

コロキウム
構造形態の解析と創生

2010

開催日：2010年10月21,22日

日本建築学会

構造委員会 シェル・空間構造運営委員会 シェル・空間構造形態創生小委員会

構造委員会 応用力学運営委員会 構造最適化の理論と応用小委員会

情報システム技術委員会 複雑系の数理学とアルゴリズム・デザイン小委員会

主 旨 説 明

本コロキウムは2006年から始まり、2010年で5回目の開催である。この間、構造形態の解析と創生に対応した構造デザインや施工例が増え始め、構造形態創生の言葉も一般に認知されてきた。それと共に、幅広い技術の可能性や応用面が注目され、多くの研究者や技術者の研究が活性化されている。本コロキウムは、構造形態創生に関する核となる情報発信を担っており、形態創生コンテストにおける斬新なアイデアが盛り込まれたデザインの発表や研究・事例の発表と活発な議論が交わされている。「コロキウム構造形態の解析と創生2010」でも、建築関連の構造最適化や構造形態創生に関する最新の研究や技術開発を手がける研究者・技術者が一堂に会し、継続的な情報交換を行い、構造形態創生に関する研究・応用の更なる発展に貢献することを目的とする。

2010年10月

シェル・空間構造形態創生小委員会主査 本間 俊雄
構造最適化の理論と応用小委員会主査 高田 豊文
複雑系の数理科学とアルゴリズム・デザイン小委員会主査 池田 靖史

構造委員会

委員長 中島 正愛（京都大学）
幹事 大森 博司（名古屋大学），倉本 洋（大阪大学），三浦 賢治（小堀鐸二研究所）

シェル・空間構造運営委員会

主査 小河 利行（東京工業大学）
幹事 竹内 徹（東京工業大学），藤本 益美（大阪市立大学）

シェル・空間構造形態創生小委員会

主査 本間 俊雄（鹿児島大学）
幹事 熊谷 知彦（東京工業大学）， 山本 憲司（鹿児島大学）
委員 大森 博司（名古屋大学）， 岡田 章（日本大学）
川口 健一（東京大学）， ガン ブンタラ（日本大学）
立道 郁生（明星大学）， 張 景耀（立命館大学）
永井 拓生（永井構造計画事務所）， 藤井 大地（近畿大学）
藤原 淳（太陽工業）， 松尾 智恵（川口衛構造設計事務所）
水谷 太郎（大成建設）， 三井 和男（日本大学）

応用力学運営委員会

主査 高田 毅士（東京大学）
幹事 伊藤 拓海（東京理科大学），竹脇 出（京都大学），山田 貴博（横浜国立大学）

構造最適化の理論と応用小委員会

主査 高田 豊文（滋賀県立大学）
幹事 小野 聡子（有明工業高等専門学校）， 平田 裕一（三井住友建設）
委員 石井 恵三（くいんと）， 大崎 純（広島大学）
大森 博司（名古屋大学）， 加藤 準治（東北大学）
澤田 樹一郎（広島大学）， 堤 和敏（芝浦工業大学）
藤井 大地（近畿大学）， 本間 俊雄（鹿児島大学）
松尾 智恵（川口衛構造設計事務所）， 三井 和男（日本大学）

情報システム技術委員会

委員長 加賀 有津子（大阪大学）
幹事 位寄 和久（熊本大学），猪里 孝司（大成建設）
仲 隆介（京都工芸繊維大学），三井 和男（日本大学）

複雑系の数理科学とアルゴリズム・デザイン小委員会

主査 池田 靖史（慶應義塾大学）
幹事 木村 謙（エーアンドエー）
委員 朝山 秀一（東京電機大学）， 大崎 純（広島大学）
佐藤 祐介（日本防災研究所）， 新宮 清志（日本大学）
瀧澤 重志（京都大学）， 陳 沛山（八戸工業大学）
濱野 慶彦（エーエーラボ）， 堀池 秀人（熊本大学）
前 稔文（大分工業高等専門学校）， 松永 直美（レモン画翠）
三井 和男（日本大学）， 渡辺 誠（渡辺誠/アーキテクト オフィス）

「コロキウム 構造形態の解析と創生 2010」実施主担当者

コロキウム実施責任者：本間 俊雄（鹿児島大学）
形態コンテスト担当：大崎 純（広島大学），立道 郁生（明星大学），永井 拓生（永井構造計画事務所）
藤原 淳（太陽工業），松尾 智恵（川口衛構造設計事務所），水谷 太郎（大成建設）
三井 和男（日本大学）

資料集担当：山本 憲司（鹿児島大学）

会計担当：ガン ブンタラ（日本大学）

特別講演担当：池田 靖史（慶應義塾大学），石井 恵三（くいんと）

懇親会担当：小野 聡子（有明工業高等専門学校），熊谷 知彦（東京工業大学），永井 拓生（永井構造計画事務所）

会場担当：朝山 秀一（東京電機大学），川口 健一（東京大学），澤田 樹一郎（広島大学）

コロキウム HP 担当：藤井 大地（近畿大学）

優秀講演選考委員会委員長：岡田 章（日本大学）

形態文献リスト担当：佐藤 祐介（日本防災研究所），張 景耀（立命館大学），藤井 大地（近畿大学）

形態 Web リスト担当：小野 聡子（有明工業高等専門学校），ガン ブンタラ（日本大学）

陳 沛山（八戸工業大学），山本 憲司（鹿児島大学）

形態建物リスト担当：朝山 秀一（東京電機大学），熊谷 知彦（東京工業大学），三井 和男（日本大学）

* 本コロキウムの実施に際しては，シェル・空間構造運営委員会より企画助成を受けました。

- 目次 -

特別講演	
『小さな群れ』	1
	小嶋一浩(東京理科大学/Cat)
『衝突安全設計のためのトポロジー最適化アルゴリズムの開発』	2
	弓削康平(成蹊大学)
一般講演	
(1) 手法による骨組構造の形状最適化	7
	佐治和哉(近畿大学), 藤井大地
(2) 空間曲線の曲率・捩率と弾性棒の歪みエネルギーに関する基礎的考察	13
	大泉修(早稲田大学), 川口健一, 新谷真人
(3) レベルセット法による形状表現に基づく有限被覆法を用いた構造形態の創生	17
	真鍋匡利(京都大学), 山田崇恭, 泉井一浩, 西脇眞二, 車谷麻緒, 寺田賢二郎
(4) 進化計算を用いた形態創生システムの計算時間短縮に関する研究 - 形態分析による事前学習システムの提案 -	23
	堤和敏, 北村悠介, ○武田侑也(芝浦工業大学)
(5) 形状・厚さ・位相の同時決定による自由曲面シェル構造の形態創生に関する研究	29
	早田寛(名古屋大学), 前根文子, 大森博司
(6) 解の多様性を考慮した GA 系解法による非対称曲面シェルの多目的最適化	35
	和田大典(鹿児島大学), 本間俊雄
(7) 反応拡散モデルを応用した構造最適化手法	41
	三井和男, 宮永圭佑(日本大学)
(8) 多面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合解析と安定性条件	45
	津浦史幸(立命館大学), 張景耀
(9) 細長比の大きな部材の個材振動制振についての基礎的研究	51
	本田誠(日本鉄塔工業), 山中宗徳, 石田伸幸, 前田潤滋
(10) 建築構造物のライフサイクルデザイン手法に関する研究 - 構成要素間における修繕周期の倍数関係の考慮 -	57
	吉田英樹(名古屋大学), 中田聡, 大森博司
(11) 形態解析に対する現代微分幾何の導入	61
	三木優彰(東京大学), 川口健一
(12) アーチの地震動最適形状	67
	山田耕司(豊田工業高等専門学校)
(13) ラチスシェルの部材長一様化のための最適化手法	71
	藤田慎之輔(金箱構造設計事務所), 大崎純
(14) 腐食による経年劣化を考慮した鉄骨造建築物のライフサイクルデザイン	77
	中田聡(名古屋大学), 吉田英樹, 大森博司
(15) 平面要素を用いた形状最適化における非線形座屈荷重の感度評価について	83
	藤井文夫(岐阜大学), 本間俊雄
(16) 骨組構造の構造性能指定設計法の開発	89
	河合良治(名古屋大学), 大森博司
(17) Self Mass Damper を用いた既存学校建築リノベーションに関する研究	95
	芋野匡俊(早稲田大学), 新谷真人, 永井拓生
(18) 細胞の増殖および消滅を応用したトラス構造物の形態創生に関する研究	101
	小野聡子(有明工業高等専門学校), シタムマラッド・ワンナボン
(19) 形状・厚さ・位相の同時最適化による自由曲面シェル構造の形態創生に関する研究 - Tachira Club 計画案への適用 -	105
	前根文子(名古屋大学), 木村俊明, 大森博司
(20) 大域的・局所的最適化手法の連携によるアルミニウム押出型材の最適断面算出システム開発	111

	川崎将臣(名古屋大学), 大森博司	
(21) シフトフレーム構造の形態創生とその実例-----		115
	後藤一真(Ove Arup & Partners Japan Limited), 城所竜太	
(22) 解の多様性を考慮した GA 系解法によるラチスシェル構造の形態創生 -----		121
	沖田裕介(鹿児島大学), 和田大典, 本間俊雄	
(23) 部材転用・再利用効率を目的とした住宅設計支援システムに関する研究-----		127
	林将利(早稲田大学), 堀駿, 新谷真人	
(24) 海洋波の生成アルゴリズムに基づく空間構造 - 形態の生成理論と適用例の考察 - -----		133
	朝山秀一(東京電機大学)	
(25) 格子状平板の初期曲げによるグリッドシェルの形成に関する基礎的研究-----		139
	山本憲司(鹿児島大学), 中村達哉, 本間俊雄	
(26) Truss Optimization Using Genetic Algorithm Considering Ultimate Resistance-----		145
	王華国(名古屋大学), 大森博司	
(27) 1.5 層スペースフレームに関する基礎研究-----		151
	川村誠(八戸工業大学), 陳沛山	
(28) 多目的最適化法による鋼構造物の構造創生支援に関する研究 - 基礎梁の最適設計への拡張 - ---		155
	小玉真一(名古屋大学), 大森博司	
(29) CA-ESO 法を用いた構造形態創生法の解の精度-----		161
	間野明人(近畿大学), 藤井大地, 真鍋匡利	

形態創生コンテスト

コンテスト概要-----		167
講評-----		168
入選作品		
(1) Adaptable Wave-----		172
	○蔵野昌浩(大林組), 小縣恭子, 勝部千絵, 北村有希子, 齋藤元嗣	
(2) ヒダ ヒダ-----		174
	和田大典(鹿児島大学)	
(3) Lingering Nature-----		176
	杉田宗	
(4) そらにえんとつをならべてみた-----		178
	井戸川達哉(梓設計), 増田彩乃, 佐川真美, 大澤元嗣, 石井衣利子, 墓田京平, 松竹祐介	
(5) digital woods-----		180
	谷垣内晶彦(慶應義塾大学), 青山みのり, キムジョンソブ, 阿部祐一	
佳作		
(1) 原始的な道具による曲面の発見-----		182
	三木優彰(東京大学)	
(2) こもれびのさんかく-----		183
	首藤徹郎(山口大学), 寺本晃浩	
(3) steel's running-----		184
	堀駿(早稲田大学), 林将利	
形態創生コンテスト 2006-2010「これまでの形態創生コンテストの歩み」-----		185
	立道郁生(明星大学)	

文献・Web 情報・建物リスト

建築構造形態創生関係 文献リスト-----		191
建築構造形態創生関係 WEB 情報リスト-----		195
構造形態の解析と創生による建築物の情報と写真掲載-----		205

* 形態創生に関連する情報は順次、次の HP に掲載していきます。
<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s17/>

特別講演

特別講演講師 小嶋 一浩（こじまかずひろ）



特別講演題目

「小さな の群れ」

CAtパートナー・東京理科大学教授・京都工芸繊維大学客員教授

1958年 大阪府生まれ

1982年 京都大学工学部建築学科卒業

1984年 東京大学大学院修士課程修了

1986年 東京大学大学院博士課程在学中シーラカンスを共同設立

1988～91年 東京大学助手

1994～03年 東京理科大学建築学科助教授

1997年 「千葉市立打瀬小学校」で日本建築学会賞受賞

1998年 C+A（シーラカンス アンド アソシエイツ）に改組

1998年 「吉備高原小学校」で日本インテリアデザイナー協会賞大賞

2001年 「スペースブロック上新庄」で ar + d賞受賞

2002年 「スペースブロック上新庄」で ARCASIAアワード金賞

2003年 「宮城県迫桜高等学校」で日本建築学会作品選奨

2005年 C+Aを CAt（C+A tokyo）と CAn（C+A nagoya）に再編

2009年 「千葉市立美浜打瀬小学校」で日本建築学会作品選奨、「ホーチミンシティ
建築大学」でGlobal Holcim Awards Silver 2009 受賞

特別講演講師 弓削 康平（ゆげこうへい）

特別講演題目

「衝突安全設計のための
トポロジー最適化アルゴリズムの開発」



所属 成蹊大学工学部エレクトロメカニクス学科

〒1808633東京都武蔵野市吉祥寺北町3

Tel: 0422(37)3722

E-mail: yuge@st.seikei.ac.jp

略歴

1986 東京大学大学院工学系研究科船舶工学専攻 博士課程修了
工学博士

1986 東京大学生産技術研究所 助手

1990 同 講師

1991 成蹊大学 助教授

2000 同 教授 現在に至る

最近の研究テーマ

衝突安全のための最適設計

人体力学モデルの作成と解析

材料、構造物のマルチスケール解析

機械システムの動的有限要素解析

衝突安全設計のためのトポロジー最適化アルゴリズムの開発

弓削康平¹⁾

1)成蹊大学理工学部エレクトロメカニクス学科, 教授, 工学博士, yuge@st.seikei.ac.jp

1 はじめに

日本においては交通事故の件数が増加傾向にあるものの死者数は減少しつつある。この一因として自動車の乗員および歩行者の保護に関する諸規則の整備とアセスメントテストの実施が挙げられる。アセスメントテストでは自動車事故時の乗員および歩行者の保護に関する様々なテストが実施され、その結果が公表される。自動車メーカーのエンジニアは、設計経験を活かしつつ高い衝突安全性能を様々な制約のなかで実現している。ここでは、このような設計の一助となるようなトポロジー最適化アルゴリズムの開発に関する著者らの試みを紹介する。

2 骨組み構造に対する最適化¹⁾

2.1 骨組み構造最適化アルゴリズムの概要

自動車の衝突時のエネルギー吸収部材として大切な役割を果たしているのがフレームである。ここではグラウンドストラクチャ法による衝撃荷重を受ける三次元骨組み構造の最適設計アルゴリズムを紹介する。衝突解析には、一次の変位関数を用いるチモシェンコはり要素を用い、塑性変形に関しては断面力 $\{R\}$ に対する近似的な塑性流れ則^{2), 3)}を適用し計算時間の短縮を図った。また、最適化ではグラウンドストラクチャを構成する各部材が外径内径比一定の中空パイプであると仮定して設計変数にはパイプ外径 D を許容最大外径で無次元化したものを用いた。

最適化の目的関数には、外力のなす仕事またはその関数を用いた。本研究では衝突のエネルギーは部材の塑性変形による内力の仕事とほぼ等しく慣性力の影響は無視できる、すなわち

$$C \equiv \int_0^u \mathbf{f} \cdot d\mathbf{u} \approx \sum_i^N \int_0^\epsilon \mathbf{R} \cdot d\boldsymbol{\epsilon} dx \quad (1)$$

と仮定した。上式で \mathbf{f} は外力、 N は部材数であり、 \mathbf{R} は断面力、 $\boldsymbol{\epsilon}$ はそれと相対関係にあるひずみである。なお、外力のなす仕事 C の設計変数 β の感度は

$$\frac{\partial C}{\partial \beta_i} = - \int_0^\epsilon \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \beta_i} \cdot d\boldsymbol{\epsilon} dx = - \frac{\partial W_i}{\partial \beta_i} \quad (2)$$

と内力のなす仕事の感度で表すことができる⁴⁾。ここに

w_i は部材 i の内力のなす仕事である。上式を、節点変位の時刻歴を利用した差分近似によって計算した。また、この感度より CONLIN 法^{5), 6)7)}を用いて設計変数を更新した。

2.2 エネルギー吸収能の最大化

目的関数を外力のなす仕事 C としてエネルギー吸収能の最大化を実施した。図1に解析モデルを示す。垂直壁上の節点は完全拘束とし、水平面上の節点は水平方向のみ移動できるものとした。また各部材は二要素に分割し、同一部材の要素直径は等しいものとした。

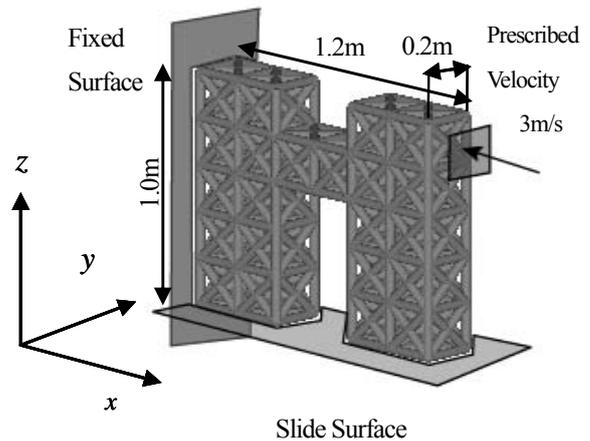


Fig. 1 Analysis Model

Fig. 2 に最適化初期状態と最適化後の計算終了時の変形状態を比較して示す。初期状態では圧縮力を受けて座屈していた部材が最適化後には太くなっていることが分かる。

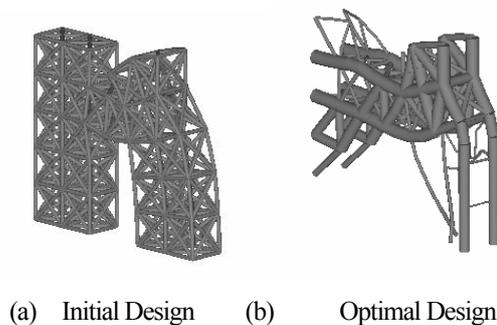


Fig. 2 Comparison of Deformed Configuration

2.3 エネルギー吸収量の指定

衝突最適設計では、しばしば指定されたエネルギー吸収能を有する構造物の設計が要求される。そこで Fig.1 に示したモデルに対して目的関数として、次式を用いた解析を実施した。

$$g = (C - \bar{C})^2 \quad (3)$$

\bar{C} は指定値である。 \bar{C} として case1([1.0MJ]), case2(1.3[MJ]), case3(1.5[MJ])の3 ケースを設定して解析を実施した。また、比較のためにエネルギー吸収能を最大化した結果を case4 とした。Fig.3 に最適形状での解析終了時の側面から見た変形状態を示す。図より \bar{C} が小さくなるにつれ軸力を受ける主部材の太さが細くなっていくことがわかる。また、Fig.4 には目標値で割り無次元化した外力のなす仕事の履歴を示す。どのケースもほぼ良好に目標値に収束していく様子がわかる。

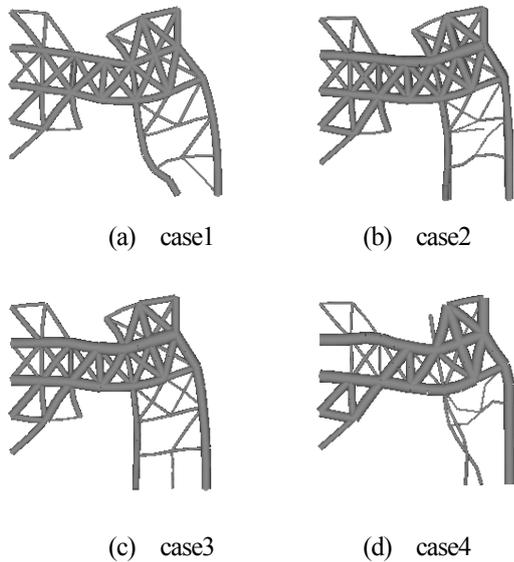


Fig.3 Deformed Shapes of Optimal Designs

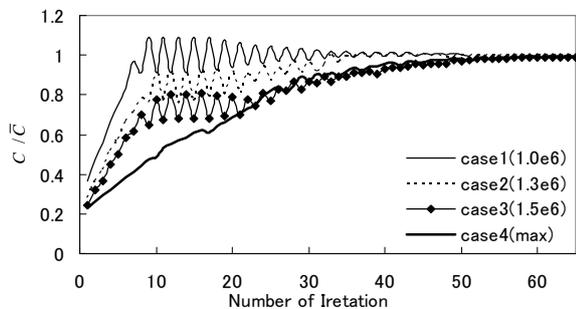


Fig.4 History of External Works

3. 薄肉構造に対する最適化^{8), 9), 10), 11)}

骨組み構造でアルゴリズムの基本的な妥当性の検証が出来たので、最適化対象を薄肉構造とするアルゴリズムを検討した。

3.1 薄肉構造最適化アルゴリズムの概要

衝突解析には、自動車の衝突安全設計への応用を念頭に自動車衝突解析で広く用いられている Belytschko と Tsay¹²⁾により提案されたシェル要素に陽的時間積分法(中心差分法)を適用し、トポロジー最適化には密度法¹³⁾を用いた。密度法は密度のべき乗に比例する材料定数を仮定し、各要素の密度を設計変数として最適形状を求める手法である。

3.2 エネルギー吸収量の指定

Fig. 5 に示すような両端が完全固定され中央部に強制速度を受ける角型鋼管が指定されたエネルギー量を吸収し、重量が最小となるよう最適設計を実施した。

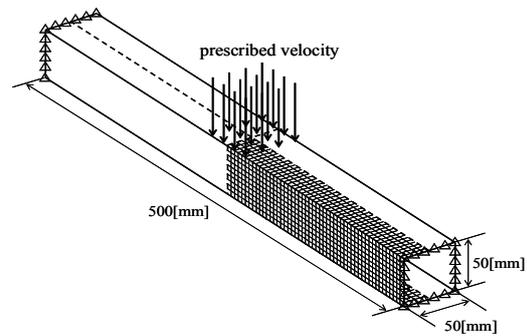


Fig. 5 Analysis Model

最適化問題は次のように記述される。

$$\text{Minimize } V = \sum_{i=1}^{\text{Node}} V_i \rho_i \quad (4)$$

$$\text{subject to } (C - \bar{C})^2 < \varepsilon \quad (5)$$

ここに、Node は最適化対象の全節点数、V は構造物の総質量、 V_i は節点毎の質量、 ρ_i は節点 i の密度、C はエネルギー吸収量、 \bar{C} は指定されたエネルギー吸収量、 ε は十分に小さな正の数である。

Fig. 5 のモデルを用い、エネルギー吸収量を指定する最適化を3 ケース実施した。Fig. 6 に解析で得られた最適形状を、また Fig. 7 に外力のなす仕事の履歴を示す。縦軸に関しては3つのケースそれぞれの指定値で無次元化してある。これらの図より、いずれの解析ケースにおいても指定したエネルギー吸収量を有する最適デザイン

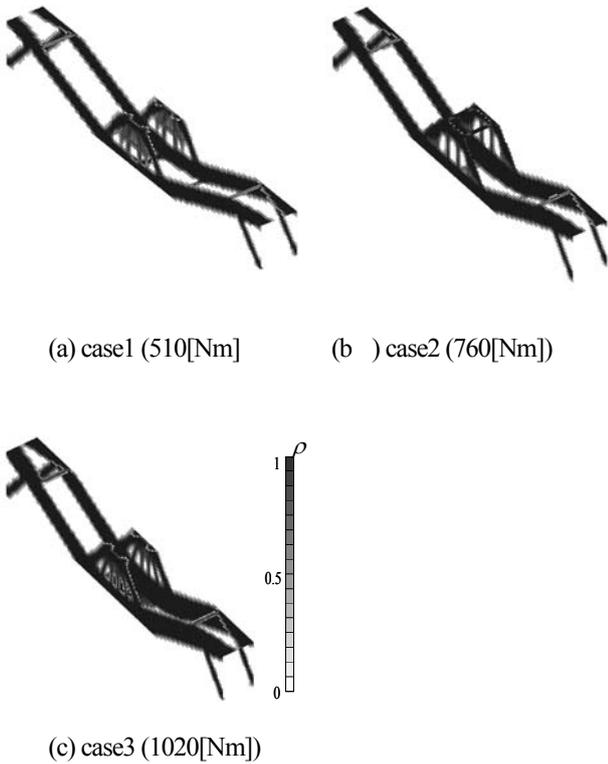


Fig.6 Comparison of Optimal Designs

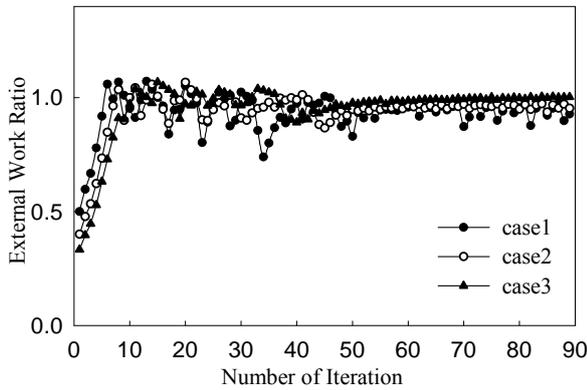


Fig.7 History of External Work

が得られていることが分かる。

3.3 荷重・変位曲線の指定

自動車の安全設計では荷重変位曲線を与えて衝突時の変形を制御することがある。そこで荷重変位曲線を複数の区間に分割し、各区間に対してエネルギー吸収量の指定値を設定する制約条件を以下のように定義する。

$$\sum_{i=1}^n \left\{ (\bar{c}_i - c_i)^2 / \bar{c}_i^2 \right\} < \varepsilon \quad (6)$$

ここに、 c_i は区間 i でのエネルギー吸収量、 \bar{c}_i は区間 i でのエネルギー吸収量の指定値、 n は区間数を表す。なお、上式では区間幅によらないよう \bar{c}_i で無次元化されている。

る。

前節と同じ問題に対して、変位 50[mm]を4つの区間に等分割し、すべての区間でエネルギー吸収量の指定値を150[Nm]とした。Fig.8に得られた最適デザインを、また、Fig.9にその解析終了時変形図を示す。さらにFig.10には荷重変位曲線を示す。初期状態のデザインでは荷重変位曲線が次第に上昇していく。これは両端が固定されていることによる大たわみの影響である。一方、最適デザインではほぼ目標とする平坦な荷重変位曲線となっている。これは変形図に見られるように、鋼管中央部の部材が座屈するためである。

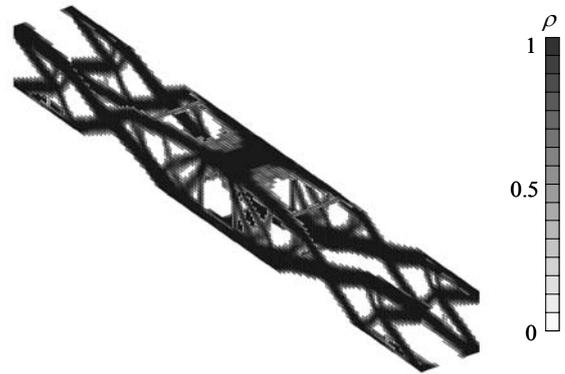


Fig.8 Optimal Design

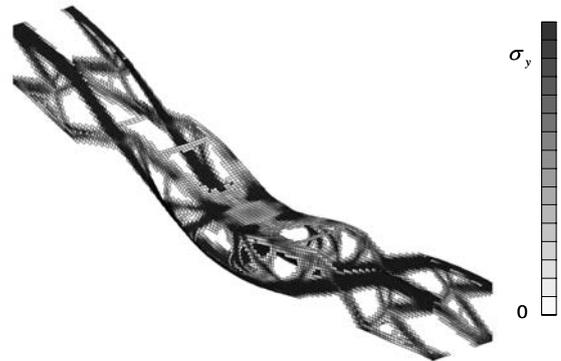


Fig.9 Deformed Configuration of Optimal Design

4. おわりに

自動車の衝突安全設計のために著者らが取り組んできたトポロジー最適化アルゴリズムを紹介した。実際の衝突部材には、ここで示した例に比べ、遙かに多くの拘束条件や荷重条件を満たすことが要求される。今後はより実際的な問題に適用し、アルゴリズムを拡張していくことが必要である。また、自動車会社は衝突解析に汎用的解析プログラムを使用するので、実用性の見地から

は、これらのプログラムを利用するようなシステムの構築も今後の課題である。

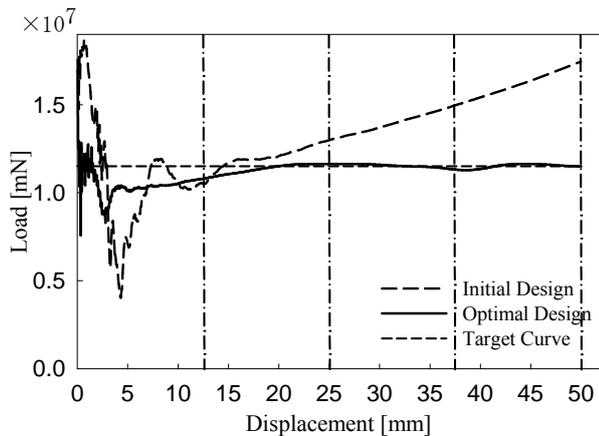


Fig.10 Load Displacement Curves

参考文献

- 1) 弓削康平, 永井榮啓, 原山勝臣: 衝撃荷重を受ける骨組み構造のトポロジー最適設計, 自動車技術会論文集, Vol.37, No1, pp125-130, 2006
- 2) 都井裕, 梁供鐘: 骨組構造の崩壊シミュレーション(その1), 日本造船学会論文集, 第166号, pp. 285-294, 1989
- 3) 都井裕, 梁供鐘, 小畑和彦: 骨組構造の崩壊シミュレーション(その2), 日本造船学会論文集, 第167号, pp. 169-177, 1990
- 4) K. Yuge and N. Kikuchi: Optimization of a Frame Structure Subjected to a Plastic Deformation, Structural Optimization, Vol.10, 3/4, pp.197-208, 1995
- 5) C. Fleury and V. Braibant: Structural Optimization: A new dual method using mixed variables, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.23, pp. 409-428, 1986
- 6) C. Fleury: CONLIN: an efficient dual optimizer based on convex approximation concepts, Structural Optimization, Vol.1, pp. 77-88, 1997
- 7) 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪秀臣: 最適手法 CONLIN を用いた骨組み構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第548号, pp. 59-66, 2001
- 8) 津金澤洋平, 小林薫, 弓削康平: 薄肉鋼構造の衝突最適設計 —エネルギー吸収能の最大化—, 計算工学論文集, Vol. 2007, 20070010, 2007
- 9) 津金澤洋平, 小林薫, 弓削康平, 薄肉構造の衝突最適設計(続報), 計算工学会講演会講演論文集 Vol.12, No.1, pp185-188, 2007
- 10) 中里光太, 弓削康平, 岩井信弘, 自動車歩行者保護構造のトポロジー最適設計, 第14回計算工学講演会論文集, No.1, pp. 353-356, 2009
- 11) 境野勇作, 弓削康平, 梅津康義, 汎用動的解析プログラムを用いた衝突部材のトポロジー最適設計, 第15回計算工学講演会論文集, No.1, pp. 313-316, 2010
- 12) T. Belytschko, J. I. Lin and C. S. Tsay: Explicit Algorithms for the Nonlinear Dynamics of Shells, Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., Vol.42, pp. 225, 1984
- 13) R. J. Yang, C. H. Chuang: Optimal Topology Design Using Linear Programming, Computers & Structures, Vol. 52, No. 2, pp. 265-275, 1994

一般講演

力法による骨組構造の形状最適化

佐治和哉¹⁾, 藤井大地²⁾

1)近畿大学大学院システム工学研究科大学院生, hd093007@hiro.kindai.ac.jp

2)近畿大学工学部, 教授, 博士(工学)

1 はじめに

近年, 構造解析および施工技術の発達により, 幾何学的な形態にとらわれないより不定形で自由な形態の建築物が建築されるようになってきている. また, シェル構造等では, 意匠設計者の求める恣意的な形態に対して, 形状最適化手法を適用して形状修正を行う方法¹⁾⁵⁾が発展してきている.

形状最適化技術は, これまで有限要素法を用いた様々な形状最適化手法が提案されてきた⁷⁾. 有限要素法による形状最適化手法として最も原始的な方法は, 境界節点座標を設計変数とする最適化問題を数値計画法によって解く方法⁸⁾であるが, この方法では, 形状を記述する自由度(設計変数)を有限要素モデルの自由度よりも少なく制限しないと境界形状が波打つなどの問題が生じる⁹⁾. このため, 境界形状の自由度を制限する方法として, 形状を B-スプライン曲線やベジエ曲線と与える方法^{10),11)}や, 形状を基本変形モードの線形形で表し, その係数を設計変数に選ぶ方法¹²⁾⁻¹⁴⁾(ベースベクトル法)などが提案されている. しかしながら, 形状の自由度を制限する方法では, 形状のコントロールポイントや基本変形モードをユーザーが設定する必要があり, 一般ユーザーにとって形状最適化を難しいものとしている. これに対して, 畔上, 下田ら¹⁵⁾⁻¹⁷⁾は, 形状の自由度を制限せずに形状最適化を行う方法を提案した. この方法は, 目的関数の節点座標に関する感度係数に負号を付けた値を節点荷重として加え, その時の変形にしたがって形状を変更していく方法で, 力法(Traction method)と呼ばれている. この方法では, 境界形状の波打ち現象が生じないことが証明されており, 弾性変形にしたがって形状を変更していくため, メッシュのゆがみが生じにくいというメリットがある.

最近, 建築分野では, シェル構造のみならず, 建築構造の骨格をなす骨組構造に対してもより自由な形態を模索する傾向があり, 骨組構造の形態にも構造的合理性を付与できる手法が望まれている. そこで, 本研究では, 畔上らによって提案された力法を, 建築骨組の形状最適化問題に適用する方法を示す. ただし, 畔上らの方法では, 目的関数の感度解析に随伴変数法が用いられているが, 本研究では, 目的関数をコンプライアンスとし, 位

相最適化手法等で一般的に用いられている感度解析法を採用する. 本方法は, 佐々木⁶⁾が, ひずみエネルギーの感度解析として用いている方法と同様であるが, 本論文では, 感度係数の導出法, 計算法について詳細に示す. また, 力法による形状最適化手法と逐次線形計画法による同様の手法との比較により, その有効性を検討する.

2 最適化問題の定式化と感度解析法

2.1 最適化問題の定式化

本論文では, 2次元骨組の形状最適化問題として, 以下のような問題を考える. ただし, 2次元骨組はベルヌーイ・オイラーの仮定にもとづくはり要素によって離散化するものとする¹⁸⁾.

<p>目的関数</p> $C(\mathbf{q}) = \mathbf{f}^T \mathbf{d} = \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d}$ <p>を最小にする節点座標</p> $\mathbf{q} = \{x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n\}$ <p>を求める.</p> <p>ただし, 要素総長さの制約条件</p> $L = \sum_{i=1}^m l_i \leq L^U$ <p>を満足するものとする.</p>	(1)
--	-----

ここに, C はコンプライアンス, \mathbf{f} は節点外力ベクトル, \mathbf{d} は節点変位ベクトル, \mathbf{K} は全体剛性マトリクス, x_i, y_i は i 番目節点の座標値, L は要素の総長さ, l_i は i 番目要素の長さ, L^U は要素総長さの制約値, n は座標変更を行う節点数, m は要素数である.

(1)式を逐次線形計画法(SLP法)で解く場合は, (1)式をテーラー展開し, 節点座標の増分値を設計変数とする次式の問題に変換する.

<p>目的関数</p> $\sum_{j=1}^{2n} \frac{\partial C^{(k)}}{\partial q_j} \Delta q_j$ <p>を最小にする節点座標の増分</p> $\Delta \mathbf{q} = \{\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \dots, \Delta x_n, \Delta y_n\}$ <p>を求める.</p> <p>ただし, 要素総長さの制約条件</p> $\sum_{j=1}^{2n} \frac{\partial L^{(k)}}{\partial q_j} \Delta q_j \leq L^U - L^{(k)}$ <p>を満足するものとする.</p>	(2)
--	-----

$$\begin{aligned} \frac{\partial l_i}{\partial x_s} &= -\frac{x_r - x_s}{l_i} = -\cos \alpha_i \\ \frac{\partial l_i}{\partial y_s} &= -\frac{y_r - y_s}{l_i} = -\sin \alpha_i \\ \frac{\partial}{\partial x_s} \left(\frac{1}{l_i} \right) &= -\frac{1}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s} \left(\frac{1}{l_i} \right) = -\frac{1}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x_s} \left(\frac{1}{l_i^2} \right) &= -\frac{2}{l_i^3} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s} \left(\frac{1}{l_i^2} \right) = -\frac{2}{l_i^3} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) \\ \frac{\partial}{\partial x_s} \left(\frac{1}{l_i^3} \right) &= -\frac{3}{l_i^4} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s} \left(\frac{1}{l_i^3} \right) = -\frac{3}{l_i^4} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) \\ \frac{\partial \cos \alpha_i}{\partial x_s} &= -\frac{x_r - x_s}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right) - \frac{1}{l_i}, \quad \frac{\partial \cos \alpha_i}{\partial y_s} = -\frac{x_r - x_s}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) \\ \frac{\partial \sin \alpha_i}{\partial x_s} &= -\frac{y_r - y_s}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right), \quad \frac{\partial \sin \alpha_i}{\partial y_s} = -\frac{y_r - y_s}{l_i^2} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) - \frac{1}{l_i} \end{aligned} \quad (12)$$

以上の式から(9)式が計算され、これにより(8)式を計算することができる。

一方、要素総長さ L の感度係数は、次式から計算できる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_s} &= \sum_{i=s_1}^{s_4} \left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s} \right) = -\sum_{r=1}^4 \left(\frac{x_r - x_s}{l_i} \right) \\ \frac{\partial L}{\partial y_s} &= \sum_{i=s_1}^{s_4} \left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s} \right) = -\sum_{r=1}^4 \left(\frac{y_r - y_s}{l_i} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

以上により、(2)式の感度係数を効率よく計算できる。なお、(8)式の計算が正しいことは、文献 21)で検証している。

3 法による形状最適化

次に、法による形状最適化の方法を示す。

逐次線形計画法では、(2)式をシンプレックス法などの線形計画法 (LP 法) で解き、節点座標の最適増分 $\Delta \mathbf{q}$ を求めるが、法では、まず、目的関数の各節点の x, y 座標に関する感度係数を求め、この感度係数に負号を付けたものを各節点の x, y 方向荷重として加える。そして、線形解析によって各節点の変位を求め、この変位に適当な倍率を掛けたものを節点座標の増分 $\Delta \mathbf{q}$ とする。なお、変位に掛ける倍率は、逐次線形計画法における設計変数増分のムーブリミットと同様の意味を持つ。以上の計算を繰り返し、節点座標の増分がほぼ 0 になる最適解を求める。なお、法においても、逐次線形計画法と同様にムーブリミットの絞り込みにより解を収束させる。

図 2 は、法による解析のフローを示したものである。準備計算としては、各節点に接続する要素数 (図 1 の s 番目節点の場合は 4)、要素番号 (図 1 の $s_1 \sim s_4$)、各要素の片端の節点番号 (図 1 の $t_1 \sim t_4$) を調べておくこと計算効率がよい。

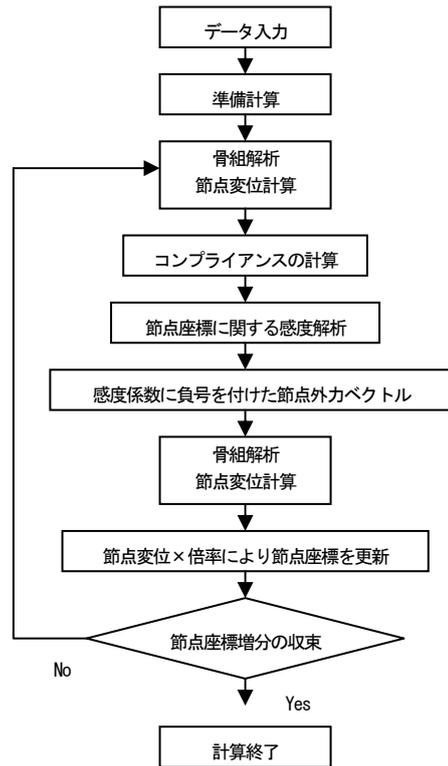


図 2 法の解析フロー

4 解析例

4.1 三角形トラス

図 3 は、単純支持された三角形トラスの剛性を最大化 (コンプライアンスを最小化) する高さ h (節点 C の y 座標) を求める問題を示す。本問題は静定問題であるため、仮想仕事法によりコンプライアンスおよびその感度係数を陽な式で求めることができる。

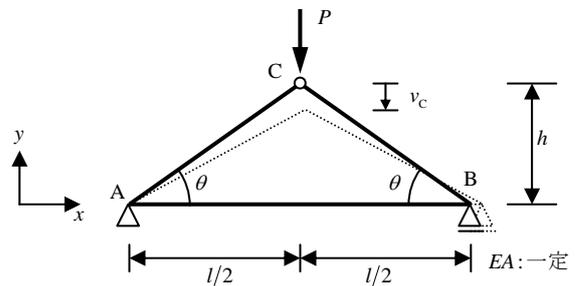


図 3 静定三角形トラスの例題

まず、コンプライアンス C は図 3 に示す表記を用いると次式のようになる。

$$C = -P \cdot v_c = \frac{P^2}{EAh^2} \left(\frac{(h^2 + (l/2)^2)^{3/2}}{2} + \frac{l^3}{16} \right) \quad (14)$$

また、高さ h に関する感度係数は次式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial h} = -\frac{P^2}{EA} \left(\frac{(h^2 + (l/2)^2)^{3/2}}{h^3} - \frac{3(h^2 + (l/2)^2)^{1/2}}{2h} + \frac{l^3}{8h^3} \right) \quad (15)$$

Mathematica を用いて、 $\partial C/\partial h = 0$ の解を求めると、 $h = \pm(\sqrt{3}/2)l$ が得られる。すなわち、正解は正三角形となる。

以上の問題を SLP 法と力法で解き、解の収束性を比較する。

解析条件として、材料の断面積 $A = 100\text{mm}^2$ 、ヤング係数 $E = 205000\text{N/mm}^2$ 、また、C 点に 1N の集中荷重を加える。

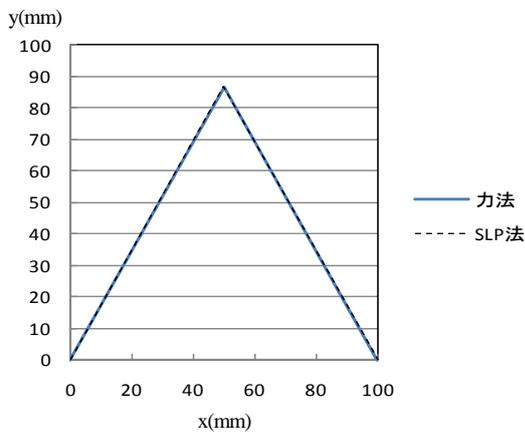


図4 力法と SLP 法の最適形状

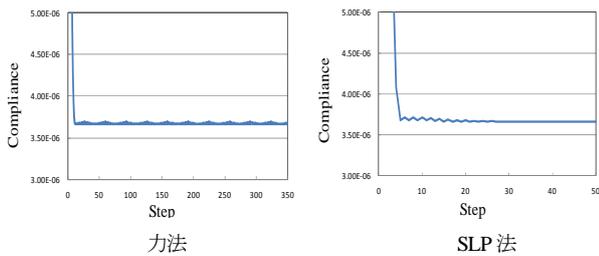


図5 コンプライアンスの比較

図4より、力法と SLP 法の解はほぼ一致し、上記の仮想仕事法で求めたものと同じ正三角形が最適な形状であるといえる。

図5は、力法と SLP 法のコンプライアンスを比較したもので、どちらの手法もほぼ同じ値に向かって収束しているのが分かる。

以上より、力法と SLP 法は、このような例題では、ほぼ同じ解が得られることがわかる。

4.2 アーチトラス構造

次に、図6のようなアーチトラス構造を SLP 法と力法で解析し、有効性を検討する。

解析条件として、材料は丸鋼(断面積 $A = 12.26\text{mm}^2$ 、ヤング係数 $E = 205000\text{N/mm}^2$) とし、下図のように節点に 10N の集中荷重を加える。

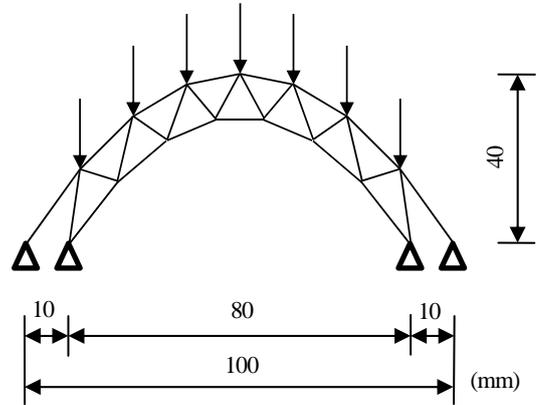


図6 初期形状

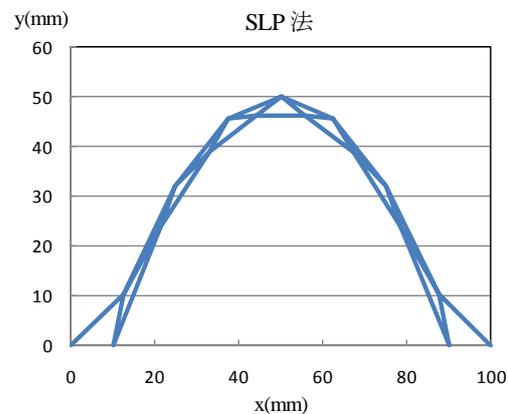
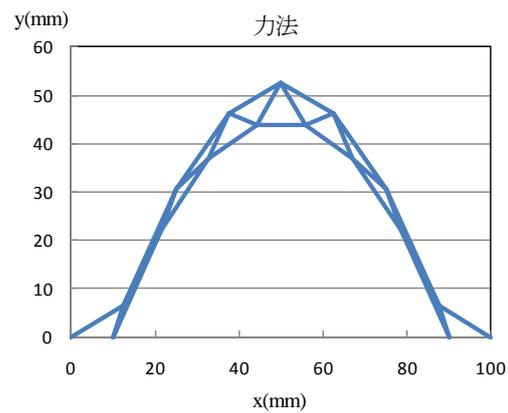


図7 力法と SLP 法の最適形状

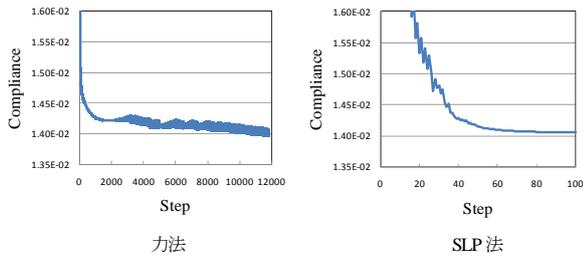


図8 コンプライアンスの比較

図7より、力法と SLP 法では、ともにアーチになるように形状が決定し、似たような形状が出てくるという結果となった。また、図8より、どちらの手法も、コンプライアンスは同じ値に向かって収束しているのがわかる。これにより、本手法である力法は、基本的な例題では、ほぼ SLP 法の解と同様の形状が得られることがわかった。

4.3 骨組構造

次に、図9に示すような1層、3層、5層の筋かい付き剛接骨組構造の解析を行う。

解析条件として、材料の断面2次モーメント $I = 833\text{mm}^4$ 、断面積 $A = 100\text{mm}^2$ 、ヤング係数 $E = 205000\text{N/mm}^2$ 、また、下図のように上層部の節点に10Nの荷重を加える。

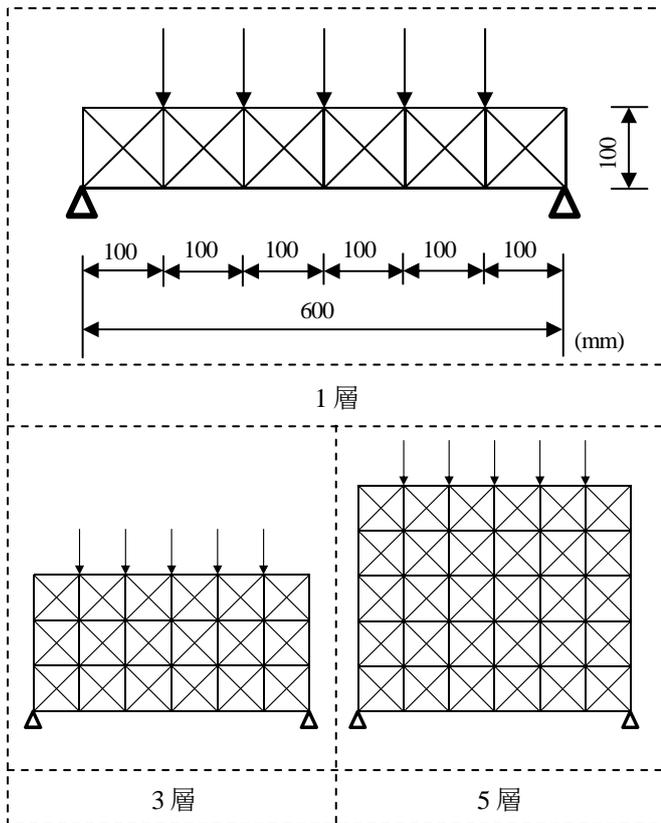


図9 初期形状

図10を見て分かるように、3層での力法と SLP 法の最適形状は、似たような形状が得られているのに対して、1、5層では、力法は構造的にも使うことができる形状が得られたが、SLP 法では、全く違う複雑な形状が得られた。また、SLP 法では、1、3、5層の最適形状に統一感がないという結果となった。

図10の力法と SLP 法のコンプライアンス値を比べると、1、3層では、同じような値が得られたが、5層では、全く一致せず、力法は SLP 法より小さな値にすることができた。

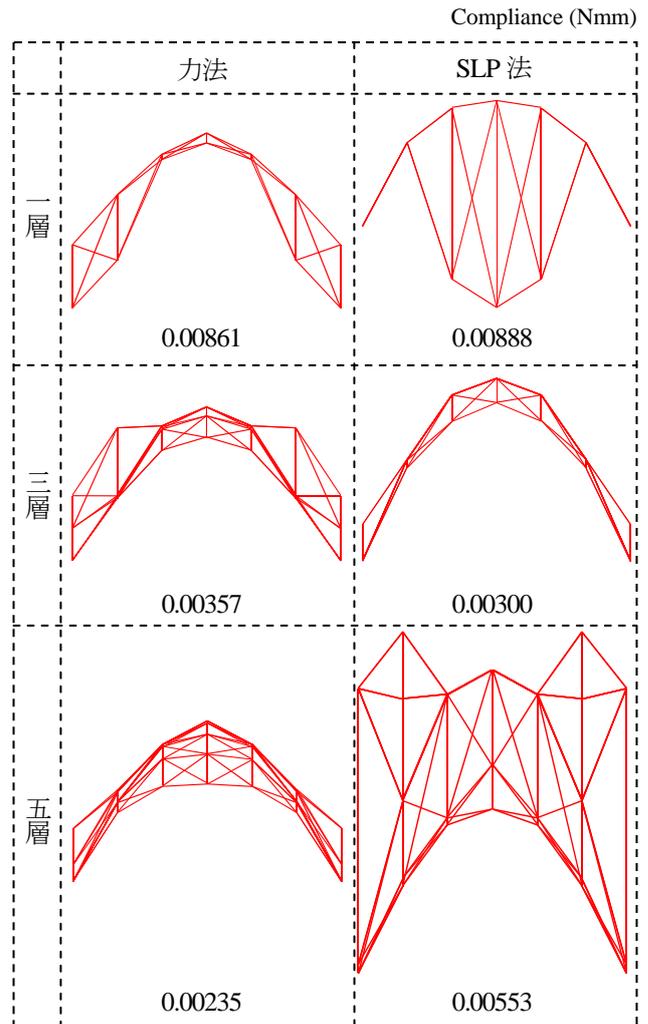


図10 最適形状とコンプライアンス値

5 まとめ

本研究では、力法で用いる感度係数の導出法、計算法について詳細に示した。また、本手法である力法による形状最適化手法と SLP 法による同様の手法で、トラス構造や剛接骨組構造の解析を行った。その結果、簡単な構造では、力法と SLP 法は同様の結果を得ることがで

きたが、複雑な構造となると、SLP法では、最適形状が複雑となり、それに比べ、法は、建築分野としても使うことができる形状が得られた。

参考文献

- 1) 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案—その1 多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法, 日本建築学会構造系論文集, 第 609 号, pp.105-111, 2006.11
- 2) 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案—その2 最適性条件による理論的解法, 日本建築学会構造系論文集, 第 618 号, pp.143-150, 2007.8
- 3) 藤田慎之輔, 大崎 純: ひずみエネルギーとパラメトリック曲面の代数不変量を考慮したシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 639 号, pp.857-863, 2009.5
- 4) 木村俊明, 大森博司: 形状と厚さの同時最適化法の定式化とその応用—自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案(その1), 日本建築学会構造系論文集, 第 640 号, pp.1091-1098, 2009.6
- 5) 木村俊明, 大森博司: 形状と厚さの同時最適化法の構造位相決定問題への応用—自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案(その2), 日本建築学会構造系論文集, 第 648 号, pp.367-376, 2010.2
- 6) 佐々木睦朗: FLUX STRUCTURE; フラックスストラクチャー, TOTO 出版, 2005.6
- 7) 畔上秀幸: 形状最適化問題の解法, 計算工学, Vol.2, No.4, pp.27-35, 1997
- 8) Zienkiewicz, O.C. and Campbell, J.S. : Shape optimization and sequential linear programming, *Optimum Structural Design Theory and Applications*, edited by Gallager, R.H. and Zienkiewicz, O.C., John Wiley & Sons, London, pp.109-126, 1973
- 9) Iman, M.H. : Three-dimensional Shape Optimization, *Int. J. Num. Meth. Engrg.*, Vol.18, pp.661-673, 1982
- 10) Braibant, V. and Fleury, C. : Shape optimal design using B-splines, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.44, pp.247-267, 1984
- 11) Braibant, V. and Fleury, C. : An approximation concepts approach to shape optimal design, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.53, pp.119-148, 1985
- 12) Belegundu, A.D. and Rajan, S.D. : A shape optimization approach based on natural design variables and shape functions, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 66, pp.87-106, 1988
- 13) Raasch, I., Chargin, M.S. and Bruns, R. : Optimierung von pkwbauteilen in bezug auf form und dimensionierung, *VDI Berichte*, Nr. 699, pp.713-748, 1988
- 14) Vanderplaats, G.N. and Miura, H. : GENESYS-structural synthesis software using advanced approximation techniques, *AIAA Report*, 92-4839-CP, pp.180-190, 1992
- 15) 畔上秀幸: 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集, A 編, 60 巻, pp.1479-1486, 1994.6
- 16) 下田昌利, 吳志強, 畔上秀幸, 桜井俊明: 汎用 FEM コードを利用した領域最適化問題の数値解析法(力法によるアプローチ), 日本機械学会論文集, A 編, 60 巻, pp.2418-2425, 1994.10
- 17) 畔上秀幸: 線形弾性問題における領域最適化解析(力法によるアプローチ), 日本機械学会, A 編, 60 巻, pp.2312-2318, 1994
- 18) 例えば, 藤井大地: Excel で解く構造力学, 丸善, 2003.8
- 19) 例えば, 藤井大地: 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008.10
- 20) Fish, J. and Belytschko, T; 山田貴博監訳: 有限要素法, 丸善, 2008.12
- 21) 佐治和哉, 藤井大地: 骨組構造の形状最適化における感度解析, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.33, 203, 2010.3

空間曲線の曲率・振率と 弾性棒の歪みエネルギーに関する基礎的考察

○大泉 修¹⁾ 川口 健一²⁾ 新谷 真人³⁾

1) 早稲田大学 創造理工学研究科建築学専攻、大学院生、s.ohizumi@suou.waseda.jp

2) 東京大学 生産技術研究所、教授

3) 早稲田大学 理工学術院（建築学）、特任教授

1. はじめに

著者らは、既報¹⁾において釣り糸に用いられるテグスを境界のリングとして用いた石鹼膜実験を行い、テグスの太さや径（剛性）の違いにより、様々な釣り合い形状が得られることを示し、いくつかの形状を実測してエネルギー的な観点から形状の特徴を把握することを試みている。以下に、リング周長 250mm、テグスの太さを変更した際の形状を示す（図 1a-c）。

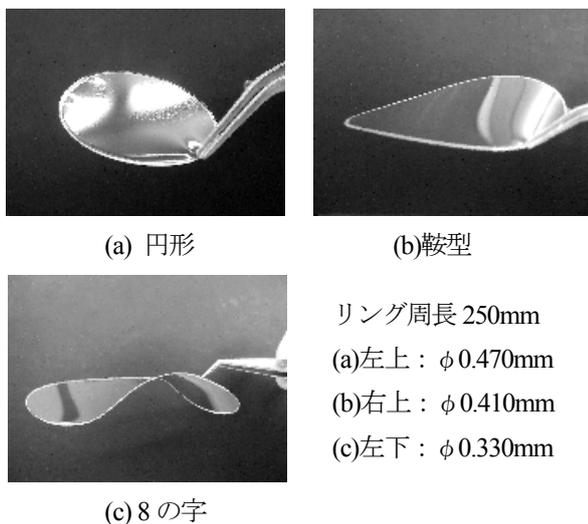


図 1 石鹼膜実験による様々な釣り合い形状

このような弾性棒と等張力曲面の形状決定問題は、膜の表面積に加え、弾性棒の歪みエネルギーと重力のポテンシャルエネルギーを同時に停留させる問題であろうと予測される。しかし、テグスの剛性と石鹼膜形状との関係を調査するにあたっては、境界リングの形状を表現する空間的な記述方法として適切な方法が見つかっておらず、有限要素法などによる数値的な方法に頼らざるを得ないのが現状である。

そこで、本報では、境界リングの空間曲線を記述するにあたり、曲線上の位置ベクトルを用いる方法ではなく、曲線の曲率・振率により簡便に曲線の形状を記述するこ

とができないかどうか、考察を行なった。空間曲線の形状と曲率・振率は、フルネ・セレの公式により一意に関係付けられることが知られている。この公式を拡張し、空間曲線の形状を求める方法について考察を行う。

また、空間曲線に沿ってある断面形状を持った部材が配置されるとき、その空間曲線の曲率・振率と、部材の曲率・振れがどのような関係にあるか、部材の弾性エネルギーを求めることで考察する。

2. 空間曲線の形状と曲率・振率

2.1 動標構とフルネ・セレの公式

ある空間曲線 C 上の位置ベクトル $\mathbf{r}(s)$ に対して以下のように構成されたベクトルの組

$$\mathbf{e}_1(s) = \mathbf{r}'(s) / |\mathbf{r}'(s)| \tag{1.a}$$

$$\mathbf{e}_2(s) = \mathbf{r}''(s) / |\mathbf{r}''(s)| \tag{1.b}$$

$$\mathbf{e}_3(s) = \mathbf{e}_1(s) \times \mathbf{e}_2(s) \tag{1.c}$$

のことを、曲線 C の動標構（Moving frame）と呼ぶ。記号「 $'$ 」は曲線のパラメータ s に対する微分を表す。

上式の各ベクトルは互いに直交しており、 \mathbf{e}_1 は接単位ベクトル、 $\mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ はそれぞれ、主法線ベクトル・従法線ベクトルと呼ばれる。また、 s が弧長パラメータに選ばれるとき、 C の 1 階微分の大きさが常に 1 となり、次式が成り立つ。

$$\mathbf{e}_1(s) = \mathbf{r}'(s) \tag{1.d}$$

曲線 C が $\mathbf{r}''(s) \neq 0$ であるとき、その曲線の動標構に対して以下の関係式が成り立つ。

$$\frac{d}{ds} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \kappa & 0 \\ -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

ここで、 κ は曲線 C の曲率、 τ は振率を表している。本報告では、上式の初期値問題を解くことで曲線を求め、その特徴について考察を行なう。以下に、動標構の模式図を示す（図 2）。

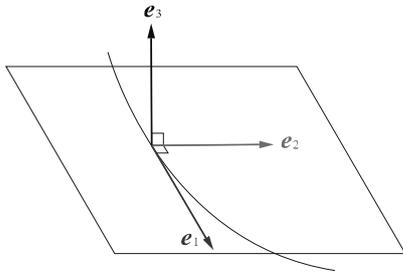


図2 動標構の概念図

2.2 初期値問題の解

式(1.d)と(2)をあわせ、次式のように微分の階数を見かけ上1階の微分方程式に置き直す。

$$\frac{d}{ds} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 \\ 0 & -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{x} = \{\mathbf{r} \quad \mathbf{e}_1 \quad \mathbf{e}_2 \quad \mathbf{e}_3\}^T \quad (4.a)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \kappa & 0 \\ 0 & -\kappa & 0 & \tau \\ 0 & 0 & -\tau & 0 \end{bmatrix} \quad (4.b)$$

とおけば、式(3)およびその解は次式のように表わされる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad \therefore \mathbf{x}(s) = \exp\left(\int_0^s \mathbf{A} ds\right) \mathbf{C} \quad (5)$$

ここで、未定係数ベクトルは、パラメータ s の初期値における状態量から求められる。

$$\mathbf{C} = \exp\left(\int_0^0 \mathbf{A} ds\right) \mathbf{C} = \mathbf{I}\mathbf{C} = \mathbf{x}(0) \quad (6)$$

次に、式(5)の積分を以下のようにおく。

$$\int \mathbf{A} ds = \begin{bmatrix} 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K & 0 \\ 0 & -K & 0 & T \\ 0 & 0 & -T & 0 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (7)$$

ここで、 K, T は次式である。

$$K = \int \kappa ds, \quad T = \int \tau ds$$

行列 $\exp(\mathbf{B})$ は、初期値から任意の s における状態量への変換を求める遷移行列である。

行列 \mathbf{A} が弧長パラメータ s の関数でない場合には、 \mathbf{A} と $\exp(\mathbf{B})$ は積の順序を入れ替えることができるので、形

式的に以下のようなテイラー展開で表すことができる。

$$\exp(\mathbf{B}) = \mathbf{I} + \mathbf{B} + \frac{1}{2!} \mathbf{B}^2 + \frac{1}{3!} \mathbf{B}^3 + \dots \quad (8)$$

行列 \mathbf{B} のべき乗行列 \mathbf{B}^n を求め、三角関数や指数関数のテイラー展開式を用いると、 $\exp(\mathbf{B})$ の成分として最終的に次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} 1 & \frac{s}{D} \sin D - \frac{sT^2(\sin D + D)}{D^3} & \frac{-sK(\cos D - 1)}{D^2} & \frac{-sKT(\sin D + D)}{D^2} \\ 0 & 1 + \frac{K^2(\cos D - 1)}{D^2} & \frac{K \sin D}{D} & \frac{-KT(\cos D - 1)}{D^2} \\ 0 & \frac{-K \sin D}{D} & \cos D & \frac{T \sin D}{D} \\ 0 & \frac{-KT(\cos D - 1)}{D^2} & \frac{-T \sin D}{D} & 1 + \frac{T^2(\cos D - 1)}{D^2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

ただし、上式における D は、

$$D = \sqrt{K^2 + T^2} \quad (10)$$

ここで、弧長 s の範囲を $0 \sim 2\pi$ とし、曲線が始点と終点で閉じるような(リング状に繋がる)条件を考える。 $s=0$ においては、 \mathbf{B} はゼロ行列であるから、式(8)を見ると遷移行列 $\exp(\mathbf{B})$ は単位行列である。

また、 $s=2\pi$ では、

$$K = 2\pi\kappa, \quad T = 2\pi\tau, \quad D = 2\pi\sqrt{\kappa^2 + \tau^2} \quad (11)$$

であり、これを式(9)に代入したとき、遷移行列が単位行列になれば曲線は閉じることになる。

まず、3行3列成分を見ると、この成分は1にならないから、

$$D = 2n\pi, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

このとき同時に、

$$\cos D = 1 \Leftrightarrow \sin D = 0 \quad (13)$$

となるので、残る制約は1行2列と1行4列成分となり、その条件式は以下となる。

$$\frac{sT^2}{D^2} = 0, \quad \frac{sKT}{D^2} = 0 \Leftrightarrow T = 0 \quad (14)$$

したがって、曲率および捩率が一定の場合において閉じた空間曲線を描くためには、捩率がゼロ、かつ曲率が正の整数である必要がある。この場合には平面の円のみがこれに該当する。

図3に曲率や捩率を色々に変えて得られた空間曲線の例を示す。本手法では、曲率・捩率が一定のもののみ解が得られるため、形状は、円・直線・常螺旋に限られる。

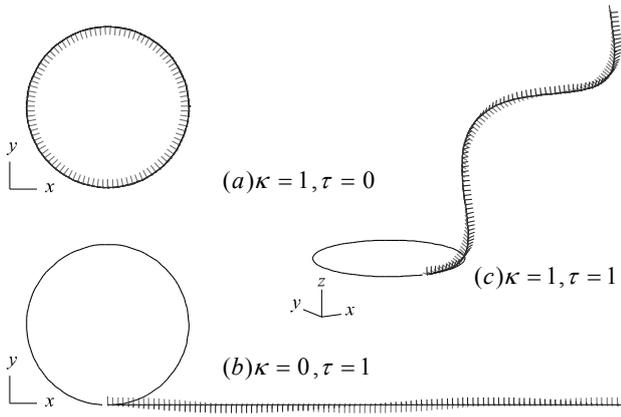


図3 (a)正円 (b)振れた直線 (c)常螺旋

3. 弾性棒の歪みエネルギーと空間曲線の動標構の関係

3.1 部材座標系の定義

ここでは、そのように与えられた空間曲線に対し、断面形状の情報を付加するため、部材座標系を導入する。部材座標系は、棒の接線方向ベクトルと、2つの主軸方向ベクトルからなる。主法線ベクトル・従法線ベクトルから θ 傾いた向きに主軸方向をとると、座標変換行列により、部材座標系は次のように定義される。

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{d}_1 \\ \mathbf{d}_2 \\ \mathbf{d}_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

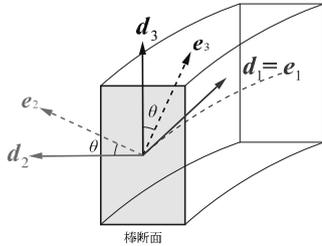


図4 部材座標系の定義

3.2 歪みエネルギーの定式化

部材座標系の直交性より、

$$\frac{\partial \mathbf{d}_i}{\partial s} = \bar{\boldsymbol{\kappa}}(s) \times \mathbf{d}_i(s) \quad (i=1,2,3) \quad (16)$$

が得られる。ここで、

$$\bar{\boldsymbol{\kappa}} = \bar{\kappa}_1 \mathbf{d}_1 + \bar{\kappa}_2 \mathbf{d}_2 + \bar{\kappa}_3 \mathbf{d}_3 \quad (17)$$

は曲率ベクトルと呼ばれ、

$$\bar{\kappa}_1 = \frac{\partial \mathbf{d}_2}{\partial s} \cdot \mathbf{d}_3, \bar{\kappa}_2 = \frac{\partial \mathbf{d}_3}{\partial s} \cdot \mathbf{d}_1, \bar{\kappa}_3 = \frac{\partial \mathbf{d}_1}{\partial s} \cdot \mathbf{d}_2 \quad (18)$$

$\bar{\kappa}_1$ は振れ、 $\bar{\kappa}_2, \bar{\kappa}_3$ は主軸方向の曲げを表している。

以上、3つの曲率成分 $\bar{\kappa}_1, \bar{\kappa}_2, \bar{\kappa}_3$ から歪みエネルギーを算出すると以下ようになる。

$$U = \int \left(\frac{GJ\bar{\kappa}_1^2}{2} + \frac{EI_1\bar{\kappa}_2^2}{2} + \frac{EI_2\bar{\kappa}_3^2}{2} \right) ds \quad (19)$$

3.3 歪みエネルギーの停留問題

棒の釣り合い形状を求めるために、部材座標軸の動標構に対する回転角 θ に関する歪みエネルギーの停留問題を解く。回転角 θ に関する各曲率の2乗値の変分は、

$$\frac{\partial \bar{\kappa}_i^2}{\partial \theta} = 2\bar{\kappa}_i \frac{\partial \bar{\kappa}_i}{\partial \theta} \quad (i=1,2,3) \quad (20)$$

となる。ここで、曲線の動標構を用いて変分を表すと、

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\kappa}_1}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \{(\cos\theta \mathbf{e}'_2 + \sin\theta \mathbf{e}'_3) \cdot (-\sin\theta \mathbf{e}_2 + \cos\theta \mathbf{e}_3)\} \\ \frac{\partial \bar{\kappa}_2}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \{(-\sin\theta \mathbf{e}'_2 + \cos\theta \mathbf{e}'_3) \cdot \mathbf{e}_1\} \\ \frac{\partial \bar{\kappa}_3}{\partial \theta} &= \frac{\partial}{\partial \theta} \{\mathbf{e}'_1 \cdot (\cos\theta \mathbf{e}_2 + \sin\theta \mathbf{e}_3)\} \end{aligned} \quad (21)$$

となり、動標構の直交性とフルネ・セレの公式より、

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_i &= |\mathbf{e}_i|^2 = 1 \quad (i=1,2,3) \\ \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2 &= \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}_3 = \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}_1 = 0 \\ \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}'_1 &= 0, \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}'_2 = -\kappa, \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}'_3 = 0 \\ \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}'_1 &= \kappa, \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}'_2 = -\tau, \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{e}'_3 = -\tau \\ \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}'_1 &= 0, \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}'_2 = 0, \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{e}'_3 = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\kappa}_1^2}{\partial \theta} &= \tau^2 \sin\theta (\sin\theta - \cos\theta) (\sin 2\theta - \cos 2\theta) \\ \frac{\partial \bar{\kappa}_2^2}{\partial \theta} &= \kappa^2 \sin\theta \cos\theta \\ \frac{\partial \bar{\kappa}_3^2}{\partial \theta} &= -\kappa^2 \sin\theta \cos\theta \end{aligned} \quad (23)$$

となる。以上より、歪みエネルギーの第1変分は、

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial \theta} &= \sin\theta (\sin\theta - \cos\theta) (\sin 2\theta - \cos 2\theta) \frac{GJ}{2} \int \tau^2 ds \\ &\quad + \sin\theta \cos\theta \left(\frac{EI_1}{2} - \frac{EI_2}{2} \right) \int \kappa^2 ds \end{aligned} \quad (24)$$

となり、エネルギー停留原理より停留値は、

$$\frac{\partial U}{\partial \theta} = 0 \Leftrightarrow \theta = 0, \frac{\pi}{2} \quad (25)$$

となる。停留状態での歪みエネルギーを計算すると、

$$U|_{\theta=0} = \int \left(\frac{GJ(-\tau)^2}{2} + \frac{EI_1 \cdot 0^2}{2} + \frac{EI_2 \kappa^2}{2} \right) ds$$

$$U|_{\theta=\pi/2} = \int \left(\frac{GJ\tau^2}{2} + \frac{EI_1 \cdot \kappa^2}{2} + \frac{EI_2 \cdot 0^2}{2} \right) ds \quad (26)$$

図4のように、 \mathbf{d}_2 を強軸、 \mathbf{d}_3 を弱軸に定義すると、

$$I_1 \geq I_2 \therefore U|_{\theta=\pi/2} \geq U|_{\theta=0} \quad (27)$$

となる。この事から、ある断面形状を持った棒が空間曲線に沿って配置されるとき、そのエネルギーが停留している事とは、棒の主軸が動標構の主法線方向・従法線方向と一致している事と同義となることがわかる。更に、その2つの停留状態は、式(27)より、棒の強軸が動標構の主法線方向と一致している時のほうがエネルギーが低い状態にあることがわかる。このとき、部材座標系に対する曲率成分は、振れの成分が空間曲線の振率と一致しており、曲げの成分は弱軸に関する曲率成分が、空間曲線の曲率と一致し、強軸に関する曲率成分が0になっていることになる。

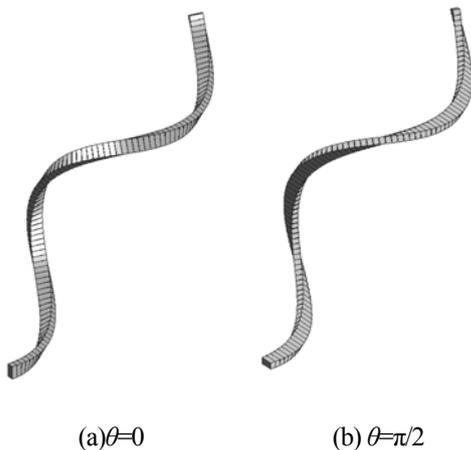


図4 矩形断面棒(b=1,h=2)の2つの停留状態

5. まとめ

本報ではフルネ・セレの公式を初期値問題として直接積分し、空間曲線と曲率・振率の関係について基礎的な考察を行なった。

ただし、本報告で解いた1階の微分方程式の問題においては、行列の可換性の問題から、曲率・振率に変動を与えることができず、記述できる曲線は、円・常螺旋・直線に限られている。

また、空間曲線になんらかの断面形状をもった弾性棒が配置される場合の、部材座標系の定義をおこなった。このとき、弾性棒のエネルギー状態が最も小さい状態とは、部材の強軸が曲線の主法線ベクトルと一致する場合であることを確認した。

6. 今後の課題

任意の形状を表すことができる空間曲線の記述法について考察することがまず挙げられる。その際に、膜表面積の計算と境界の歪みエネルギーの計算を簡便にできるような関数で表わす必要がある。

また、本報の知見から、動標構を定義することで、歪みエネルギーの停留問題が簡略化されることがわかったので、動標構から、如何に閉じた空間曲線の厳密解を求めるかということが重要な要素である。

そして、膜と境界リングの連成解析をおこない、膜張力と境界リングの剛性の比の違いにより、様々な釣り合い形状が得られることを定量的に示すこと、更には、構造システムの実現の可能性の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1) 大泉修、芋野匡俊、永井拓生、川口健一、新谷真人：弾性的境界を有する等張力曲面の形状に関する実験と基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、B-1、構造I、pp.837-838、2010.9
- 2) 石原競、八木孝憲、萩原伸幸、大森博司：極小曲面解析による膜構造の形状解析、日本建築学会構造系論文集第469号、pp.61-70、1995.3
- 3) 柯宛伶、川口健一：最急降下法による付帯条件付き極小曲面形状決定法、日本建築学会大会学術講演論文集、pp.701-702、2006.9
- 4) 矢ヶ崎一幸：弾性棒の大変形挙動とソリトン ～三次元的な大変形挙動出典 URL : www1.gifu-u.ac.jp/~chaos/jsmeds/jsmeds1/yagasaki.pdf
- 5) J.Spillmann, M.Teschner : Cosserat Rod Elements for the Dynamic Simulation of one-dimensional Elastic Object, URL:animationphysics.wordpress
- 6) Robert S. Manning, John H. Maddocks, Jason D. Kahn : A continuum rod model of sequence-dependent DNA structure, American Institute of Physics, J. Chem. Phys. 105 (13), 1 October 1996
- 7) Miklo's Bergou, Max Wardetzky, Stephen Robinson, Basile Audoly, EitanGrinspun : Discret Elastic Rods, ACM Transactions on Graphics, Vol. 27, No. 3, Article 63, August 2008
- 8) 井上治郎、原田利宜：多項式による空間曲線の近似手法とそれを用いた性質分析、社団法人情報処理学会研究報告、2007-CG-129
- 9) 小野進：ワイヤロープの微分幾何学的考察、日本応用数学会論文誌、Vol.3、No.4、pp387-424、1993
- 10) 中内伸光：じっくり学ぶ曲線と曲面—微分幾何学初歩—、共立出版株式会社、2005.9
- 11) 小沢哲也：曲線 —幾何学の小径—、株式会社培風館、2005.9
- 12) 田澤義彦 著：曲線論・曲面論 —Mathematica で探索する古典微分幾何学—、株式会社ピアソン・エデュケーション、1999.8

レベルセット法による形状表現に基づく有限被覆法を用いた構造形態の創生

真鍋 匡利¹⁾, 山田 崇恭²⁾, 泉井 一浩³⁾, 西脇 眞二⁴⁾ 車谷 麻緒⁵⁾ 寺田 賢二郎⁶⁾

1)京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻, 大学院生, 修士(工学), M.Manabe@fs3.ecs.kyoto-u.ac.jp

2)京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻, 大学院生, 修士(工学)

3)京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻, 助教, 博士(工学)

4)京都大学大学院工学研究科機械理工学専攻, 教授, Ph.D

5)茨城大学大学院理工学研究科都市システム工学専攻, 助教, 博士(工学)

6)東北大学大学院工学研究科土木工学専攻, 准教授, Ph.D

1 緒言

トポロジー最適化[1]は, 構造最適化問題を固定設計領域内における材料分布問題へ置き換えることにより, 構造形態を変更可能とした最も自由度の高い構造最適化手法であり, 現在までに, 線形問題を中心として, 多くの最適設計問題に適用されている. また, 近年では, レベルセット法に基づく構造最適設計手法[2, 3]が提案されている. この方法は, スカラー場であるレベルセット関数場の等位面を用いて, 物体の外形形状を陰的に表現し, レベルセット関数を更新させることにより, 最適設計過程における, 形状の更新を表現する方法である. 山田らが提案した手法[4, 5]は, レベルセット法による形状表現を行いながらトポロジー最適設計を行う方法であり, 剛性最大化問題に関しては線形弾性体を対象として, その有効性が示されている. また, 剛性問題のみならず, マルチフィジックスを考慮した構造最適設計問題においてもその有効性が示されている. しかしながら, 表皮効果 (Skin effect) を伴う電磁波問題や外形形状表面に圧力荷重が作用するような設計依存荷重問題においては, 有限要素内部に位置する境界に対する境界条件の付与について未だ問題点を持ち, 従来の手法では近似関数を用いて擬似的に境界を表現せざるを得なかった. そこで本研究では, レベルセット法による形状表現に基づく有限被覆法 (Finite Cover Method; FCM) [6, 7]を導入することにより, 上記の問題点を克服した新たなレベルセット法に基づくトポロジー最適設計法を構築する. 本報では, レベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適設計法とFCMの統合化を行う方法論を示し, 数値解析例により, 剛性最大化問題における本提案手法の妥当性と有効性を検証する.

以下, 第2章ではレベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適化手法の定式化とFCMによる弾性解析の概要を記す. 第3章では本提案手法による最適化アルゴリズムを記し, 更にこれらの統合化の方法論について説明する. 第4章では数値解析例により物体領域と空洞領域の不連続性を考慮した剛性最大化問題における本提案手法の妥当性と有効性を検証する.

2 定式化

2.1 レベルセット法による形状表現を用いたトポロジー最適化

物体領域 Ω と, 空洞領域により構成される固定設計領域 D における物体領域の構造最適化について考える. 今, レベルセット法を用いて固定設計領域 D 内の物体領域 Ω の境界 $\partial\Omega$ を表現する. すなわち, レベルセット関数 ϕ を用いて, 次式に示すように, 物体領域 Ω の境界 $\partial\Omega$ を, レベルセット関数の値が0である等位面によって表現する.

$$\begin{cases} 0 < \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \text{for } \forall \mathbf{x} \in \Omega \setminus \partial\Omega \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \text{for } \forall \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \text{for } \forall \mathbf{x} \in D \setminus \Omega \end{cases} \quad (1)$$

上式において, レベルセット関数に上限値と下限値をそれぞれ, 1と-1に設定している.

上述のレベルセット法による形状表現を用いて, 目的汎関数を F , 体積制約に対する制約汎関数を G で表す構造最適化問題を次式で定義する.

$$\inf_{\phi} \quad F(\Omega(\phi)) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x})d\Omega \quad (2)$$

$$\text{subject to } G(\Omega(\phi)) = \int_{\Omega} d\Omega - V_{\max} \leq 0 \quad (3)$$

ここで、 $f(\mathbf{x})$ は目的汎関数の被積分関数で、 V_{\max} は許容される体積の上限値である。

本研究では、Tikhonovの正則化法[8]に基づいて最適化問題を正則化する。すなわち、式(2),(3)で定式化される最適化問題を次式に置き換える。

$$\inf_{\phi} F_R(\Omega(\phi), \phi) = \int_{\Omega} f(\mathbf{x})d\Omega + \int_D \frac{1}{2}\tau |\nabla\phi|^2 d\Omega \quad (4)$$

$$\text{subject to } G(\Omega(\phi)) = \int_{\Omega} d\Omega - V_{\max} \leq 0 \quad (5)$$

ここで、 τ は、正則化の度合いを決定するパラメータである。この方法ではレベルセット関数 ϕ の勾配の存在を仮定し、次式に示すように、目的汎関数を目的汎関数とレベルセット関数 ϕ の勾配の二乗和との和に置き換えることで最適化問題を正則化する。これによって、レベルセット関数 ϕ の滑らかさが確保されることになる。このとき、レベルセット関数 ϕ は図1に示すように、空洞領域では-1,物体領域では1をとり、境界近傍において滑らかに分布するスカラー関数となる。詳

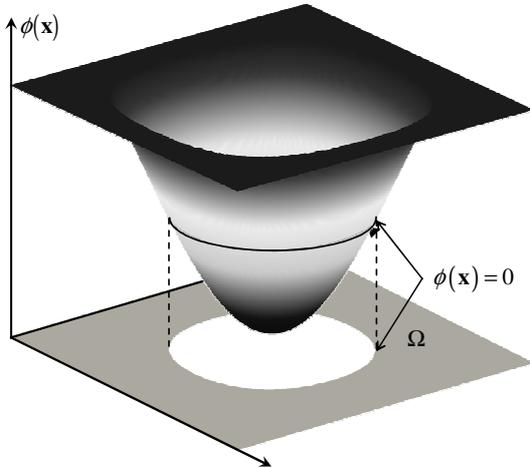


図1 Fixed design domain D and level set function ϕ

細は文献[4, 5]を参照されたい。

次に、上式の構造最適化問題を、Lagrange未定乗数法において、無制約問題に置き換える。今、Lagrangianを \bar{F}_R 、式(5)に関するLagrange乗数を λ とすれば、上の

最適化問題は次式となる。

$$\begin{aligned} \inf_{\phi} \bar{F}_R(\Omega(\phi), \phi) &= \int_{\Omega} f(\mathbf{x})d\Omega + \lambda \left(\int_{\Omega} d\Omega - V_{\max} \right) \\ &\quad + \int_D \frac{1}{2}\tau |\nabla\phi|^2 d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \bar{f}(\mathbf{x})d\Omega - \lambda V_{\max} \\ &\quad + \int_D \frac{1}{2}\tau |\nabla\phi|^2 d\Omega \quad (6) \end{aligned}$$

なお、上式では、Lagrangian密度関数 $\bar{f}(\mathbf{x})$ として、 $\bar{f}(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) + \lambda$ としている。本研究では、上式を解くことにより、最適構造を得る。

2.2 時間発展問題

上述の最適化問題に関するKKT条件は次式となる。

$$\delta\bar{F}_R(\Omega) = 0, \quad \lambda G(\Omega) = 0, \quad \lambda \geq 0, \quad G(\Omega) \leq 0 \quad (7)$$

ここで、 $\delta\bar{F}_R$ はLagrangian \bar{F}_R の汎関数微分を表す。このKKT条件を満たすレベルセット関数 ϕ が最適解の候補となる。しかしながら、これらを満たすレベルセット関数 ϕ を直接求めることは困難であるため、適当な初期値を与え、設計変数であるレベルセット関数を更新することによって最適解を求める。すなわち、仮想的な時間 t を導入し、レベルセット関数を変動させる駆動力は、Lagrangianの勾配に比例するものと仮定すれば、次式に示すように、最適化問題をレベルセット関数 ϕ の時間発展問題に置き換えることができる。

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = -K(\phi)\delta\bar{F}_R \quad (8)$$

ここで、 $K(\phi) > 0$ は比例定数を表す。上式に式(6)を代入し、適切に境界条件を設定すれば、次式が得られる[4]。

$$\begin{cases} \frac{\partial\phi}{\partial t} = -K(\phi) \left(\delta\bar{F}(\mathbf{x}) - \tau \nabla^2 \phi \right) \\ \frac{\partial\phi}{\partial n} = 0 & \text{on } \partial D \setminus \partial D_N \\ \phi = 1 & \text{on } \partial D_N \end{cases} \quad (9)$$

ここで、 ∂D_N は非設計境界である。式(5)の制約条件が活性であるとき、

$$\begin{aligned} \frac{dG(\phi)}{dt} &= \int_{\Omega} \frac{\partial\phi}{\partial t} d\Omega \\ &= 0 \quad (10) \end{aligned}$$

となるため，Lagrange定数 λ は，次式で与えられる．

$$\lambda = -\frac{\int_{\Omega} K(\phi) (f(\mathbf{x}) + \tau \nabla^2 \phi) d\Omega}{\int_{\Omega} K(\phi) d\Omega} \quad (11)$$

また，制約条件が非活性のとき，Lagrange定数 λ は，次式となる．

$$\lambda = 0 \quad (12)$$

本研究では，式(11),(12)によりLagrange定数 λ を求め，式(9)を解くことにより，最適構造を得る．

2.3 剛性最大化問題の定式化

ここでは，剛性最大化問題について定式化する．目的関数には，平均コンプライアンス $F_{m.c.}$ を用い，これを最小化する．このとき，体積制約条件下における平均コンプライアンス最小化問題は次式で定式化される．

$$\inf_{\phi} F_{e.c.} = l(\mathbf{u}) \quad (13)$$

$$\text{subject to } a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = l(\mathbf{v}) \quad (14)$$

$$\text{for } \forall \mathbf{v} \in U \quad \mathbf{u} \in U$$

$$G(\Omega(\phi)) \leq 0 \quad (15)$$

ただし，上式中の各表記は次式で定義される．

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \int_D \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) : \mathbf{E} : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v}) d\Omega \quad (16)$$

$$l(\mathbf{v}) = \int_{\Gamma_t} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} d\Gamma + \int_D \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} d\Omega \quad (17)$$

$$G(\Omega(\phi)) = \int_D d\Omega - V_{\max} \quad (18)$$

ここで， $\boldsymbol{\epsilon}$ はひずみテンソル， \mathbf{E} は弾性テンソルであり， U は次式で表わされる変位関数空間である．

$$U = \{\mathbf{v} = v_i \mathbf{e}_i : v_i \in H^1(D) \text{ with } \mathbf{v} = 0 \text{ on } \Gamma_u\} \quad (19)$$

次に，上の最適化問題に関するKTT条件を導くと共に，目的汎関数 $F_{e.c.}$ の感度解析を行う．上述の定式化より，Lagrangian $\bar{F}_{e.c.}$ はLagrange乗数 λ ，随伴変数場 \mathbf{v} を用いて，以下のように記述される．

$$\bar{F}_{e.c.} = l(\mathbf{u}) + a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - l(\mathbf{v}) + \lambda G \quad (20)$$

式(20)を用いてKKT条件を導けば，次式となる．

$$\begin{aligned} \delta \bar{F}_{e.c.}(\Omega(\phi)) &= 0, \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) - l(\mathbf{v}) = 0, \\ \lambda G(\Omega(\phi)) &= 0, \quad \lambda \geq 0, \quad G(\Omega(\phi)) \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

ここで，随伴変位場 \mathbf{v} を次式で定義することにより，本最適化問題は自己随伴問題となる．

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = l(\mathbf{u}) \quad \text{for } \forall \mathbf{u} \in U \quad \mathbf{v} \in U \quad (22)$$

式(20)に式(22)を代入し，平衡方程式(14)を用いれば，Lagrangian $\bar{F}_{e.c.}$ は次式となる．

$$\begin{aligned} \bar{F}_{e.c.}(\Omega(\phi)) &= \frac{1}{2} a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) + \lambda G(\Omega(\phi)) \\ &= \int_{\Omega} (\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) : \mathbf{E} : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v}) + \lambda) d\Omega \end{aligned} \quad (23)$$

したがって，Lagrangianの感度となる $\bar{f}_{e.c.}$ は次式となる．

$$\bar{f}_{e.c.}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) : \mathbf{E} : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{v}) + \lambda \quad (24)$$

ただし，本最適化問題は自己随伴問題であるため，式(24)は次式となる．

$$\bar{f}_{e.c.}(\mathbf{x}) = \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) : \mathbf{E} : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{u}) + \lambda \quad (25)$$

2.4 FCMの概説

FCMでは，近似関数が定義される数学領域と支配方程式が満たされるべき物理領域を分離して考える．数学領域は，近似基底関数の定義域として，解析対象である物理領域を覆うように設定され，数学被覆 M_i の重合により形成される．物理領域は，数学被覆 M_i と物理領域の共通領域である物理被覆 $P_i^{[\alpha]}$ の重合により形成され，数学被覆の共通領域を数学要素，物理被覆 $P_i^{[\alpha]}$ の共通領域を物理要素と定義する．すなわち，Partition-of-Unity(PU)条件を満たす重み関数を導入する数学領域と物理領域を独立に定義できるため，要素内部における物理境界の存在を許容することができる．重み関数 w_i は，数学被覆 M_i において数学領域内で次式の様に定義される．

$$w_i(\mathbf{x}) \geq 0 \quad \mathbf{x} \in M_i \quad (26)$$

$$w_i(\mathbf{x}) = 0 \quad \mathbf{x} \notin M_i \quad (27)$$

ここで、重み関数 w_i は次式のPU条件を満たすように設定される。

$$\sum_{\mathbf{x} \in M_i} w_i(\mathbf{x}) = 1 \quad (28)$$

被覆関数 u_i は数学被覆 M_i と物理領域 $\Omega^{[\alpha]}$ との共通領域である物理被覆 $P_i^{[\alpha]}$ ごとに定義され、以下の様に表わされる。

$$u_i(\mathbf{x}) \neq 0 \quad \mathbf{x} \in P_i^{[\alpha]} \quad (29)$$

$$u_i(\mathbf{x}) = 0 \quad \mathbf{x} \notin P_i^{[\alpha]} \quad (30)$$

全体変位関数 u は、重み関数 w_i および被覆関数 u_i を用いて、次式のように定義できる。

$$u(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{N_M} w_i(\mathbf{x}) u_i(\mathbf{x}) \quad (31)$$

ここで N_M は数学被覆 M_i の総数である。詳細については、文献[6, 7]を参照されたい。

3 数値実装法

3.1 最適化アルゴリズム

図2に、本提案手法によるトポロジー最適化のフローチャートを示す。まず、FCMにおける数学領域に適切な初期構造を示すレベルセット関数 ϕ を与える。次に、レベルセット関数値から物理領域の境界を特定し、FCMにより状態方程式を解析する。ここで目的汎関数が収束していれば、最適解が得られたと判断して最適化を終了する。収束していなければ、レベルセット関数 ϕ を更新し、FCMにより状態方程式を解析するステップに戻る。以上の手続きにより、最適構造を示すレベルセット関数値を得る。

3.2 FCMの数値実装法

物理領域のみで構成される物理要素については、Lagrange双一次四辺形要素として4点Gauss積分法に基づき数値積分を行い、一般化要素については、物理領域のみ定ひずみ三角形要素を用い、面積座標系に基づき数値積分を行う。また、連立一次方程式の解法としては、node-by-nodeで前処理付き共軛勾配法を用いる。

4 数値解析例

数値解析例として、曲げを受ける片持ち梁の剛性最大化問題に本提案手法を適用する。図3に、設計領域と

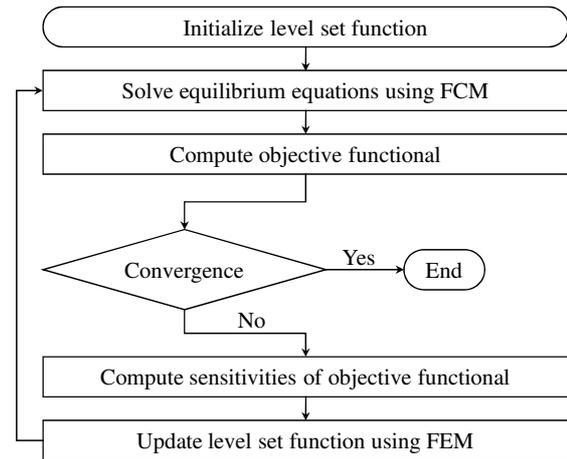


図2 Flowchart of optimization procedure

境界条件を示す。固定設計領域を $0.4\text{m} \times 0.3\text{m}$ の長方形領域とし、許容される体積の最大値 V_{\max} を固定設計領域の40%とした。境界条件は、左端を完全変位拘束し、右端中央に下向きに表面力として線分布外力 P_{ext} を作用させる。ここに、材料は等方性材料を想定し、材料定数は、Young率を210GPa、Poisson比を0.3とする。

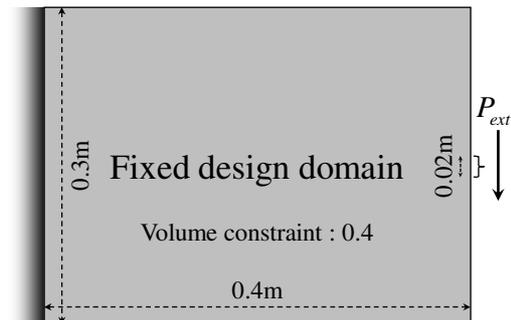


図3 Fixed design domain and boundary conditions of design problem for cantilever beam

4.1 初期形状依存性の検証

まず、初期形状依存性について検証する。ここでは、固定設計領域を要素長 $2.5 \times 10^{-3}\text{m}$ の構造格子として要素分割した。図4に初期形状(a)-(c)を示す。図5(a)に初期形状(a)、図5(b)に初期形状(b)、図5(c)に初期形状(c)の場合の最適構造を示す。これより、得られた最適構造はほぼ同一の構造であり、初期形状が最適構造に与える影響は極めて小さいといえる。

4.2 領域分割数依存性の検証

次に、領域分割数依存性について検証する。ここで、初期形状は、図4(a)とする。図6(a)に分割数4, 800($80 \times$

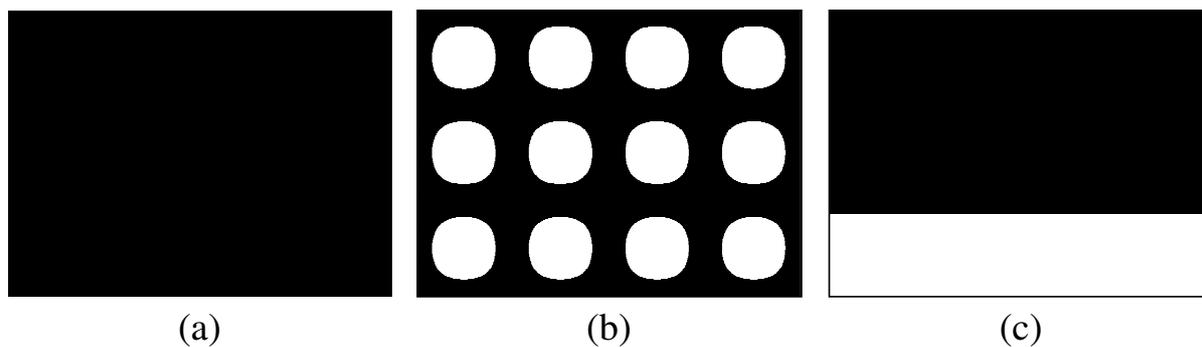


図4 Initial configurations for effect of initial shape

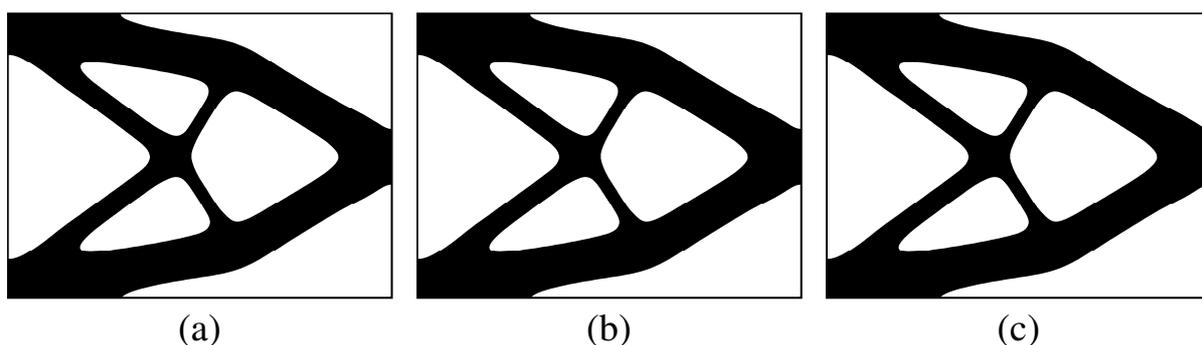


図5 Optimal configurations for effect of initial shape

60), 図6(b)に分割数19,200(160×120), 図6(c)に分割数76,800(320×240)の場合の最適構造を示す. これより, 得られた最適構造はほぼ同一の構造であり, 領域分割数が最適構造に与える影響は極めて小さいといえる.

5 結語

本研究では, レベルセット法による形状表現に基づくFCMを用いたトポロジー最適化手法を提案した.

本研究で得られた結果を以下に示す.

(1) レベルセット法による形状表現に基づくトポロジー最適化手法とFCMによる弾性解析の統合化を行う方法論を開発した.

(2) 提案する方法を, 平均コンプライアンス最小化問題に展開し, アルゴリズムを構築した.

(3) 数値解析例により, 本提案手法の有効性を検証した. その結果, が最適構造に与える影響は小さく, 物理的に妥当で, 明瞭な最適構造が得られることを示した.

参考文献

- 1) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N., Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 71, No. 2, pp. 197-224, 1988.
- 2) Wang, M. Y., Wang, X. and Guo, D., A level set method for structural topology optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 192, pp. 227-246, 2003.
- 3) Allaire, G., Jouve, F. and Toader, A., Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method, *Journal of Computational Physics*, Vol. 194, pp. 363-393, 2004.
- 4) Yamada, T., Nishiwaki, S., Izui, K., Yoshimura, M. and Takezawa, A., A structural optimization method incorporating level set boundary expressions based on the concept of the phase field method, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 75, No. 753, pp. 550-558, 2009.
- 5) Yamada, T., Izui, K., Nishiwaki, S. and Takezawa, A., A topology optimization method based on the level set method incorporating a fictitious interface

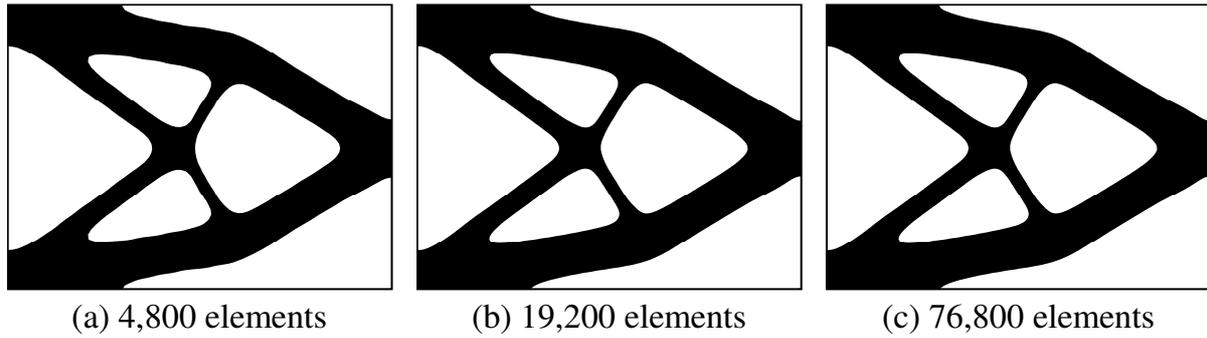


图6 Optimal configurations for effect of mesh size

energy, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering(in press).

- 6) Kurumatani, M. and Terada, K., Approximation properties of generalized elements in finite cover method, Transactions of JSCES, Paper No. 20030027, 2003.
- 7) Terada, K. and Kurumatani, M., Performance assessment of generalized elements in the finite cover method, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 41, pp. 111-132, 2004.
- 8) Tikhonov, A. N. and Arsenin, V. Y., Solutions of ill-posed problems, Winston and Sons, 1997.

進化計算を用いた形態創生システムの計算時間短縮に関する研究
 ~形態分析による事前学習システムの提案~

堤和敏¹⁾，北村悠介²⁾，武田侑也³⁾

1) 芝浦工業大学システム理工学部環境システム学科，教授，博士(工学)

2) 元芝浦工業大学大学院生，修士(工学)

3) 芝浦工業大学システム理工学部環境システム学科

1 はじめに

近年、コンピュータ性能が向上し様々な分野において進化的計算を用いたシステム最適化が行われている¹⁾。本研究室では大空間の屋根形態を対象とし、遺伝的アルゴリズム(以下GAと呼ぶ)を用いて設計者イメージを満足し、且つ力学的合理性の高い形態を提案する発想支援型形態創生システム²⁾を構築している。しかし、このシステムでは合理的形態を提案するのに多大な計算時間を必要とする。処理時間を抑え、システムの実用性を向上させるためには、FEM解析回数を少なくすることが必要である。既報³⁾では、種々の形態と相当応力の関係をニューラルネットワーク(NN)で事前学習し、各世代各個体毎の相当応力評価をNNで推定することにより、FEM解析を行う回数を極力減らし、効率よく実用的時間内に進化計算による最適形態を創生する事前学習システムを提案した。本報では既報の事前学習システムのさらなる精度向上を目指し、力学的合理性を高めるための形態分析を行い、合理性を高めるために必要な形態変化に関する設計知識を得ること、その設計知識を使った事前学習システムの有効性を検証することを目的とする。

2 既報³⁾の概要

2.1 旧システム(事前学習なし)

形態創生システムは、「屋根形態イメージ入力システム」と「合理的形態評価システム」により構築されている。「屋根形態イメージ入力システム」では、設計者のイメージを制御点を用いて入力し、3次元化する。「合理的形態評価システム」では、「屋根形態イメージ入力システム」で決定した形態の制御点を微小変化させ、力学的に優れた屋根形態をGAにて検索する。手法は、形態表現に使用しているSpline曲線の制御点座標を垂直方向に微小変動させ、新たな屋根形態を生成し、この形態に対してFEM解析を実行し、解析結果の相当応力平均値より適応度を決定し、設定した世代までGA操作を繰り返す。小

国町民体育館⁴⁾を参考にしたAモデルを対象に本システムを適用した結果を図1に示す。

2.2 事前学習システム概要

事前学習システムのフローを図2に示す。事前学習システムでは合理的形態評価システムの前に事前学習システムが追加される。事前学習に用いる学習データは各制御点に対し、表1に示す鉛直変動15パターンの中から想定される変動幅の上、下端、中央の3ケース選び出し、実験計画法の直交表L81を用い81個体とする。学習データモデルに対してFEM解析を行い、それらの形態と相当応力の関係をNNで学習する。学習データとして、単純に制御点変動幅の両端部と中央の3点とした場合には推定精度が低く、制御点の変動幅を最適形態を予想して上下にシフトし、狭める必要があることが先行研究³⁾よりわかっている。したがって形態分析を行い、どういう形態の場合にどちらの方向にシフトすべきかの知識を獲得し、得られた知識を基にエリート形態を予測し、学習形態の制御点位置をシフトさせる必要がある。合理的形態評価システムでは各個体の適応度は各個体の制御点変動量からNNで相当応力の推定を行い、最小となる個体をエリート保存する。NNの推定誤差を考慮してエリート個体は各世代毎に保存し、各世代のエリート形態のみFEM解析で実際の相当応力の確認を行い、最終的に各世代エリート形態の中から相当応力平均値が最小となる形態を選び、最終決定個体とする。

表1. 変動遺伝子座

0	0	0	0	$-0.7 \times \alpha(m)$	1	0	0	0	$0.7 \times \alpha(m)$
0	0	0	1	$-0.6 \times \alpha(m)$	1	0	0	1	$0.6 \times \alpha(m)$
0	0	1	0	$-0.5 \times \alpha(m)$	1	0	1	0	$0.5 \times \alpha(m)$
0	0	1	1	$-0.4 \times \alpha(m)$	1	0	1	1	$0.4 \times \alpha(m)$
0	1	0	0	$-0.3 \times \alpha(m)$	1	1	0	0	$0.3 \times \alpha(m)$
0	1	0	1	$-0.2 \times \alpha(m)$	1	1	0	1	$0.2 \times \alpha(m)$
0	1	1	0	$-0.1 \times \alpha(m)$	1	1	1	0	$0.1 \times \alpha(m)$
0	1	1	1	0m	1	1	1	1	0m

* α は制御点変動倍率とする。

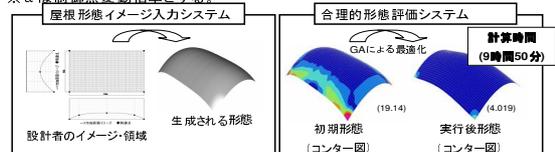


図1. 形態創生システム概要(Aモデル)

3 形態分析

NN の事前学習において精度良い学習データを選定するためには、種々の初期形態に対して、力学的合理性が高くなる制御点変動幅を狭める必要があり、そのためには制御点変動量の方向を知る必要がある。形態は spline 曲線をベースにして作成されるため、制御点の相対位置により形態が決定する。そのため、形態分析では制御点の相対位置関係により決まるライズ比や曲率の向き（凸凹）といった形態要素と制御点変動方向の関係を分析する。存在する制御点全てを考慮するのは難しいため、形態要素は対象とする制御点と、その前後の制御点の相対位置によって決まる曲面のライズ比とその向き（凸凹）までを考慮することにした。ライズ比とその向き（凸凹）の組み合わせの中から、形態分析用に 40 形態作成し、これらに合理的評価システム（事前学習なし）を実行し、相当応力の小さくなる制御点移動傾向を求め、形態と制御点変動量の関係をラフ集合⁵⁾により分析を行った。手順は図 3 のとおりである。

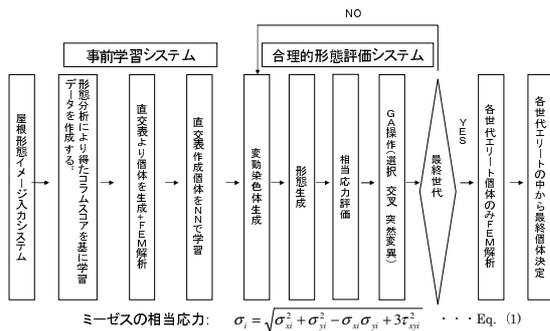


図 2. 事前学習システムフロー

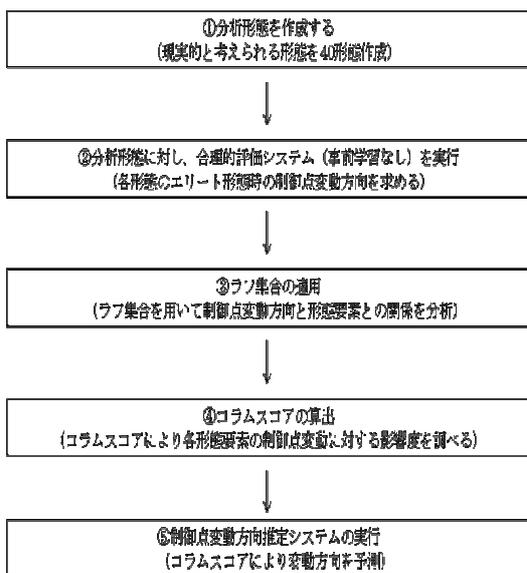


図 3. 形態分析手順

3.1 分析形態の作成

本研究では、端部を除く各制御点の鉛直変動量を変数としてパラメータ解析を行う。X 方向制御点は制御点 2~6 の 5 点を変動させる。制御点変動範囲は最低高さ 4 m、最大高さ 10m として、1m 刻みで変動させると 16807 形態を作成することができる。(図 4)。分析用の形態は、バランス良くサンプリングする必要がある。直交表により分析形態を作成することを考えたが、そのままライズ比、凸凹を対応する因子に当てはめると、ライズ比が極端に大きい、各制御点間の凸凹が全て凹等といった非現実的なモデルが存在する (表 2. 形態 N030)。

16807 形態のライズ比、凹凸の分析結果を基にして、直交表の中でも発生確率の極端に低い組み合わせは削除し、発生確率の高い形態と入れ替えることで、現実的なデータの集団となるように分析形態を決定した。直交表は L36 をベースにしたが、発生確率の高い形態は 1 個ではデータ不足と考え、4 形態追加し、全 40 個を分析形態とした (表 3)。各種形態要素の組み合わせに合う形態の制御点座標は、パラメータ解析で得た 16807 パターンの形態の中で、条件に一致する形態の中から無作為に一つ選んで決定した。

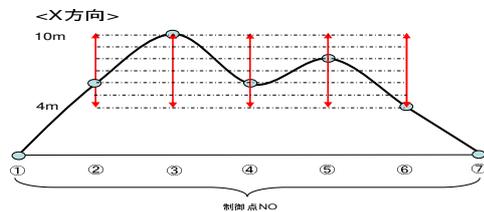


図 4. X 方向 : 7⁵=16807case (実線は一例)

表 2. 形態分析 (初期)

NO	制御点-1	制御点-2	制御点-3	制御点-4	発生数
1	ライズ小	凸	ライズ小	凸	214
2	ライズ中	凸	ライズ中	凸	0
3	ライズ大	凸	ライズ大	凸	0
4	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
5	ライズ中	凸	ライズ大	凸	1
6	ライズ大	凸	ライズ小	凸	44
7	ライズ小	凸	ライズ中	凸	17
8	ライズ中	凸	ライズ大	凸	0
9	ライズ大	凸	ライズ小	凸	33
10	ライズ小	凸	ライズ大	凸	1
11	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
12	ライズ大	凸	ライズ中	凸	114
13	ライズ小	凸	ライズ大	凸	41
14	ライズ中	凸	ライズ小	凸	1
15	ライズ大	凸	ライズ中	凸	10
16	ライズ小	凸	ライズ大	凸	44
17	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
18	ライズ大	凸	ライズ中	凸	111
19	ライズ小	凸	ライズ大	凸	0
20	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
21	ライズ大	凸	ライズ中	凸	141
22	ライズ小	凸	ライズ大	凸	11
23	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
24	ライズ大	凸	ライズ中	凸	114
25	ライズ小	凸	ライズ大	凸	0
26	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
27	ライズ大	凸	ライズ中	凸	141
28	ライズ小	凸	ライズ大	凸	11
29	ライズ中	凸	ライズ小	凸	1
30	ライズ大	凸	ライズ中	凸	0
31	ライズ小	凸	ライズ大	凸	0
32	ライズ中	凸	ライズ小	凸	11
33	ライズ大	凸	ライズ中	凸	14
34	ライズ小	凸	ライズ大	凸	11
35	ライズ中	凸	ライズ小	凸	111
36	ライズ大	凸	ライズ中	凸	11

表 3. 形態分析 (最終決定)

NO	制御点-1	制御点-2	制御点-3	制御点-4	発生数
1	ライズ小	凸	ライズ小	凸	111
2	ライズ中	凸	ライズ中	凸	1111
3	ライズ大	凸	ライズ大	凸	1111
4	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
5	ライズ中	凸	ライズ大	凸	111
6	ライズ大	凸	ライズ小	凸	111
7	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
8	ライズ中	凸	ライズ大	凸	111
9	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
10	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
11	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
12	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
13	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
14	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
15	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
16	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
17	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
18	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
19	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
20	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
21	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
22	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
23	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
24	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
25	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
26	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
27	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
28	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
29	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
30	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
31	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
32	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
33	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11
34	ライズ小	凸	ライズ中	凸	11
35	ライズ中	凸	ライズ大	凸	11
36	ライズ大	凸	ライズ小	凸	11

3.2 形態分析方法

形態分析用の40個体は、設計領域としてX方向40m、Y方向30mとし、制御点数はX方向7個、Y方向5個、制御点変動量±0.7m、制御点水平座標(X,Y)と支持点位置は共通とし、端部を除く制御点の鉛直座標(Z)を変動させ作成した。図5に設計領域、支持点位置、制御点水平座標を示す。中央の制御点(3,4,5)の制御点の変化を分析する。図6に、制御点4における左右、自身の曲面のライズ比、凸凹の見方を示す。本報では左の曲面は制御点2-4間、自身の曲面は制御点3-5間、右側の曲面は制御点4-6間で、奥行き方向の中央部分は制御点2-4間で構成される曲面とする。分析では自身の曲面と左右の曲面のライズ比を大中小の3段階で分類し、凸凹の方向を考え、表3のように形態パラメータを設定した。一方、表5のように形態のカテゴリー分類を行う。ライズ比の大きさ、凸凹と制御点変動方向との関係をラフ集合⁵⁾を用いて分析する。

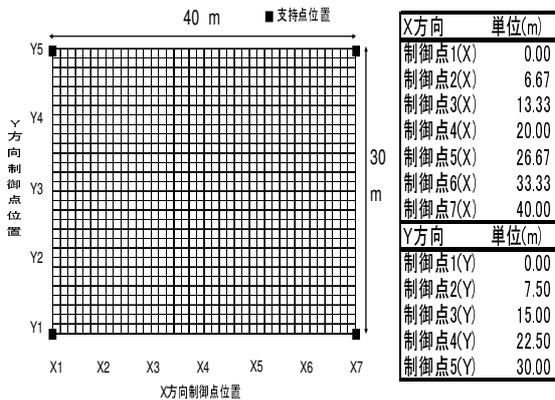


図5. 設計領域・支持点位置、制御点座標(水平)

表4. 分析形態の形態パラメータ(一部)

NO	X方向制御点					Y方向制御点								
	1-3間	2-4間	3-5間	4-6間	5-7間	1-3間	2-4間	3-5間	4-6間	5-7間				
1	024	凸	005	凸	001	凸	004	凸	019	凸	004	凸	024	凸
2	021	凸	019	凸	015	凹	022	凸	019	凸	024	凸	010	凸
3	055	凸	020	凹	022	凸	020	凹	038	凸	009	凹	026	凸
4	026	凸	008	凸	012	凸	023	凹	063	凸	023	凸	007	凹
5	017	凸	012	凸	014	凹	021	凸	021	凸	023	凸	010	凹
6	051	凸	023	凹	012	凸	023	凸	012	凸	043	凸	020	凹
7	015	凸	017	凸	011	凹	009	凸	023	凸	041	凸	017	凹
8	029	凸	009	凸	015	凸	024	凸	038	凸	015	凸	008	凹
9	010	凸	018	凸	004	凸	004	凸	005	凸	038	凸	013	凹
10	019	凸	019	凸	011	凹	012	凹	030	凸	023	凸	010	凹

表5. カテゴリー分類

	X方向(当該方向)			Y方向(奥行き方向)			決定クラス		
A1	左面ライズ(大)	C1	自身ライズ(大)	E1	右面ライズ(大)	G1	自身ライズ(大)	1	に変動
A2	左面ライズ(中)	C2	自身ライズ(中)	E2	右面ライズ(中)	G2	自身ライズ(中)	2	に変動
A3	左面ライズ(小)	C3	自身ライズ(小)	E3	右面ライズ(小)	G3	自身ライズ(小)	ライズ大	0.15以上
B1	左面凹(凸)	D1	自身凹(凸)	F1	右面凹(凸)	H1	自身凹(凸)	ライズ中	0.15-0.08
B2	左面凹(凹)	D2	自身凹(凹)	F2	右面凹(凹)	H2	自身凹(凹)	ライズ小	0.08以下

3.3 合理的評価システムによる形態分析データの作成

分析用40形態に対し、事前学習なし合理的形態評価システムを実行した結果(制御点変動量、相当応力変化)の一部を表6に、エリート形態と初期形態の形態イメージの変化の例を図7に示す。また形態をカテゴリー分類によって変換したラフ集合決定表を表7に示す。

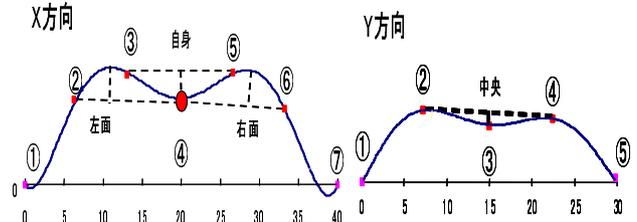


図6. 制御点4のライズ比と凸凹

表6. 分析形態制御点変動量と相当応力減少量(一部)

NO	X方向 制御点					Y方向 制御点			相当応力減少量
	2 (m)	3 (m)	4 (m)	5 (m)	6 (m)	2 (m)	3 (m)	4 (m)	
1	-07	07	-05	01	04	07	-07	06	6.19
2	-06	-06	07	0	05	-07	01	07	9.26
3	04	06	-07	0	07	-07	07	-07	17.78
4	-07	-07	-06	07	-07	03	05	01	11.36
5	-07	03	07	-07	-07	01	06	04	14.23
6	-07	07	-07	02	04	07	07	07	11.94
7	-01	0	07	07	-07	-06	07	-03	4.01
8	-03	0	-07	07	-07	07	02	05	26.4
9	-07	-06	-02	07	05	-07	07	-02	12.37
10	-06	-07	07	07	-07	04	06	07	11.46

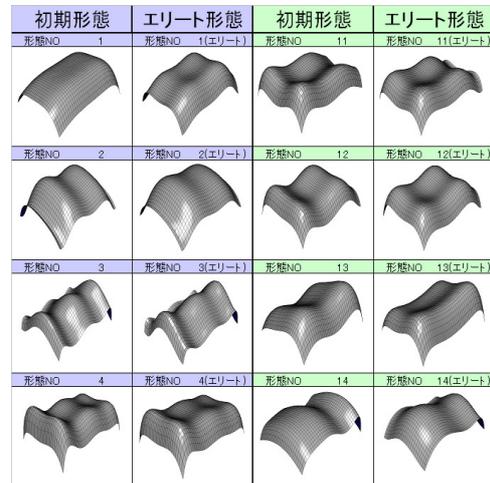


図7. 合理的評価システム実行後の形態変化例

表7. 分析形態のラフ集合決定表(一部)

NO	X方向 制御点						Y方向 制御点		決定クラス
	2-4間		3-5間		4-6間		2-4間		
1	A3	B1	C3	D1	E3	F1	G3	H1	2
2	A1	B1	C1	D2	E1	F1	G2	H1	1
3	A1	B2	C1	D1	E1	F2	G1	H1	2
4	A3	B1	C2	D1	E1	F2	G3	H2	2
5	A2	B1	C2	D2	E1	F1	G2	H2	1
6	A1	B2	C2	D2	E1	F1	G1	H2	2
7	A1	B1	C2	D2	E2	F1	G1	H2	1
8	A2	B1	C1	D1	E1	F2	G3	H2	2
9	A1	B1	C3	D1	E3	F1	G2	H2	2
10	A1	B1	C2	D2	E2	F2	G2	H2	1

3.4 ラフ集合による形態分析結果

表7よりラフ集合理論を使って、制御点変動方向と形態要素（ライズ比、凸凹）の関係を分析して得たC.I値の一部を表8に、各属性に対応するコラムスコアを表9に示す。各決定クラスに影響を及ぼしているカテゴリーには網掛けをした。制御点の変動方向は各形態における形態要素の組み合わせから各決定クラス毎にコラムスコアの総和を求め、和が大きい方（上または下）にシフトすると予測する。また、各決定クラスのコラムスコアの総和がほぼ等しい($0.9 < Y(1) \div Y(2) < 1.1$) 場合には、制御点変動方向はシフトしないと考えられる（図8）。端部制御点(2,6)に関しては、片側の曲面が存在しなため、左右の曲面に関するコラムスコアを0とし、自身の曲面と奥行き方向の曲面のコラムスコアの総和で考える。コラムスコアの総和を用いて制御点4（中央）、制御点2（端部）のエリート時の制御点移動方向を予測した例と、各制御点に対する分析用データ全体の推定精度のまとめ（正解率）を表10に示す。表9よりそれぞれの決定クラスに対するコラムスコアの差が0.5以上のものをまとめると、

- 1) 制御点が上に変動する場合（中央）
左曲面が凸（B1）、自身曲面が凹（D2）、右曲面が凸（F1）
 - 2) 制御点が下に変動する場合（中央）
左曲面が凹（B2）、自身曲面が凸（D1）、右曲面が凹（F2）
- これらをまとめると、相当応力の小さくなる制御点移動傾向は、形態が一つの曲率に近づいていく方向であると考えられる。

図9に形態N03、形態N08における初期形態と、制御点変動量を±0.7m、±2.1mとした場合のエリート形態のコンター図を示す。表11に各形態の制御点位置変化を示す。図7より各形態変動量を増やすことで凹凸が比が小さくなり、一つの形態に近づいていくことが確認できる。

表8. C.I. 値（一部）

	Y=1(↑)			Y=2(↓)					
C1F1B1A1	0.28	D2E3	0.09	A3G3C3	0.06	C3H1E2	0.02	A3F1G1B1	0.02
C1F1H1B1	0.20	G2E1B1H2C1	0.06	A3G3D1	0.11	C3H1F2	0.02	A3F1G1E3	0.02
C1F1H1G2	0.11	G2E1H2A1B1	0.06	A3G3E3	0.04	D1A2C3	0.04	D1G1F1E3	0.02
D2C1	0.49	A1B1C2D1H2F2	0.02	A3H1C3	0.06	D1A2H1E2	0.02	E3C1G1	0.02
D2F1A1	0.43	C1F1G1E2	0.05	A3H1D1	0.06	D1B2C3	0.06	C3F1A2	0.02
D2G2A1	0.15	C2E3A3	0.02	A3H1E3	0.04	D1E2C3	0.04	D1E1F1B1H2	0.02
D2H1	0.42	C2E3B1	0.06	B2A1H1C1	0.09	D1E2G3	0.11	C2A1G2F1H2	0.02
E1F1B1A1	0.18	F2E3	0.05	B2F2C1	0.11	D1F2C3	0.02	D1C2F1B1H2	0.02
E1F1B1C1	0.26	G1A3C2	0.03	B2F2G1	0.06	D1F2H1E2	0.06	D1C2F1G2H2	0.02
E1F1B1H1	0.18	G1A3F2	0.02	D1B2C1H1	0.13	G3C3A2	0.04	E2G2F1H2C2	0.02
E1F1H1G2	0.09	G1E3C2	0.02	D1E1H1C1	0.19	G3C3E2	0.04	A2C1G3H1	0.02
G2H1B1F1	0.17	H2G1F2C2	0.02	D1F2H1C1	0.13	G3F2C3	0.02	G3H2C1F1E2	0.02
D2G1	0.31	E2B1H1G2	0.06	D1G1H1	0.17	C2A1E1G2	0.04	A3G3E2	0.04
E2G2	0.23	E2C1H1G2	0.05	F2E1H1C1	0.11	D1E1H1A1G2	0.06	D1E1F1A1H1	0.04
E2H1H2	0.06	A1G3F1C2	0.02	A3E1B1H2	0.02	A3E2C3	0.04	A3H1B2	0.02
G1B1H2A1	0.12	C2E3A1	0.05	A3E1D1	0.09	A3E2D1	0.06	G3E1A1B2F1	0.02
G1B1H2C2	0.03	C2E3H1	0.03	A3E1F2	0.02	A3C3G1	0.02	D1E1F1A1G2	0.02

表9. コラムスコア

	コラムスコア	
	Y=1(↑)	Y=2(↓)
A1	0.61	0.34
A2	0.26	0.51
A3	0.11	0.30
B1	0.83	0.24
B2	0.14	0.70
C1	0.75	0.62
C2	0.27	0.32
C3	0.11	0.30
D1	0.04	1.43
D2	1.18	0.01
E1	0.42	0.51
E2	0.31	0.31
E3	0.24	0.18
F1	0.94	0.36
F2	0.12	0.65
G1	0.47	0.21
G2	0.33	0.43
G3	0.28	0.72
H1	0.67	0.62
H2	0.34	0.44

表10. コラムスコア推定精度

制御点2					
形態NO	Y=1(↑)	Y=2(↓)	コラム推定	実際値	判定
1	1.74	3.38	2	2	O
2	1.79	3.09	2	2	O
3	1.93	2.88	2	1	X
4	1.41	3.21	2	2	O
5	1.46	2.92	2	2	O
6	1.80	2.70	2	2	O
7	1.80	2.70	2	2	O
8	1.41	3.21	2	2	O
9	0.98	2.61	2	2	O
10	1.46	2.92	2	2	O

制御点4					
形態NO	Y=1(↑)	Y=2(↓)	コラム推定	実際値	判定
1	3.21	4.13	2	2	O
2	5.72	3.12	1	1	O
3	3.22	5.07	2	2	O
4	2.40	4.59	2	2	O
5	4.55	2.81	1	1	O
6	3.22	4.30	2	2	O
7	4.94	2.23	1	1	O
8	3.02	5.11	2	2	O
9	3.42	3.71	-	2	X
10	3.98	2.73	1	1	O

正解率まとめ					
	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5	制御点6
正答数	34	30	36	29	24
正解率	85.0%	75.0%	90.0%	72.5%	60.0%



図8. 制御点変動の組み合わせ

左：上にシフトする場合 中央：下にシフトする場合 右：どちらにもシフトしない場合

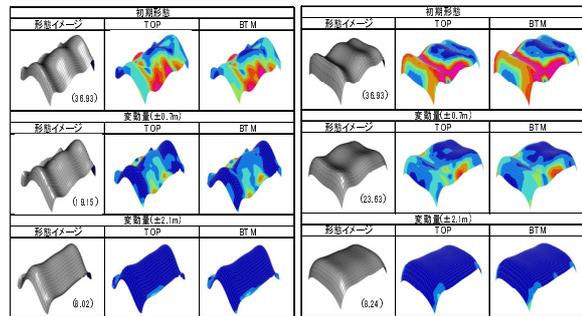


図9. 変動量と形態変化 左（N03） 右（N08）

表11. 各変動量における制御点変化と相当応力変化

NO	X方向					Y方向			
	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5	制御点6	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5
3	8	6	8	4	4	4	10	8	
8	7	8	9	6	9	4	4	5	

NO	X方向					Y方向				初期形状	実行後	減少量
	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5	制御点6	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5			
3(0.7)	8.4	6.6	7.3	4	4.7	3.3	10.7	7.2	36.83	19.15	17.78	
8(0.7)	6.7	8	8.3	6.7	8.3	4.7	4.2	5.8	50.03	23.63	26.4	
3(2.1)	7.7	6.6	6.2	5.2	6.1	4.9	12.1	5.9	36.93	8.02	28.91	
8(2.1)	7	7.1	7.8	8.1	9	5.2	5.8	5.3	50.03	8.24	41.79	

NO	X方向					Y方向			
	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5	制御点6	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5
3(0.7)	-0.4	-0.6	0.7	0.0	-0.7	0.7	-0.7	-0.7	0.7
8(0.7)	0.3	0.0	0.7	-0.7	0.7	-0.7	-0.2	-0.5	
3(2.1)	-0.3	0.6	-1.8	1.2	2.1	0.9	2.1	-2.1	
8(2.1)	0	-0.9	-1.2	2.1	0	1.2	1.8	0.3	

4 適用例

既存研究で用いた小国町民体育館を参考にしたAモデル、九州国立博物館⁶⁾を参考にしたBモデルを使用し、有効性を検証した。制御点変動幅は、建物の規模を考慮し、Aモデル(±2.1m)、Bモデル(±1.4m)とした。今回、事前学習システムを用いてGA評価をおこなったものをNNGA、既存研究で行った事前学習を使わずにFEM解析を行いGA評価したものをFEMGAと呼ぶ。

4.1 Aモデル概要

Aモデルの概要を図10に、制御点間のライズ比、凹凸を表12に記す。このモデルでは制御点6は左右の曲面と自身の曲面、制御点2,5,7は自身の曲面とy方向中央の曲面を考えコラムスコアの総和を求めて変動方向を予測し(図11、表13)、事前学習データ81個体を生成し、FEM解析を行い相当応力を算定し(表14)NNで学習を行った。NNでの学習結果をもとに相当応力を推定し、合理的形態評価システムを実行した。

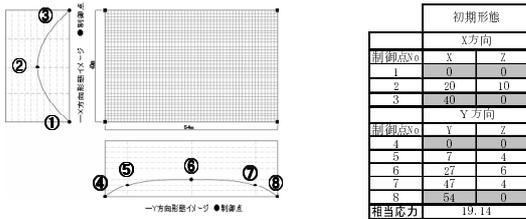


図10. Aモデル概要

表12. Aモデルライズ比、凹凸

Aモデル							
制御点1-3(X)		制御点4-6(Y)		制御点5-7(Y)		制御点6-8(Y)	
ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸
0.25	凸	0.09	凸	0.05	凸	0.09	凸

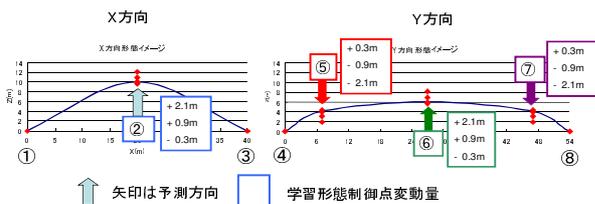


図11. Aモデル制御点変動予測方向

表13. コラムスコアによる予想 (Aモデル)

	コラムスコア		予想変動方向
	Y=1(↑)	Y=2(↓)	
Aモデル			
制御点2(X)	1.74	3.38	↓
制御点5(Y)	1.45	2.57	↓
制御点6(Y)	3.62	3.97	-
制御点7(Y)	1.45	2.57	↓

表14. Aモデル学習データ (一部)

形態NO	学習データ			教師データ	
	制御点2	制御点5	制御点6	制御点7	相当応力
1	0.3(m)	0.3(m)	2.1(m)	0.3(m)	15.57
11	0.3(m)	-0.9(m)	2.1(m)	-0.9(m)	5.25
21	0.3(m)	-2.1(m)	2.1(m)	-2.1(m)	17.16
31	-0.9(m)	0.3(m)	0(m)	0.3(m)	19.72
41	-0.9(m)	-0.9(m)	0(m)	-0.9(m)	14.42
51	-0.9(m)	-2.1(m)	0(m)	-2.1(m)	5.60
61	-2.1(m)	0.3(m)	-2.1(m)	0.3(m)	20.53
71	-2.1(m)	-0.9(m)	-2.1(m)	-0.9(m)	18.55
81	-2.1(m)	-2.1(m)	-2.1(m)	-2.1(m)	13.47

4.1.1 考察 (Aモデル)

- 1) NNGA と FEMGA の形態を比較すると、各制御点 0.3m 程度の違いしかなくほぼおなじ形態をとっている。(表15、図12)
- 2) 図13よりNNGAは、FEMGA同様、約80%相当応力を減少していることがわかる。コラムスコアにより制御点変動方向を予測し、学習形態を予測することにより、計算時間を約93%減少させ、且つ、力学的合理性の高い形態を創生することができた。

4.2 Bモデル概要

Bモデルの概要を図14に、制御点間のライズ比、凹凸を表16に記す。このモデルは一方形状態なので、奥行き方向のコラムスコアを0として計算した。コラムスコアの総和より変動方向を予測し(表17、図15)、事前学習データ81個体を生成し、FEM解析を行い相当応力を算定し(表18)NNでの学習を行った。NNでの学習結果をもとに相当応力を推定し合理的形態評価システムを実行した。

表15. Aモデルにおける制御点変動量比較 (FEMGA, NNGA)

制御点NO	制御点Z方向位置		差異(絶対値)
	FEMGA	NNGA	
2	1.8(m)	2.1(m)	0.3(m)
5	-2.1(m)	-2.1(m)	0(m)
6	-0.3(m)	0(m)	0.3(m)
7	-2.1(m)	-2.1(m)	0(m)

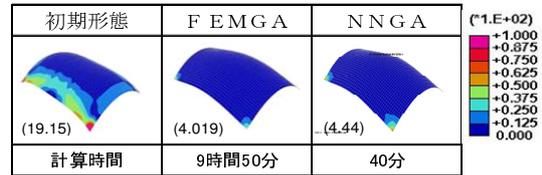


図12. Aモデル各種コンター図

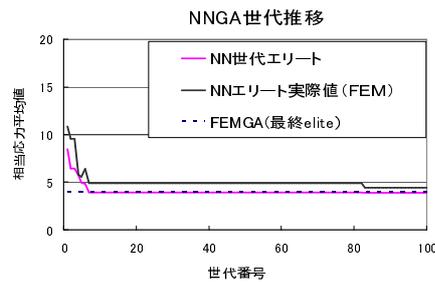


図13. AモデルNNGA相当応力世代推移

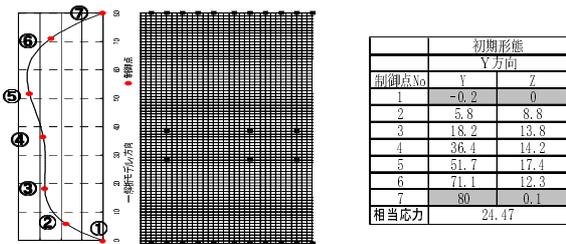


図14. Bモデル概要

4.2.1 考察 (Bモデル)

- 1) NNGA と FEMGA を比較すると、制御点3がNNGAではFEMGAより上側に0.6m上がるが、他の制御点では±0.2m程度の違いしかなく、2つの形態はほぼおなじ形態となった。(表19、図16)
- 2) 図17より、NNGAでは、FEMGAで創生される形態よりわずかに相当応力は大きい、初期形態と比較して約40%減少していることがわかる。コラムスコアにより制御点変動方向を予測し、学習形態を予測することにより、計算時間を約94%減少させ、且つ、力学的合理性の高い形態を創生することができた。

表 16. Bモデルライズ比、凹凸

Bモデル							
制御点1-3(Y)		制御点2-4(Y)		制御点3-5(Y)		制御点4-5(Y)	
ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸	ライズ比	凹凸
0.16	凸	0.1	凸	0.05	凹	0.14	凸
						0.19	凸

表 17. コラムスコアによる予測 (Bモデル)

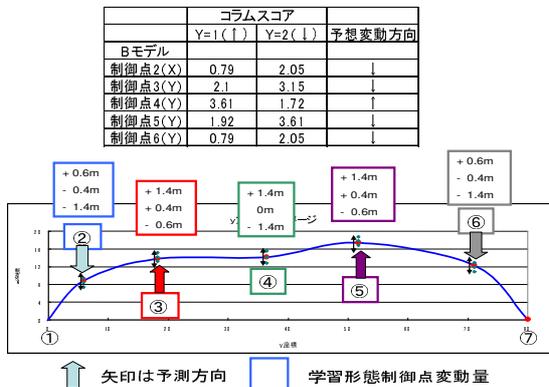


図 15. Bモデル制御点変動予測方向

表 18. Bモデル学習データ

形態NO	学習データ					教師データ 相当応力
	制御点2	制御点3	制御点4	制御点5	制御点6	
1	0.2(m)	0.2(m)	1.4(m)	0.2(m)	0.2(m)	31.89
11	0.2(m)	-0.6(m)	1.4(m)	-0.6(m)	-0.6(m)	39.51
21	0.2(m)	-1.4(m)	1.4(m)	-1.4(m)	-1.4(m)	45.74
31	-0.6(m)	0.2(m)	0.6(m)	0.2(m)	-0.6(m)	20.84
41	-0.6(m)	-0.6(m)	0.6(m)	-0.6(m)	-1.4(m)	25.15
51	-0.6(m)	-1.4(m)	0.6(m)	-1.4(m)	0.2(m)	46.07
61	-1.4(m)	0.2(m)	-0.2(m)	0.2(m)	-1.4(m)	17.16
71	-1.4(m)	-0.6(m)	-0.2(m)	-0.6(m)	0.2(m)	26.62
81	-1.4(m)	-1.4(m)	-0.2(m)	-1.4(m)	-0.6(m)	33.04

表 19. Bモデルにおける制御点変動量比較 (FEMGA、NNGA)

制御点NO	制御点Z方向位置		差異(絶対値)
	FEMGA	NNGA	
2	-1.4(m)	-1.4(m)	0(m)
3	0.2(m)	0.8(m)	0.6(m)
4	1.2(m)	1.4(m)	0.2(m)
5	1.0(m)	1.2(m)	0.2(m)
6	-1.4(m)	-1.4(m)	0(m)

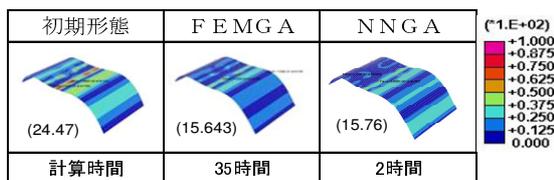


図 16. Bモデル各種コンター図

5 結論

- 1) ラフ集合で形態分析と変動方向との関係を予測することができた。また、複雑な形態でも全体的に一つの曲面に近付くことで力学的合理性が高まる傾向をもっていると思われる。
- 2) ニューラルネットワークで事前学習を行うことにより、計算時間が90%減少し、実用的時間内に形態創生を行うことが可能となり、本システムの有効性が示された。今後の課題を以下に示す。
 - 1) コラムスコアによる予想が実際の移動方向と一致しない制御点も存在した。形態分析に用いたデータ数が40個と少なかったためと考えられる。あらゆる形態に対応できるようにデータを追加して、コラムスコアの推定精度を改善していく必要がある。
 - 2) 本システムでは長方形を対象に形態分析を行い、事前学習システムを適用したが、実際は長方形だけではない。他の形態に対しても事前学習システムが有効であるかを検討する必要がある。

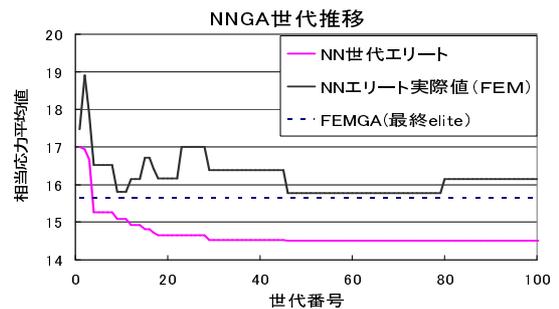


図 17. BモデルGA相当応力世代推移

参考文献

- [1] 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: 計算工学シリーズ4 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, コロナ社, 2004.7
- [2] 堤和敏, 熊川恵里子: 開口を持つ大スパン屋根の形態創生に関する研究 ~開口有無と応力変化・形態変化(その1, その2)~, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) pp819-822, 2009.8
- [3] 北村悠介, 堤和敏: 設計者のイメージを満足し、力学的合理性の高い形態創生法の研究~実験計画法とニューラルネットワークを用いた効率化の提案~, コロナキウム構造形態の解析と創生 2009, pp99-104, 2009.10
- [4] 新建築 1988年8月号, 新建築社
- [5] 森典彦, 田中秀雄, 井上勝雄: ラフ集合と感性, KAIBUNDO
- [6] 建築技術四月号・第六五号, pp161, 2004.4

形状・厚さ・位相の同時決定による自由曲面シェル構造の形態創生に関する研究

早田 寛¹⁾, 前根 文子²⁾, 大森 博司³⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, hayata@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, maene@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

3)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序論

シェルの力学的に理想的な形態を求める研究は20世紀前半から盛んに行われているが, シェル構造物のような不定型な自由曲面構造物の力学挙動は複雑で, 直感的に評価することは困難を極める。しかし, 近年のコンピュータの急速な性能向上や, 施工・材料技術の進歩により複雑で不定型な構造物が実現しつつあり, それとともに, 初期形状に対してコンピュータによる形態解析を用いて力学的に形状修正を加えることで, 理論的形態デザインに基づいた厳密な力学的根拠を持つ自由曲面のシェル構造を形成する構造形態創生手法が求められている。

文献1)では, 曲面構造固有の力学性状である変形性状と安定性に対し, 力学的に合理性のある曲面構造の形状と厚み分布を求める自由曲面シェル構造の構造形態創生手法を提案し, さらに, 開口(位相)についても同時最適化を行えるまでに至っている。また文献2)では, 文献1)の理論を実構造物に適用し, その有効性を確認しており, その実用性も確かなものになりつつある。

しかし, 文献1), 文献2)において, 初期形状の時点で開口を有した自由曲面シェルの形態の最適化は行われていない。もし, 設計者の意図により開口部を設けたいとなれば, 開口部がない場合と比較して力学的に合理性を持つ形態の特徴は異なると想定され, 加えて, 開口部にトップライトを作りたいとなれば, 開口部周辺にガラスやフレームの重量による力が掛かり, これもまた最適な形態を求めるとすれば大きな影響を与えられ。そのため, これらのような場合の最適化過程の挙動を把握しておくことは設計者のニーズに応えるために有効であると考えられる。

そこで, 本研究では, 文献2)で提案された理論を基に, 設計段階に生じる形態に関するニーズを想定した自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案を目指している。

2 厚み分布の定式化

本論文では外力として自重と鉛直等分布荷重を受ける曲面構造物を設計対象とし, 応力算定を有限要素法による線形静的解析により行い, 変断面を有する自由曲面シェル構造の構造形態を求める。有限要素として, シェル厚を一定と仮定する通常の三角形平面シェル要素(図1(a))を採用した場合, 滑らかな厚み分布を求めるためには細かい要素分割が必要となり, 計算量が増大する可能性が考えられる。本論文では有限要素に関連する3つ節点の位置におけるシェル厚から線形補間により要素内任意の位置におけるシェル厚を表し, 曲面構造の厚み分布を節点単位で離散化し, スプライン関数の応用であるNURBSにより厚み分布を表現する。まず, 本節では厚み分布の離散化方法について記述する。

要素内任意の位置におけるシェル厚 $h_{\xi}(x, y)$ を定係数 $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ を用いて3つ節点の位置におけるシェル厚から線形補間により表すと, 以下のように書ける。

$$h_{\xi}(x, y) = \alpha_1 + \alpha_2 h_{xi} + \alpha_3 h_{yi} \quad (1)$$

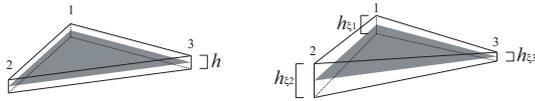
ここに下添え字1~3は三角形要素の頂点の3つの節点の番号を, h_{xi}, h_{yi} は各節点の要素座標系における x, y 座標を, $h_{\xi i}$ は各節点の位置におけるシェル厚の値を表す。

各節点の位置における厚み分布を $h_i = (h_{xi}, h_{yi}, h_{\xi i})$ ($i = 1, 2, 3$)と表すと, 三角形の頂点では以下の関係が成立する。

$$\begin{aligned} h_{\xi 1} &= \alpha_1 + \alpha_2 h_{x1} + \alpha_3 h_{y1} \\ h_{\xi 2} &= \alpha_1 + \alpha_2 h_{x2} + \alpha_3 h_{y2} \\ h_{\xi 3} &= \alpha_1 + \alpha_2 h_{x3} + \alpha_3 h_{y3} \end{aligned} \quad (2)$$

上式を $\alpha_1 \alpha_2 \alpha_3$ について解き, 式(1)に代入し, 要素内任意の点におけるシェル厚を求めることができる。以後, n 個の節点で離散化された曲面構造の厚み分布を表すベクトル(以後, 厚み分布ベクトルと呼ぶ)を $h_i = [h_{xi} \ h_{yi} \ h_{\xi i}]^T$ ($i = 1, \dots, n$)と表す。ここで $h_{xi} \ h_{yi}$ は

全体座標系における各節点の x, y 座標を, h_{ξ_i} は各節点におけるシェル厚の値を表す。



(a) 従来の三角形要素 (b) 本論文での三角形要素

図1 三角形要素

3 設計問題の定式化

本手法では, 形状と厚さ, 位相の同時決定問題を, ひずみエネルギーの最小化を目標とした, 厚み分布の上下限值とシェル総体積の増減量に制約を有する最適化問題として取り扱う。本問題は制御点座標決定ベクトル ϕ と厚み分布に関するNURBS制御点 q_h をまとめて設計変数ベクトル $w = [\phi^\top, q_h^\top]^\top \in R^{6N}$ として表すと, 次のように書くことができる。

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & f(w) = \frac{1}{2} d^\top(w) K(w) d(w) \\ & Lw \leq h^u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{subject to} \quad & h \in \Omega \quad \Omega = \{h \mid \varepsilon \leq h\} \\ & \Delta V^l \leq \Delta V(w) \leq \Delta V^u \end{aligned}$$

ここに, $L = [0 \ B] \in R^{3n \times 6N}$, B は制御点座標と節点座標を関連づける係数マトリクス, $d \in R^{6n}$ は節点変位ベクトル, $K \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクスを表し, h^u, ε はそれぞれ厚み分布の上限値と下限値(削除基準値)を表す。また $\Delta V(w)$ はシェル総体積の増分量を, $\Delta V^u, \Delta V^l$ はそれぞれ総体積の増加量と減少量の最大値を表す。本問題の解法には逐次二次計画法を採用する。

4 構造形態創生手法の流れ

本論文で扱う, 形状及び厚み分布の同時決定による自由曲面シェル構造の構造形態創生手法は, 非線形計画問題を逐次二次計画法により解くものである。

逐次二次計画法は反復点近傍において目的関数を二次近似, 制約条件を線形近似して得られる二次計画問題を, 逐次, 反復点において解きながら, 求める解に収束させる最適化手法である。また, 本論文では, 二次計画問題の解法として主双対内点法の理論に基づくMehrotraの予測子・修正子法を採用する。これにより, 効率よく解を求めることが可能となる。

構造形態創生手法のアルゴリズムは以下のようになる。

Step 1 所与の設計条件に応じて曲面形状のイメージ(原曲面), 材料定数を定める。

Step 2 原曲面の曲面形状と厚み分布をNURBSにより表現する。

Step 3 初期点として $\phi^1 = 0$ と原曲面の厚み分布を採用する。 $k=1$ とおく。

Step 4 k 回目の反復点 w^k における二次計画問題

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & \nabla_w f(w^k)^\top \delta_w^k + \frac{1}{2} \delta_w^{k\top} Q^k \delta_w^k \\ \text{subject to} \quad & c(w^k) + \nabla_w c(w^k)^\top \delta_w^k \leq 0 \end{aligned}$$

をMehrotraの予測子・修正子法により解き, 最適解 $\delta_w^k \in R^{6N}$ と対応するラグランジュ乗数 $u^k \in R^{2n+2}$ を求める。ここで $Q^k \in R^{6N \times 6N}$ はヘシアン近似行列を, $\nabla_w f(w^k) \in R^{6N}$ は設計変数 w に関する目的関数の勾配ベクトルを, $\nabla_w c(w^k) \in R^{6N \times 2n+2}$ は各不等式制約条件の設計変数 w に関する勾配ベクトルを集めたマトリクス表す。

Step 5 $w^{k+1} = w^k + \delta_w^k$ とおく。

Step 6 現在の点 w^{k+1} において停止基準を満たせば終了。そうでなければBFGS更新公式を用いてヘシアン近似行列 Q^k を Q^{k+1} に更新し, $k = k + 1$ としてStep 4に戻る。

停止基準としては次の(1)から(3)の3つの基準のうち, いずれかが満たされた場合としている。

(1) 反復段階における最適性条件の残差ベクトルノルムと目的関数の勾配ベクトルのノルムの比がある許容値 ε より小さいとき, すなわち

$$\frac{\|\nabla_w f(w^k) + Q^k \delta^k + \nabla_w c(w^k) \lambda^k\|}{\|\nabla_w f(w^k) + Q^k \delta_w^k\|} < \varepsilon$$

のときに終了する。本研究では $\varepsilon = 1.0 \times 10^{-4}$ としている。

(2) 目的関数の変化量がある許容値 η より小さいとき, すなわち

$$\frac{|f(w^{k+1}) - f(w^k)|}{|f(w^k)|} < \eta$$

という条件が指定回数満たされたとき終了する。本研究では $\eta = 1.0 \times 10^{-4}$, 目的関数値がある一

定の値に収斂したときを反復終了と判断するため指定数を3としている。

(3) 各反復点における修正量のノルムがある許容値\zetaより小さいとき、すなわち

$$\|\delta_w^k\| < \zeta$$

のときに終了する。本研究では\zeta = 1.0 \times 10^{-8}としている。

5 位相決定のアルゴリズム

ここで述べる位相決定のアルゴリズムは二段階の手順をとる。第一段階(予測子ステップとよぶ)では最適化過程のシェル厚とあらかじめ設定した指定値を基に設計領域の削除・付加を、第二段階(修正子ステップとよぶ)では設計問題の制約条件を満たすよう厚み分布に関して補正を行うものである。ここでは、最適化過程における位相決定のアルゴリズムについて説明する。以下、位相決定手法のアルゴリズムを示す。

今第*k*回目の反復計算が終了し、削除基準値を超える節点が現れたとする。

Step 0 (反復計算前):参照領域を構成するパラメトリック平面の\hat{s} - \hat{t}座標を定める。

Step 1 参照領域の\hat{s} - \hat{t}座標を用いて厚み分布を表現し、削除基準値を満たさない節点を調べる。そのような節点の総数を\tilde{n}とする。

Step 2 削除基準値を満たさない節点 *j* に関連する要素を探す。(関連する要素数を \tilde{n}_e とする)

Step 3.1 要素 *j* を構成する 3 つの節点において削除基準値を満たさない節点を探す。

Step 3.2 (削除基準値を満たさない節点が 2 つの時) 板厚に関して二分法を行い 2 つの新しい節点を作成する。二分法により得られた新しい節点 2 つと残りの節点1つで新しい要素を作成する。

(削除基準値を満たさない節点が 1 つの時)

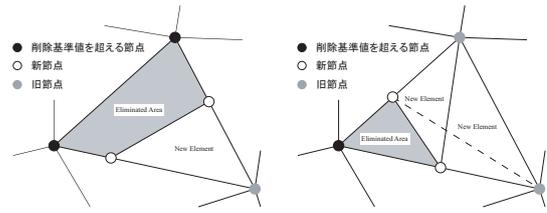
削除基準値を満たさない節点が2つある場合と同様に二分法を行って1つの新しい節点を作成する。二分法により得られた新しい2つの節点と残りの2つの節点で2つの新しい要素を作成する。

(削除基準値を満たさない節点が 3 つの時)

要素を削除する。

Step 3.3 $j = \tilde{n}_e$ なら Step 4 へ、そうでなければ $j = j + 1$ として Step 3.1 へ戻る。

Step 4 $i = \tilde{n}$ ならば終了、そうでなければ Step 1 に戻る。



(a) 基準値を満たさない節点が2つの時 (b) 1つの時

図2 削除基準値を満たさない節点に関する場合分け

6 数値解析例1

初期形状の段階で開口部を有したモデルの厚み・形状及び位相の同時最適化の結果を示す。

6.1 解析概要

解析モデルは、半径14.142mの円形平面を有し、頂部に半径6mの円形の開口のある、点支持された曲率半径20mの球形シェルとする。厚み分布に関するNURBS制御点は全部で49個配置する(図3(b))。厚み分布に関するNURBS制御点を設計変数とする。応力算定は有限要素法による線形静的解析により行う。有限要素は三角形平面シェル要素を用いる。対称性を考慮して1/4の部分解析対象とし、要素分割は119要素とする。外力は単位体積重量24kN/m³として自重を、積雪荷重として1kN/m²を作用させる。ヤング率を21GPa、ポアソン比を0.17とする。初期シェル厚は一様に0.1mとする。なお、図3(c)に $f(w)$ として示した値は原曲面のひずみエネルギーを表す。

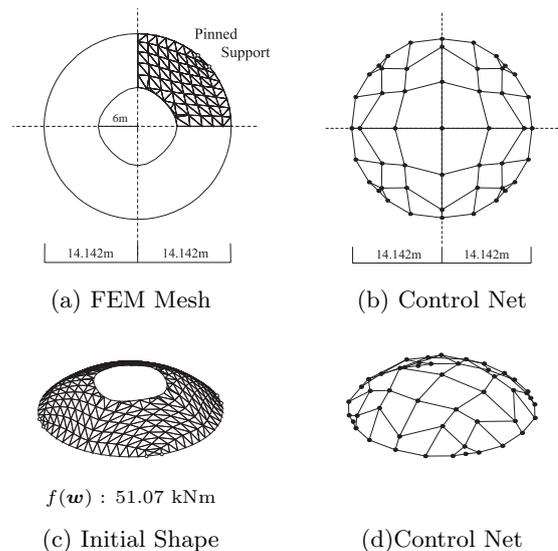


図3 解析モデル

6.2 解析結果と考察

シェル厚の上限値を0.120m, 削除基準値を0.03m, 総体積の増減量の最大値をそれぞれ原曲面総体積の0.1%と設定した場合の解析結果を示す。最適解曲面のシェル形状と厚み分布性状を図4に示す。図中に $f(w)$ として示した値は目的関数であるひずみエネルギーの値を, $h_u \cdot h_l$ はそれぞれシェル厚の最大値・最小値を表す。厚み分布はシェル全領域について, 平面図を用いて示しており, 図中の等高線で示す厚み分布の値は, 全ステップのシェル厚の最大値と最小値の間を30分割して決定している。また図中の等高線は初期シェル厚(0.1m)より薄い場合には灰色の実線で, 厚い場合には黒の実線で表している。最適化過程において, 形態の進化がわかるようにStepを選択したものを図5に示す。原曲面及び最適解曲面のシェル中立面における膜応力及び曲げモーメントによる縁応力に関する主応力図を図6に示す。各図において, 実線, 点線はそれぞれ各要素図心における圧縮応力, 引張応力を表し, 線の長さは主応力の大きさを示す。図中 σ^t として示した値は各要素図心における引張応力のうちで最大の値を, σ^c として示した値は各要素図心における圧縮応力のうちで最大の値を表し, σ^b は曲げ応力において各要素図心の縁応力の絶対値のうちで最大の値を表している。また, 図中に w として示した値は最大鉛直方向変位を表す。目的関数であるひずみエネルギーの推移を図7に示す。横軸はステップ数を, 縦軸はひずみエネルギーを表す。最大主応力・最大鉛直変位の推移を図8に示す。横軸はステップ数を, 左側の縦軸は最大主応力を, 右側の縦軸は鉛直方向節点変位の最大値を表す。

原曲面(図3)と最適解曲面の形状(図4)を比較すると, 最適化過程で開口が大きく広がるが最終的にほぼ同じ規模の開口を保っている。また, 拘束していない外周部分が上昇し, 全体的にもサイズが上昇している。最適解曲面の厚み分布を見ると, 開口部周辺で薄く, 支持部近傍で厚くなるように変化する様子が確認できる。

原曲面及び最適解曲面の主応力図(図6)を比較すると, 最適解曲面では主応力がすべて小さくなっている。さらに原曲面においては支持部, 自由端付近に大きな曲げ応力が生じているが, 最適解曲面では小さくなり, 力の伝達方式として最も効率の悪いとされる曲げが働くことを抑制していることが確認できる。また, 圧縮応力がシェル全面で生じ, シェル頂部近傍から支持点

に向かった明快な力の流れに変化していることが確認できる。

ひずみエネルギーの推移を示す図7と各種力学量の推移を示す図8を見ると解析ステップが進むにつれてともに大きく減少していることが確認できる。ただし, このひずみエネルギーの低減の過程ではStep73付近において, 各種力学量ではStep37とStep73付近において急激に上昇していることが見受けられる。この原因として考えられるのは位相最適化によって, 要素の削除が行われたことによる曲げ応力や引張応力の発生である。Step73付近の方が上昇率が高いのは, 要素の削除される箇所の違いが原因であると考えられる。Step37付近では図5(b)のように中央の開口部が徐々に広がるようになり, Step73付近では図5(c)のように連続している部分に開口が現れるという違いがある。

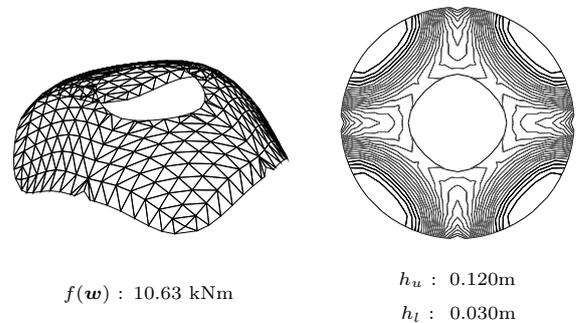


図4 最適解曲面のシェル形状と厚み分布性状

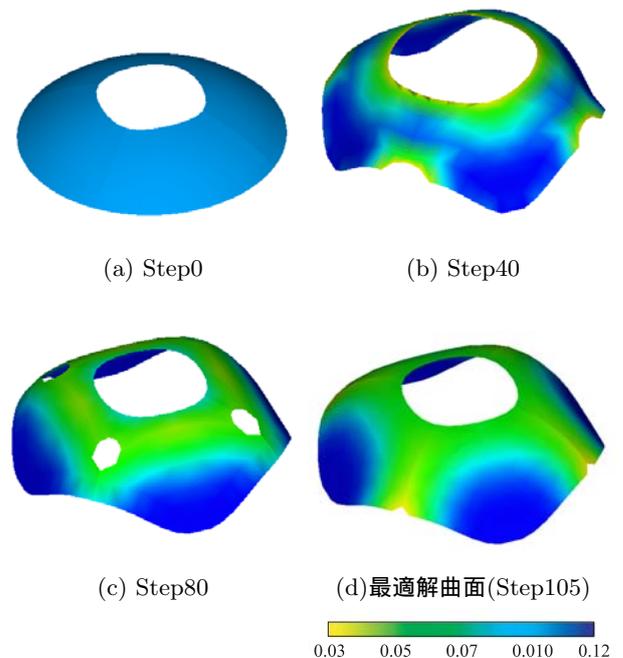
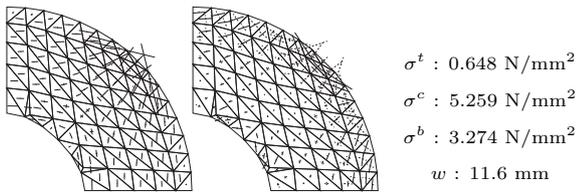
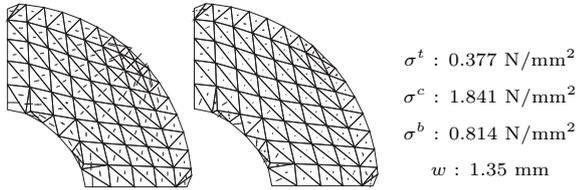


図5 最適化進化過程



a) 原曲面の主応力図(左:膜応力 右:曲げ応力)



b) 最適解曲面の主応力図(左:膜応力 右:曲げ応力)

図6 原曲面と最適解曲面の主応力図

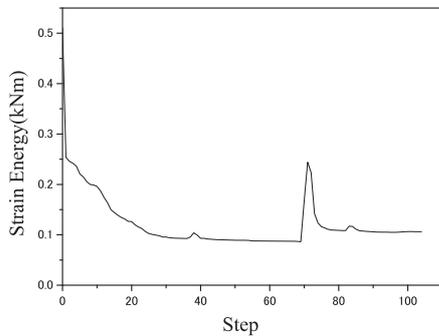


図7 目的関数の推移

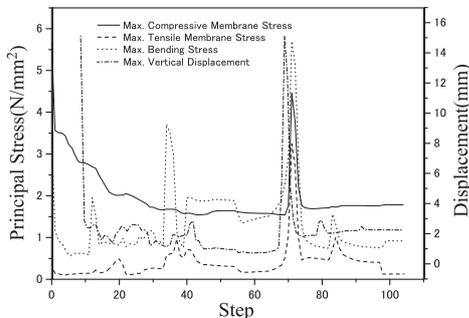


図8 各種力学量の推移

7 数値解析例2

開口部にトップライトの部材等を想定し、開口部周辺に集中荷重を掛けた場合の厚み・形状及び位相の同時最適化の結果を示す。

7.1 解析概要

解析モデルは、基本的に数値解析例1で用いたモデルと同じものとする。異なる点は、開口部を形成する各節点にそれぞれ8kNの集中荷重を掛けている。解析モデルを図9に示す。対称性を考慮して1/4の部分を解析対象とし、要素分割は119要素とする。外力は単位体積

重量 24kN/m^3 として自重を、積雪荷重として 1kN/m^2 を作用させる。ヤング率を 21GPa 、ポアソン比を 0.17 とする。初期シェル厚は一様に 0.1m とする。なお、初期形状のひずみエネルギーは $f(w) = 62.4\text{kN/m}$ である。

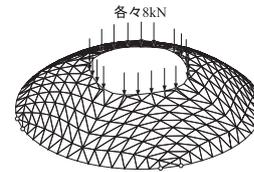


図9 解析モデル

7.2 解析結果と考察

シェル厚の上限値を 0.120m 、削除基準値を 0.03m 、総体積の増減量の最大値をそれぞれ原曲面総体積の 0.1% と設定した場合の解析結果を示す。ここで使用する諸記号の意味は数値解析例1で示したものと同一である。最適解曲面のシェル形状と厚み分布性状を図10に示す。また、最適化進化過程がわかるように選択したした形状・厚み分布図を図11に示す。原曲面及び最適解曲面のシェル中立面における膜応力及び曲げモーメントによる縁応力に関する主応力図を図12に示す。目的関数であるひずみエネルギーの推移を図13に示す。横軸はステップ数を、縦軸はひずみエネルギーを表す。最大主応力・最大鉛直変位の推移を図14に示す。横軸はステップ数を、左側の縦軸は最大主応力を、右側の縦軸は鉛直方向節点変位の最大値を表す。

原曲面(図3)と最適解曲面の形状(図10)及び最適化進化過程(図11)を比較すると、最適解曲面では、全体的なサイズがほとんど上昇せず、開口部の大きさにほぼ変化がないことが確認できる。最適解曲面の厚み分布を見ると、支持部近傍が最も厚くなり、開口部周辺で局部的に厚くなっていることがわかる。

原曲面及び最適解曲面の主応力図(図12)を比較すると、最適解曲面では主応力がすべて小さくなっている。さらに原曲面においては支持部、自由端付近に大きな曲げ応力が生じているが、最適解曲面では小さくなり、力の伝達方式として最も効率の悪いとされる曲げが働くことを抑制していることが確認できる。また、圧縮応力がシェル全面で生じ、シェル頂部近傍から支持点に向かった明快な力の流れに変化していることが確認できる。

ひずみエネルギーの推移を示す図13を見ると解析ステップが進むにつれて大きく減少していることが確認

できる。図14では、ひずみエネルギーに大きな影響は与えていないが、Step16付近で変位が大きく上昇している。この原因は自由端の切り欠きが大きくなり、つまりは要素の削除が行われ、その時厚み分布の変化によるものと考えられる。

数値解析例1の結果と大きく異なる点は、自由端の切り欠きの大きさと厚み分布であるといえる。前者のような結果になったのは、集中荷重によって生まれる大きな応力を直接的に支持部に流れていることのためであり。それは図4と図10の厚み分布図を比較すれば明らかである。後者の厚み分布が異なる理由は、集中荷重に抵抗するために開口部周辺が厚みを増したからである。集中荷重の掛かっていない数値解析例1では支持部近傍のみ厚くなっている。これらのことより、最終的に求められた形態は大きく異なるものとなった。

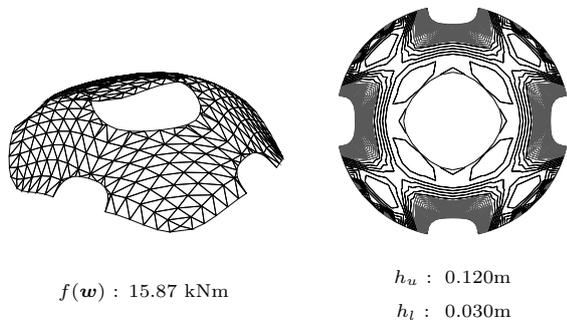


図10 最適解曲面のシェル形状と厚み分布性状

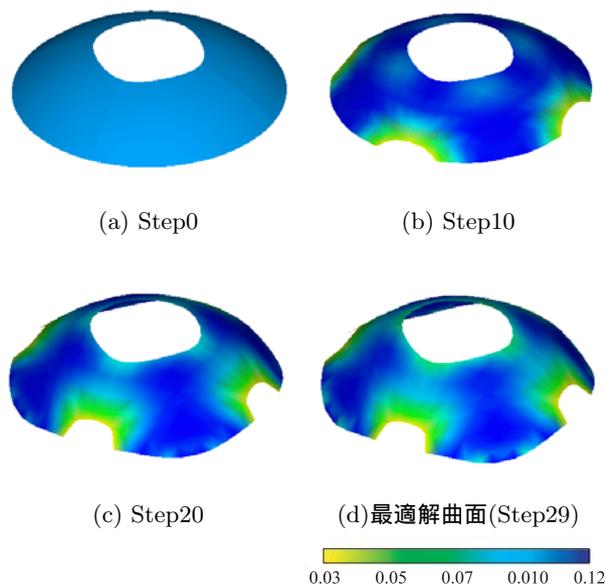
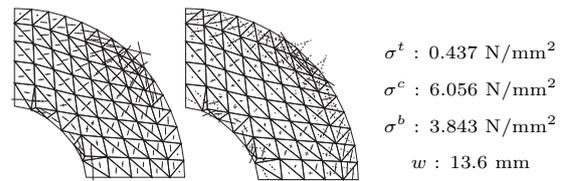
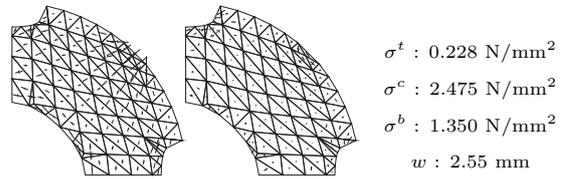


図11 最適化進化過程



a) 原曲面の主応力図(左:膜応力 右:曲げ応力)



b) 最適解曲面の主応力図(左:膜応力 右:曲げ応力)

図12 原曲面と最適解曲面の主応力図

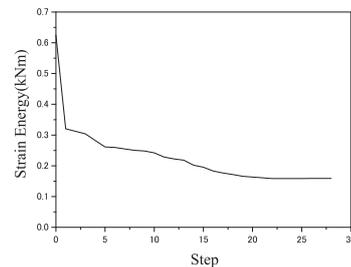


図13 目的関数の推移

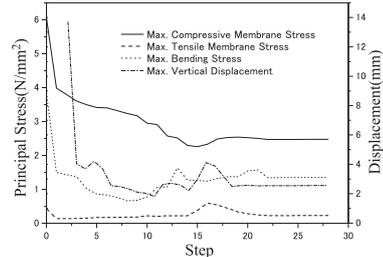


図14 各種力学量の推移

8 結語

本論文では、簡単なモデルを用いて開口を有した自由曲面シェルと、同モデルの開口部周辺に荷重を掛けた場合の最適化形態を示した。結果より、初期条件によって力学的に合理性を持つ形態は大きくことなることが分かった。今後は福岡県に存在する実構造物「ぐりりんぐりん」のような、複雑な形状を持ち、トップライトを有した自由曲面シェルに本手法を適用した場合、実際の形態とどのように異なるのか検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 木村俊明：形状と厚さの同時最適化法の定式化とその応用-自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案(その1)、日本建築学会構造系論文集, pp.1091-1098, 2009.06
- 2) 前根文子：形状・厚さ・位相の同時最適化による自由曲面シェル構造の形態創生に関する研究, コロキウム構造形態の解析と創生2009
- 3) 佐々木睦朗：フラックス・ストラクチャー, TOTO出版, pp.122-133, 2005.6

解の多様性を考慮した GA 系解法による非対称曲面シェルの多目的最適化

和田大典¹⁾, 本間俊雄²⁾

1) 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生 wada@com.aae.kagoshima-u.ac.jp

2) 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 工博・教授 honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

自由曲面シェル構造の形態決定は、力学的な指標を目的関数とする構造最適化問題に帰着され、応力分布やコンプライアンス、ひずみエネルギーを目的関数とする研究がある¹⁾³⁾。これらの既往研究で扱われている構造最適化は、いずれも目的関数空間内での解の評価に重点を置いたものである。これに対し、本研究は解の多様性という観点から、与えられた設計変数空間内で設計条件を満たす複数の解を探索する方法を自由曲面シェル構造の構造最適化に導入する。

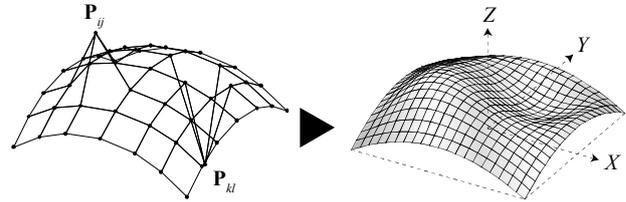
著者らは、形態決定に関する構造最適化の解析に、生物集団の進化の過程を工学的に模倣した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm:GA)⁴⁾ 系解法 ISGA (GA with immune system) を提案している⁵⁾。ISGAは従来の既往解法と異なり、大域的最適解(パレート最適解)や局所最適解(局所パレート最適解)を含む比較的評価の高い解(優良解:decent solution)が獲得でき、かつ目的関数空間と設計変数空間の多様性を同時に維持した解が探索できる。したがって、このような優良解の利用は同一条件で複数の構造形状が提示でき、設計者の形態発想支援につながると考える。

本論では、パラメトリック曲面の一つである有理テンソル積ベジェ曲面⁶⁾によって離散化された自由曲面シェル構造の構造形態最適化にISGAを適用し、感性的な条件を考慮した構造形状の獲得の可能性を確認する。数値計算例では形状の凹凸に関する非対称制約条件を与えたRCシェルの多目的最適化(multi-objective optimization)を行う。なお、非対称制約はパラメトリック曲面の制御点高さを条件⁷⁾とする。

2. 非対称制約条件の定式化

2.1 有理テンソル積ベジェ曲面

ここで扱う設計変数は、有限要素の制御点座標値とする。その際、設計変数の削減と滑らかな曲面表現のために有理テンソル積ベジェ曲面を用いた制御点による曲面の離散化を行う。有理テンソル積ベジェ曲面は複数の制御点と基底関数で定義される。曲面上に $m \times n$ 配置された有限要素の任意の位置ベクトルを $\mathbf{r}_k(x, y) = [r_x(u_k, v_j), r_y(u_k, v_j), r_z(u_k, v_j)]^T(u_k, v_j; [0.0, 1.0], k$



a. 制御点 b. 有限要素

図1 凹凸形状イメージ

$= 1, 2, 3, \dots, m, l = 1, 2, 3, \dots, n)$ とすると、この位置ベクトルは曲面形状を決定する $m'+1 \times n'+1$ 配置された制御点 $\mathbf{P}_{ij} = [x p_{ij}, y p_{ij}, z p_{ij}]$ より次式で表現される。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u) B_j^{n'}(v) \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u) B_j^{n'}(v)} \quad (1a, b)$$

$$B_i^{m'}(u) = \frac{m!}{i!(m-i)!} u^i (1-u)^{m-i} \quad (\text{バーンスタイン基底関数})$$

ここで、 $B_i^{m'}(u)$: m' 次のバーンスタイン基底関数, w_{ij} : 制御点の重み係数である。

以上より、有理テンソル積ベジェ曲面の制御点を設計変数とした曲面構造の最適化問題を解く。

2.2 高さ制約条件

凹凸形状を表現する方法は制御点高さ制約条件とする。図1に制御点高さ制約による凹凸形状イメージを示す。発見的手法であるGAは側面制約条件が形状表現に大きく関係する。特に、制御点を設計変数とする場合、その特性の一つである凸包性(表現される曲面形状が制御点と重ならない)より複雑な曲面形状が得にくい場合がある。したがって、ここでは高さ制約条件を側面制約の外側に与えることで凹凸形状を制御する。つまり、制御点の高さ方向に関して制約値を側面制約の上限値以上とすれば上に凸、下限値以下とすれば下に凸となる。制御点のZ軸座標を $z p_{ij}$ とすれば高さ制約条件は次式で表現される。

$$z p_{ij} = h \quad i = 0, 1, \dots, m' \quad j = 0, 1, \dots, n' \quad (2)$$

ここで、 h : 高さ制約値である。この他、制御点に重み

制約を課すことで凹凸形状を制御することが可能だが、高さ制約も同時に与える必要がある。

3. 解の多様性を考慮したGA系解法ISGA

本GA系解法は従来のGAの計算パラメータの他に、グループ数 r と上位個体選択率 H 、記憶細胞数 M の設定を行う。グループ数 r は設計変数空間の解状況、上個体選択率 H は個体の評価の上限値に関する。記憶細胞数 M は上位個体を記憶する上限値であり、解の収束性とニッチ操作の個体間距離に関する。本解法は問題毎にこれらの設定値を変えることで、解空間特性を把握した優良解探索が可能となる。さらに、既往の解法の殆どが目的関数空間上でニッチ操作を行っているのに対し、本解法は設計変数空間上で行う。これは目的関数空間上の一点における設計変数空間上の複数の解の選択を可能にするためである。ただし、遺伝子長が長く設計変数が複数存在する場合、設計変数空間上でのニッチ操作は解の収束の遅延や真のパレートフロントを追えない可能性がある。その際は、記憶細胞内にある個体の除去率を設定し、記憶細胞内の解の更新を行うことで改善する。なお、今回の解析例は一定率による個体の除去は行わないが、必要であれば記憶細胞内の強度計算による下位個体の除去で優良解のみ選択することが可能である。詳細なアルゴリズムは文献5), 8)を参照されたい。

4. 非対称曲面シェルの構造形態創生

形態創生例として、一辺が $20m$ の正方形平面を有する自由曲面シェルの多目的最適化を行う。解析モデルの初期形状は図2a, bに示す隅角部ピン支持の平板シェル(Model-A:節点数441, 要素数400)である。解析領域と有理テンソル積ベジェ曲面による制御点の配置は図2cとする。また、本解析はまず形状最適化による解探索の性状を把握するため、板厚は $t = 0.15[m]$ で全要素一様とする。

4.1 多目的最適化問題の定式化(1)

多目的最適化問題は総ひずみエネルギーと総体積の同時最小化を設定する。定式化は次式で与える。

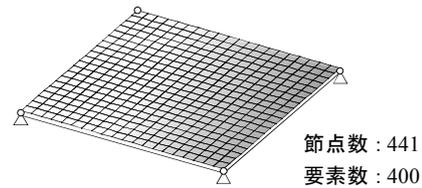
$$\text{Minimize } f_1(\mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (\text{総ひずみエネルギー}) \quad (3)$$

$$f_2(\mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})^T \mathbf{A} \quad (\text{総体積}) \quad (4)$$

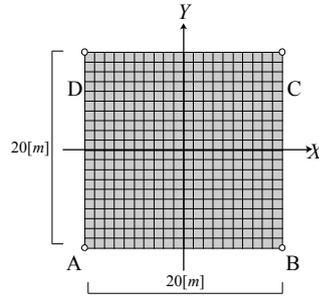
$$\text{subject to } \sigma^L \leq \sigma_i(\mathbf{R}) \leq \sigma^U \quad (\text{応力制約条件}) \quad (5)$$

$${}_z p_{ij} = h \quad (\text{高さ制約条件}) \quad (6)$$

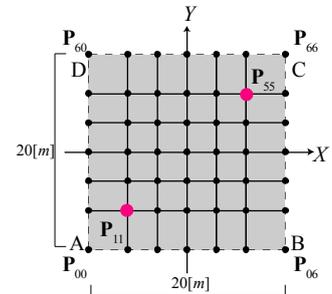
$$\mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (\text{側面制約条件}) \quad (7)$$



a. 初期形状(鳥瞰図)



b. 初期形状(平面図)



c. 制御点(7×7)

図2 解析モデル Model-A

表1 ISGAパラメータ Model-A

個体数	200	突然変異率	0.001
世代数	10000	記憶細胞数	100
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉

ここで、 \mathbf{R} : 節点情報ベクトル, \mathbf{A} : 部材情報ベクトル, \mathbf{d} : 節点変位ベクトル, \mathbf{K} : 全体剛性マトリクス, \mathbf{S} : 要素表面積ベクトル, $\mathbf{R}^L=0.0[m]$, $\mathbf{R}^U=7.0[m]$, σ^L : 許容応力度の下限值, σ^U : 許容応力度の上限値を表す。なお、式(4)総体積 $[m^3]$ は単位重量 $24.0[kN/m^3]$ を乗じ、総重量 $[kN]$ として表現する。載荷荷重は長期に自重と等分布荷重 $\omega = 1.0[kN/m^2]$ を設定する。制御点は x, y 座標を固定し z 軸座標のみ設計変数とする。設計変数は $16bit$ の二進数型でコード化する。構造解析は弾性定数 $E=2.1 \times 10^7[kN/m^2]$ 、ポアソン比 0.2 とする。基本的なGAパラメータは表1に示す通りである。高さ制約条件は次節の2ケースに対して計算した。

○数値計算例1 Case-1

制御点高さ制約条件を次式で与える。

$${}_z p_{11} = 20.0[m] \quad (8)$$

式(8)は図2cに示す黒●でプロットした点(\mathbf{P}_{11})が上に凸となる条件である。

解析結果を図3-5に示す。図3はISGA($r=10, H=0.01, 0.05, 0.1$)の試行結果2例(result-1~6)を目的関数空間上にプロットしたものである。ここで、横軸は総ひずみエネルギー、縦軸は総重量を表わす。図4は $r=10, H=$

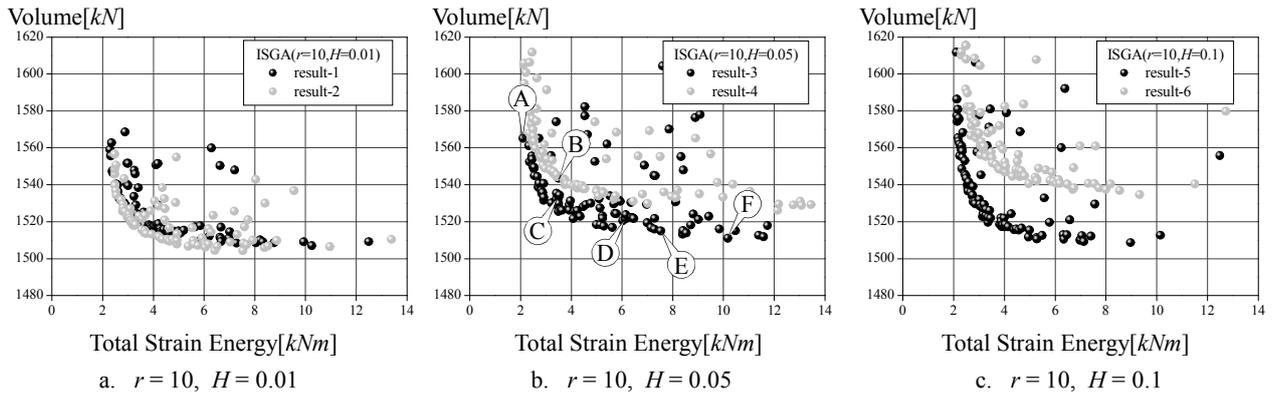


図3 記憶細胞内の個体(目的関数空間) Model-A Case-1

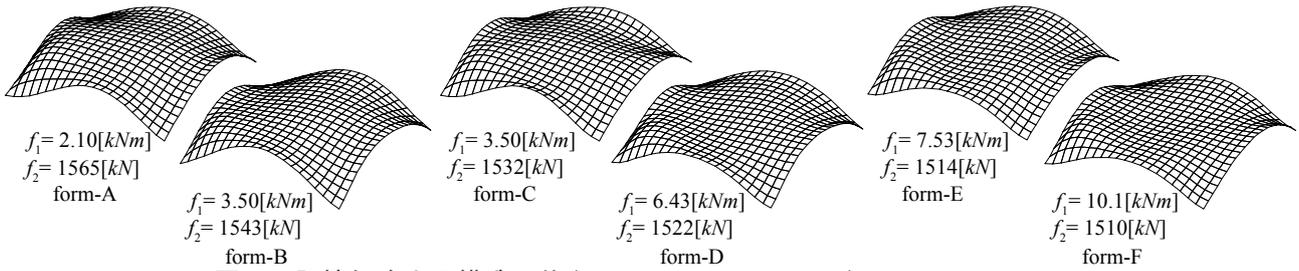


図4 記憶細胞内の構造形状 ($r = 10, H = 0.05$ result-3) Model-A Case-1

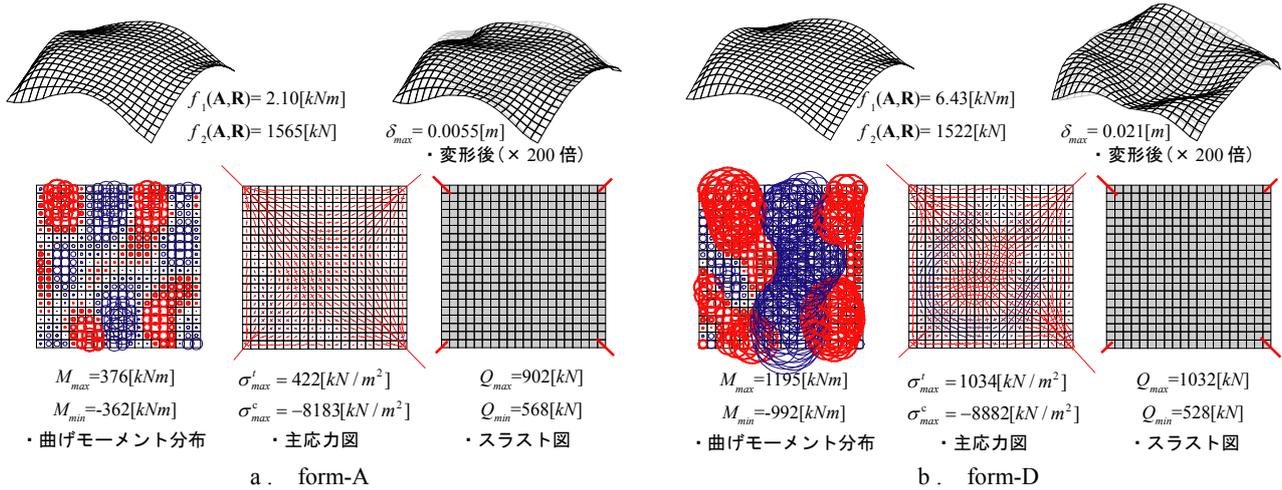


図5 form-A, Dの力学性状 ($r = 10, H = 0.05$ result-3) Model-A Case-1

0.05 result-3で得られた構造形状6例(form-A~F)である。さらに、form-A, Dの力学性状を図5に示す。なお、図5曲げモーメント分布の円の大きさはX軸周りの曲げモーメントの比率(太○が下に凸, 細○が上に凸)、主応力図の実線長さは主応力の比率を表す。

○数値計算例2 Case-2

高さ制約条件を2点次式で与える。

$${}_z p_{11} = 20.0[m] \quad {}_z p_{55} = -10.0[m] \quad (9)$$

式(9)は図2cに示す左下に黒●でプロットした点(P_{11})が上に凸、右上に黒●でプロットした点(P_{55})が下に凸となる条件である。

解析結果を図6-8に示す。図6はISGA($r = 10, H = 0.01, 0.05, 0.1$)の試行結果2例(result-7~12)を目的関数空間上にプロットしたものである。図7は $r = 10, H = 0.1$ result-11で得られた構造形状6例(form-G~L)である。また、得られた構造形状の力学性状(form-I, K)を図8に示す。

4.2 多目的最適化問題の定式化(2)

ここでは、目的関数として曲げひずみエネルギーと総体積の同時最小化を目的関数とした多目的最適化を行う。RCシェル構造は外力を面内力で支配的に処理することが求められ、面外方向の応力を最小化する。最適化問題の定式化は次式で与える。

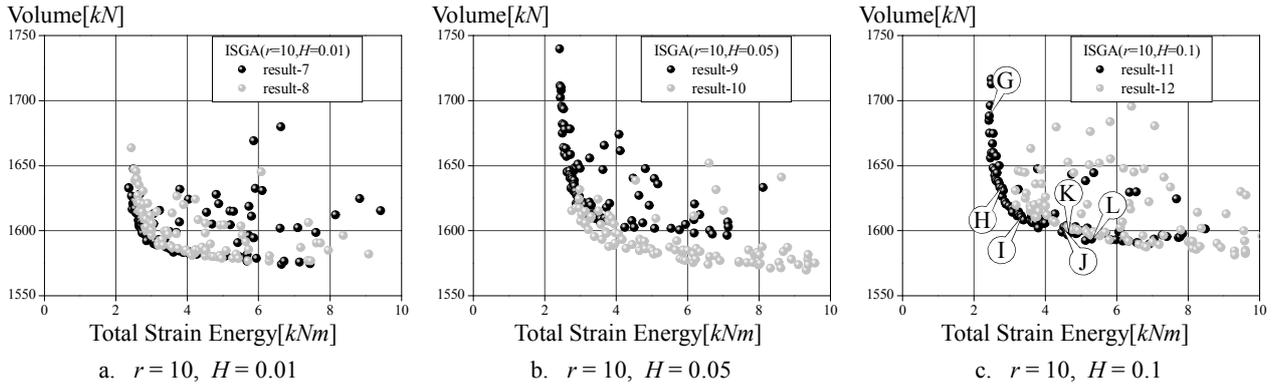


図6 記憶細胞内の個体(目的関数空間) Model-A Case-2

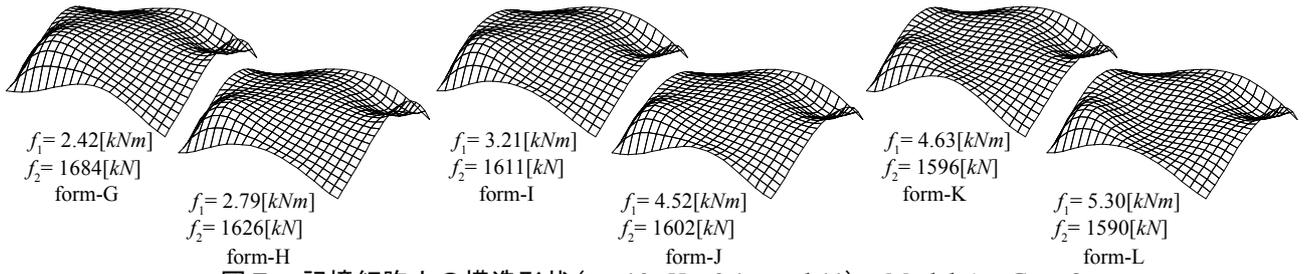


図7 記憶細胞内の構造形状 ($r = 10, H = 0.1$ result11) Model-A Case-2

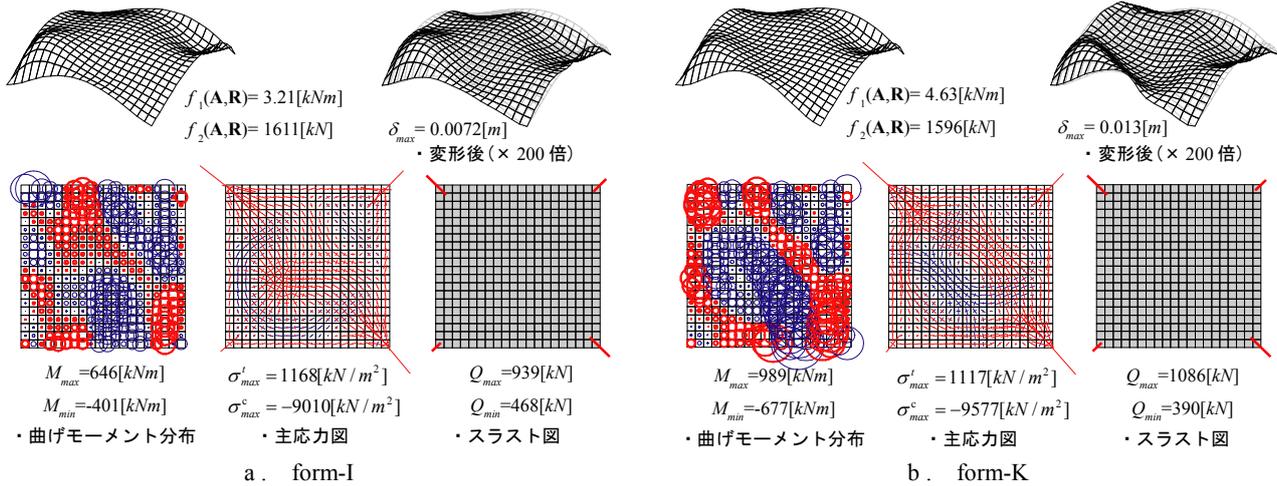


図8 form-I, Kの力学性状 ($r = 10, H = 0.1$ result11) Model-A Case-2

$$\text{Minimize } f_1(\mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{K}^b \mathbf{w}^e \quad (\text{曲げひずみエネルギー}) \quad (10)$$

$$f_2(\mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})^T \mathbf{A} \quad (\text{総体積}) \quad (11)$$

$$\text{subject to } \sigma^L \leq \sigma_i(\mathbf{R}) \leq \sigma^U \quad (\text{応力制約条件}) \quad (12)$$

$$z \cdot p_{ij} = h \quad (\text{高さ制約条件}) \quad (13)$$

$$\mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (\text{側面制約条件}) \quad (14)$$

ここで、 \mathbf{w}^e : 面外節点変位ベクトル、 \mathbf{K}^b : 面外剛性マトリクス、 $\mathbf{R}^L=0.0[m]$ 、 $\mathbf{R}^U=7.0[m]$ を表す。制御点高さ制約条件は前節 Case-1 とする。なお、解析モデルの初期形状と制御点配置、設計変数、荷重条件、材料定数、GAパラメータは多目的最適化(1)と同じ値を用いる。

○数値計算例3

解析結果を図9-11に示す。図9はISGA ($r = 10, H=0.01, 0.05, 0.1$)の結果2例 (result-13~18) を目的関数空間上にプロットしたものである。ここで、横軸は曲げひずみエネルギー、縦軸は総重量を表す。 $r=10, H=0.01$ result-13で得られた構造形状6例(form-M-R)を図10に示す。form-M, Pの力学性状を図11に示す。

5. 考察

数値計算例1, 2の結果に対して、本解法で得られるパレートフロントは試行毎に変化する。特に $H = 0.05, 0.1$ で得られたパレートフロントは目的関数空間上に広く分布する(図3b, c)。また、本解法はエリート戦

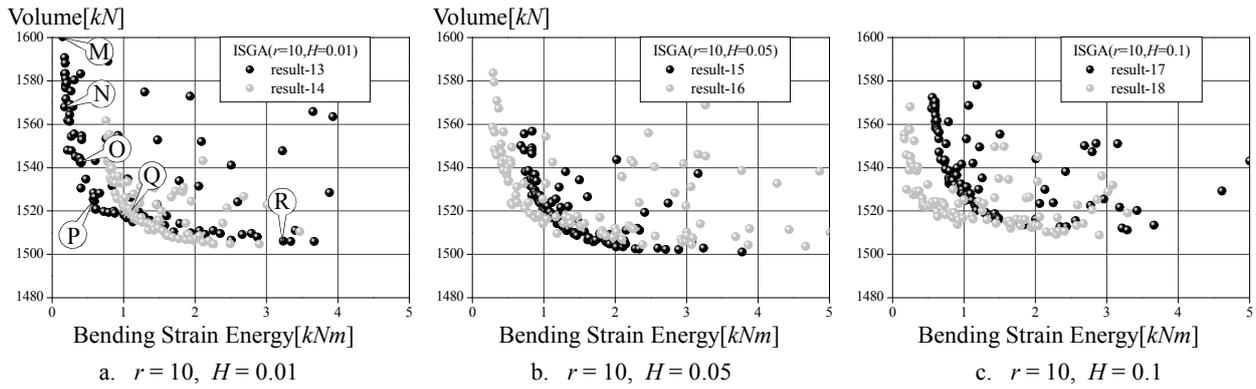


図9 記憶細胞内の個体(目的関数空間) Model-A Case-1

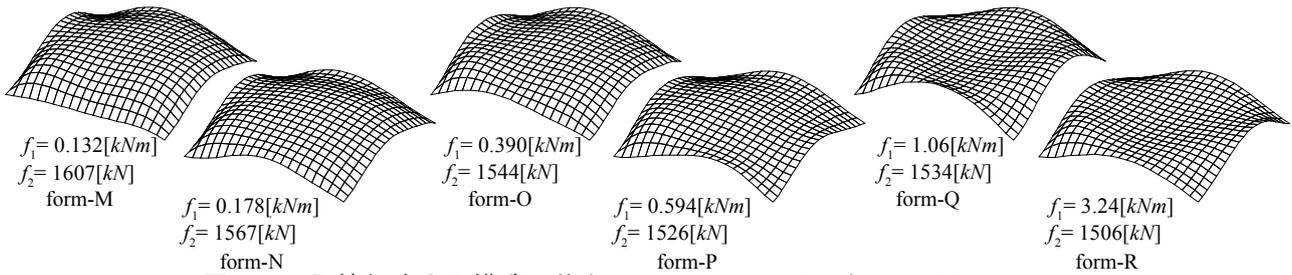


図10 記憶細胞内の構造形状 ($r=10, H=0.01$ result-13) Model-A Case-1

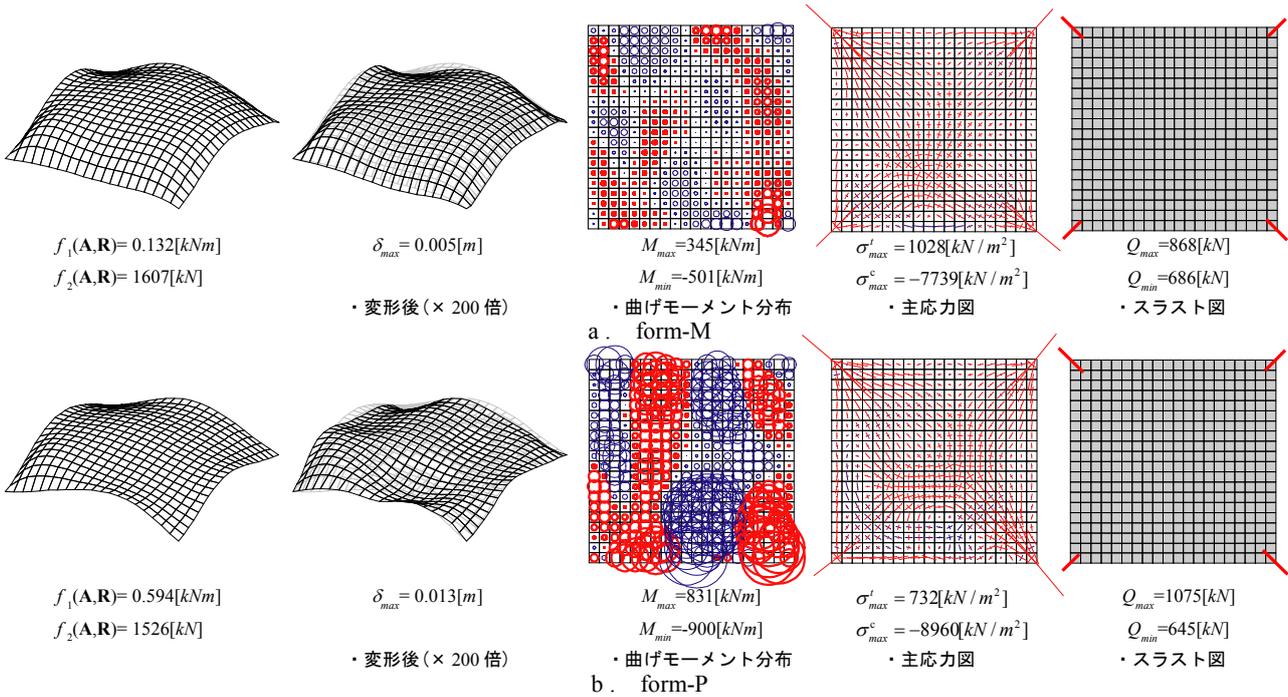


図11 form-M, Pの力学性状 ($r=10, H=0.01$ result-13) Model-A Case-1

略をとらず解の多様性に従って解の更新を行うため、記憶細胞内の個体で評価の低い解が複数存在する場合があります(図3, 6)。これは、グループ数の設定値と記憶細胞の個体除去率の設定で改善でき、優良解のみを捉えることが出来る。ただし、記憶細胞内の除去率の設定は解の収束性を早める半面多様性が失われる可能性があり、扱いに注意しなければならない。図4, 7に示す構造形状例はいずれも力学制約, 高さ制約を満たす。

特に、図4a. Case-1 form-Aは最も総ひずみエネルギーが最小化された解であり、その形状は文献7)総ひずみエネルギーを目的関数とする単一目的最適化で得られた構造形状と一致した。Case-1 form-B-Fについてはform-Aを基準に総ひずみエネルギーの増加に従ってシェル境界部のライズ, および凹凸が変化した形状である(図4)。得られた構造形状の力学性状は図5, 8より凹凸形状に即した力学性状であり、Case-1 form-Dはform-Aに比べ

て総ひずみエネルギーの増加に伴い、曲げモーメントと主応力の引張力が増加する。Case-2 で得られた構造形状も同様な傾向を示す。

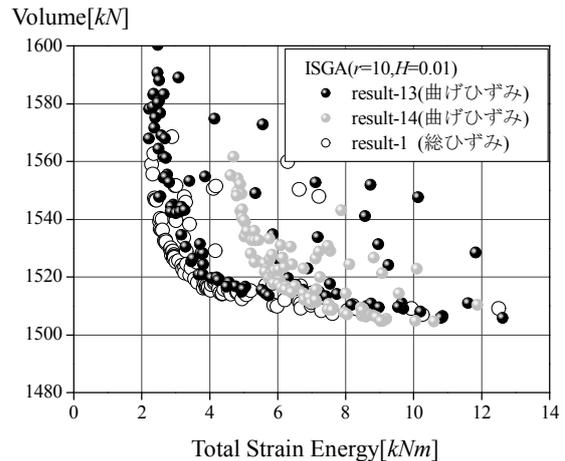
数値計算例3の結果に対して、目的関数空間におけるパラメータ特性は数値計算例1,2と同時傾向を示した(図9)。また、図10より得られた構造形状は総ひずみに比べてさらに複数の形状が確認された。これは総ひずみに比べて曲げひずみのオーダーが小さく、制約条件を満たす解が多く存在したためと考える。ここで、曲げひずみエネルギーの有効性を考察する。図12a, bは数値計算例3の解析結果result-13~15に対して、得られた記憶細胞内の個体の総ひずみエネルギーを計算し、横軸に総ひずみエネルギー、縦軸に総重量をとった目的関数空間内にプロットした図である。また、数値計算例1で得られたresult-1,3を各図に白○でプロットする。図12a, bより曲げひずみエネルギーを目的関数としても得られる解は数値計算例1の解個体と同じパレートフロント上に存在しており、かつ得られた解の構造形状は異なる。つまり、曲げひずみエネルギーは総ひずみエネルギーに比べて目的関数空間内の同じ位置で多様な形状が探索できると判断する。力学性状についても、曲げモーメント、主応力図の最大値は総ひずみで得られた形状の値と同じオーダーである(図5, 11)。

6. まとめ

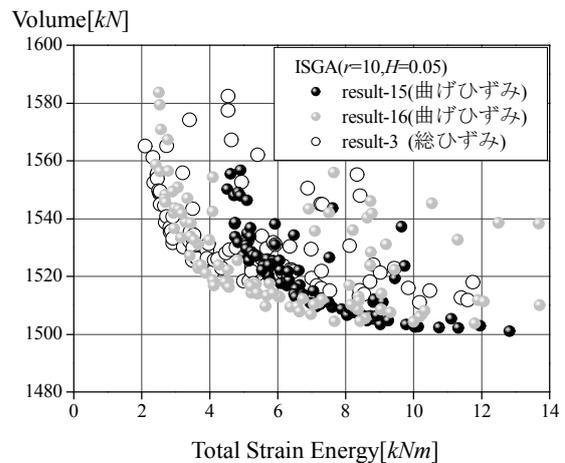
本研究は、制御点の高さ制約条件を利用して非対称曲面形状の多目的最適化を行った。数値計算例では、解探索手法として解の多様性を考慮したGA系解法を適用し、優良解探索による多様な構造形状の獲得を示した。数値結果より優良解探索の利用は、パレートフロント上で凹凸形状を有した解が捉えられることを確認している。また、高さ制約条件というシンプルな凹凸制御で、複数の構造形状が獲得できることを示した。曲げひずみエネルギーと総ひずみエネルギーの比較を行うことで、曲げひずみエネルギーが多様な構造形状を得るための優れた評価指標になりえる可能性を示した。今後は意匠面や施設機能面を考慮した目的関数の導入を含め、種々の最適化問題へ展開したい。

参考文献

- 1) 山本憲司, 大森博司: 応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究 - その1 シェル構造への適用 -, 日本建築学会構造系論文集, **496**, 67-73, 1997. 6
- 2) 木村俊明, 大森博司: 形状の厚さと同時最適化法の定式化とその応用, 日本建築学会構造系論文集, **640**, 1091-



a. $r = 10, H = 0.01$



b. $r = 10, H = 0.05$

図12 曲げひずみ総ひずみの比較 Case-1

1098, 2009. 6

- 3) 藤田慎之輔, 大崎純: ひずみエネルギーとパラメトリック曲面の代数不変量を考慮したシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, **639**, 857-863, 2009. 5
- 4) 日本建築学会: 実践やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 丸善, 2009
- 5) 本間俊雄, 野瑞憲太: 解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, **614**, 35-43, 2007. 4
- 6) 杉原厚吉: グラフィックスの数理, 共立出版, 1995
- 7) 和田大典, 本間俊雄: パラメトリック曲面の制御点制約条件を利用した非対称曲面シェルの構造最適化一解の多様性を考慮したGA系解法の適用一, 日本建築学会大会学術講演会, 823-824, 2010. 9
- 8) 和田大典, 本間俊雄: 解の多様性を考慮した優良解を探索する遺伝的アルゴリズム系解法と解の特性, バイオメディカル・ファジィ・システム学会第22回年次大会講演論文集, 21-24, 2009. 10

反応拡散モデルを応用した構造最適化手法

三井 和男¹⁾, 宮永 圭佑²⁾

1)日本大学生産工学部創生デザイン学科, 教授, 博士(工学)

2)日本大学大学院生産工学研究科数理情報工学専攻, 大学院生

1 はじめに

発見的な手法のひとつにアリのフェロモンをモデル化した最適化手法がある。この手法を骨組みの構造形態最適化に使用した場合、部材毎の最適化には有効だが、部材間でのフェロモンの流入出に問題があるため、一度消えた部材を再び出現させることができないなどの問題が生じる。この問題点を解消するために、反応拡散系に着想を得てモデル化した手法を提案する。

このモデルでは前述のアリのフェロモンをモデル化した手法を反応の式として扱い、反応の式で得られたフェロモンが部材間を拡散するという仕組みを加えることで、一度消えた部材を再び出現させることができる。

2 解析モデル

設計領域を所定のサイズで格子状に分割しグラウンドストラクチャを設定した後、下に示す手順で構造形態を更新する手法を採用する。

- ① 設計領域に荷重条件・支持条件を設定する。
- ② 構造の応答を評価するために有限要素法を用いて応力解析を行い、各部材の応力を求める。
- ③ ②で得られた応力を基に、次の時間ステップにおける部材の状態を決定し、構造形態を更新する。
- ④ ②へ戻る。

2.1 蓄積と蒸発のモデル

アリのフェロモンをモデル化した探索手法では、目標とする応力値 σ^E を予め設定し、部材に生じる応力 σ が目標応力 σ^E を超えた場合にその部材にフェロモンが置かれたものとし、これによって蓄積されたフェロモン量を基に部材断面積の増減を決定する。本論では、各ステップで加わるフェロモンを x で記述し信号と呼び、蓄積されたフェロモンを u で記述し活性因子と呼ぶ。

$$x_i = \begin{cases} 1 & (\sigma_i > \sigma^E) \\ 0 & (\sigma_i \leq \sigma^E) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_i^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)u_i^k + \omega\Delta t x_i \quad (2)$$

$$\omega = \lambda u_s \quad (3)$$

u_s は u の飽和量を表し、 λ 、 ω はそれぞれ蒸発、蓄積の係数、 Δt は時間ステップを意味する。

$$A_i = \begin{cases} A_i + \Delta A & (u_i \geq \varepsilon) \\ A_i - \Delta A & (u_i < \varepsilon) \end{cases} \quad (4)$$

u_i が閾値 ε_i を上回っている場合、断面積 A_i は増加し、 u_i が閾値 ε_i を下回っている場合断面積 A_i は減少する。

2.2 拡散を考慮したモデル

蓄積と蒸発のモデルに u が部材間で拡散するという式を加えることで部材の再出現を可能にできる。活性因子の濃度が高い部材から低い部材へ因子の濃度がその勾配に比例して拡散するような単純なシステムとする。

$$U = D \sum_{i=1}^N (u_0 - u_i) \quad (5)$$

u_0 は目標部材の抑制因子、 u_i は隣接部材の抑制因子、 N は隣接部材数、また U は活性因子の拡散量を意味する。 D は拡散係数を意味する。 D が N の最大値の逆数より大きい場合、拡散量が過多となり発散してしまうので $1/N_{\max}$ よりも小さい値とする必要がある。本論では λ/N_{\max} に近い値を使用している。(2)式に(5)式を加え(6)式とする。ここで、断面積が0の部材には蓄積も蒸発もないものとし、拡散のみが作用するものとする。

$$u_i^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)u_i^k + \omega\Delta t x_i - U \quad (6)$$

(6)式を用いて拡散の効果を検証するため、図1のような設計領域と荷重・境界条件を設定した。上部に作用する下方向の鉛直等分布荷重及び水平方向等分布荷重を下部の2点で支持する問題である。この問題を用いて蓄積と蒸発のモデルに拡散を加えた場合の効果を考える。上部の梁は非設計対象として、 1 kN/cm の鉛直等分布荷重と 0 kN/cm 、 0.2 kN/cm 、 0.8 kN/cm の3パターンの水平等分布荷重が加わるものとする。非設計部分の断面積は 1800 cm^2 で固定し断面は2:1とする。左右の

部材の初期断面積は 100 cm^2 とし、梁と左右の部材以外の部材の初期断面積は 0 とする。設計対象の断面は 1:1 とした。グランドストラクチャは 4×8 分割 (45 節点, 632 要素, 隣接部材の最大数は 47) を使用する。また拡散係数 D は 0.001、抑制係数 μ は 0.0005 とした。目標応力は 1.8 MPa とし、ヤング係数は 2060 kN/cm^2 とした。また、活性因子の飽和量は 1、閾値は 0.5 とした。

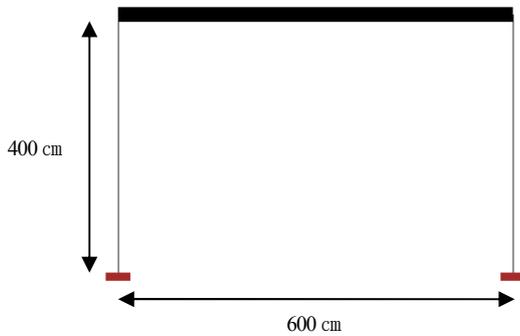


図 1. 設計領域

図 2 は左から水平等分布荷重 0、0.2、0.8 kN/cm の結果である。 Vol は体積を、 $\bar{\sigma}$ は応力の平均を表す。拡散がない場合は断面積が 0 の部分の部材が出現することは無いが、拡散がある場合は図 2 のように設計領域の断面積が 0 の部分の部材が出現する。しかし、余分と考えられる細い部材が多数残ってしまう問題が生じた。これは拡散により細い部材にも因子が流れ込み、太い部材のみに収束しづらくなっているためだと考えられる。

2.3 抑制を考慮したモデル

拡散を考慮したモデルに、抑制因子を考慮したモデルについて述べる。(7)式は蓄積と蒸発のモデルに抑制を加えた式である。また、(8)式は抑制因子を求める式である。この抑制因子は活性因子と相互に作用し、活性因子を抑制し、活性因子により活性される。抑制因子は活性因子の抑制のみに作用し、断面積の更新は(4)式と同様に活性因子の量により決定される。

$$u_i^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)u_i^k + \omega\Delta tx_i - \mu\Delta tv^k \quad (7)$$

$$v_i^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)v_i^k + \lambda\Delta tu_i^k \quad (8)$$

v は u を抑制する抑制因子、 μ は抑制因子が活性因子に与える影響を表す係数である。

$$V = D \sum_{i=1}^N (v_0 - v_i) \quad (9)$$

抑制因子も活性因子と同様に拡散する。(9)式は抑制因子の拡散を示す式である。 v_0 は目標部材の抑制因子、 v_i は隣接部材の抑制因子、 N は隣接部材数、 V は抑制因子の拡散量を意味する。

$$u^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)u^k + \omega\Delta t - \mu\Delta tv^k - U \quad (10)$$

$$v^{k+1} = (1 - \lambda\Delta t)v^k + \lambda\Delta tu^k - V \quad (11)$$

因子を求める(7)・(8)式に拡散式(5)・(9)を加え、(10)・(11)式とする。この式を用いて抑制の効果を検証する。2.2 で用いた問題を用いる。

解析の結果、図 3 のような結果を得ることができた。図 2 と比較すると、拡散のみの場合よりも細い部材が除かれた結果であることが分かる。しかし、抑制を加えても太い部材のみから構成されるシンプルな形が得られるとは限らず、多少の細い部材が組み合わせられた複雑な形となる場合がある。太い部材のみから構成されるよりシンプルな結果を求める場合は、閾値の値を上げ断面積増加の条件を厳しくすることで、余分な部材を除くことができる。本論では一定ステップ数経過後に閾値の値を徐々に増加させた。その結果、図 4 のような太い部材のみで構成されるシンプルな結果を得ることができた。

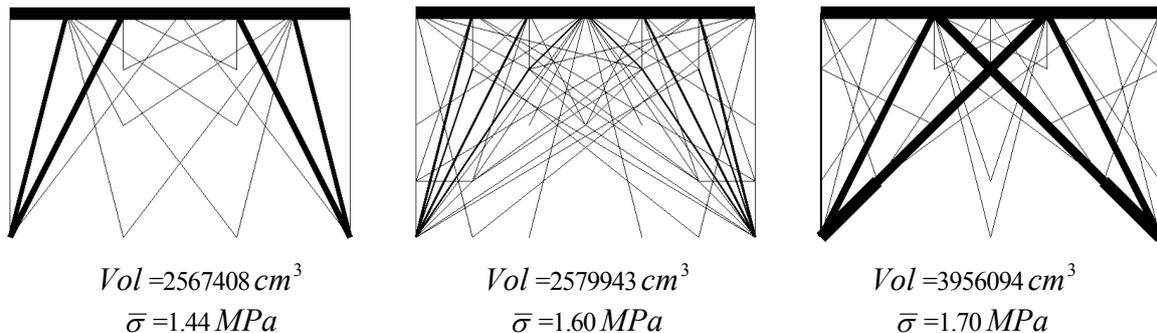


図 2. 拡散モデルの効果

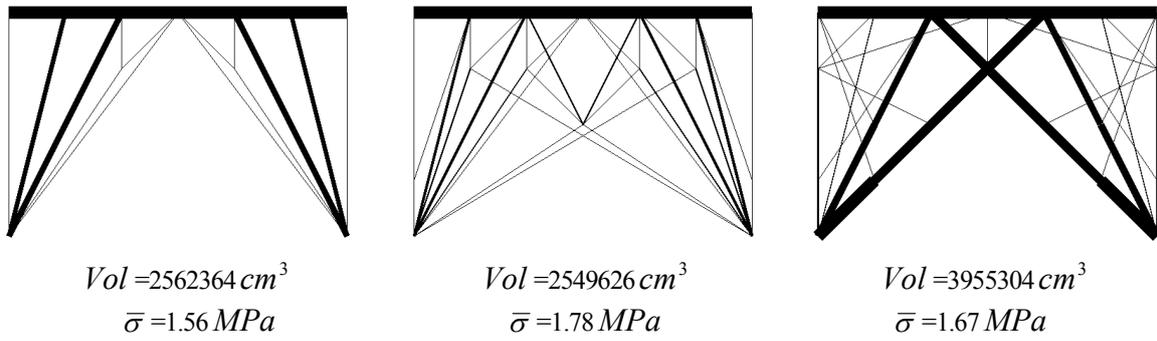


図 3. 抑制モデルの効果

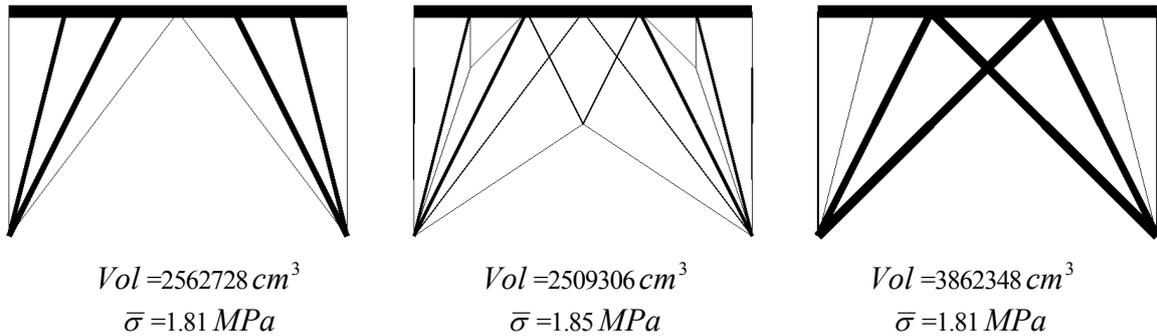


図 4. 条件を厳しくした場合

3 解析例

以下に反応と拡散のモデルによる解析例を示す。

3.1 橋

橋の中央に梁が存在し、これを支える最適な骨組の形を求める問題を扱う。図 5 のように、設計領域の中間の梁部分は非設計対象として、梁に 1 kN/cm の鉛直等分布荷重が加わるものとする。非設計部分の断面積は 3000 cm^2 で固定し断面は 1:1 とする。設計部分の初期断面積は 100 cm^2 とし、断面は同様に 1:1 とした。下地構造は 4×8 分割 (45 節点, 632 要素, 隣接部材の最大数は 59) と 6×12 分割 (91 節点, 2542 要素, 隣接部材の最大数は 119) のグランドストラクチャを使用する。 4×8 分割の場合の拡散係数 D は 0.0017、抑制係数 μ は 0.00085 とした。 6×12 分割の場合の拡散係数 D は 0.0008 とし、抑制係数 μ は 0.0004 とした。目標応力は 4 MPa 、ヤング係数は 2060 kN/cm^2 とした。また、因子の飽和量は 1、因子の閾値は 0.5 とした。

解析の結果、図 6 のような結果を得ることができた。上が 4×8 分割、下が 6×12 分割の結果である。結果から、各部材の応力が均衡化し、その平均値が設定した目標応力値に非常に近い値となっていることが分かる。

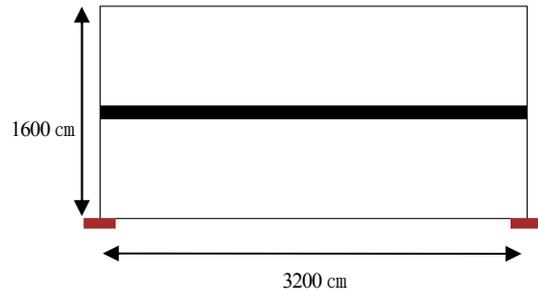
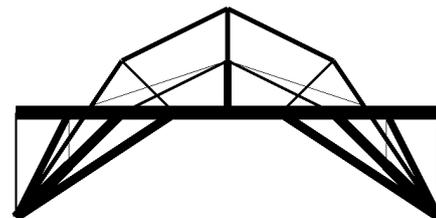
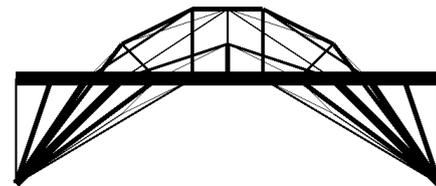


図 5. 設計領域



$Vol = 20924852 \text{ cm}^3$
 $\bar{\sigma} = 4.01 \text{ MPa}$



$Vol = 21749486 \text{ cm}^3$
 $\bar{\sigma} = 4.02 \text{ MPa}$

図 6. 結果

3.2 8層構造

8階建てのビルの各階に梁のみが存在し、これを支える最適な骨組の形を求める問題を扱う。図7に示すように各階の梁部分は非設計対象とし、その梁の要素に 1 kN/cm の鉛直等分布荷重と 0.2 kN/cm の水平等分布荷重が加わるものとする。非設計部分の断面積は 1000 cm^2 で固定し断面は 1:1 とする。設計部分の初期断面積は 100 cm^2 とし、断面は同様に 1:1 とした。グラウンドストラクチャは 12×8 分割 (117 節点, 580 要素, 隣接部材の最大数は 22) を使用する。グラウンドストラクチャ生成時の要素最大長は 600 cm とした。拡散係数 D は 0.004、抑制係数 μ は 0.002 とした。ヤング係数は 2060 kN/cm^2 とした。また、因子の飽和量は 1、因子の閾値は 0.5 とした。目標応力は 5 MPa と 10 MPa の 2 ケースとし、設計を行う。

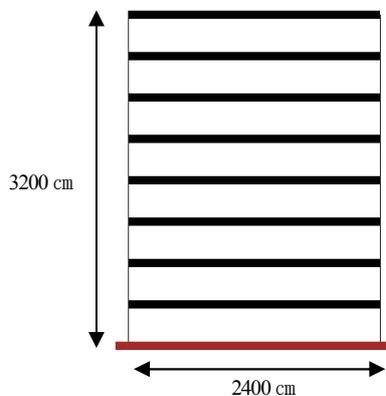


図7. 設計領域

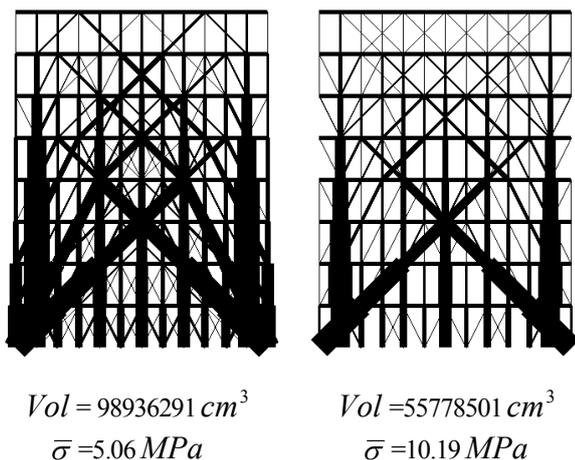


図8. 結果

解析の結果、図8のような結果を得ることができた。左から 5 MPa の結果と 10 MPa の結果である。結果から 2 ケースとも、各部材の応力が均衡化し、その平均値が設定した目標応力値に非常に近い値となっていることが分かる。

4 考察・まとめ

本論文では蓄積と蒸発のモデルを利用し、反応・拡散系から着想を得た手法を提案した。

- 1) 蓄積と蒸発のモデルに拡散モデルを加え、その効果について示した。
- 2) 1)のモデルに対し抑制モデルを加え、その効果について示した。
- 3) 条件を厳しくすることでよりシンプルな構造を得ることができることを示した。
- 4) 解析例により、本提案手法の有効性を検証した。その結果、各部材の応力が均衡化し、その平均値が設定した目標応力値に非常に近い値となった。それまでの過程において不要な部材を取り除き、結果としてほぼ均一な応力状態が得られたことから、近似的な最適形状を設計することができたと考えられる。

本提案手法をさらに有効にするために以下の問題点を解決する必要がある。

- 1) 拡散の影響か、グラウンドストラクチャの分割数が増えるほど細い部材が消えにくくなるという問題がある。本論では蒸発係数と隣接部材の最大数から拡散係数及び抑制係数の値を決定したが、グラウンドストラクチャの分割数や総部材数などとも関係がある可能性があるため検証する必要がある。
- 2) 1)と関連して、拡散係数と抑制係数の求め方について、今回は拡散係数を λ / N_{\max} に近い値とし、抑制係数は拡散係数の半分の値を与え使用したが、これらの係数を決定する方法について考察する必要がある。

5 参考文献

- 1) 三井和男：周期的に変動する条件下における構造形態創生のための発見的手法, 日本建築学会構造系論文集, 第 593 号, pp.73-79, 2005.7
- 2) 三井和男：セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 555 号, pp.101-105, 2002.5
- 3) 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文: グラウンドストラクチャ法による建築デザインの創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 633 号, pp.1967-1973, 2008.11
- 4) 藤井大地: Excel で簡単にシミュレーション! 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008.10

多面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合解析と安定性条件

津浦 史幸¹⁾, 張 景耀²⁾

1) 立命館大学理工学部建築デザイン学科, 博士前期課程, ru003064@ed.ritsumei.ac.jp

2) 立命館大学理工学部建築デザイン学科, 講師, 工博, zhang@fc.ritsumei.ac.jp

1 はじめに

テンセグリティは、連続な引張材（ケーブル）と不連続な圧縮材（棒材）で構成される構造物であり、部材にあらかじめ軸力を導入することによって安定させている。その軸力分布と形状は強い相関性があり、構造物全体の剛性を影響するため、自己釣合い状態における形状の決定、及び安定性調査は、テンセグリティ構造の設計問題に対して重要な課題となっている。

従来、構造解析の計算量を減らすために、構造物および外力の対称性はよく利用されている。テンセグリティ構造の場合には、その高い対称性を利用すれば、構造全体ではなく、一つの節点を考慮するだけで、釣合い状態における軸力分布および形状を決めることができる。さらに、同じ種類の対称性を有するテンセグリティ構造の安定性条件を誘導することも可能となる。著者らは、この考えに基づいて四面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合い形状における軸力（密度）分布および安定性条件を導いた[1-3]。本研究では、既往の研究成果に基づいて、四面体群、六面体群、八面体群および十二面体群対称性を有するテンセグリティ構造を対象とする。

2 四面体群対称性を有するテンセグリティ構造

テンセグリティ構造の部材がピンで接合されるので、部材には軸力のみ存在する。また、自己釣合い状態における形状決定および安定性調査には、外荷重と自重を考慮しない。

2.1 概要

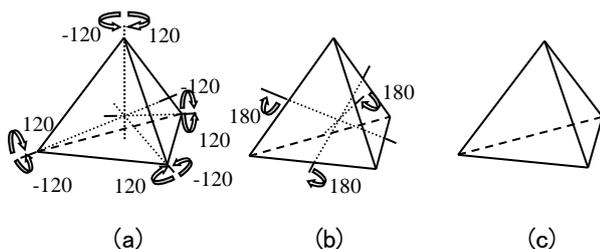


図1 四面体群の対称操作

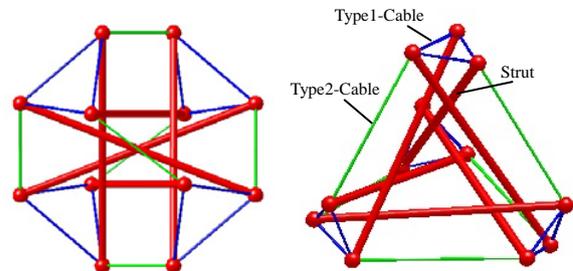


図2 四面体群対称性

構造物がある群の対称性を有するというのは、その群の対称性操作によって、構造物の形状（位置）は操作前に一致することを意味する。本研究の対象としたテンセグリティ構造の節点は多面体群の対称操作と一対一の対応関係がある。すなわち、一つの節点を別の節点に移動させるには、一つだけの対称操作が対応している。

例えば、正四面体に対して、図1に示すように12個の対称操作がある。それぞれは、

- (a) 頂点と中心を結ぶ軸とした回転：8個
- (b) 対辺の中心を結ぶ軸とした回転：3個
- (c) 恒等操作：1個

である。これらの対称操作に対して、回転させた構造物は元の構造物と変わらない。

さらに、図2に示すように、任意の節点は、2本の Type1 ケーブル、1本の Type2 ケーブルおよび1本の棒材でほかの節点と接続される。したがって、四面体群の対称操作と一対一の関係によって、四面体群対称性を有するテンセグリティ構造は合計で12個の節点があり、また、12本の Type1 ケーブル、6本の Type2 ケーブル、6本の棒材がある。

2.2 自己釣合

図2のような高い対称性を有するテンセグリティ構造に対しては、自己釣合い状態における軸力分布と形状を決めるため、構造物全体ではなく、任意の節点の自己釣合い方程式を考慮することだけで、その節点に繋がっている部材の軸力を導くことができる。

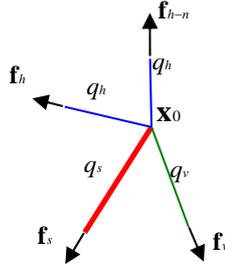


図3 対象節点の釣合い状態

ある対象節点の座標ベクトルを \mathbf{x}_0 で表す。図3に示すように、この対象節点に接続している他の四つの節点座標は \mathbf{x}_0 を通じて以下のように表すことができる。

$$\mathbf{x}_{h1} = \mathbf{R}_{h1} \mathbf{x}_0 \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{h2} = \mathbf{R}_{h2} \mathbf{x}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{R}_s \mathbf{x}_0 \quad (3)$$

$$\mathbf{x}_v = \mathbf{R}_v \mathbf{x}_0 \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{R}_{h1} 、 \mathbf{R}_{h2} 、 \mathbf{R}_s と \mathbf{R}_v はそれぞれ対象節点を部材通じて接続される節点に移動させる対称操作（転置行列）であり、

$$\mathbf{R}_{h1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_{h2} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 0 & \frac{2\sqrt{2}}{3} \\ 0 & -1 & 0 \\ \frac{2\sqrt{2}}{3} & 0 & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_v = \begin{bmatrix} -\frac{2}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & \frac{\sqrt{6}}{3} \\ \frac{\sqrt{2}}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \quad (5)$$

となる。したがって、各部材の単位有向ベクトルは下記のように表すことができる。

$$\mathbf{d}_{h1} = (\mathbf{x}_h - \mathbf{x}_0) / l_h = (\mathbf{R}_{h1} - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 / l_h \quad (6)$$

$$\mathbf{d}_{h2} = (\mathbf{x}_{h2} - \mathbf{x}_0) = (\mathbf{R}_{h2} - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 / l_h \quad (7)$$

$$\mathbf{d}_s = (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_0) / l_s = (\mathbf{R}_s - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 / l_s \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_v = (\mathbf{x}_v - \mathbf{x}_0) / l_v = (\mathbf{R}_v - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 / l_v \quad (9)$$

ここで、 l_h 、 l_v と l_s はそれぞれ Type1 ケーブル、Type2 ケーブルおよび棒材の長さである。 f_h 、 f_v と f_s を各部材の軸力とすれば、各部材の軸力ベクトルが

$$\mathbf{f}_{h1} = f_h \mathbf{d}_{h1} = q_h (\mathbf{R}_{h1} - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 \quad (10)$$

$$\mathbf{f}_{h2} = f_h \mathbf{d}_{h2} = q_h (\mathbf{R}_{h2} - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 \quad (11)$$

$$\mathbf{f}_s = f_s \mathbf{d}_s = q_s (\mathbf{R}_s - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 \quad (12)$$

$$\mathbf{f}_v = f_v \mathbf{d}_v = q_v (\mathbf{R}_v - \mathbf{I}) \mathbf{x}_0 \quad (13)$$

となる。ここで、軸力密度は部材の軸力と部材長の比として定義され、 q_h 、 q_v と q_s はそれぞれ Type1、Type2 のケーブルおよび棒材の軸力密度である。

対象節点は自己釣り合い状態にあるので、それに作用する軸力ベクトルの総和はゼロとなる。したがって

$$\mathbf{f}_{h1} + \mathbf{f}_{h2} + \mathbf{f}_s + \mathbf{f}_v = \mathbf{0} \quad (14)$$

式(10)-(13)を式(14)に代入して、以下のように整理する。

$$\mathbf{S} \mathbf{x}_0 = \mathbf{0} \quad (15)$$

ここで、

$$\mathbf{S} = 2q_h \begin{bmatrix} -\frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} + q_s \begin{bmatrix} -\frac{2}{3} & 0 & -\frac{2\sqrt{2}}{3} \\ 0 & -2 & 0 \\ -\frac{2\sqrt{2}}{3} & 0 & -\frac{4}{3} \end{bmatrix} + q_v \begin{bmatrix} -\frac{5}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -1 & \frac{\sqrt{6}}{3} \\ \frac{3}{3} & \frac{\sqrt{6}}{3} & -\frac{4}{3} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ゼロ解は式(15)における対象節点の座標ベクトル \mathbf{x}_0 の自明解である。ゼロ以外の解も存在することを保証するため、 \mathbf{S} の行列式はゼロでなければならない。したがって、

$$|\mathbf{S}| = \begin{vmatrix} -3q_h - \frac{2}{3}q_s - \frac{5}{3}q_v & \frac{\sqrt{3}}{3}q_v & \frac{2\sqrt{2}}{3}q_s + \frac{\sqrt{2}}{3}q_v \\ \frac{\sqrt{3}}{3}q_v & -3q_h - 2q_s - q_v & \frac{\sqrt{6}}{3}q_v \\ \frac{2\sqrt{2}}{3}q_s + \frac{\sqrt{2}}{3}q_v & \frac{\sqrt{6}}{3}q_v & -\frac{4}{3}q_s - \frac{4}{3}q_v \end{vmatrix} = 0 \quad (17)$$

式(17)を整理すると、下記の式になる。

$$-12q_h^2(q_s + q_v) - 8q_s^2(q_h + q_v) - 8q_v^2(q_h + q_s) - 24q_hq_sq_v = 0 \quad (18)$$

式(18)の両側に q_h で割ると、

$$3\frac{(q_s+q_v)}{q_h} + 2\frac{q_s^2}{q_h^2} + 2\frac{q_s^2 q_v}{q_h^3} + 2\frac{q_v^2}{q_h^2} + 2\frac{q_v^2 q_s}{q_h^3} + 6\frac{q_s q_v}{q_h^2} = 0 \quad (19)$$

となる。さらに、軸力密度の比を

$$s = \frac{q_s}{q_h}, \quad v = \frac{q_v}{q_h} \quad (20)$$

として、式(19)を下記のように整理できる。

$$v^2(2+2s) + v(3+6s+2s^2) + (3s+2s^2) = 0 \quad (21)$$

二次方程式である式(21)の解は

$$v_1 = \frac{-(3+6s+2s^2) + \sqrt{(3+6s+2s^2)^2 - 4(2+2s)(3s+2s^2)}}{2(2+2s)} \quad (22)$$

$$v_2 = \frac{-(3+6s+2s^2) - \sqrt{(3+6s+2s^2)^2 - 4(2+2s)(3s+2s^2)}}{2(2+2s)} \quad (23)$$

で表すことができる。

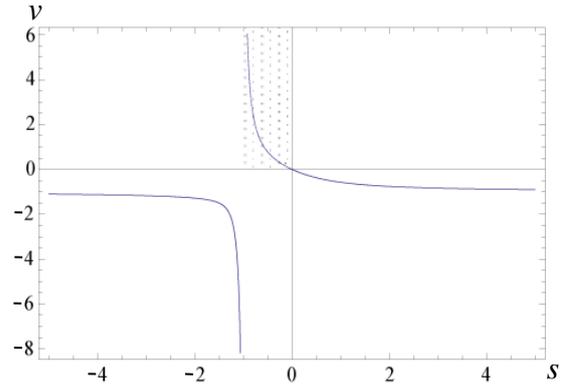
図4には、式(22)と(23)で求められた軸力密度の比 v_1, v_2 と s 、つまり異なる部材の軸力密度の関係を示している。ここで、ケーブルと棒材の軸力はそれぞれ正と負であるため、 v は正の値で、 s は負の値である。したがって、図4の網掛け領域のみが実現可能な軸力密度である。これは、Rajら[4]が「群の表現理論」に基づいて軸力密度行列を数値的にブロック対角化し、その軸力密度行列のランク落ちを保証することによって求められた異種類部材の軸力密度の関係式と一致する。

2.3 無条件的安定

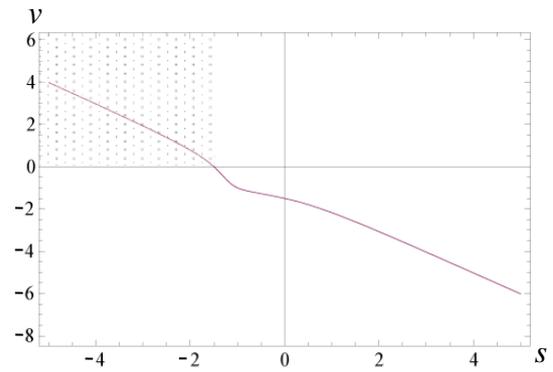
無条件的安定 (Super-stability) は、接線剛性行列の正定値で定義される通常安定性基準よりも強い安定性基準である。無条件的安定であるテンセグリティ構造は、部材の剛性や軸力のレベルに関係なく、常に安定であるため、テンセグリティにとって望ましい性質である。

三次元テンセグリティ構造に対しては、下記の無条件的安定の十分条件が証明されている[5]。

- (1) 幾何行列のランクは6である。
- (2) 軸力密度行列は半正定値である。



(a) 解 v_1



(b) 解 v_2

図4 四面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合い状態における軸力密度比の関係

(3) 軸力密度行列のランク落ちは4以上である。上記の条件のうち、(1)と(2)はテンセグリティ構造の無条件的安定の必要条件でもある。(1)は常に満たされるため、本研究では(2)の条件のみに注目する。

四面体群対称性を有するテンセグリティ構造の無条件的安定を検討するために、自己釣合い解析で得られた軸力密度の解 v_1 と v_2 を軸力密度行列に代入して、その固有値を求める。解 v_1 と v_2 に対応する固有値と軸力密度 s との関係それぞれ図5の(a)と(b)で表す。

四面体群対称性を有する構造は12個の節点があるので、その軸力密度行列は合計12個の固有値がある。しかし、構造物の対称性によって、重複した固有値が存在するため、図5に示すようにその固有値はゼロを含めて4つの異なる値しか存在しない。

軸力密度行列のすべての固有値が非零であれば、前述の無条件的安定条件の十分条件(2)が満たされる。図5(b)

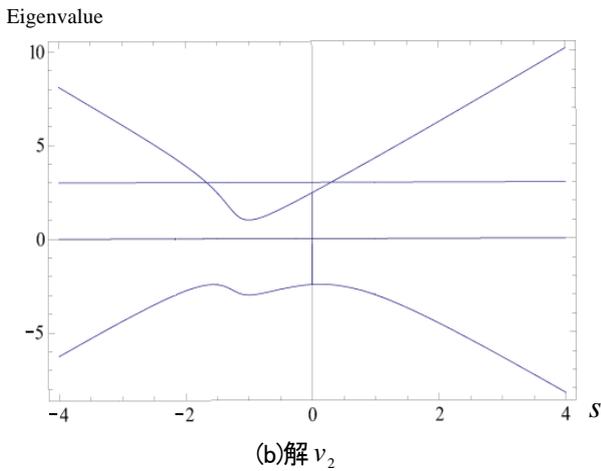
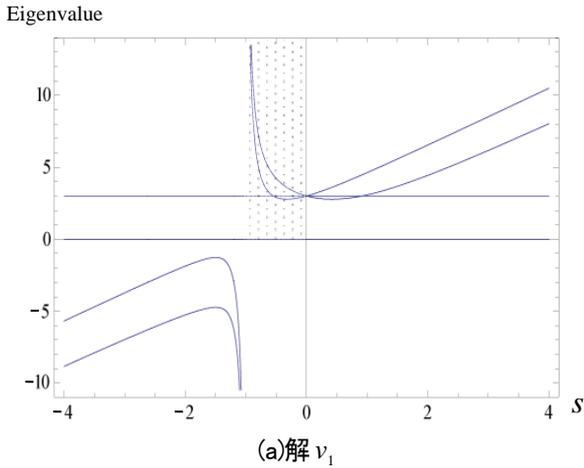


図5 四面体群対称性を有するテンセグリティ構造の軸力密度行列の固有値と軸力密度の関係

より、解 v_2 に対しては、軸力密度行列に常に負の固有値が存在するため、無条件的安定にはならない。

図5(a)では、 $s > -1$ の場合、軸力密度行列は常に半正定値である。しかし、 q_s は圧縮材の軸力密度であるため、 s は負の値である。したがって、無条件的安定となる軸力密度の範囲は $-1 < s < 0$ ($0 < -q_s < q_h$) である。

3 他の多面体群

前節では、四面体群対称性を有するテンセグリティ構造を対象として、節点と群の対称操作との一対一の対応関係を利用し、その自己釣合い状態における各種の軸力密度の関係を導き出し、さらにその無条件的安定のための条件式を導き出した。

本節では、同様の手法によって、六面体群、八面体群および十二面体群対称性を有するテンセグリティ構造の自己釣合い解析および安定性調査を行う。



図6 六面体群対称性を有するテンセグリティ構造

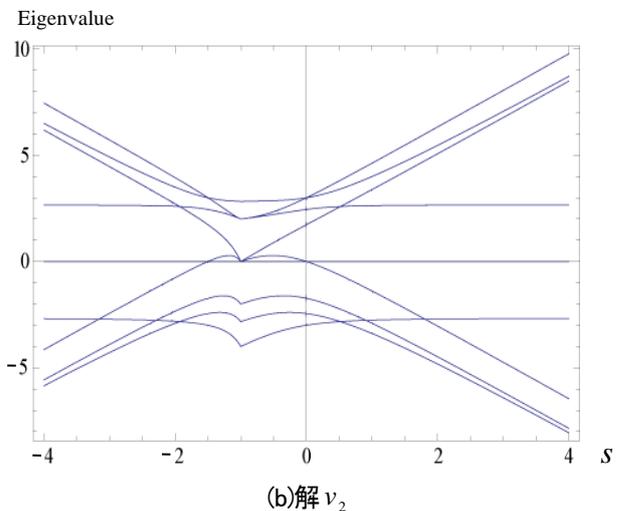
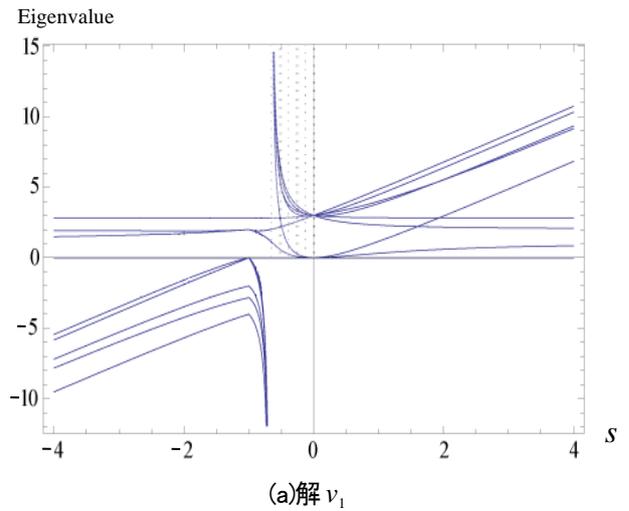


図7 六面体群対称性を有するテンセグリティ構造の軸力密度行列の固有値と軸力密度比の関係

3.1 六面体群

六面体群の対称操作は24個あり、それぞれは

- (a) 頂点と六面体の中心を結ぶ軸とした回転：8個
- (b) 向かい合う面の中心を結ぶ軸とした回転：9個
- (c) 向かい合う辺の中心を結ぶ軸とした回転：6個

(d) 恒等操作 : 1 個

である。四面体群対称性を有するテンセグリティ構造と同様に、構造物の任意の節点は、2 本の Type1 ケーブル、1 本の Type2 ケーブルおよび 1 本の棒材でほかの節点に繋がっているため、対称操作と一対一の対応関係により、節点の数は 24 個、構成部材は、24 本の Type1 ケーブル、12 本の Type2 ケーブル、12 本の棒材である。

四面体群対称性を有するテンセグリティ構造と同様に、一つの対称節点を対象にして、その自己釣り合い方程式を解いて各部材の軸力密度の関係式を求める。さらに、構造物の無条件的安定となる条件を求めるため、図 7 に軸力密度行列の固有値と軸力密度の比 s の関係を示す。したがって、無条件的安定となる軸力密度の比の範囲は $-\frac{2}{3} < s < 0$ である。

3.2 八面体群

八面体群は六面体群の双対群であり、その対称操作は 24 個ある。それぞれは、

- (a) 頂点と八面体の中心を結ぶ軸とした回転 : 9 個
- (b) 向かい合う面の中心を結ぶ軸とした回転 : 8 個
- (c) 向かい合う辺の中心を結ぶ軸とした回転 : 6 個
- (d) 恒等操作 : 1 個

である。対称操作と一対一の対応関係より、節点の数は 24 である。また、24 本の Type1 ケーブル、12 本の Type-ケーブルおよび 12 本の棒材を有する。

前述の手法と同様に、構造物の安定性条件を検討するため、図 9 に軸力密度行列の固有値と軸力密度の比 s の関係を示しており、無条件的安定となる軸力密度比の範囲は $-\frac{2}{3} < s < 0$ である。

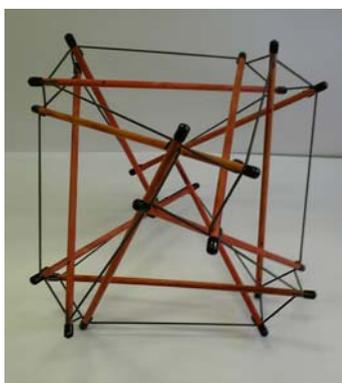


図 8 八面体群

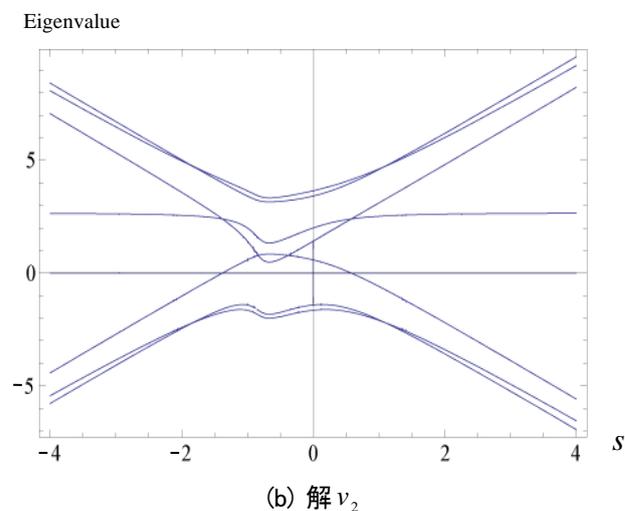
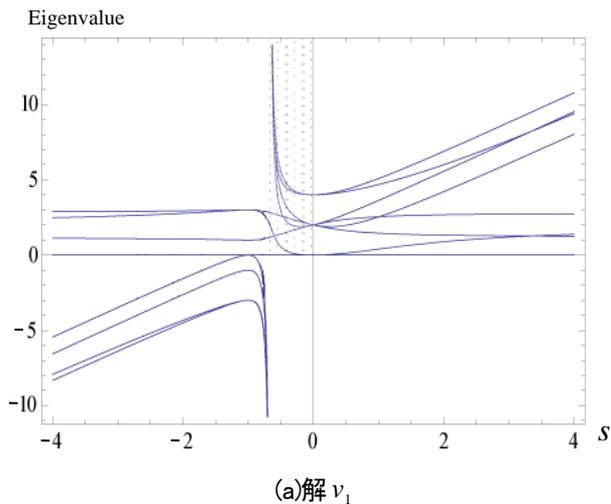


図 9 八面体群対称性を有するテンセグリティ構造の軸力密度行列の固有値と軸力密度比の関係



図 10 十二面体群

3.3 十二面体群

- 十二面体群の対称操作は 60 個あり、それぞれ、
- (a) 向かい合う面の中心を結ぶ軸とした回転 : 24 個
- (b) 向かい合う辺の中心を結ぶ軸とした回転 : 15 個

(c) 向かい合う頂点を結ぶ軸とした回転：20 個

(d) 恒等操作：1 個

である。対称操作と一対一の対応関係より、節点の数は 60 個、構成部材は、60 本の Type1 ケーブル、30 本の Type2 ケーブル、30 本の棒材である。

図 11 には、軸力密度行列の固有値と軸力密度比 s の関係を示しており、無条件的安定となる軸力密度比の範囲は

$$\text{範囲は } -\frac{5-2\sqrt{5}}{10} < s < 0 \text{ である。}$$

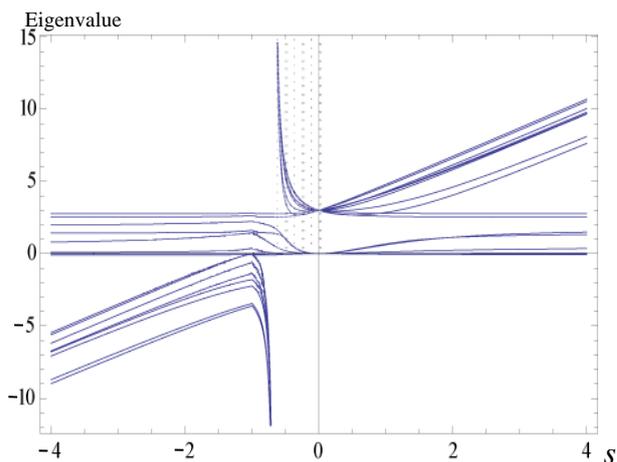
4 結論

本研究では、多面体群対称性を有するテンセグリティ構造物に対して、その自己釣合い解析および安定性調査を行った。その高い対称性を利用して、自己釣合い解析には、構造物全体よりも任意の対象節点の自己釣合い方程式で、異なる種類の部材の軸力密度を解析的に求めることができる。

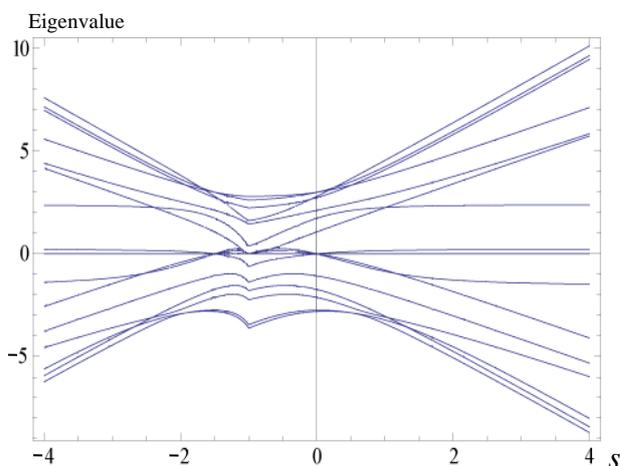
さらに、構造物の自己釣合い解析で得られた軸力密度の関係に基づいて、軸力密度行列の半正定値で定義される無条件的安定の条件式を数値的に示した。

参考文献

- 1) Zhang JY, Guest GD, and Ohsaki M. Symmetric prismatic tensegrity structures: Part I. configuration and stability, *Int. J. Solids, Structures*, 2009; **46**: 1-14.
- 2) Zhang JY, Guest SD, and Ohsaki M. Symmetric prismatic tensegrity structures: Part II. Symmetry-adapted formulations, *Int. J. Solids, Structures*, 2009; **46**: 15-30.
- 3) Zhang JY, Guest SD, Connelly R, and Ohsaki M. Dihedral ‘Star’ Tensegrity Structures, *Int. J. Solids, Structures*, 2010; **47**: 1-9.
- 4) Pandia Raj R. and Guest SD, Using Symmetry for Tensegrity Formfinding, *J. of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 2006; **47**: 245-252.
- 5) Zhang JY and Ohsaki M. Stability conditions for tensegrity structures, *Int. J. Solids, Structures*, 2007; **44**: 3875-3886.



(a) 解 v_1



(b) 解 v_2

図 11 十二面体群対称性を有するテンセグリティ構造の軸力密度行列の固有値と軸力密度の関係

細長比の大きな部材の個材振動制振についての基礎的研究

本田誠¹⁾, 山中宗徳²⁾, 石田伸幸³⁾, 前田潤滋⁴⁾

1) 日本鉄塔工業株式会社, m-honda@JSTeam.jp

2) 九州大学大学院人間環境学府, 大学院生, yamanaka@windmail.arch.kyushu-u.ac.jp

3) 日本鉄塔工業株式会社, 博士 (工学), n-ishida@JSTeam.jp

4) 九州大学大学院人間環境学研究院, 教授, 博士 (工学), maeda@arch.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

送電用鉄塔などのスパースなラチス構造物は、細長比が大きい細長い部材を多数有する。そのような細長比が大きい部材で初期応力が小さく、断面形状が鋼管や山形鋼の部材には、渦励振や他部材からの振動伝播の影響などによる部材振動が生じることが確認されている¹⁾。送電用鉄塔の構面結構によっては、塔体構面が塔体内外に振動する部材振動としてオバリング振動も発生する³⁾。これらの部材振動は、ボルト接合部のボルト緩みや溶接部の疲労損傷などを引き起こす可能性が考えられる。その対策として、従来は付加構造材の挿入や部材自体を交換し、サイズアップして剛性を増加させる方法が採用されてきた。しかし、工事が大掛かりになるケースや適用自体が困難となるケースが考えられるため、より簡便で経済的な工法が求められている。本報は、ダンピングシート（粘弾性体）を部材に貼付して部材自体の減衰を増加させることによる個材制振対策の可能性を検討する。本手法は、一般的に自動車などのメカニカルな機構の制振対策⁴⁾や騒音などの音環境対策⁵⁾として採用されており、その対象周波数領域は百～数 kHz である。これらに比べて鉄塔部材の個材振動は数～数十 Hz と低周波数領域であるが、そのような領域における本手法の適用事例⁶⁾は少なく、ダンピングシートの材料特性や適用範囲および適用位置などによる制振効果への影響は不明な点が多い。本報では、ダンピングシートとして採用する鋼鉄道橋規格 (SRS) を満足する高減衰ゴムの素材試験を実施して、高減衰ゴムの材料特性を把握するとともに材料特性モデルを構築して、鋼板片持ち梁モデルの振動試験と材料特性モデルを反映させた有限要素解析の結果から制振対策の有効性について検討した。また、鋼板板厚や高減衰ゴムの取付位置および範囲、さらに振動試験にて有意な制振効果を与えるために必要であることが明らかとなった拘束板の板厚をパラメータとした解析を実施し、各パラメータが制振効果に与える影響について報告する。

2 高減衰ゴムの材料特性

2.1 単純せん断試験

高減衰ゴムの材料特性（等価せん断弾性率、等価減衰定数）を把握するため、鋼板に高減衰ゴムを貼付した図1の供試体を用いて動的単純せん断試験を図2のように行った。供試体の高減衰ゴムと鋼板は専用接着剤にて一体化した。試験ケースは表1のように温度と加振周波数をパラメータとした計15ケースである。供試体のばらつきを考慮し、3体を試験して平均値にて評価した。事前試験にて、接着面が載荷荷重2kN（高減衰ゴムせん断応力度 $\tau \approx 0.3\text{MPa}$ ）にて剥がれた為、載荷荷重が1.5kN（ $\tau \approx 0.25\text{MPa}$ ）以下となるように調整して試験した。

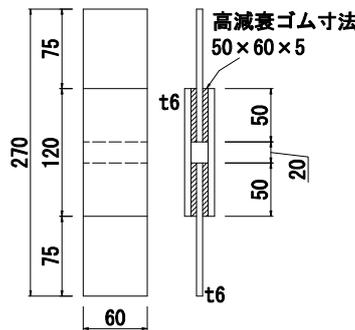


図1 供試体

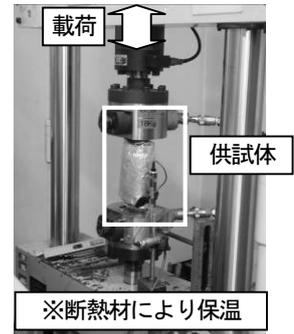


図2 試験状況

表1 試験ケースおよび試験結果(3体平均)

供試体温度 (°C)	加振周波数 (Hz)	せん断ひずみ (%)	等価せん断弾性率 G_{eq} (MPa)	H_{eq}
0	0.1	0.47%	33.65	0.158
0	5	0.19%	72.49	0.127
0	10	0.24%	72.89	0.117
0	20	0.20%	85.00	0.122
0	30	0.16%	87.05	0.119
20	0.1	2.94%	4.56	0.212
20	5	0.91%	12.55	0.175
20	10	0.93%	13.44	0.171
20	20	0.81%	15.74	0.160
20	30	0.79%	16.98	0.153
50	0.1	10.39%	0.71	0.279
50	5	3.07%	2.42	0.212
50	10	3.27%	2.88	0.199
50	20	3.37%	3.36	0.189
50	30	3.42%	3.62	0.177

試験で得られる図 3 のような荷重-変位曲線より算出した等価せん断弾性率と等価減衰定数を前述の表 1 と図 4 および図 5 にそれぞれ示す。全ケースで載荷荷重が 1.5kN 程度となるように試験を実施したため、せん断ひずみは 0.16~10.39%と一定でない。しかし、全体的な傾向として加振周波数が増加するに伴って、等価せん断弾性率は増加し、等価減衰定数は一定値に収束する。

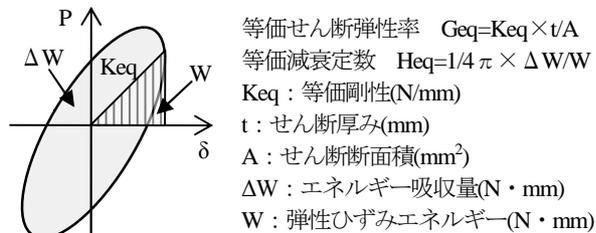


図 3 荷重-変位曲線および等価せん断弾性率と等価減衰定数

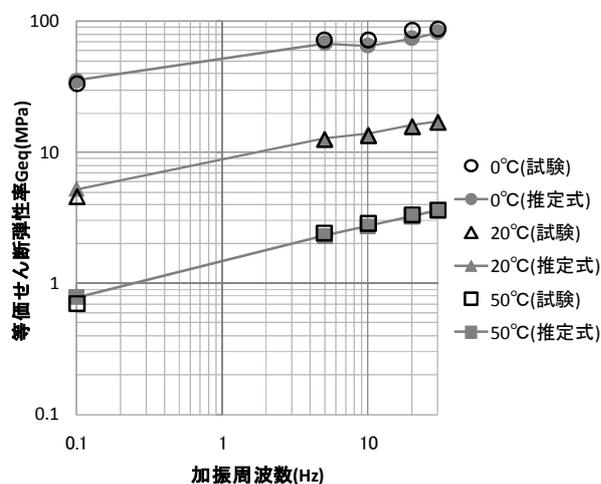


図 4 等価せん断弾性率 G_{eq}

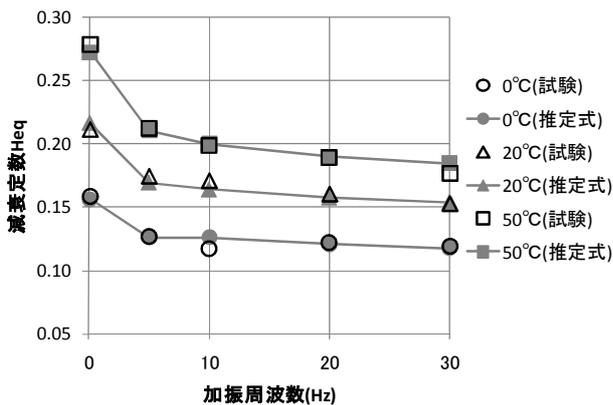


図 5 等価減衰定数 H_{eq}

表 2 各係数

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
39.5467	0.004	0.079	0.006	-0.376	-0.031	-1.943
b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
3.8608	-0.0007	-0.0344	-0.0021	0.0857	-0.0006	-2.826

2.2 加振周波数と振幅および温度に依存する等価せん断弾性率 G_{eq} と等価減衰定数 H_{eq} の近似式

加振周波数と振幅および温度に対する等価せん断弾性率 G_{eq} と等価減衰定数 H_{eq} との関係を表(1)と(2)で近似し⁷⁾、図 4 と図 5 の試験結果を用いて最小二乗法にて各係数 ($a_0 \sim a_6$, $b_0 \sim b_6$) を算出した。

$$G_{eq} = a_0 f^{(a_1 \theta + a_2)} \gamma^{(a_3 \theta + a_4)} e^{(a_5 \theta + a_6)} \quad (1)$$

$$H_{eq} = b_0 f^{(b_1 \theta + b_2)} \gamma^{(b_3 \theta + b_4)} e^{(b_5 \theta + b_6)} \quad (2)$$

表 2 に各係数の算出結果および図 4 と図 5 にそれぞれ式(1)と式(2)による推定結果を示す。推定式は、等価せん断弾性率 G_{eq} と等価減衰定数 H_{eq} とともに試験結果を精度良く再現できることが分かった。温度 0~50°C, 周波数 30Hz 以下, せん断応力度 $\tau \leq 0.3\text{MPa}$ (接着面が損傷を受けない応力) の条件下において, 等価せん断弾性率 G_{eq} と等価減衰定数 H_{eq} は式(1)と(2)によって推定可能と考えられる。

2.3 解析モデルの構築

供試体の時間特性 (周波数依存性) を表現できる一般化 Maxwell モデルを用いて高減衰ゴムの材料特性を次式にて表すことにする。

貯蔵せん断弾性率

$$G'(\omega) = G_0 + \sum_{i=1}^N \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} G_i \quad (3)$$

損失せん断弾性率

$$G''(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2} G_i \quad (4)$$

損失係数

$$\tan \delta = G''(\omega) / G'(\omega) \quad (5)$$

式(1)と(2)の推定式において, せん断ひずみ 1%, 温度を 0°C, 20°C, 50°Cとしたときの等価せん断弾性率 G_{eq} と等価減衰定数 H_{eq} を用いて算出した貯蔵せん断弾性率 $G'(\omega)$ と損失せん断弾性率 $G''(\omega)$ をもとに, 最小二乗法でせん断弾性率 G_i と緩和時間 τ_i を求めた結果 (以下, Prony 級数近似結果) を表 3 と図 6 にそれぞれ示す。推定式と Prony 級数近似の貯蔵せん断弾性率と損失せん断弾性率は, 0°Cで若干誤差が生じているが, 概ね一致することが分かった。

また、推定式にて周波数を $1.0^5(\text{Hz})$ とした時を「準静的載荷」と見なし、図7に示すような3次のMooney-Rivlinモデルにて応力度-ひずみ曲線を模擬することとした。

以上の結果を反映させた高減衰ゴムの材料特性を用いて、せん断ひずみ1%として加振周波数を変化させて、単純せん断試験を模擬した解析を行ったときの等価せん断弾性率および等価減衰定数を図8と図9に示す。

等価せん断弾性率は、 0°C と 20°C では式(1)と(2)による推定式と解析結果は概ねよく対応しているが、 50°C では解析が推定式を下回っていた。等価減衰定数は、 0°C と 20°C および 50°C の全ての温度にて解析が推定式を下回っていることが分かったが、周波数が増加するに伴い、ある一定値に収束する傾向は一致する。解析は、等価せん断弾性率の一部と等価減衰定数にて推定式と若干の誤差が見られたが、全体の傾向は合致していることから材料特性モデルは概ね妥当であると判断した。

表3 せん断弾性率 G_i と緩和時間 τ_i

温度($^\circ\text{C}$)	(MPa)					(sec)			
	G_0	G_1	G_2	G_3	G_4	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4
0	14.69	15.25	28.23	11.30	14.76	0.0084	0.0008	2.0761	0.0786
20	3.04	4.90	8.99	4.64	5.20	0.0120	0.0019	2.6284	0.0860
50	0.47	1.37	2.84	0.92	1.42	0.0106	0.0017	1.8040	0.0713

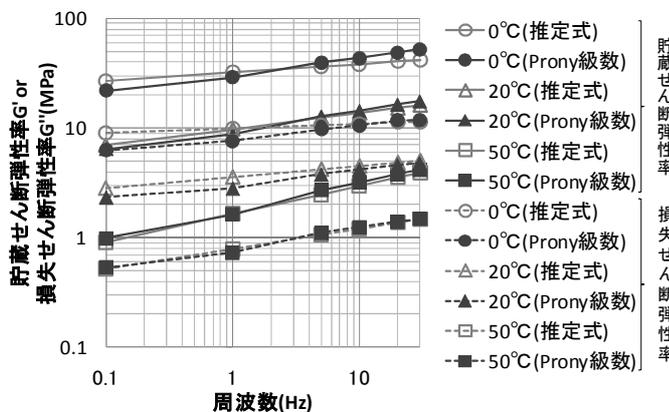


図6 貯蔵せん断弾性率 G' と損失せん断弾性率 G''

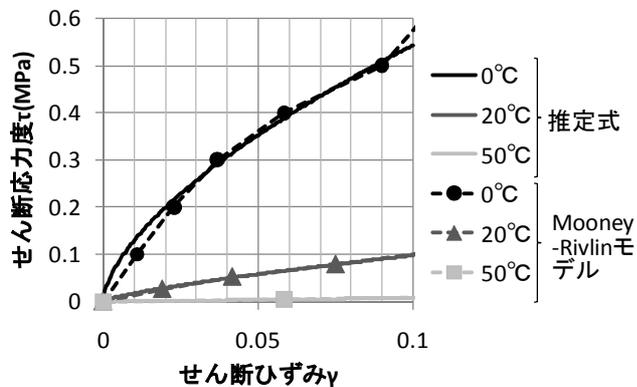


図7 せん断応力度-せん断ひずみ曲線

3 鋼板片持ち梁モデルの自由振動試験

高減衰ゴムの部材への貼付による基本的な制振効果について検討するため、固有振動数を約5Hzに設定した片持ち梁の鋼板(図10, 図11)を用いて自由振動試験を行った。試験ケースは鋼板のみのケース, 高減衰ゴムを鋼板の固定端側の1/2に貼り付けたケース, 高減衰ゴム

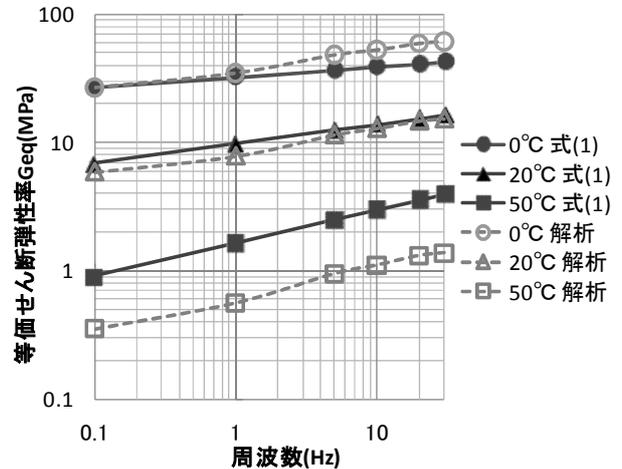


図8 等価せん断弾性率 G_{eq}

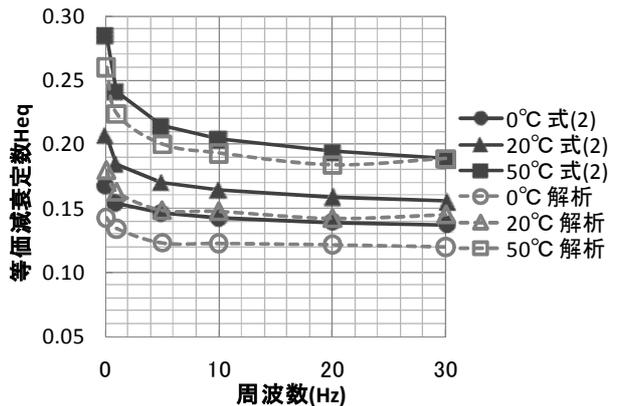


図9 等価減衰定数 H_{eq}

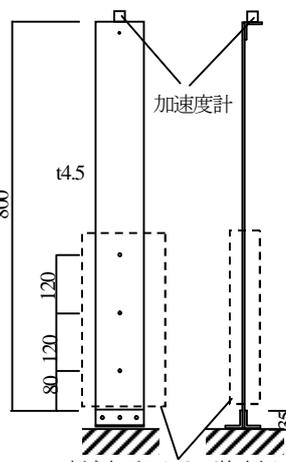


図10 試験体図面

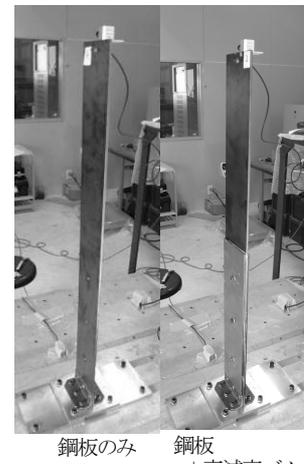


図11 試験体

を貼り付けた後に拘束板にて挟み込んだケース、および鋼板に拘束板のみを取り付けて質量変化による影響を検討したケースの全6ケースとして、各試験体名を表4のように記号化した。なお、拘束板厚さによる影響について検討するため、表5に示すように板厚1.2mm(拘束板A)と2.3mm(拘束板B)の2種類を用意した。鋼板と高減衰ゴム、高減衰ゴムと拘束板、鋼板と拘束板は2.1節の単純せん断試験と同様に専用接着剤にて固着した。試験は、試験体頂部に強制変位を与えて自由振動させ、試験体頂部に設置した加速度計にて頂部加速度を計測し、その計測データをもとに各ケースの減衰評価を行った。

図12に自由振動試験結果を示す。高減衰ゴムのみを貼り付けたB-HDRでは固有振動数は変化なく、減衰も僅かな増大はあるが、ほぼ変化が見られない。B-HDRに拘束板を取り付けたB-HDR-P1.2とB-HDR-P2.3では、拘束板の影響により固有振動数が7.0Hz, 8.0Hzと高くなり、拘束板が厚いB-HDR-P2.3の方が固有振動数が高いことが分かった。減衰は両者とも著しく増大し、B-HDR-P1.2では3.75%程度、B-HDR-P2.3では3.5%程度となり、拘束板の厚いB-HDR-P2.3が僅かに小さくなる傾向が見られた。拘束板のみを取り付けた

表4 試験体一覧

試験体名	内容
B	鋼板のみ
B-P1.2	鋼板+拘束板A
B-P2.3	鋼板+拘束板B
B-HDR	鋼板+高減衰ゴム
B-HDR-P1.2	鋼板+高減衰ゴム+拘束板A
B-HDR-P2.3	鋼板+高減衰ゴム+拘束板B

表5 拘束板および高減衰ゴムの寸法

	寸法(mm)
高減衰ゴム	400×100×2.0
拘束板A	400×100×1.2
拘束板B	400×100×2.3

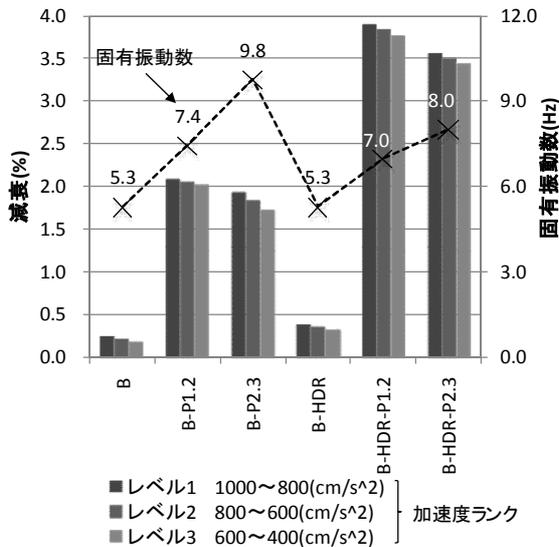


図12 自由振動試験結果

B-P1.2とB-P2.3は、拘束板による剛性増加にて固有振動数が7.4Hz, 9.8Hzと高くなる。減衰はB-P1.2では2.0%程度、B-P2.3では1.75%程度に増加する。よって、拘束板を取り付けるだけでもある程度の制振効果が期待できると考えられるが、減衰の定量的な評価は困難であるため、制振対策としては適用できないと考えられる。全ケースにおいて、加速度ランクがレベル1~レベル3になるに伴い、減衰も減少する傾向が見られ、その程度もほぼ同等であることから高減衰ゴムと拘束板を取り付けたB-HDR-P1.2とB-HDR-P2.3において、減衰の著しい振幅依存性はないものと考えられる。

4 自由振動試験のシミュレーション解析

前節の鋼板片持ち梁モデルの自由振動試験より、高減衰ゴムのみでは有意な制振効果は得られず、高減衰ゴムと拘束板を併用することにより大きな制振効果が得られることが分かった。2節にて構築した高減衰ゴムの材料特性モデルを適用して自由振動試験のシミュレート解析を実施して、制振効果を検討するとともに構築した高減衰ゴムの材料特性モデルについての妥当性を検証する。

解析モデルは図13に示すように鋼板と高減衰ゴムおよび拘束板の全てをソリッド要素として再現した。自由振動試験時における雰囲気温度が20~25°Cであったことから、高減衰ゴムの材料特性モデルは2節に示す温度20°Cと同手順にて作成した温度25°Cの2種類の諸元を用いてそれぞれ解析を行った。解析結果を図14と図15および表6にそれぞれ示す。B-HDR-P1.2とB-HDR-P2.3の両者とも温度20°Cにて固有振動数と減衰定数が試験値とほぼ一致しており、自由振動波形は試験結果と良く対応することが分かった。また、温度が25°Cの解析は減衰定数では、概ねよく対応していると考えられるが、固有振動数が試験より若干小さくなっていることから自由振動波形にて時間経過と共に両者の差が大きくなる。試験実施時の雰囲気温度は20~25°Cであったが、高減衰ゴムの温度は20°Cに近

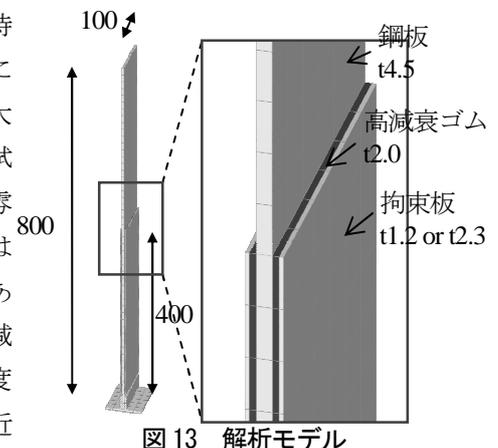


図13 解析モデル

い状態にて試験が実施されたためと考えられる。試験では、拘束板厚さの薄い B-HDR-P1.2 の方が B-HDR-P2.3 よりも僅かに減衰定数が大きくなる傾向を示したが、解析では B-HDR-P2.3 が僅かに大きくなる傾向を示している。原因として高減衰ゴムの材料特性のばらつきや設置誤差などが考えられるが、両試験体の解析結果とも試験結果を非常に良く模擬しており、高減衰ゴムの材料特性モデルは妥当であると判断できる。以上のことから、解析においても高減衰ゴムと拘束板を併用すれば、高い制振効果が得られることが分かった。

5 各パラメータが制振効果に与える影響

以下では、本手法による制振効果を総合的に把握するために高減衰ゴムと拘束板の取付位置、鋼板全長に対する取付範囲、拘束板厚さ、鋼板厚さの4因子について「実験計画法」を用いて検討する。自由振動試験で使用した鋼板片持ち梁モデルを用いて上記4因子を表7に示す各3水準として表8のL9直交表⁸⁾に割り付け、各ケースの

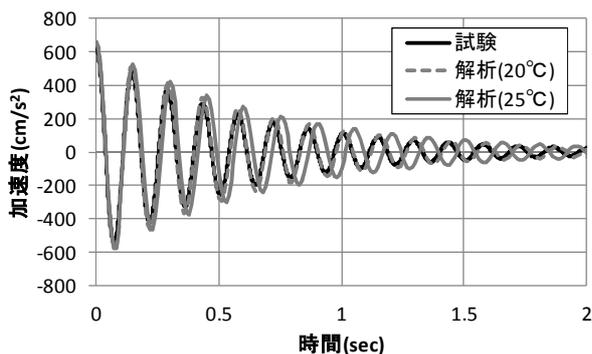


図14 解析結果 (B-HDR-P1.2)

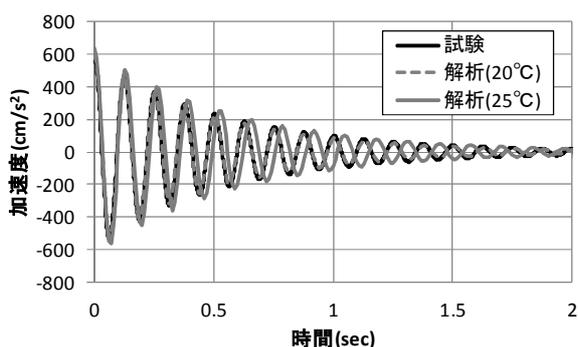


図15 解析結果 (B-HDR-P-2.3)

表6 解析結果

試験体名	項目	温度(°C)	固有振動数(Hz)	減衰定数(%)
B-HDR-P1.2	試験	20~25	7.0	3.8
	解析	20	6.9	3.7
		25	6.7	3.5
B-HDR-P2.3	試験	20~25	8.0	3.4
	解析	20	8.0	3.8
		25	7.7	3.6

自由振動解析を行い、各因子が制振効果に与える影響について検討した。図16に各因子と水準の概念図を示す。

表8のNo.1~9の自由振動解析から得られた減衰定数および固有振動数をもとに算出した「要因効果図」を図17に示す。図17下図の縦軸の振動数変動率は鋼板のみの固有振動数に対する固有振動数の変動率である。減衰定数に対する影響は高減衰ゴムおよび拘束板の取付位置が最も大きく、取付位置が「最下」が最も制振効果が大きくなる。「中央」および「頂部」では制振効果が著しく小さくなる。取付範囲はL/4~L/2と大きくなるに伴い、制振効果も大きくなる傾向を示す。温度により若干傾向が異なるが、拘束板厚さと鋼板厚さは制振効果に与える影響は小さい。振動数変動率でも最も影響が大きいのは取付位置であり、「最下」では固有振動数が大きくなるが、頂部では小さくなることが分かった。取付範囲と拘束板厚さは振動数変動率に対する影響は小さい。鋼板厚さは板厚の増加に伴い、振動数変動率も大きくなる傾向を示し、取付位置に次いで影響が大きい。取付位置の影響より非常に小さい。以上より、制振効果および振動数変動率には、取付位置がその他の因子より影響が大きいことが分かった。

表7 因子および水準

因子	水準		
1 取付位置	最下	中央	頂部
2 取付範囲	L/4	L/3	L/2
3 拘束板厚さ	1.2	2.3	4.5
4 鋼板厚さ	2.3	4.5	6

表8 L9直交表

No.	因子			
	取付位置	取付範囲	拘束板厚さ	鋼板厚さ
1	最下	L/4	1.2	2.3
2	最下	L/3	2.3	4.5
3	最下	L/2	4.5	6
4	中央	L/4	2.3	6
5	中央	L/3	4.5	2.3
6	中央	L/2	1.2	4.5
7	頂部	L/4	4.5	4.5
8	頂部	L/3	1.2	6
9	頂部	L/2	2.3	2.3

※温度0°C, 20°C, 50°Cにてそれぞれ実施

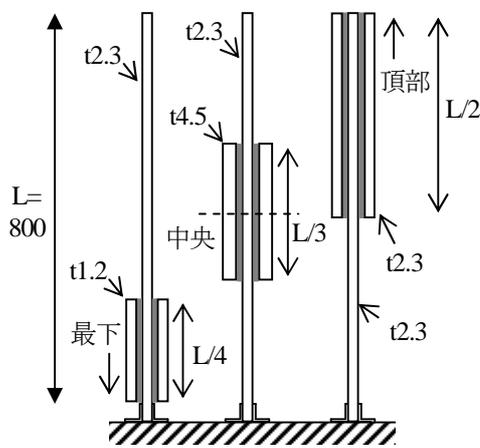


図16 因子および水準の概要

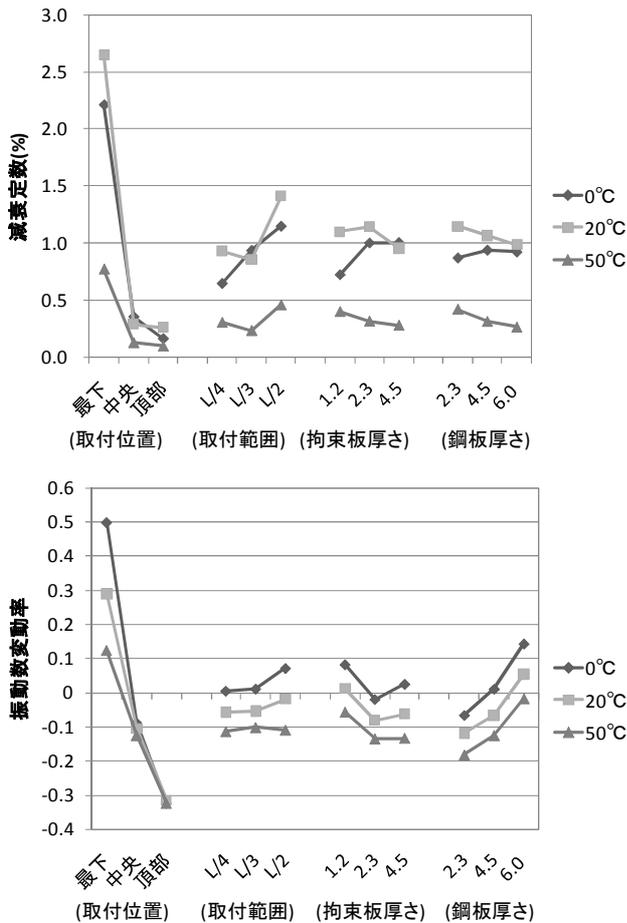


図 17 要因効果図

6 まとめ

送電用鉄塔などにおける渦励振や他部材からの振動伝播などによる個材振動に対して、高減衰ゴムと拘束板を取付ける簡易的な制振対策を提案し、鋼板片持ち梁モデルによる自由振動試験および有限要素解析から基本的な制振効果について検討した。上記より得られた知見を以下に示す。

- 1.単純せん断試験より得られた高減衰ゴムの材料特性を用いて構築した材料特性モデルの妥当性を確認した。
- 2.鋼板片持ち梁モデルによる自由振動試験より高減衰ゴムと拘束板を併用すれば、減衰定数 3.5%前後と高い制振効果が得られることが分かった。
- 3.高減衰ゴムの材料特性モデルを反映させた解析モデルを用いて鋼板片持ち梁モデルの自由振動シミュレーション解析が、試験結果を精度良く模擬できることが分かった。また、高減衰ゴムと拘束板を取付けることにより高い制振効果が得られることを確認した。
- 4.「実験計画法」を用いて、鋼板片持ち梁モデルの高減

衰ゴムと拘束板の取付位置、取付範囲、拘束板厚さ、鋼板厚さを 4 因子 3 水準で L9 直交表に割り付けて、各ケースの自由振動解析を行ない、要因効果図を求めた結果、取付位置が制振効果と固有振動数の変動に対して最も影響が大きいことが分かった。

本報では、鋼板片持ち梁モデルを用いてダンピングシート貼付による制振効果について検討した結果、高い制振効果が期待できることが分かった。しかし、実機への適用には鋼管などの断面形状の違いや両端ピン支持などの支持条件の違いなどが制振効果に与える影響について、さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 淡嶋毅弘, 大熊武司, 本郷榮次郎, 漆原秀雄, 丸川比佐夫, 岡村俊良: 鋼管トラス鉄塔における腹材の風応答に関する実測, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 構造 I, pp.137~138, 2004.8
- 2) 山戸秀晃, 本田誠, 藤村真弓, 海老原修二, 森本康幸, 前田潤滋: 送電線吊架装置を含む鉄塔-送電線連成系振動特性に関する実機試験 (その 1 加振試験による振動特性の概要), 日本風工学会誌, No.119, pp.191~192, 2009
- 3) 海老原修二, 石田伸幸, 荊尾治邦, 前田潤滋: 強風時における送電鉄塔の構面外振動特性について (その 1), 日本風工学会誌, No.99, pp.167~168, 2004
- 4) 日本機械学会: 新技術融合シリーズ 第 4 巻 振動のダンピング技術, 養賢堂, 1998
- 5) 平野廣和, 連重俊: 鋼橋の低周波数域騒音環境対策システムの開発と試験施工, 中央大学理工学研究所論文集, 第 9 号, 2004
- 6) 幽谷榮二郎, 細見雅生: 小型制振装置 BH-TMD の開発, 駒井技報, Vol.24, pp.1~7, 2005
- 7) 黄一華, 加藤敬史, 和田章, 岩田衛, 竹内徹, 大熊潔: 振動数と温度に依存する粘弾性ダンパーの動的力学モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 516 号, pp.91~98, 1999
- 8) 井上清和, 中野恵司, 林裕人, 芝野広志, 大場章司: 入門パラメータ設計, 日科技連, 2008

建築構造物のライフサイクルデザイン手法に関する研究 - 構成要素間における修繕周期の倍数関係の考慮 -

○吉田 英樹¹⁾, 中田 聡²⁾, 大森 博司³⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻M1, hyoshida@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻M2, nakata@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

3)名古屋大学大学院環境学研究科教授, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序論

現代に生きる私達と将来の世代のために、建築構造物のライフサイクル (Life Cycle, LC) を考慮した設計をすることが必要である。本研究では、構法的序列を考慮したライフサイクルデザイン手法を用いて具体的な解析を行い、結果を考察する。

建築物のライフサイクルプロセスには種々の不確定要因が存在する。その一つとして各部材、各材料における経年劣化の不確定性が挙げられる。経年劣化の不確定性には様々な実証的研究が行われてきたが、環境条件や修繕状況、腐食対策の有無などの要因により劣化関数形状の定式化が困難であるという事実は依然変わらず、ライフサイクルデザイン (Life Cycle Design, LCD) を行う上でこの要因の考慮は不可避な課題であるといえる。

さらに不確定要因として本研究に適用されている遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA) が挙げられる。GA とは探索空間の莫大な組合せ最適化問題について大域的最適解の近傍解を算出していく手法であり、各問題に対して解析手法の定式化が行われる。最適解の精度は定式化された解析手法の厳密性に依存しており、単一目的最適化手法の厳密性が多目的最適化における適合度の向上に大きく寄与すると考えられる。

本研究には二つの目的があり、一つは劣化関数の形状不確定性がもたらす誤差を示すことで劣化関数を精密に設定することの有意性について考察することを目的とし、一つは単一目的 LC 最適化問題において、構成要素間における修繕周期に倍数関係が成立することに着目し、それを利用した LC 評価手法の構築を目的とする。

2 劣化関数の形状不確定性が及ぼす影響

建築構造物の各構成要素に用いられる材料にここに与えられる劣化関数について、その形状不確定性が LCCO₂ 手法の検討を行なう。倍数関係を考慮した LC 評価手

にどれだけ影響を与えるかを単一目的 LCCO₂ 最適化を通して評価する。評価対象期間は100年とし、評価対象とする劣化関数形状は図1に示す5通りと設定する。問題領域、GAパラメータを図2、表3に示す。

表2より、Test B, Test C間を除き、Test AからTest EにかけてLCCO₂が増加していることがわかる。Test B, Test C間において大小関係が逆転しているのはGAによる解析誤差であり、Test AからTest Eにかけての差は設計内容がほぼ一致していることから劣化関数の形状の差によるものと考えられる。

以上の結果より、劣化関数の形状によりLCCO₂の差は生じるが、他の設計内容やGAの解析誤差といった要因と比較して影響度は小さいといえる。

表1 GAパラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Prob. of Crossover	0.80
Prob. of Mutation	0.01

表2 LCCO₂ 最小化値

LCCO ₂ (kg-CO ₂)	
Test E	76000.54
Test D	75604.05
Test C	75316.82
Test B	75352.01
Test A	75079.25

3 修繕周期の倍数関係を考慮した LC 評価手法

本研究では設計内容に構成要素間における修繕周期の倍数関係という法則を利用した解析手法および評価

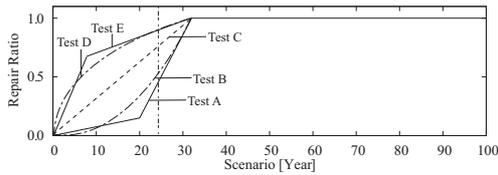


図1 解析対象とする劣化関数形状

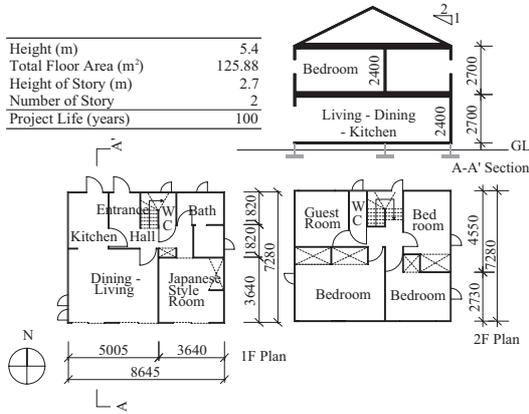


図2 問題領域

法として3種類の異なる視点に基づく手法、および長期供用期間を想定したLC評価手法について述べる。

ここで、本研究で用いる「構成要素間における修繕周期の倍数関係」とは既往の研究により得られていた知見である。図3、図4のように、ある部材の性能が0となる時点と構法的二位、あるいは二位上位の部材の性能が0となる時点が等しくなるシナリオ、即ち、「ある部材とその構法的二位、あるいは二位上位の部材の修繕周期が倍数関係にあるシナリオが最適となる」という知見である。

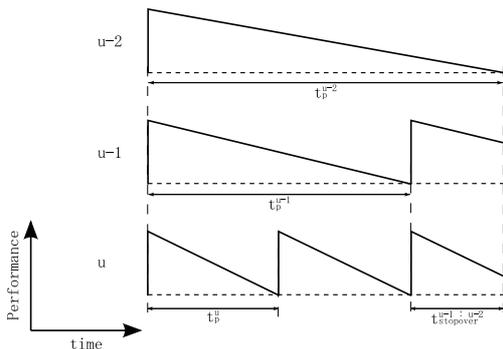


図3 修繕周期の倍数関係パターン1

3.1 GAを用いた解析結果に対する補正手法：手法1

従来の単一目的LCCO₂最小化解には選択されている修繕周期にばらつきがあり、得られた設計内容を人為的に補正することでLCCO₂をより小さくする設計内容を導出することが可能である。この補正を行う際

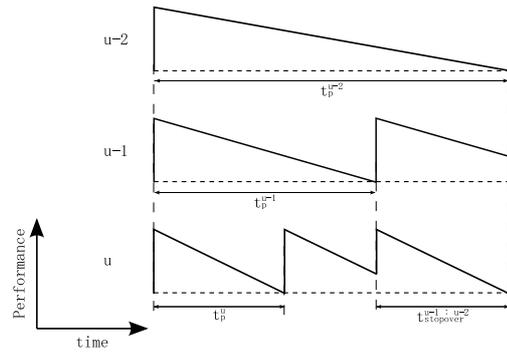


図4 修繕周期の倍数関係パターン2

に、本手法では修繕回数の最小化を考慮した補正を行う。また、本手法は「GAにより得られた設計内容をもとに補正を行うことである」ため、躯体の修繕周期は補正対象から除外する。本手法のフローを図5に示す。

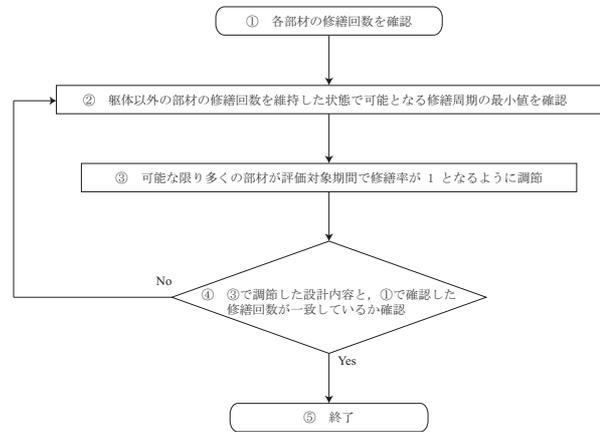


図5 手法1フロー

3.2 倍数関係を考慮した選択可能修繕周期の削減手法：手法2

手法1による人為的な解の補正が可能なることからわかるように、より大域的最適解の近傍にある解が存在している可能性が大いにある。この原因として探索空間が非常に大きいことが挙げられる。本手法ではGAの解析前に入力データにおける設計変数の選択肢から、最適解として選択され得る選択肢のみを抽出する。

図6に示すように抽出段階をStep1およびStep2に分類する。Step1では、各部材の各修繕周期に選択可能な材料が複数ある場合、LCCO₂が最小となる材料のみを選択しとして抽出する。またStep2では、Step1で抽出した仮想材料から、修繕周期の倍数関係を考慮して最適解となり得る修繕周期のみを抽出する。

本手法の修繕周期の抽出計算例を図7に示す。

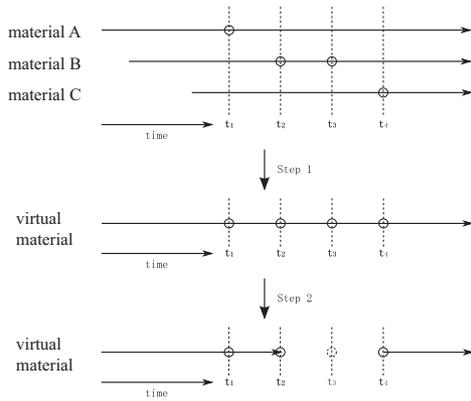


図6 修繕周期の抽出手法（概念図）

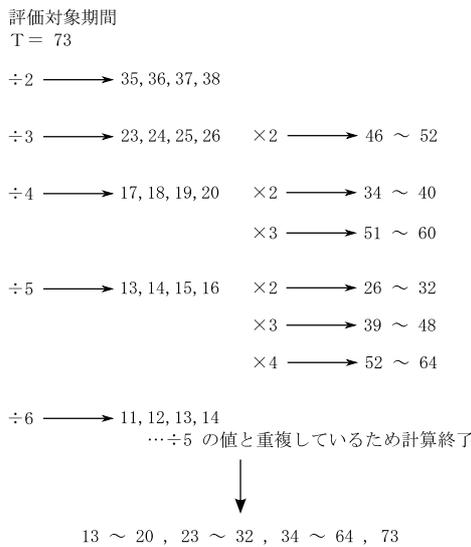


図7 修繕周期の抽出計算例

3.3 倍数関係を考慮した独自の LC 最適化手法：手法 3

本手法では、GA を用いずに独自の計算手法を構築し、修繕周期の倍数関係を考慮した最適解を導出する。本手法の構築にあたり、最適解における修繕周期の倍数関係のパターンを定義し、それをもとに導出を行う。

まず手法 2 で行った修繕周期の抽出を行い、その後躯体の各耐用年数において、定義したパターンに従って図 8 のように分枝形状に構法的下位部材の修繕周期を選択していく。これが完了すると、次は末端から順に LCCO₂ の小さなものを選択していく段階に移行する。これを「トーナメント式最適解導出手法」と呼称する。以上の計算によって得られた躯体の各耐用年数を比較することで、評価対象期間における LCCO₂ 最小化解が算出される。

hierarchy of members

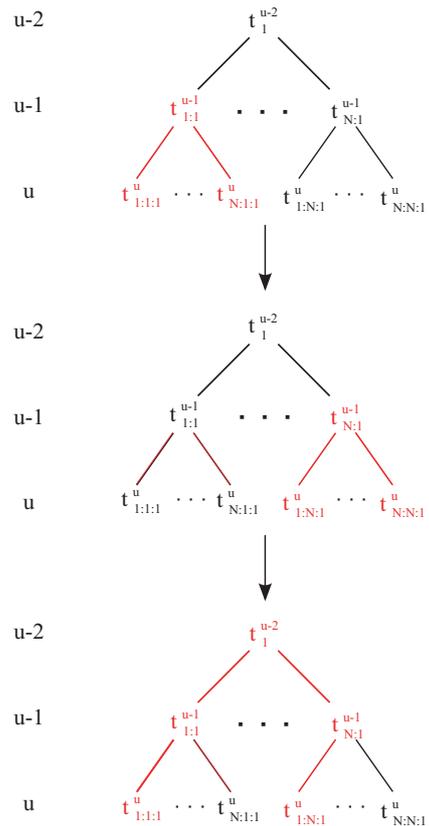


図8 トーナメント式最適解導出手法（概念図）

3.4 長期供用期間を想定した LC 評価手法

従来の LC 評価では、評価対象期間を設定した上での解析を行ってきた。しかしこのような解析では評価対象期間を超過して利用する場合に優位的な設計内容が得られる保証がない。

そこで本手法では各材料の躯体を最大限の耐用年数で、さらに修繕周期の倍数関係を考慮した設計内容の建築構造物を利用することが長期的な供用期間を想定した際に LCCO₂ がより減少した解となるという優位性を有するのではないかと考え、単一目的 LCCO₂ 最小化を通してその比較考察を行う。

4 修繕周期の倍数関係を考慮した LC 最適化

第 3 節で述べた LC 評価手法のうち、手法 1 および手法 2 を用いた場合、また長期供用期間を想定した LC 評価手法による場合について数値解析例を示し、考察を述べる。

4.1 手法 1 および手法 2

評価対象期間は素数である 73 年、世代数は 1000 世代とし、問題領域、GA パラメータを図 2、表 3 に示す。

従来の手法, 手法 1, 手法 2 における Step 1 のみ, Step 1 ~ 2 をそれぞれ用いた場合, 手法 1 および手法 2 を併用した場合の LCCO₂ 最小化値を表 4 に示す。

表 4 より, 手法 1 による値が従来の手法による値を下回っていることから人為的な補正が可能であることがわかる。また手法 2 の Step 1, さらに Step 2 を用いるほどに値が小さくなっていることから, 手法 2 の有意性が示されたといえる。また手法 1 および 2 を併用した場合により値が小さくなっていることから, より良好な解を算出する手法であるといえる。

表 3 GA パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Prob. of Crossover	0.80
Prob. of Mutation	0.01

表 4 LCCO₂ 最小化値

	LCCO ₂ (kg-CO ₂)
traditional method	63661.1
method 1	63494.3
method 2 Step 1	63227.1
method 2 Step 1-2	63185.2
method 1, 2	63160.9

4.2 長期供用期間を想定した LC 評価

各材料の最長耐用年数である木造 50 年, S 造 60 年, RC 造 100 年および一般的な設計内容の例として評価対象期間 70 年の場合の設計内容を用いて比較を行う。各設計内容における供用期間 350 年における LCCO₂ を図 9 に, さらに木造 50 年における解と評価対象期間 70 年における解の LCCO₂ を図 10 に示す。

図 9 より, S 造躯体と RC 造躯体は他の躯体に対して LCCO₂ が非常に大きいことがわかる。また図 10 より, 評価対象期間 70 年の場合および木造 50 年を比較すると, 供用期間 350 年の時点で木造 50 年の方が評価対象期間 70 年よりも約 10 % 下回っている。これは最適解の決定要因の一つである「修繕回数の最小化」が大きく影響しているため, 修繕回数の少ない木造 50 年を選択した設計内容の LCCO₂ が小さくなっており, それ以降の供用期間における大小関係は変動しないものと考えられる。

以上の考察により, CO₂ 発生量の小さな材料の躯体で最長の耐用年数を選択し, かつ倍数関係を考慮した設計内容は, 他の設計内容と比較して優位性を有する設計内容となっているといえる。

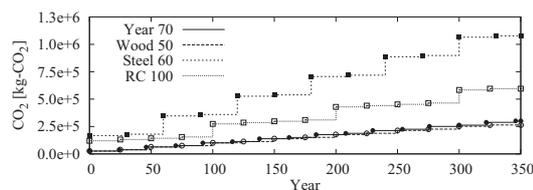


図9 LCCO₂ 経年累積 1

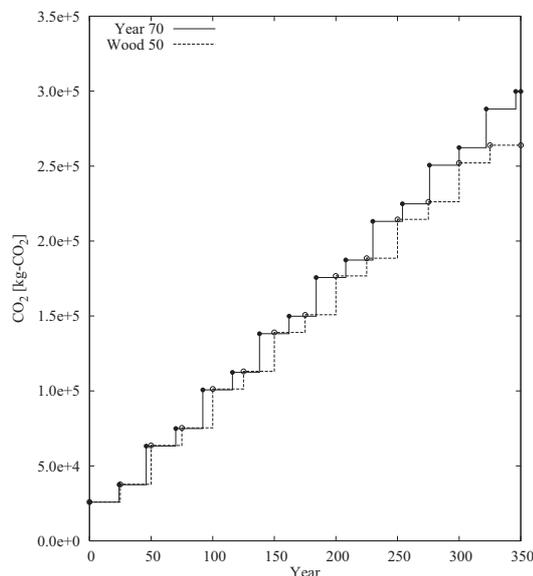


図10 LCCO₂ 経年累積 2

5 結

本研究では, 劣化関数の形状不確定性について, また修繕周期の倍数関係を考慮した LC 評価手法について単一目的 LCCO₂ 最小化を通して考察した。

劣化関数の形状不確定性に関しては, 劣化関数の形状により LCCO₂ に一定の差が生じることがわかったが, それらの上下関係は GA の解析誤差によって十分に変動しうる程度であり, 大きな不確定要因であるとは言えないことがわかった。

また, 修繕周期の倍数関係を考慮した手法では解析精度の向上に効果が見られ有意性が示されたといえるが, 現手法では他のモデルに対して汎用性に欠けるものである。今後の研究では評価期間の設定についての合理的な考え方に関して検討を加える予定である。汎用性の向上やより厳密な定式化がなされることで, 多目的 LC 最適化においても適用可能な手法となることが望まれる。

参考文献

- 1) 野田賢, 小林春之, 大森博司. 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究: その1:最適化手法. 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I .pp.351-352, 2005.

形態解析に対する現代微分幾何の導入

三木 優彰¹⁾, 川口 健一²⁾

1) 東京大学工学系研究科, 博士課程, mikity@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 東京大学生産技術研究所, 教授, 工博

1 はじめに

”接続”と”測地線”は微分幾何により定義される一般化された概念である。古典曲面論における測地線は二点間の最短曲線として知られており、これは構造工学においても広く知られている。例えば、張力膜構造の裁断線は測地線が理想的とされている。

しかし、微分幾何における、接続により定義される一般化された測地線は、構造工学にはあまり活用されていない。いずれの定義にせよ、測地線とは”直線”を一般化した概念であり、曲がった空間に対し客観的に”まっすぐな”方向を与えるから、非線形解析における探索空間に対しても適用可能であると考えられる。形状探索や最適化における非線形解析において、標準的な探索方向曲線として客観的に”まっすぐな”方向を採用することは、確かな意義をもつ。

問題提起のため、次の単純な最小化問題を考える。

$$L(q_1, \dots, q_4) \rightarrow \min \quad (1)$$

関数 L は2点間の距離を表す関数とする。2次元の平面で考える。 q_1, \dots, q_4 は2つの点の座標であるが、ここではパラメータと呼ぶことにする。問題の答えは明白である。2点が一致するとき、関数 L は最小値0をとり、これはパラメータの与え方には依存しない。

パラメータの与え方は様々で、例えば図1(a)と(b)に示す正規直交座標と極座標の場合を考える。このとき(1)式は

$$\begin{aligned} L_c(x_1, y_1, x_2, y_2) &\rightarrow \min \\ L_p(\theta_1, r_1, \theta_2, r_2) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

と2通りの表現で表せる。最小化問題のもっとも単純な非線形数値解法の一つ、最急降下法において、次に示す勾配がもっとも基本的な解の探索方向となる。

$$\begin{aligned} \nabla L_c &= \begin{bmatrix} \frac{\partial L_c}{\partial x_1} & \frac{\partial L_c}{\partial y_1} & \frac{\partial L_c}{\partial x_2} & \frac{\partial L_c}{\partial y_2} \end{bmatrix} \\ \nabla L_p &= \begin{bmatrix} \frac{\partial L_p}{\partial \theta^1} & \frac{\partial L_p}{\partial r^1} & \frac{\partial L_p}{\partial \theta^2} & \frac{\partial L_p}{\partial r^2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

このとき、勾配は長さの最大変化方向という客観的な意味を持ち、これはパラメータの与え方によらない。

最急降下法において、次式によるパラメータの逐次更新がもっとも基本的なアルゴリズムである。

$$\begin{bmatrix} \Delta q_1 & \Delta q_1 & \Delta q_2 & \Delta q_2 \end{bmatrix} = -\alpha \nabla L \quad (4)$$

ここで、 Δq_i はパラメータの修正量、 α は適当な係数である。 α の決め方としては、十分小さな一定値とするのがもっとも簡単であり、このとき解の探索は勾配の積分曲線に沿って行われる。また、勾配が客観的な意味をもつために、最急降下法においては扱い易いパラメータ、例えば正規直交座標を採用できる。

しかし、 α を一定とする方法は効率が悪く、実際の解析においては直線探索(Line Search)を行うのが一般的とされる。これは関数 L を最小にするような α を探すというものである。そこで次のような1パラメータ関数を考える。

$$\begin{aligned} c_c(t) &\equiv \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & x_2 & y_2 \end{bmatrix} + t \nabla L_c \\ c_p(t) &\equiv \begin{bmatrix} \theta_1 & r_1 & \theta_2 & r_2 \end{bmatrix} + t \nabla L_p \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式は、右辺第1項を始点とし、パラメータ t により滑らかに動くから、その意味で曲線である。図2に関数 L の勾配と(5)式の与える曲線を示す。勾配の単純な延長である(5)式はパラメータの与え方に依存してしまうことが図2よりわかる。従って、直線探索を行う最急降下法はパラメータの与え方に依存するので、パラメータの与え方を問題毎に考察する必要が生じ、大変煩雑である。

ところで、(5)式の代わりに、パラメータの与え方に依らない勾配の延長の仕方が予め用意されていれば、これを活用することで、勾配の延長を用いる場合も都合の良いパラメータ、例えば正規直交座標を採用できる。パラメータの与え方に依らない勾配の延長はなんらかの幾何学的な意味をもつと考えられるから、むしろこれを”まっすぐな”方向と定義してしまい、標準的な探索方向の延長として採用するのは自然な流れである。

今一度、図2をよく観察すると、両者はその始点において、異なる曲率をもっていることがわかる。従って

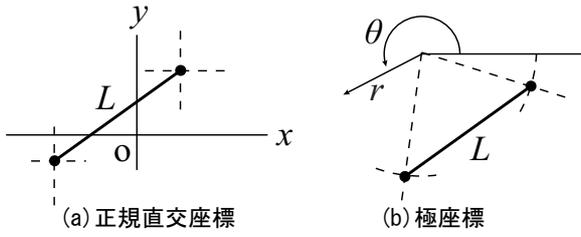


図1 異なるパラメータ

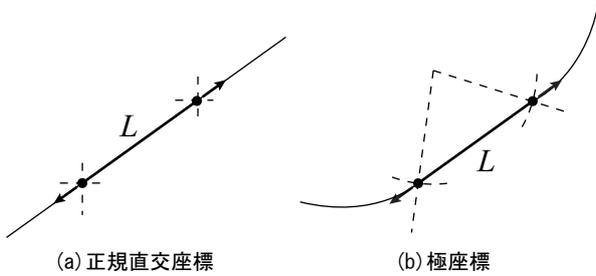


図2 勾配とその延長

そのような方向が、(5)式に関数 L の2階微分に関する項を付加する形で与えられることも推察できる。

さて、微分幾何における測地線はまさしくパラメータに依存しない一般化された”まっすぐな”を与え、接続とはまさしく曲率に関する項を与える概念である。本報ではその活用の仕方を探る第一歩として、測地線の計算と可視化を行う。ただし、非線形数値解法への組み込みにまでは踏み込まない。

第2節で文献[1, 3, 2, 4]を参考に、*Riemann*幾何学における接続と測地線の定義を紹介する。第3節で正方形を初期形状とし、四角形を表すパラメータを測地線に沿って移動し、その軌跡を可視化する。その際、異なる接続が異なる測地線を与えることを示す。

2 接続と測地線

2.1 接続係数

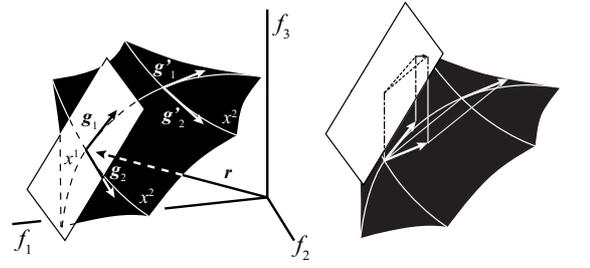
n 個のパラメータをとる m 本の関数列

$$\mathbf{r}(x^1, \dots, x^n) = \begin{bmatrix} f_1(x^1, \dots, x^n) \\ \vdots \\ f_m(x^1, \dots, x^n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

に対し幾何学的考察を行う。パラメータ $\{x^1, \dots, x^n\}$ を座標と呼ぶ。また

$$\mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x^1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x^1} \end{bmatrix}, \dots, \mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x^2} \\ \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x^2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

を共変基底（以下、単に基底）と呼ぶ。 $\mathbf{r} = [f_1 \dots f_m]$ を3次元ユークリッド空間における位置ベクトル、座標



(a) 共変基底と接平面 (空間) (b) 接平面 (空間) への正射影

図3 曲面

$\{x^1, \dots, x^n\}$ を2次元曲面上に与えられた曲面座標、接空間を曲面上の接平面に置き換えると理解しやすい(図3(a))。座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における基底 \mathbf{g}_i の線形結合

$$\mathbf{a} = a^i \mathbf{g}_i \quad (8)$$

を座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における接ベクトル、その集合を接空間と呼ぶ。ここで、*Einstein*の総和規約を用いた。関数列 \mathbf{r} の微小変化は次のように書ける。

$$d\mathbf{r} = dx^i \mathbf{g}_i \quad (9)$$

同様に基底 \mathbf{g}_i の微小変化は、 n^2 本の m 次元ベクトル

$$\frac{\partial \mathbf{g}_j}{\partial x^i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_1}{\partial x^i \partial x^j} \\ \vdots \\ \frac{\partial^2 f_m}{\partial x^i \partial x^j} \end{bmatrix} \quad (10)$$

の線形結合として

$$d\mathbf{g}_j = \frac{\partial \mathbf{g}_j}{\partial x^1} dx^1 + \dots + \frac{\partial \mathbf{g}_j}{\partial x^n} dx^n \quad (11)$$

と書ける。

これら $d\mathbf{g}_1 \dots d\mathbf{g}_n$ はベクトルであるが、 $\mathbf{g}_1 \dots \mathbf{g}_n$ で張られる接空間に属しているとは限らない。そこで $d\mathbf{g}_1 \dots d\mathbf{g}_n$ から接空間に直交する成分を取り除く。このようにして得られたベクトル $\delta \mathbf{g}_1 \dots \delta \mathbf{g}_n$ は $\mathbf{g}_1 \dots \mathbf{g}_n$ の線形結合として

$$\delta \mathbf{g}_j = w_{\cdot j}^1 \mathbf{g}_1 + \dots + w_{\cdot j}^n \mathbf{g}_n \quad (12)$$

と表せる。ただし、 $w_{\cdot j}^k$ は座標の微小変化 $dx^1 \dots dx^n$ を含み、

$$w_{\cdot j}^k = \Gamma_{ij}^k dx^i \quad (13)$$

として表される一次微分形式である。一般に $w_{\cdot j}^k$ を接続形式、 Γ_{ij}^k を接続係数と呼ぶ[4]。このとき、接続係数は

$$\Gamma_{ij}^k = \frac{\partial \mathbf{g}_j}{\partial x^i} \cdot \mathbf{g}^k = \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial x^i \partial x^j} \cdot \mathbf{g}^k \quad (14)$$

として与えられる。ただし、 $\mathbf{g}^1 \dots \mathbf{g}^n$ は $\langle \mathbf{g}_i, \mathbf{g}^j \rangle = \delta_i^j$ を満たす反変基底で、接空間内にとるものとする。まとめると、

$$\delta \mathbf{g}_j = w_{\cdot j}^k \mathbf{g}_k = \Gamma_{ij}^k dx^i \mathbf{g}_k \quad (15)$$

である。(14)式は反変成分を求める手続きである。一方、(15)式は反変成分を用いて共変基底による線形結合を構成する手続きである。この手続きにより $\delta g_1 \cdots \delta g_n$ は $g_1 \cdots g_n$ の張る接空間に正射影され、接空間に直交する成分は取り除かれた。(図3(b))このように接続係数を決める方法の一つとして、正射影を用いるものがある[2]。

実は(14)式は、Riemann計量のみ依存する次の第二種Christoffelの記号と一致する。

$$\left\{ \begin{array}{c} k \\ ij \end{array} \right\} = \frac{\partial g_i}{\partial x^j} \cdot g^k = \frac{1}{2} g^{kl} \left(\frac{\partial g_{il}}{\partial x^j} + \frac{\partial g_{jl}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial x^l} \right) \quad (16)$$

そこで、接続係数として第二種Christoffel記号を選択することをRiemann接続(もしくはLevi-Civita接続)と呼ぶ。(16)式によりRiemann計量のみから接続係数を決定することができる。

次節以降では接続係数を用いて、共変微分、平行移動、測地線をテンポよく定義する。本報では(16)式は用いず、(14)式を用いる。

2.2 共変微分

まず基底 g_j の $b = b^i g_i$ 方向への共変微分が、(15)式の dx^i を b^i で置き換えることにより、次式で定義される。

$$\nabla_b g_j = \Gamma_{ij}^k b^i g_k \quad (17)$$

次に、接ベクトル $a = a^j g_j$ の $b = b^i g_i$ の方向への共変微分が、成分 a^j が不変の場合(17)式の線形結合として次式で定義される。

$$\nabla_b a = a^j \Gamma_{ij}^k b^i g_k \quad (18)$$

成分 a^j が座標に沿って変化する場合共変微分は

$$\nabla_b a = \frac{\partial a^k}{\partial x^i} b^i + a^j \Gamma_{ij}^k b^i g_k \quad (19)$$

となる。 b^i を dx^i に戻し、成分の変化のみに着目して、 $\delta a^k \equiv \frac{\partial a^k}{\partial x^i} dx^i + a^j \Gamma_{ij}^k dx^i = da^k + a^j \Gamma_{ij}^k dx^i$ (20)

などとも書き[1]、以下ではこちらの表記も用いる。

ところで、工学分野で馴染みの深いベクトルの勾配(後形)

$$a \otimes \nabla \equiv \frac{\partial a}{\partial x^i} \otimes g^i \quad (21)$$

に $b = b^i g_i$ を右からかけたもの

$$a \otimes \nabla \cdot b = \frac{\partial a}{\partial x^i} b^i \quad (22)$$

を方向微分と呼ぶ[5]。これを $g_1 \cdots g_n$ の張る空間に射影する操作は

$$\begin{aligned} \sum_k \left(\left(\frac{\partial a^j}{\partial x^i} g_j b^i + a^j \frac{\partial g_j}{\partial x^i} b^i \right) \cdot g^k \right) g_k \\ = \left(\frac{\partial a^k}{\partial x^i} b^i + a^j \left(\frac{\partial g_j}{\partial x^i} \cdot g^k \right) b^i \right) g_k \end{aligned} \quad (23)$$

と書け、(14)式で定義された接続係数を用いれば

$$= \frac{\partial a^k}{\partial x^i} b^i + a^j \Gamma_{ij}^k b^i g_k \equiv \nabla_b a \quad (24)$$

となり共変微分と一致する。

2.3 平行移動

本節では、文献[1]3章を参照し、ベクトルの平行移動を定義する。座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における接ベクトル $a = a^j g_j$ に対し、十分に近傍な座標 $\{x^1, \dots, x^n\} + \{dx^1, \dots, dx^n\}$ における接ベクトル $a' = (a^j + da^j) g_j$ が、

$$\delta a^k = 0 \quad (25)$$

すなわち

$$da^k + a^j \Gamma_{ij}^k dx^i = 0 \quad \therefore da^k = -a^j \Gamma_{ij}^k dx^i \quad (26)$$

を満たすとき平行であると定義する。平行な二つのベクトル a と a' は同一ではないが、その差は座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における接平面と直交する。 a と a' を座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における接平面に正射影すれば、普通の意味で平行となる。次に n 個の1パラメータ関数

$$c(t) = \{x^1(t), \dots, x^n(t)\} \quad (\alpha \leq t \leq \beta) \quad (27)$$

で定義される曲線 $r(c(t))$ に沿った、座標 $\{x^1, \dots, x^n\}$ における接ベクトル

$$a_0 = a_0^i g_i \quad (28)$$

の平行移動を定義する。以下、 $r(c(t))$ と $c(t)$ を同一視し、断りなく $c(t)$ を曲線と呼ぶ。基本的なアイデアは(25)式で定義された平行なベクトルを曲線 $c(t)$ に沿って次々に繋いでゆくというものである。そのために

$$a(t) = a^i(t) g_i(c(t)) \quad (\alpha \leq t \leq \beta) \quad (29)$$

$$a^i(\alpha) = a_0^i \quad (30)$$

として、 $a^i(t)$ の満足する条件を定める。まず(25)式から dt を括り出す。曲線 $c(t)$ 上では

$$dx^i = \frac{dx^i}{dt} dt \quad (31)$$

である。また、 $a^i(t)$ は座標に依存しないこと、つまり

$$da^i = \frac{da^i}{dt} dt \quad (32)$$

を要請する。(25)式に(31),(32)式を代入することで

$$\delta a^k = \frac{da^k}{dt} dt + a^j \Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{dt} dt = 0 \quad (33)$$

を得る。 dt の任意性より

$$\frac{da^k}{dt} + a^j \Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{dt} = 0 \quad (34)$$

ベクトル $\mathbf{a}(t) = a^i(t) \mathbf{g}_i(c(t))$ は微分方程式(34)を満足するとき曲線 $c(t)$ に沿って平行であると言われる。微分方程式(34)の初期値が(30)式のように与えられたとき、その解は、ベクトルの曲線 $c(t)$ に沿った平行移動と呼ばれる。

2.4 測地線

平行移動が定義されたので、測地線を定義できる。本節も文献[1]3章を主に参照した。基本的なアイデアは、接ベクトル \mathbf{a} を \mathbf{a} 自身に沿って平行移動し、次々と繋いでゆくというものである。まず、曲線 $c(t) = \{x^1(t), \dots, x^n(t)\}$ の接ベクトルを、 $\mathbf{a}(t)$ とする。すなわち;

$$\begin{aligned} \mathbf{a} &= \frac{dr(c(t))}{dt} = \frac{\partial r}{\partial x^i} \frac{dx^i}{dt} = \frac{dx^i}{dt} \mathbf{g}_i \\ \therefore a^i(t) &= \frac{dx^i}{dt} \quad (\alpha \leq t \leq \beta) \end{aligned} \quad (35)$$

次に、 $\mathbf{a}(t)$ が曲線 $c(t)$ に沿った平行移動であるとき、曲線 $c(t)$ を測地線と呼ぶ。(34)式に(35)式を代入して

$$\frac{da^k}{dt} = -\Gamma_{ij}^k a^i a^j \quad (36)$$

として測地線の満たすべき微分方程式を得る。または、 a^i を \dot{x}^i と書く記法を用いて、

$$\frac{d\dot{x}^k}{dt} = -\Gamma_{ij}^k \dot{x}^i \dot{x}^j \quad (37)$$

曲線 $c(t)$ が測地線ならば、曲線 $c(t)$ 上で $\mathbf{a}(t)$ の $\mathbf{a}(t)$ 方向への共変微分はいたるところ零となる。図4(a)に接続のイメージを示す。図4(b)に x^1 に沿った平行移動と \mathbf{g}_1 を初期ベクトルとする測地線を示す。

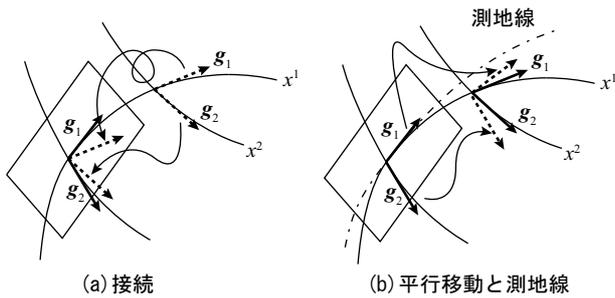


図4 接続と平行移動、測地線

3 簡単な計算例

本節では図(5)(a)に示す初期形状を用いた測地線の様々な計算例を紹介する。これは一辺1.0の正方形である。関数列を

$$\mathbf{r}(x^1, \dots, x^n) = \begin{bmatrix} L_1(x^1, \dots, x^n) \\ \vdots \\ L_m(x^1, \dots, x^n) \end{bmatrix} \quad (n=8, m=4) \quad (38)$$

とおく。 $L_1 \dots L_4$ は四角形を構成する4つの辺の長さであり、 $x^1 \dots x^n$ は4つの頂点の x, y 座標である。各関数 L_j は2点間の距離として

$$l(p_1, p_2, p_3, p_4) \equiv \sqrt{(p_1 - p_3)^2 + (p_2 - p_4)^2} \quad (39)$$

の形式で与える。 $p_1 \dots$ は $x^1 \dots$ から辺ごとに指定する。

関数 f の1階偏微分係数を並べたものを

$$\nabla f \equiv \left[\frac{\partial f}{\partial x^1} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial x^n} \right] \quad (40)$$

と書き勾配と呼ぶ。関数 L_j の勾配ベクトルを構成するには、(39)式の勾配

$$\begin{aligned} \nabla l &\equiv \left[\frac{\partial l}{\partial p_1} \quad \frac{\partial l}{\partial p_2} \quad \frac{\partial l}{\partial p_3} \quad \frac{\partial l}{\partial p_4} \right] \\ &= \frac{1}{l} [(p_1 - p_3) \quad (p_2 - p_4) \quad (p_3 - p_1) \quad (p_4 - p_2)] \end{aligned} \quad (41)$$

を参考にすればよい。各成分は方向余弦と呼ばれている。勾配を縦に並べたものは Jacobian と呼ばれるが、これは同時に共変基底を横に並べたものでもある。すなわち;

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &\equiv \begin{bmatrix} \nabla L_1 \\ \vdots \\ \nabla L_m \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial L_1}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial L_1}{\partial x^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial L_m}{\partial x^1} & \dots & \frac{\partial L_m}{\partial x^n} \end{bmatrix} \\ &\equiv \left[\mathbf{g}_1 \quad \dots \quad \mathbf{g}_n \right] \end{aligned} \quad (42)$$

また、関数 f の2階偏微分係数を並べたものを

$$\mathbf{H}(f) \equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x^1 \partial x^1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x^1 \partial x^n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x^n \partial x^1} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x^n \partial x^n} \end{bmatrix} \quad (43)$$

と書く。これは Hessian と呼ばれている。関数 L_j の Hessian を構成するには(39)式の Hessian

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(l) &\equiv \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 l}{\partial p_1 \partial p_1} & \dots & \frac{\partial^2 l}{\partial p_1 \partial p_4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 l}{\partial p_4 \partial p_1} & \dots & \frac{\partial^2 l}{\partial p_4 \partial p_4} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{l} \left(-\nabla l^T \cdot \nabla l + \begin{bmatrix} \mathbf{I}_2 & -\mathbf{I}_2 \\ -\mathbf{I}_2 & \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (44)$$

を参照すればよい。ただし、 \mathbf{I}_2 は 2×2 単位行列、また、

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} (x_1 - x_3)^2 & (x_1 - x_3)(x_2 - x_4) \\ (x_2 - x_4)(x_1 - x_3) & (x_2 - x_4)^2 \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$\nabla l^T \cdot \nabla l = \frac{1}{l^2} \begin{bmatrix} \mathbf{G} & -\mathbf{G} \\ -\mathbf{G} & \mathbf{G} \end{bmatrix} \quad (46)$$

である。ここで、Hessianを並べた $n \times n \times m$ Hessian列

$$\mathbf{H} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{H}(L_1) \\ \vdots \\ \mathbf{H}(L_m) \end{bmatrix} \quad (47)$$

を準備する。これは2節(10)式に対応する。前節の考察を踏まえれば、接続係数を得るためには(47)式から $n \times n$ 本の m 次元ベクトルを取り出し、 $\mathbf{g}_1 \cdots \mathbf{g}_n$ の張る空間に正射影すればよい。ここで、 $H_{ij}(f) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^i \partial x^j}$ なる記法とJacobianの一般逆行列 \mathbf{J}^+ を用いて、次式により接続係数を決定できる。

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{ij}^1 \\ \vdots \\ \Gamma_{ij}^n \end{bmatrix} = \mathbf{J}^+ \cdot \begin{bmatrix} H_{ij}(L_1) \\ \vdots \\ H_{ij}(L_m) \end{bmatrix} \quad (48)$$

なぜならば、(48)式と(42)式から

$$\begin{bmatrix} \mathbf{g}_1 & \cdots & \mathbf{g}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Gamma_{ij}^1 \\ \vdots \\ \Gamma_{ij}^n \end{bmatrix} = \mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^+ \cdot \begin{bmatrix} H_{ij}(L_1) \\ \vdots \\ H_{ij}(L_m) \end{bmatrix} \quad (49)$$

と書けるが、一般に $\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^+$ は $\mathbf{g}_1 \cdots \mathbf{g}_n$ の張る空間への正射影を表すためである。

$n \leq m$ かつランク落ちがなければ \mathbf{J}^+ は擬逆行列、すなわち反変基底を並べたものとなり、(48)式と(14)式は一致する。それ以外の場合、(48)式と(14)は異なる。しかし、常に $\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^+$ は正射影なので、本報では(48)式を接続係数として採用し測地線を描いた。また、(38)式を拡張して、

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} \pi_1(L_1) \\ \vdots \\ \pi_m(L_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1^p \\ \vdots \\ L_m^p \end{bmatrix} \quad (50)$$

つまり関数列 \mathbf{r} として長さの累乗を用いた場合も同様に接続係数を求め、測地線を描いた。 p は指数(整数)である。このとき勾配やHessianは以下を参照して構成した。

$$\nabla \pi(l) = \frac{\partial \pi}{\partial l} \nabla l \quad (51)$$

$$\mathbf{H}(\pi(l)) = \frac{\partial^2 \pi}{\partial l^2} \nabla l^T \cdot \nabla l + \frac{\partial \pi}{\partial l} \mathbf{H}(l) \quad (52)$$

(51)(52)式から、JacobianとHessian列、さらに接続係数、測地線が共通の手続きにより得られる。

測地線の計算には(35)(36)式を参照し、 $2n$ 個のパラメータ $\{x^1, \dots, x^n, a^1, \dots, a^n\}$ に対し、増分値

$$\begin{aligned} \Delta a^k &= -\Gamma_{ij}^k a^j \Delta x^i dt \\ \Delta x^k &= a^k dt \end{aligned} \quad (53)$$

を毎ステップ求め

$$\begin{aligned} a_{\text{Next}}^k &= a_{\text{Current}}^k + \Delta a^k \\ x_{\text{Next}}^k &= x_{\text{Current}}^k + \Delta x^k \end{aligned} \quad (54)$$

として逐次更新した。 $\{a^1, \dots, a^n\}$ の初期値は総て共通で、図(5)(b)に示した通りである。dtは一定の刻み幅である。

図(6)にdt=0.5,ステップ数200とした時の(53)(54)式による四角形と頂点の軌跡を示す。関数列が異なると、測地線が異なることがわかる。また、測地線は関数列の変化速度を保つ方向に曲がってゆくことが予想できるが、確かにそうなっているようである。

次に、指数を $p = 4$ に固定し、刻み幅dtを様々に変更した時の軌跡を図(7)に示す。刻み幅を変更しても軌跡には影響がないことがわかる。

図(6)と同様の解析をステップ数1000まで続行した場合、指数を $p = 1.2$ としたものは軌跡が発散した。これは(53)式のような近似式は $\mathbf{a} = [a^1, \dots, a^n]$ のノルムが十分小さいときしか有効ではないためと考えられる。そこで、(54)式の直後で

$$\mathbf{a} := \mathbf{a}/|\mathbf{a}| * 0.005 \quad (55)$$

とし、ノルムを一定値とした。但し記号:=は右辺の左辺への代入である。また、以降の計算例では総てdt=1.0とした。

(55)式を導入し $p = 1 \sim 6$ について測地線を2000ステップ求めたものを図(8)に示す。図(8)(d)と図(7)を比較すると全く同一の軌跡が描かれており、(55)式の導入に問題ないことがわかる。

図(6)の軌跡は互いに異なるものの、 \mathbf{a} の初期値が同一なためによく似た軌跡を示した。ところが、図(8)は基本的には図(6)の延長であるにも関わらず劇的に異なる軌跡を示している。

これらの結果は形状決定や構造最適化における異なる目的関数の選択に対し、質の異なる探索空間の選択といった意味づけを行える可能性を示唆している。また、様々な関数列が生成する接続係数と測地線を標準的な探索方向の延長として用いることで、解に多様性が生まれる可能性がある。

図(8)(a),(b)において、正方形は最終的に直線状に潰れ、小さな回転をしながら動かなくなった。この現象は前述の発散と関連があると考えられる。

最後に $p = 4, 8$ として計算を10000ステップまで続行した場合の軌跡を図(9)に示す。

4 まとめ

接続と測地線を導入した。また、異なる関数列が異なる測地線を与えることを示した。

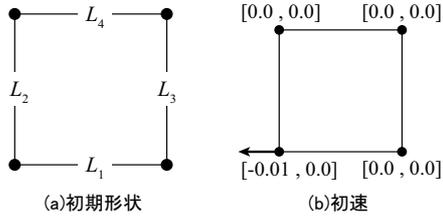


図5 例題

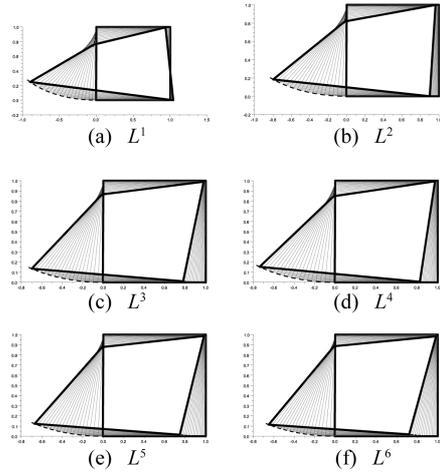


図6 測地線(200Step)

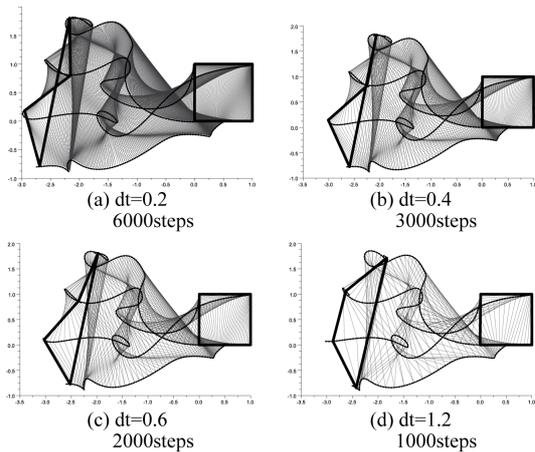


図7 異なる刻み幅と測地線($p = 4$)

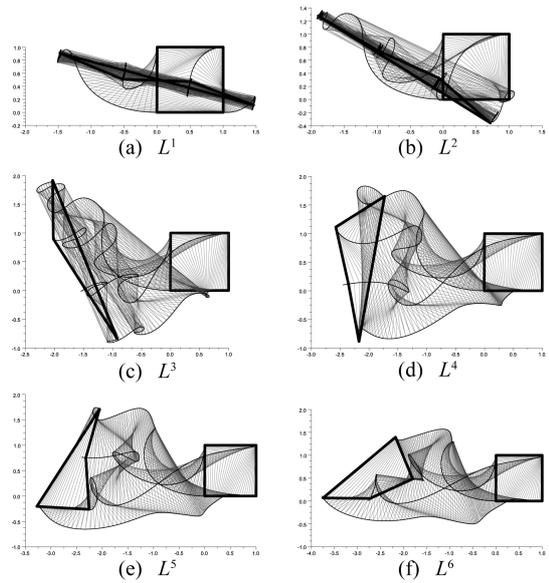


図8 異なる関数列と測地線

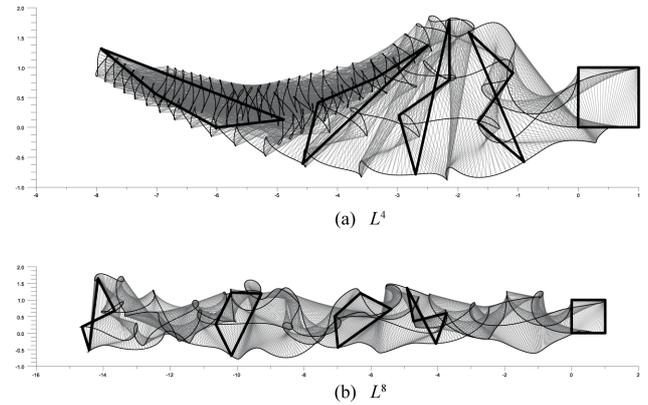


図9 10000Step

参考文献

- 1) 矢野健太郎, 接続の幾何学, 森北出版, 2004
- 2) 小沢哲也[著], 砂田利一, 黒川信重[共著], 曲線・曲面と接続の幾何, 培風館, 1998
- 3) 田代嘉宏, テンソル解析, 裳華房, 2010
- 4) R. W. R. Darling, 時田節訳, 微分形式と接続, ピアソン, 2000
- 5) 久田俊明, 非線形有限要素法のためのテンソル解析の基礎, 丸善, 1992

アーチの地震動最適形状

山田 耕司¹⁾

1) 豊田工業高等専門学校, 准教授, 博士(工学), kyamada@toyota-ct.ac.jp

1 序

空間構造では, 力学的合理性に基づいた形態が要求される。このため, 菊竹ら¹⁾, 大森ら²⁾を始め, 多様な研究が行われている。これら空間構造の最適形状に関する研究は, 主に自重下における最適化を行っている。また, 山本ら³⁾, 小河ら⁴⁾は, 線形座屈荷重を目的関数として形状最適化している。一方で, 地震時を考慮すれば, 地震時の応答低減を図る最適化も必要となる。著者の知る範囲では, 大森ら²⁾が, 静的横力に対するドームの形態最適化, FERNANDEZ ら⁵⁾が地震動に対する塔状型円筒シェルの形態最適化, 山下ら⁶⁾は風荷重下での屋根形状最適化を行っているのみである。そこで本報では, アーチの地震動に対する形状最適化問題を検討する。

2 解析モデルおよび地震動

解析モデルは, 一方向ヴォールト屋根を想定し, 張間方向のアーチ形状を最適化する。アーチのスパンは 50m, ライズ/スパン比(R/S 比)を 0.2, 0.3, 0.4 とする。アーチ端部はピン, 桁行き方向アーチ間隔を 5m, 非構造材自重(桁行き構造材を含む)を 9075N/m と仮定した。アーチの初期形状は円弧とし, 鋼管を用い, その断面は長期荷重で 160N/mm² 以下となるように, R/S 比=0.3 で直径 300mm 厚さ 10mm, R/S 比=0.3 で直径 400mm 厚さ 20mm, R/S 比=0.4 で直径 500mm 厚さ 30mm とした。

地震動は, 観測波として PEER Strong Motion Database の IMPVALL /I-ELC, KERN /TAF, KOBE /KJM, KOBE/TAK の 3 成分を NS 成分+UD 成分, EW 成分+UD 成分の 2 セットで使用した。なお, 水平動・鉛直動の最大加速度比を固定したまま, 最大水平加速度を 400gal に基準化している。加えて, ランダム位相, 二種地盤で告示波(水平動のみ)を図 1 の 10 波作成し使用した。

減衰は剛性比例減衰とし, 減衰定数を 0.02 とした。計算は中間加速度法で線形解析とした。

最適化手法は逐次二次非線形計画法¹⁴⁾を用い, 部材に作用する最大曲げモーメントを最小化した。以下, 地震

応答解析結果に対して最適形状を求めた事例を“応答最適化”, 自重に対して最適形状を求めた事例を“自重最適化”と呼称する。本報における“自重最適化”形状および“応答最適化”形状は, 初期形状を円弧アーチとし, 単純に逐次二次非線形計画法を適用し, 最適形状を得るために特段の手間および手法は用いていない。

以下では, 円弧アーチに対する解析結果を基準として, “自重最適化”形状に対する解析, “応答最適化”形状に対する解析結果を比較する。

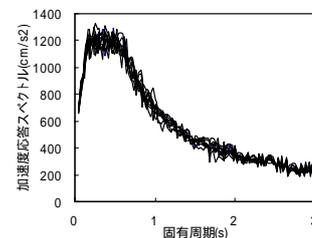


図 1 告示波の加速度応答スペクトル

3 解析結果

3.1 観測波を用いた基礎的な検討

まず上下動も考慮した観測波を用いた解析結果として部材の最大軸応力度分布を図 2~4 に示す。

図より観測波を用いた解析では, 円弧アーチに生ずる軸応力度に比して, “自重最適化”を行った場合に軸応力度が低減していることが分かる。ただし, 応力度の低減率は一様ではない。一方, “応答最適化”結果では, 本報で行った単純な最適化では, 元のアーチ形状より軸応力度が増大する事例も存在する(R/S 比 0.2 の KERN/TAF および KOBE/KJM, R/S 比 0.4 の KERN/TAF および KOBE/KJM, KOBE/TAK)。また, “応答最適化”により軸応力度が低減した場合でも, “自重最適化”に比して極めて優位な軸応力度分布は計算されておらず, “自重最適化”に対して優位な結果は, R/S 比 0.4 IMPVALL/I-ELC の 1 例のみである。この“応答最適化”において十分な最適化が行われていない実情に対して, 初期値, 増分などを変更して“応答最適化”を再計算する考え方もある。しかし, 本計算例の範囲で言えば, “自重最適化”を行えば, 地震応答にも最適化された

といえ かつ 最適化形状を得るための計算量が少ない，
といえる．

3.2 告示波を用いた自重最適化形態の効果
次に告示波を用いた解析結果として部材の最大軸応力度分布を図5～7に示す．
図中，No.1～10は，使用した示波の識別名である．告示波を用いた解析では，
円弧アーチに生ずる軸応力度に比して，“自重最適化”を行った場合に軸応力度が増加する
ケースが1事例（R/S比0.3のNo.10）のみあるが，他の“自重最適化”時の軸応力度が
円弧アーチでの最大軸応力度と同等か低減している．また，告示波を用いた解析では，“
応答最適化”時の軸応力度が“自重最適化”時の軸応力度より低減している
ケースが30事例中8事例（R/S比0.2のNo.1，R/S比0.3のNo.1,3,8,10，R/S比0.4の
No.5,6,9）見られる．

特にR/S比0.3のNo.8最適化事例は，“自重最適化”時の軸応力度に比して軸応力度低減が
大きい．そこで，このR/S比0.3のNo.8最適化事例の形状が

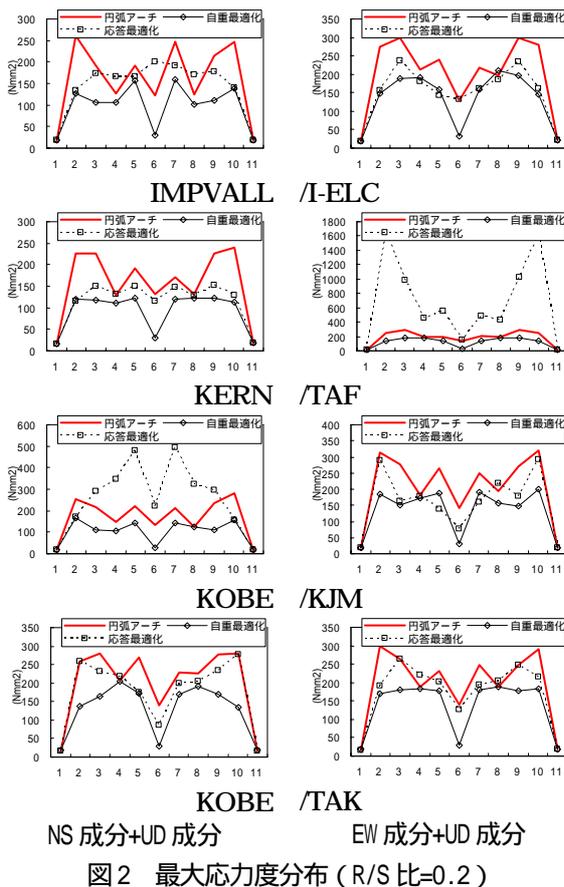


図2 最大応力度分布 (R/S比=0.2)

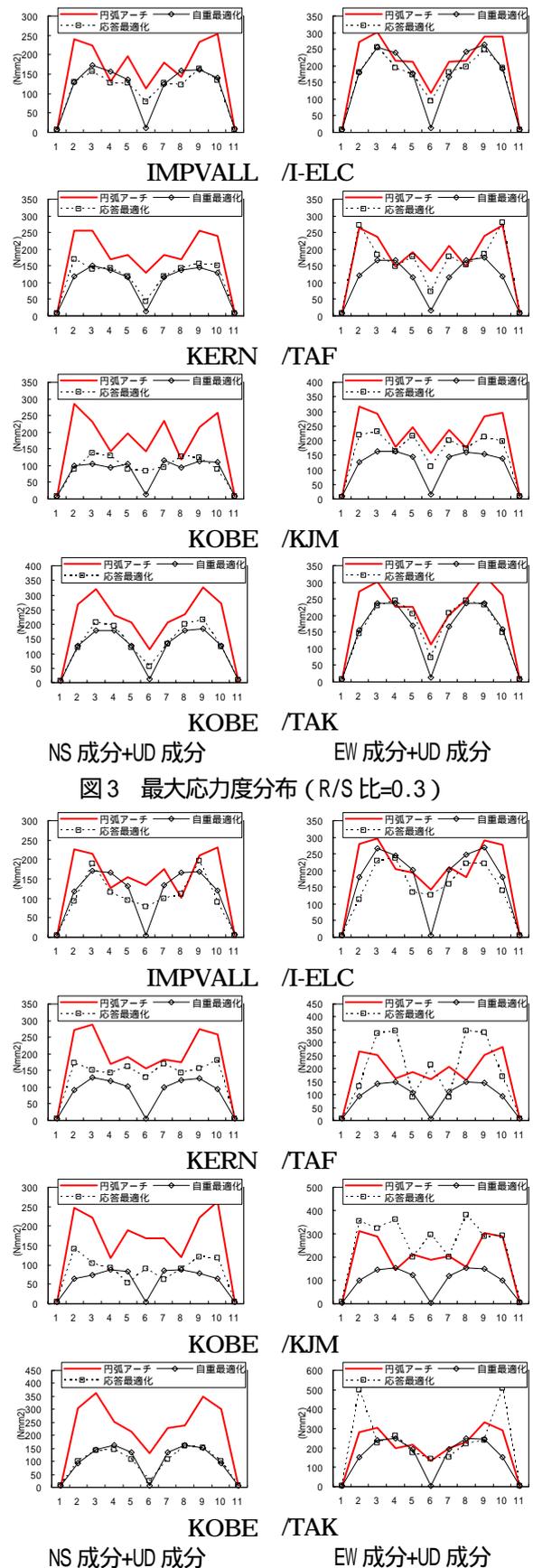


図3 最大応力度分布 (R/S比=0.3)

図4 最大応力度分布 (R/S比=0.4)

“自重最適化”に比して優位な形状であるかを検討するため、No.8 最適事例の形状を用いて、前節の観測波による応答を計算した。結果を図8に示す。図より、“応答最適化”時の軸応力度は、“自重最適化”時の軸応力度に比して同等か多少大きめに算定されている。

図9に示す円弧アーチ時の最大軸応力度に対する比を見れば、“応答最適化”時の軸応力度も、“自重最適化”時の軸応力度もその分布性状に大差無いともいえる。従って、本報では、最適化に要する計算量も含めた上で、“自重最適化”形状を最適形状と判断する。

3.3 自重最適化形状における曲げ応力度低減効果

以上の結果より、“自重最適化”形状による曲げ応力度低減効果を検討する。地震動は、3.1節の観測波に加え、K-NET, KiK-netより、北海道十勝沖地震 (HKD098: 大樹), 新潟県中越沖地震 (NIG018: 柏崎), 岩手・宮城内陸地震 (AKTH04: 東成瀬), 建

築センター波 94-Hachinohe を用いて最大応力度を計算した。観測波 16 波, 告示波 10 波に対する計算結果を図10に示す。図より、“自重最適化”を行えば、殆どのケースで最大軸応力度が軽減可能といえるが、その低減率に傾向は見られない。なお、“自重最適化”形状採用による最大軸応力度低減効果の平均値は、R/S 比 0.2 で 0.63 (観測波) 0.78(告示波) R/S 比 0.3 で 0.64(観測波) 0.86(告示波), R/S 比 0.4 で 0.60 (観測波) 0.78(告示波), となっている。

4 結語

本報では、アーチの地震動に対する形状最適化問題を検討した。その結果、観測地震波と告示波で多少異なるが、自重最適化形状を採用することが、現段階で确实兼短時間に地震応答低減に有効であることが判明した。ただし、その低減率に一定の傾向が見られないため、適用には注意が必要である。

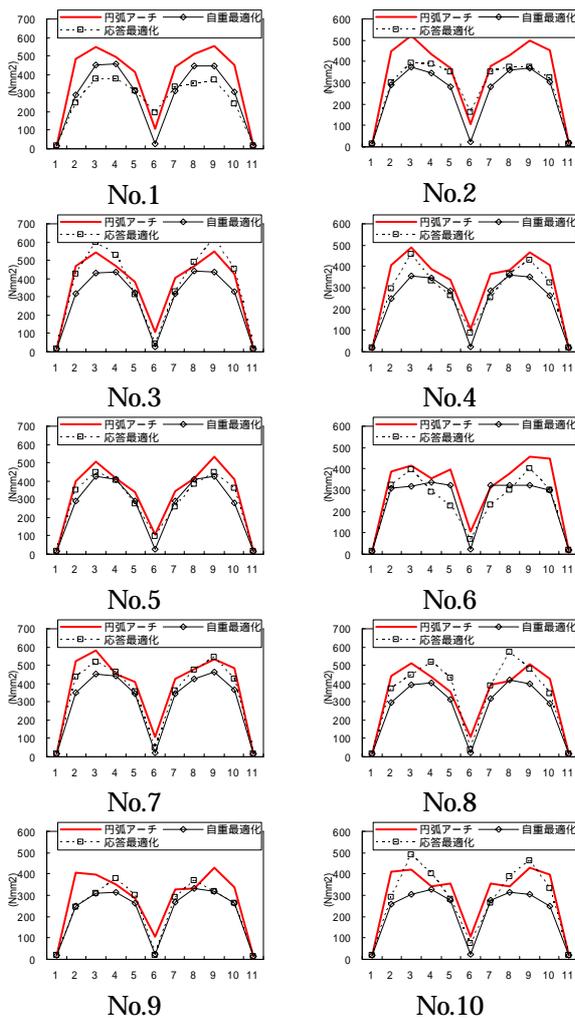


図5 最大応力度分布 (R/S比=0.2)

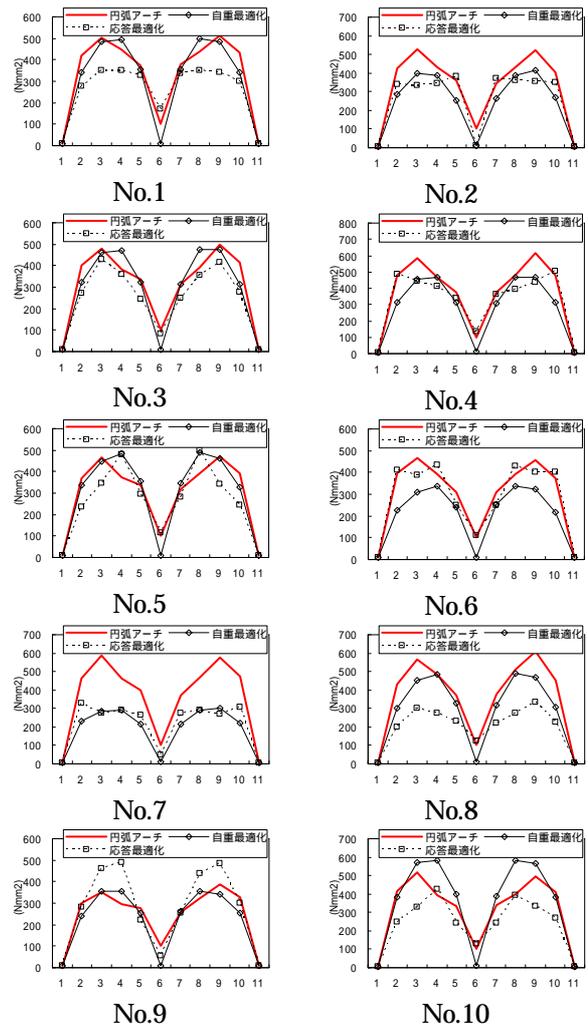


図6 最大応力度分布 (R/S比=0.3)

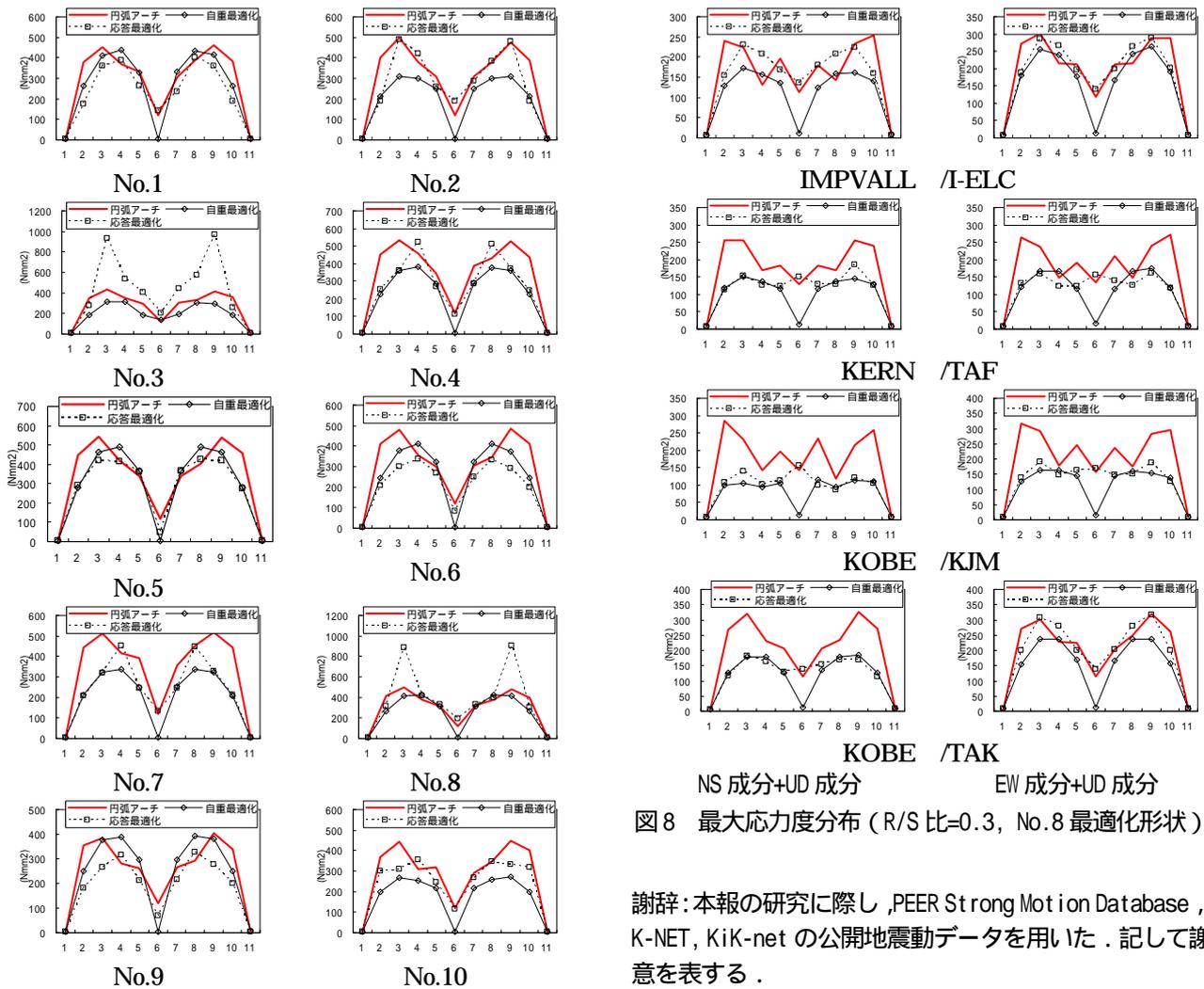


図7 最大応力度分布 (R/S比=0.4)

NS成分+UD成分 EW成分+UD成分
 図8 最大応力度分布 (R/S比=0.3, No.8最適化形状)

謝辞: 本報の研究に際し、PEER Strong Motion Database、K-NET、KiK-netの公開地震動データを用いた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 菊竹 清訓, 松井 源吾: 軸力シエルの研究, 日本建築学会構造系論文報告集 No.444, pp.63-72, 1993.02
- 2) 大森 博司, 山本 憲司: 応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究: その1 シェル構造への適用, 日本建築学会構造系論文集 No.496, pp.67-73, 1997.06
- 3) 山本 憲司, 皆川 洋一, 大森 博司: 座屈荷重を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 Vol.564, pp.95-102, 2003.02
- 4) 小河 利行, 大崎 純, 立石 理恵: 線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集 Vol.570, pp.129-136, 2003.08
- 5) FERNAND EZ Michael, 三井 和男, 西田 明美, 半谷 裕彦: 地震波入力に対する応答変位を最小とする搭状型円筒シェルの形状解析: エルセントロタワーと八戸タワー, 日本建築学会構造系論文集 No.509, pp.105-112, 1998.07
- 6) 山下 拓三, 熊谷 知彦, 小河 利行, 宮村 倫司, 大崎 純: マルチグリッド法と可変複合モデルを用いた強風を受けるシェル構造物の屋根形状最適化, 日本建築学会構造系論文集 Vol.636, pp.297-304, 2009.02

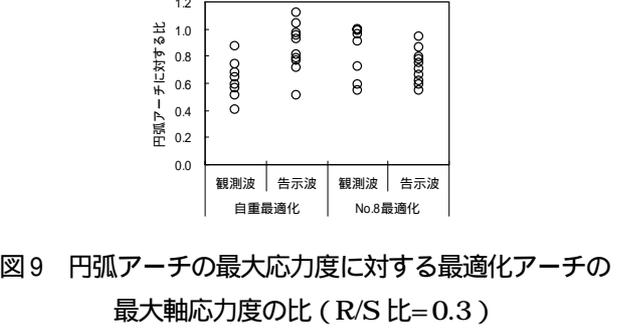


図9 円弧アーチの最大応力度に対する最適化アーチの最大軸応力度の比 (R/S比=0.3)

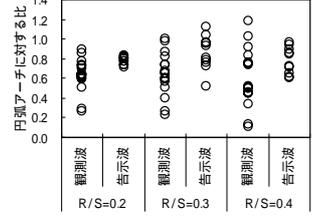


図10 円弧アーチの最大応力度に対する自重最適化

ラチスシェルの部材長一様化のための最適化手法

藤田慎之輔¹⁾, 大崎 純²⁾,

1)金箱構造設計事務所, 工修

2)広島大学大学院工学研究科建築学専攻, 教授, 博士(工学)

1 序

NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)曲面やベジエ曲面などのパラメトリック曲面で定義される自由曲面シェルの力学特性を考慮した形状最適化については, 多数の研究が存在する¹⁾。しかし, 建築のデザインにおいては, 力学的合理性に加えて, 意匠性や施工性などの数学的定量化になじまない非力学的性能も考慮する必要があり, 設計問題を最適化問題として定式化することが困難である。とくに, 建築形態と力学的合理性に強い相関があるシェル構造物においては, 設計者の経験と直感によって実構造物として実現可能な形状を決定することは困難であるため, 力学的指標に加えて, 非力学的性能を反映できる何らかの定量的な指標の提示が望まれる²⁻⁵⁾。

一方, パラメトリック曲面で定義された曲面状のラチスシェルの形状最適化についても, 90年代から多くの研究が存在する⁶⁾。ラチスシェルでは, 曲面形状に加えて, 部材配置や節点位置の最適化が可能であるが, そこでも施工性などの非力学的指標が重要となる。小河ら⁷⁾の研究では, 部材長の均一化と線形座屈荷重最大化が考慮され, 数種類の長さの部材で構成されるラチスシェルが得られている。しかし, そこでは曲面形状が固定されているため, 完全な部材長一様化は行われていない。

本研究では, 種々の平面形状とトポロジーを有するラチスシェルに対して, 施工管理の向上などを目的として, 構成部材の部材長を一様化するような形状を求めることを目的とする。3角形, 4角形, 6角形の3種類の平面形状を対象とし, それらの最適形状の特性を考察する。

2 最適化問題の定式化

ラチスシェルの剛性の指標として, 古典的な構造最適化問題で用いられるひずみエネルギー (外力仕事として定義されるコンプライアンスと同義) を最小化し, さらに, 施工性の指標として部材長の一様化を考える。

3角形グリッドと4角形グリッドの例では, 曲面形状をベジエ曲面で定義し, 曲面上の節点位置をパラメータ平面での座標を指定することによって定める。したがって, 設計変数は, ベジエ曲面において自由に移動できる制御点の座標成分である。6角形グリッドでは, パラメトリック曲面は用いず, 対称性を考慮して, 1/6領域での節点の座標を独立な変数とする。いずれの場合に対しても, 変数を並べたベクトルを形式的に \mathbf{x} で表す。

第 k 部材の長さを $l_k(\mathbf{x})$, 部材長の平均を l_{ave} , 部材数を m とすると, 平均部材長からの差の2乗和 $g(\mathbf{x})$ は次式で定義できる。

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^m (l_k - l_{ave})^2 \quad (1)$$

$g(\mathbf{x}) = 0$ の制約を与えることにより, 部材長が一様なラチスシェルを得ることができる。

静的載荷を考慮し, 剛性行列を \mathbf{K} , 指定された荷重に対する節点変位ベクトルを \mathbf{d} とすると, ひずみエネルギー $f(\mathbf{x})$ は次式で定義できる。

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}(\mathbf{x})^T \mathbf{K}(\mathbf{x}) \mathbf{d}(\mathbf{x}) \quad (2)$$

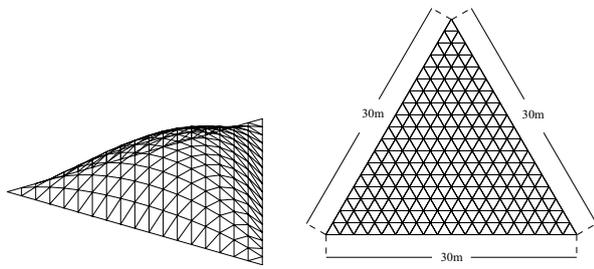
部材長の総和を $L(\mathbf{x})$, 初期解での $L(\mathbf{x})$ の値を L_0 とし, 極端にライズが大きいあるいは小さい形状が得られるのを防ぐため, 以下のような制約を与える。

$$L(\mathbf{x}) = L_0 \quad (3)$$

ここで, 全ての部材の断面が同一であるとき, 部材長制約(3)は部材体積制約と同等である。

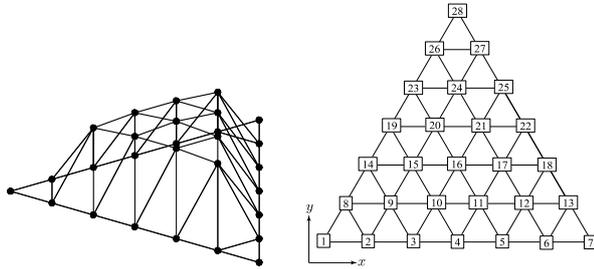
以上より, 最適化問題は次のように定式化できる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \\ & \text{subject to} && \begin{cases} L(\mathbf{x}) - L_0 = 0 \\ g(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$



(a) 形状図

(b) 平面図



(c) 制御多角形

(d) 制御点番号

図1 3角形グリッド

しかし、初期形状のトポロジーや設計変数の定義によっては、部材長が一様になるような許容解が存在しない場合も考えられる。しかがって、そのような場合には次のような最適化問題を考える。

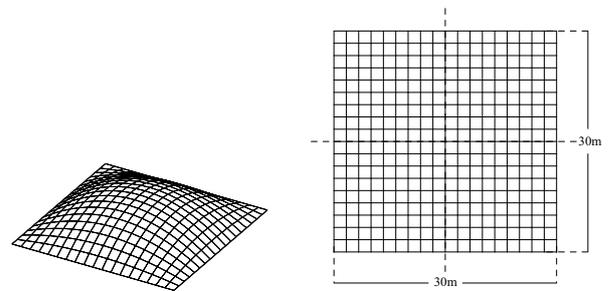
$$\begin{aligned} & \text{minimize} && g(\mathbf{x}) \\ & \text{subject to} && \begin{cases} L(\mathbf{x}) - L_0 = 0 \\ f(\mathbf{x}) = \bar{f} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 \bar{f} はひずみエネルギーの指定値である。

このように、ひずみエネルギーを制約することで、剛性を表す指標として指定されたひずみエネルギーの下で可能な限り部材長が一様化された形状を得ることができる。あるいは、部材長の最大値と最小値の差を最小化することにより、部材長を一様化することも可能である。しかし、この場合、 $2m$ 個の不等式からなる以下のような制約条件を与える必要がある

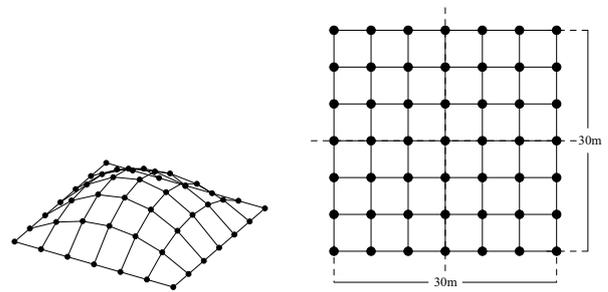
$$l_{\min} \leq l_k \leq l_{\max}, \quad (k = 1, \dots, m) \quad (6)$$

ここで、 l_{\min} は部材長の最小値であり、 l_{\min} 、 l_{\max} ともに変数となる。したがって、問題(4)、(5)と比較して制約条件が極めて多くなり、最適化での計算量が増加するため、部材長の最大値と最小値の差を最小化することは、 $g(\mathbf{x}) = 0$ を満たす解が存在する場合には有効ではない。



(a) 形状図

(b) 平面図



(c) 制御多角形

(d) 制御多角形平面図

図2 4角形グリッド

3 ラチスシェルモデル

以下のような3種類のモデルを対象として最適形状を求める。

3.1 モデル1: 3角形グリッドを有するラチスシェル

図1のような3角形グリッドを有するラチスシェルを考える。形状は6次の3角形パッチベジエ曲面により記述する。変位の境界条件は3隅を固定支持とする。設計変数は制御点の x 、 y 、 z 方向座標とし、次のように不動条件を定める。

- 制御点1, 7, 28を不動とする。
- 制御点28を不動とし、制御点1, 2, ..., 7については x 軸方向のみ移動可能とする。

以降、それぞれのケースをCase-a、Case-bで表す。

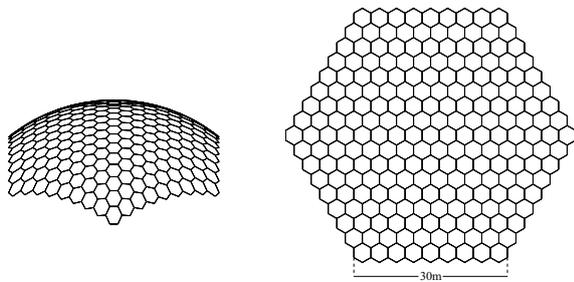
3.2 モデル2: 4角形グリッドを有するラチスシェル

図2のような正方形平面を有するラチスシェルを考える。形状は 6×6 次のテンソル積ベジエ曲面により記述する。変位の境界条件は以下の2ケースを考える。

- 4隅を固定支持
- 周辺をピン支持

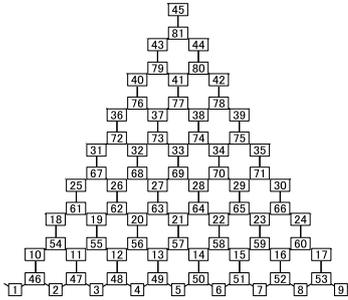
設計変数は制御点の x 、 y 、 z 方向座標とし、次のように不動条件を定める。

- 4隅の制御点を不動とする。
- 4隅の制御点を不動とし、残りの周辺制御点については z 方向および辺方向のみ移動可能とする。



(a) 形状図

(b) 平面図



(c) 制御点番号(1/6領域)

図3 六角形グリッド

c. 4隅の制御点を不動とし、残りの周辺制御点については xy 平面内でのみ移動可能とする。

以降、それぞれのケースをCase-1-a, Case-2-bのように表す。

3.3 モデル3: 六角形グリッドを有するラチスシェル

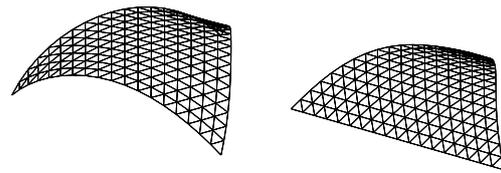
図3のような六角形グリッドを有するラチスシェルを考える。境界条件は以下の2ケースを考える。

1. 節点1, 9をピン支持
2. 節点1, 2, ..., 9をピン支持

六角形グリッドをベジエ曲面で表した場合、3角形あるいは4角形の場合とは異なり、節点位置をパラメータ平面上の等間隔な格子で表すことができない。したがって、制御点の座標を変数として部材長を一様化することは困難なので、ここでは節点座標が直接変化できるものとする。

設計変数は1/6領域の節点の x, y, z 方向座標とし、残りの節点は対称性を考慮し生成し、次のように不動条件を定める。

- a. 節点1, 9については x 方向のみ移動可能とする。
- b. 節点1, 9については x 方向のみ移動可能、かつ節点1, 2, ..., 9については y 正方向には固定する。
- c. 節点1, 2, ..., 9の z 座標はすべて0で固定し、節点1, 9については x 方向のみ移動可能とする。
- d. 節点1, 2, ..., 9の z 座標はすべて0で固定し、かつ x 方向のみ移動可能とする。



(a) Case-aの最適解(問題(5))

(b) Case-bの最適解(問題(4))

図4 モデル1の最適化結果

以降、それぞれのケースをCase-1-aのように表す。

4 最適化結果と考察

4.1 最適化の概要

部材断面は、全ての部材で外径135.2 mm, 内径4 mmの円形鋼管であり、節点は剛接合とする。また、ヤング率は210 GPa, ポアソン比は0.3である。なお、1部材1要素の有限要素解析により応答を評価し、上記の3つのモデルに対して最適解を求める。外力は自重とし、部材の単位体積当たり重量を77 kN/m³とする。

最適化にはSNOPT Ver. 7.2⁸⁾を用いる。最適化手法は逐次2次計画法である。制約条件の許容誤差は、 1.0×10^{-6} 以下の適切な値とする。また、感度解析は解析的に実行する。

最適解での諸量を表1に示す。ここで $l_{\max} - l_{\min}$ は最大部材長と最小部材長の差、 $N_{\min}, N_{\max}, M_{\max}, d_{\max}$ はそれぞれ圧縮軸力、引張軸力、曲げモーメント、鉛直変位の最大値を表す。

4.2 モデル1

3角形グリッドを有するモデル1については、3隅を不動(不動条件a)として最適化を行うと、図4(a)に示すような形状が得られ、部材長を完全に一様化すること

表 1 最適解の部材長の一様度と各種力学量

	3角形グリッド			4角形グリッド						6角形グリッド					
	1-0	1-a	1-b	1-0	1-a	1-b	2-0	2-a	2-c	1-0	1-a	1-b	2-0	2-c	2-d
f [kNm]	1.3	1	5.2×10^{-3}	8.2	4.2×10^{-1}	1.3	3.2×10^{-2}	8.4×10^{-3}	6.0×10^{-2}	2.8	8.7×10^{-2}	8.8×10^{-1}	7.8×10^{-2}	2.7×10^{-2}	5.5×10^{-3}
$l_{\max} - l_{\min}$ [mm]	1.1×10^3	9.5	4.7×10^{-1}	4.2×10^2	9.2×10^{-1}	7.3×10^2	4.2×10^2	4.3×10^{-1}	3.4	5.3×10^2	2.9×10^{-3}	4.2×10^3	5.3×10^2	3.3×10^{-3}	5.3×10^{-3}
N_{\min} [kN]	76	20	30	18	0	0	0	0	12	6.6×10^{-1}	0	0	0	0	0
N_{\max} [kN]	85	43	74	57	55	52	6.9	3.7	11	30	26	27	6.9	7.3	7.5
M_{\max} [kN·m]	25	12	6.2	37	4.6	7.9	5.6×10^{-1}	1.6×10^{-1}	8.2×10^{-1}	13	1.8×10^{-1}	6.2	6.4×10^{-1}	1.0×10^{-1}	8.9×10^{-2}
d_{\max} [mm]	20	32	34	1.0×10^2	6.7	28	8.4×10^{-1}	3.4×10^{-1}	3	35	1.4	15	6.2	6.1×10^{-1}	1.1

はできなかつたため、 $\bar{f} = 1.0$ として問題(5)を解いたところ、10 mm以下のオーダーで部材長を一様化できた。ここで、初期解は図1のとおりである。

不動条件をbとして設計変数を増やすと、図4(b)に示すように、部材長は完全に一様化された。形状はCase-a, bともにシリンダー状となり、剛性は初期解から改善できなかった。3角形グリッドを有するラチスシェルの部材長を一様化すると、部材角も60度で固定され、形状表現の自由度が極めて制限されるため、シリンダー状とならざるを得ないと考えられる。逆に言えば、シリンダー形状のシェルを骨組で覆う際には、三角形グリッドとすることで部材角を揃えて、接合部種別を少なくすることができる。

4.3 モデル2

まず、変位境界条件1で4隅を不動 (Case-1-a) として最適化を行った結果、形状は図5(a)のようになり、部材長を完全に一様化することができ、かつ剛性を大きく上昇させることができた。ここで、初期解は図2のとおりである。最適化の結果、節点がやや中心に集まり、内部空間が小さくなる傾向が見られたので、周辺節点の移動をCase-1-bのように拘束したところ、形状は図5(b)に示すように球に近く、Case-1-aよりやや剛性は減少するものの、初期形状と同じ内部空間を維持できた。さらに、平面図で部材が直交しており、接合部種別も簡略化可能な形状となった。

一方、変位境界条件2で4隅を不動 (Case-2-a) として最適化を行った結果、形状は図5(c)のようになり、最適解はCase-1-aの場合と類似する傾向を示した。また、周辺節点が xy 平面でのみ移動可能とした場合 (Case-2-c)、部材長を完全に一様化することができなかつたため、 $\bar{f} = 0.06$ として問題(5)を解いたところ、形状は図5(d)のようになり、部材長誤差は最大で3.4 mmと極めて部材長一様性を高めることができた。しかし、力学的に不合理な形状となっており、4角形グリッドの場合、滑らかな形状で完全に部材長を一様化することは難し

く、部材長一様化条件が極めて厳しい幾何学的制約であることを示している。

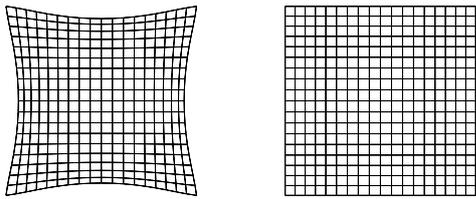
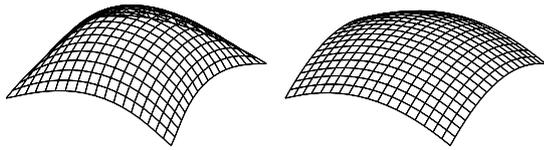
Case-2-cについて、ひずみエネルギーの指定値 $\bar{f} = 0.04, 0.005$ に対する問題(4)の最適解を求めた結果を図6(a), (b)にそれぞれ示す。図より、最適形状は \bar{f} の値に大きく依存することが分かる。また、 $\bar{f} = 0.04, 0.005$ での目的関数 $g(x)$ の値はそれぞれ $1.531 \times 10^{-3}, 2.248 \times 10^{-1}$ であり、ひずみエネルギー制約を緩めて部材長一様化を優先すると、最適形状の対称性が崩れることがわかる。

種々の \bar{f} に対して、異なる初期値から得られた問題(4)の最適解における目的関数値を図7に示す。図より、最適解は初期値に依存する場合があることがわかる。また、2つの曲線は交差しており、図6(a), (b)に示すような2種類の形状の間での最適解の分岐あるいはジャンプのような状況が生じているといえる。

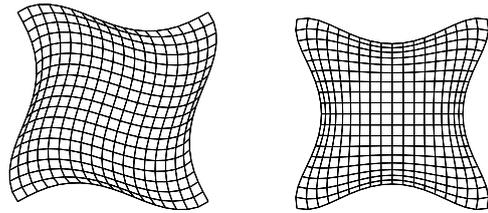
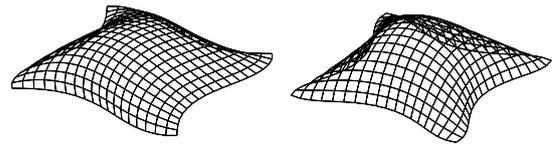
4.4 モデル3

まず、変位境界条件1で不動条件をa (Case-1-a) として最適化を行った結果、形状は図8(a)のようになり、完全に部材長を一様化しながら剛性を大きく上昇させることができた。ここで、初期解は図3のとおりである。また、モデル1, 2と同様に節点が中心に集まる傾向が見られたため、不動条件をbとしてこれを抑制した場合 (Case-1-b)、形状は図5(b)のようになり、滑らかな形状が得られた。

一方、変位境界条件を2、不動条件をc (Case-2-c) として最適化を行った結果、形状は図8(c)のようになり、モデル2と同様に、支持点の高さを揃えた場合でも完全に部材長を一様化することができた。さらに、不動条件をdとして節点を中心に集まる傾向を抑制した場合 (Case-2-d) でも完全に部材長を一様化でき、剛性も向上できている。したがって、6角形グリッドを有するラチスシェルは、部材長の完全一様化という厳しい幾何学的制約条件下においても高い形状表現の自由度を有していると言える。

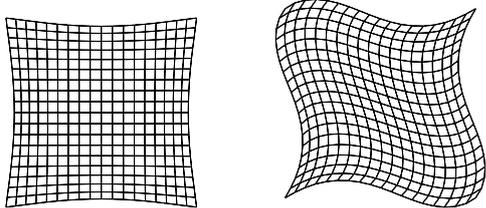
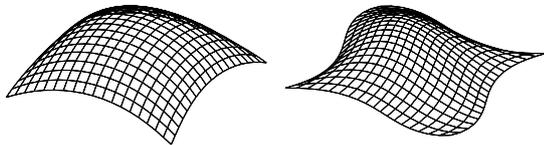


(a) Case-1-aの最適解(問題(4)) (b) Case-1-bの最適解(問題(4))



(a) $\bar{f} = 0.04$ (b) $\bar{f} = 0.005$

図6 モデル2の最適化結果(Case-2-c)



(c) Case-2-aの最適解(問題(4)) (d) Case-2-cの最適解(問題(5))

図5 モデル2の最適化結果

5 結論

ベジエ曲面の制御点座標あるいは節点座標を変数として最適化問題を解くことにより、ラチスシエルの部材長を完全に一様化する形状が得られることを示した。3角形、4角形および6角形グリッドシエルの最適化により、形状表現の自由度がトポロジーに大きく依存し、

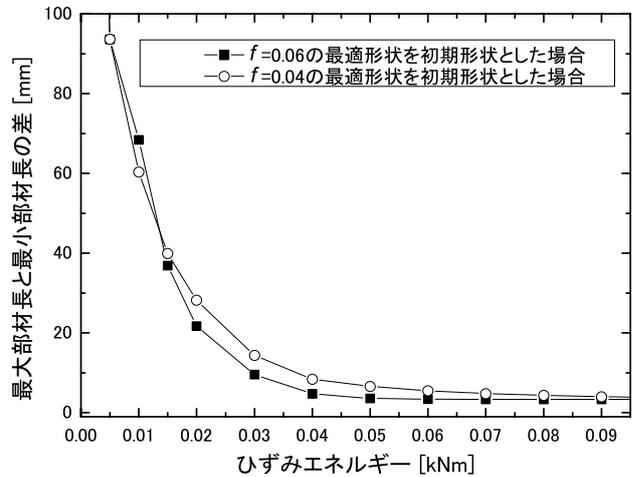


図7 2種類の初期解によるひずみエネルギーと部材長偏差の関係

部材長を完全に一様化できない場合があることが分かった。

本研究では、部材長を完全に一様化することを目的としたが、複数の部材種類を許容し、その数を最小化するためには、文献⁷⁾の方法を用いることができる。

今後の課題としては、接合部種類の数の最小化が重要である。球形シエルを2方向に大円と小円で分割すれば、節点の種類は1つに限定される。また、3角形グリッドの場合、部材長を完全に一様化して得られる形

状は限定的であるが，部材角も一様化できるというメリットもある。しかし，一般のグリッドを有する自由曲面ラチスシェルを対象として，接合部種類の数を最小化した研究は存在しない。さらに，部材長や部材角には多少の誤差は許容できるので，その大きさの調査や，誤差を許容した最適化手法の提案も重要である。

参考文献

- 1) E. Ramm, and G. Mehlhorn : On shape finding methods and ultimate load analysis of reinforced concrete shells , Eng. Struct., Vol.13, pp.178.198, 1991.
- 2) M. Ohsaki, T. Ogawa, and R. Tateishi: Shape optimization of curves and surfaces considering fairness metrics and elastic stiffness , Struct Multidisc Optim, No.27, 250-258, 2004.
- 3) 藤田慎之輔，大崎 純： ひずみエネルギーとパラメトリック曲面の代数不変量を考慮したシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集 , No.639 , 857-863 , 2009.
- 4) M. Ohsaki and M. Hayashi : Fairness metrics for shape optimization of ribbed shells , J. Int. Assoc. Shells and Spatial Struct., Vol.41(1), pp.31.39, 2000.
- 5) 浜田英明，大森博司：設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案: その2 最適性条件による理論的解法 , 日本建築学会構造系論文集, No.618, pp.143.150, 2007.
- 6) M. Ohsaki, T. Nakamura, and M. Kohiyama: Shape optimization of a double-layer space truss described by a parametric surface , International Journal of Space Struct., Vol.12, No.2, 1997.
- 7) 小河利行，大崎 純，立石理恵：線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集 , No.579, pp.129-136,2003.
- 8) P. E. Gill, W. Murray and M. A. Saunders, SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization, SIAM J. Optim., 12, 979-1006, 2002.

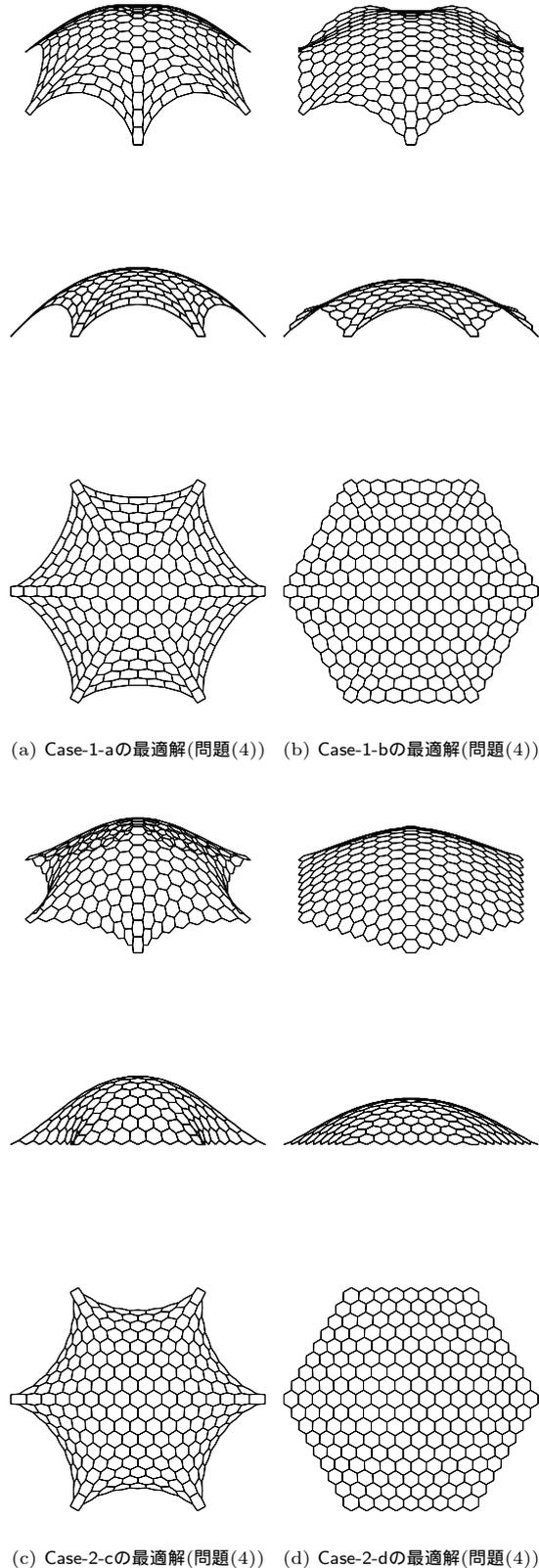


図8 モデル3の最適化結果

腐食による経年劣化を考慮した鉄骨造建築物のライフサイクルデザイン

中田 聡¹⁾, 吉田 英樹²⁾, 大森 博司³⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, nakata@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, hyoshida@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

3)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序

近年の地球環境問題の深刻化に伴い、建築分野においても持続可能な発展に貢献すべきであるという認識が高まっている。日本建築学会は建築構造物の耐用年数を延長させることが建築分野における二酸化炭素排出量の削減に効果的であるとし、わが国における建築構造物の寿命を3倍ないし100年に延長することを提唱している。建築構造物の長寿命化には、建設時の初期投資の多寡を偏重した建築構造物の設計ではなく、建設後の維持管理計画を含めた建築構造物のライフサイクル(Life Cycle, LC)を考慮した設計が必要である。建築構造物のLCを考慮した設計により長寿命化が可能になり、従来の営繕的な維持管理でなく戦略的な維持管理へシフトすることで環境負荷低減やコスト低減が可能になると考えられる。

鉄骨造建築物の物理的な耐用性は、鋼材の腐食に支配される。鉄骨造建築物の構造部分の耐久性は、工法、部位の構法、地域環境などにより左右されるが、基本的には構成材料としての鋼材と、これを保護する表面の防食(防錆)システムに負うところが大きい。建築物のLCを考慮した設計において、構造物の耐用年数を推定することは必要不可欠といえる。

持続可能な建築構造物の設計手法として、最適化手法を援用したライフサイクルデザイン(Life Cycle Design, LCD)手法の研究は近年いくつか報告されている¹⁻³⁾。また、建築構造物のLCに内在する不確定性の影響の内、修繕周期の不確定性、地震ハザードがLC評価に与える影響を考察した研究が報告されている^{4,5)}。

本稿では、鉄骨造建築物の腐食による経年劣化から建築物の耐用年数と部材断面の構造性能を推定し、文献⁶⁾に記載される手法を用いることで腐食による経年劣化を考慮したLCD手法を提案する。また、既報^{3,5)}で提案したLC評価手法、地震ハザードを考慮したLC評価手法を用いて、腐食による経年劣化を考慮した場合にLC評価値に及ぼす影響を検証する。目的関数は

ライフサイクルコスト(Life Cycle Cost, LCC)とし、LCC最小化における設計例と、腐食による経年劣化を考慮した場合のLCC最小化による設計例を比較する。

2 腐食による経年劣化を考慮したLCD手法⁶⁾

2.1 S造躯体の耐用年数の推定方法

S造躯体の耐用年数の推定方法を式(1)に定義する。

$$Y = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Y_{m,i} \quad (1)$$

ここに

Y : S造躯体の耐用年数(年)

$Y_{m,i}$: 部材*i*の推定耐用年数(年)

m : 部材数

柱、梁、全ての部材について耐用年数を算出し、その平均値をS造躯体の耐用年数とする。本解析では平均値を躯体の耐用年数として解析を行うが、全部材の耐用年数の最小値が躯体の耐用年数であるかもしれず、意思決定者へ提示する場合には必要に応じて条件を変更する必要がある。

2.1.1 部材*i*の推定耐用年数($Y_{m,i}$)

部材*i*の推定耐用年数($Y_{m,i}$)は、式(2)によって求められる。

$$Y_{m,i} = (Y_{ms} \times D_s \times B_s \times C \times M) + (Y_{mz} \times D_z \times B_z \times C \times M) + (Y_{mp} \times D_p \times B_p \times C \times M) \quad (2)$$

部材の耐用年数を推定する際、地域や環境など様々な条件によってパラメーターを決定する必要がある。本解析ではサイト条件を名古屋とし、亜鉛めっき及び塗装を施していない部材条件に設定する。また施工や維持保全に関する係数(C, M)は、本解析では結果に影響が出ないよう1.0に設定した。表1に各パラメーターの値を示す。

ここに

- Y_{ms} : 鋼材の標準耐用年数 (年)
- Y_{mz} : 亜鉛めっきの標準耐用年数 (年)
- Y_{mp} : 塗膜の標準耐用年数 (年)
- D_s : 鋼材の地域環境別設計用劣化係数
- D_z : 亜鉛めっきの地域環境別設計用劣化係数
- D_p : 塗膜の地域環境別設計用劣化係数
- B_s : 鋼材の部位別設計用劣化係数
- B_z : 亜鉛めっきの部位別設計用劣化係数
- B_p : 塗膜の部位別設計用劣化係数
- C : 施工管理係数
- M : 維持保全係数

表 1 推定耐用年数のパラメータ

許容腐食率 (%)	10
N	2.00
α_s	0.10
D_s	0.50
B_X	6.0
C	1.00
M	1.00

2.1.2 鋼材の標準耐用年数 (Y_{ms})

Y_{ms} は、式 (3) によって求められる。表面無処理鋼材の耐用に関する定義としては、部材の板厚の 10% が腐食した時をもって耐用限界に達したものとする。したがって、使用する鋼材の板厚に 0.1 を乗じた値が許容腐食量となる。これを標準地域における表面無処理鋼材の年間腐食量 $\alpha_s = 0.05$ mm/年に断面系に応じた N を乗じた値で除する。

なお、 α_s については、湿度、温度、海塩粒子、亜硫酸ガス、ほこりなどの劣化外力、およびそれらの外力の作用量を考慮して、各地域における表面無処理鋼材に対する劣化外力を評価する必要があるが、これについては図 1 の分布図が提案されている。

$$Y_{ms} = (0.1 \times t) / (N \times \alpha_s) \quad (3)$$

ここに

- t : 鋼材の板厚 (mm)
- N : 部材の断面形, $N = 1$ 閉断面形
 $N = 2$ 開断面形
- α_s : 鋼材の年間腐食量 (mm/年)

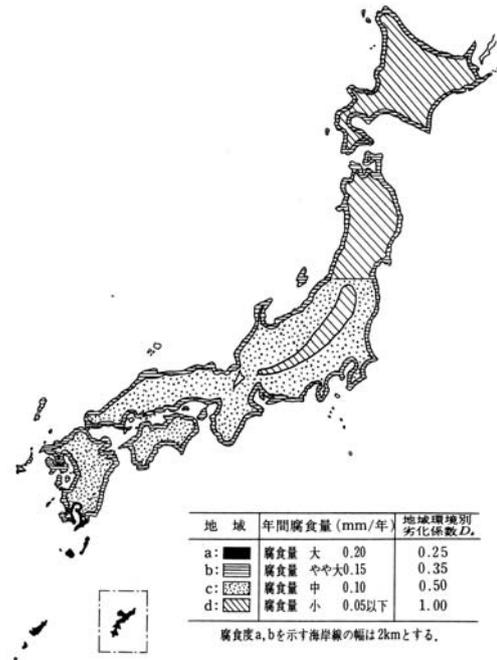


図1 表面無処理鋼材の劣化分布図

2.1.3 鋼材の地域環境別設計用劣化係数 (D_s)

湿度、温度、降水量、海塩粒子、亜硫酸ガス、ほこり等の劣化外力、およびそれらの外力の作用量を考慮して各地域における表面無処理鋼材に対する劣化外力を評価する必要がある。表面無処理鋼材の劣化分布図、図 1 の年間腐食量により、 D_s (表面無処理鋼材の地域環境別設計用劣化係数) を定める。

2.1.4 部位・露出度別設計用劣化係数 (B_s, B_z, B_p)

B_s は、式 (4) によって求められる。 B_K は例えば、柱、梁、土台ではそれぞれ 1.2, 1.0, 0.7。 B_X は例えば、外部で露出している場合 1.0, 露出せず、常時感想している場合 6.0。 B_z, B_p も同様にして求める。露出度係数は、外部露出を基準とし、露出状況と乾燥状況により係数値を定めるものとしている。なお、コンクリート端境面に用いられる塗膜の露出度を 0.8 倍することとしている。部位係数 (B_K)、露出度係数 (B_X) については、表 2 および表 3 のような提案がある。

$$B_s, B_z, B_p = B_K \times B_X \quad (4)$$

ここに

- B_K : 部位係数
- B_X : 露出度係数

表2 部位係数 (B_K)

符号	部位名	部位係数			
		表面無処理鋼材	亜鉛めっき鋼材	塗膜	
$B_K 1$	柱・間柱	柱脚部	1.20	1.20	1.30
$B_K 2$		本体	1.30	1.30	1.50
$B_K 3$	大ばり・小ばり	接合部	0.90	0.90	1.00
$B_K 4$		本体	1.00	1.00	1.00
$B_K 5$	軸組みブレース	接合部	0.90	0.90	1.00
$B_K 6$		本体	1.00	1.00	1.00
$B_K 7$	水平ブレース	接合部	0.85	0.85	1.00
$B_K 8$		本体	0.90	0.90	1.00
$B_K 9$	屋根トラス	0.95	0.95	0.95	
$B_K 10$	母屋	0.95	0.95	0.95	
$B_K 11$	筋縁	0.90	0.90	0.90	
$B_K 12$	外部階段	0.80	0.80	0.80	
$B_K 13$	鋼製土台	0.70	0.70	0.60	

表3 露出度係数 (B_X)

符号	露出状況	露出度係数			
		表面無処理鋼材	亜鉛めっき鋼材	塗膜	
$B_X 1$	外部露出	1.0	1.0	1.0	
$B_X 2$	半露出	常時乾燥	3.0	3.0	3.0
$B_X 3$		湿潤・乾燥の繰返し	1.0	1.0	2.0
$B_X 4$	非露出	常時乾燥	6.0	8.0	6.0
$B_X 5$		湿潤・乾燥の繰返し	0.8	0.8	3.0
$B_X 6$	コンクリート端境面	1.0	1.0	0.8	

2.2 部材の断面性能の推定方法

本節では文献⁶に記載されている鋼材の年間腐食量 (mm/年) の値を用いて、断面性能の経年劣化を評価する式を定義する。図2はH型鋼、角型鋼管それぞれの供用期間 n 年後の断面腐食の概念図を示している。本稿では鋼材が空気に触れている全ての面において腐食が進行する条件として断面性能の経年劣化の評価式を定義し、角型鋼管の断面性能の推定方法を示す。

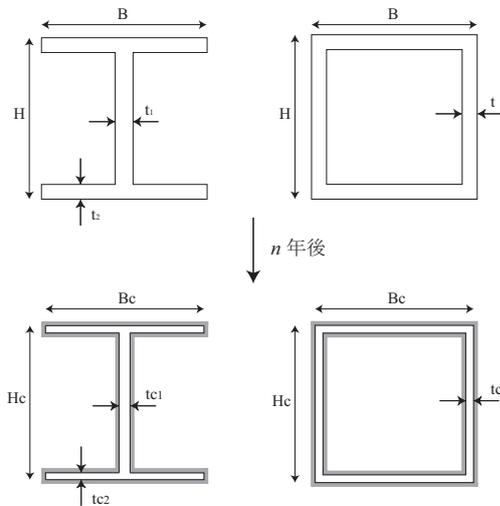


図2 鋼材の腐食概念図

2.2.1 腐食前の角型鋼管

本節では腐食が進行する前の角型鋼管の断面性能の計算式を式 (5), (6) に簡単にまとめる。

$$A = H^2 - (H - 2t)^2 \quad (5)$$

$$I = \frac{1}{12} \{H^4 - (H - 2t)^4\} \quad (6)$$

ここに

A : 断面積 (mm^2)

I : 断面 2 次モーメント (mm^4)

H : せい (mm)

t : 厚み (mm)

2.2.2 腐食後の角型鋼管

次に、腐食が進行した時の角型鋼管の断面性能の計算式を式 (7) ~ (10) に定義する。

$$\alpha_{sn} = \alpha_s \cdot n \quad (7)$$

$$t_c = t - 2\alpha_{sn} \quad (8)$$

$$A_c = (H - 2\alpha_{sn})^2 - (H - 2\alpha_{sn} - 2t_c)^2 \quad (9)$$

$$I_c = \frac{1}{12} \{ (H - 2\alpha_{sn})^4 - (H - 2\alpha_{sn} - 2t_c)^4 \} \quad (10)$$

ここに

α_s : 鋼材の年間腐食量 (mm/年)

α_{sn} : n 年後の鋼材の腐食量 (mm)

t_c : 腐食後の鋼材の厚み (mm)

A_c : 腐食後の断面積 (mm^2)

I_c : 腐食後の断面 2 次モーメント (mm^4)

3 腐食による経年劣化が LC 評価に及ぼす影響

3.1 設計例 (Test 1) の設定

本章では鉄骨造建築物の設計例を設定し、腐食による経年劣化を考慮した場合の設計例と比較することでライフサイクル評価値への影響を評価する。設計変数として、構造材、非構造材の両方を含めた建築物の構成要素の取捨選択および各構成要素の修繕時期を操作する維持保全シナリオを考慮し、最適手法には離散変数の最適化問題に優れた性能を発揮する GA を採用する。

本稿では、非構造材の組合せ、及び構造材の許容応力度、たわみ、柱接合部のディテールを制約条件とし、LCC 単一目的最小化問題として式 (11) を与える。解

析モデルを図 3 に示し、構造体の解析モデルを図 4 に示す X 方向 2 スパン、Y 方向 2 スパン、2 層の鋼構造物とし、各部材のグループ分けや染色体の構成を図 5 に示す。本稿では構造解析を同時に行うため S 造躯体に限定し、スラブは躯体と同様に S 造スラブを用いることとする。

選択可能な柱部材リストを表 6 に示し、選択可能な梁部材リストを表 7 に示す。また、本解析で用いる GA パラメータを表 4 に示す。

解析結果として表 8 の設計内容が選択され、これを設計例 (Test1) として設定する。また、その LCC 経年累積を図 6 に示す。

$$\text{minimize } f(c, t_p) = C_{eval}(c, t_p) \cdot \gamma \quad (11)$$

$$\text{subject to } g_j \leq 0$$

ここに

- C_{eval} : ライフサイクルコスト
- c : 空間的設計変数 (部材の種類および組合せ)
- t_p : 時間的設計変数 (建築寿命および修繕周期)
- g_j : j 番目の制約条件
- γ : 制約条件を満たさない場合のペナルティ

表 4 GA パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	500
Prob. of Crossover	0.80
Prob. of Mutation	0.01

表 5 構造材の制約条件

応力度	許容応力度以下
たわみスパン比	1 / 250 以下
ディテール制約*	あり

* 仕口・継手の設計を考慮し、上層柱と下層柱の外径の差に制約条件を設ける。

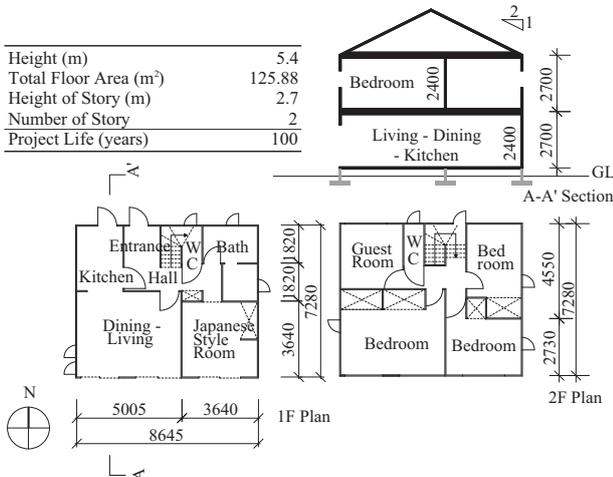


図3 解析モデル

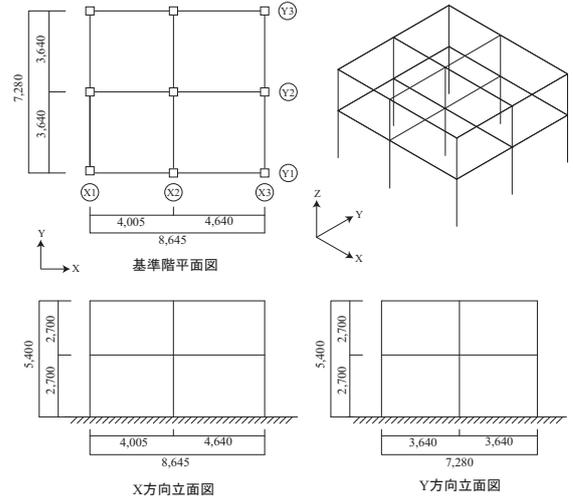


図4 解析モデル (構造体)

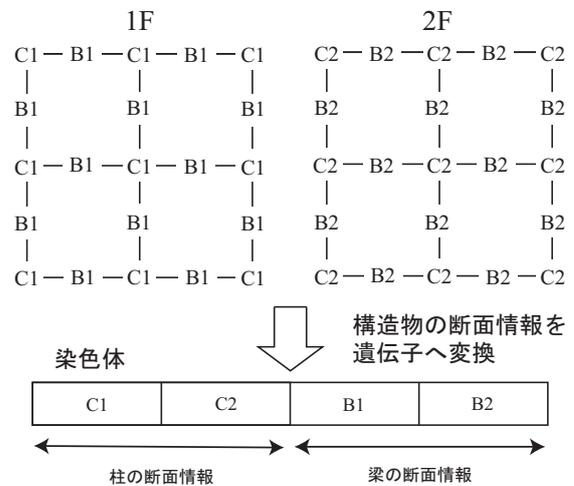


図5 グループ分け・染色体の構成

表 6 冷間成形角形鋼管

シリーズ	No	H	B	t	r	A(cm ²)	Ix(cm ⁴)	Iy(cm ⁴)
150	801	150	150	6	12	33.63	1145	1145
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
350	819	350	350	19	64	233.78	40670	40670
400	825	400	400	22	77	307.71	69528	69528
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
550	847	550	550	28	113	537.04	229807	229807
	848	550	550	32	117	607.55	255585	255585
600	854	600	600	28	113	593.04	306802	306802
	855	600	600	32	117	671.55	342090	342090
650	860	650	650	28	113	649.04	399219	399219
	861	650	650	32	117	735.55	446078	446078
700	866	700	700	28	113	705.04	508456	508456
	867	700	700	32	117	799.55	569149	569149

表 7 H 形鋼 (細幅)

シリーズ	No	H	B	t ₁	t ₂	r	A(cm ²)	Ix(cm ⁴)	Iy(cm ⁴)
100 × 50	101	100	50	5	7	8	11.84	187	15
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
450 × 200	118	450	200	9	14	18	96.76	33451	1872
	119	456	201	10	17	18	113.32	40397	2307
500 × 200	121	500	200	10	16	20	114.23	47846	2141
	122	506	201	11	19	20	131.29	56516	2581
600 × 200	124	600	200	11	17	22	134.41	77632	2278
	125	606	201	12	20	22	152.47	90395	2721
	126	612	202	13	23	22	170.65	103487	3176

3.2 腐食による経年劣化を考慮した設計例 (Test 2) との比較

本節では Test1 に対して、腐食による経年劣化を考慮した場合の LC 評価値を比較する。解析モデルは前節と同様で、推定耐用年数を求める際の各パラメータを表 1 に示す。解析結果として Test2 の設計内容を表 11 に示し、LCC 経年累積を図 7 に示す。表 9 は Test1, Test2 それぞれの LC 評価値を示し、表 10 はそれぞれの最大層間変形角の経年変化を示す。

表 9 より、Test1 と比較して Test2 の LCC が大きいことがわかる。これは図 6, 7 からわかるように、Test1 の躯体の修繕周期が 60 年に対し、Test2 は 28 年であり、躯体の修繕回数が Test1 に比べて 2 回多いためである。これまでの S 造躯体の耐用年数は、構成部材による変化が無く最大の修繕周期 60 年が選択されていたため、構成する部材が直接 LC 評価に影響を与えることはなかったが、推定耐用年数を取り入れたことにより躯体の修繕回数に影響を与え、LC 評価に影響を与えたことがわかる。これより推定耐用年数の評価は LC 評価値に大きく影響を与えるため、評価方法を慎重に設定する必要があると言える。次に、表 10 より、構造部材の腐食により Test2 の最大層間変形角が経年変化していることがわかる。しかし、最大層間

変形角の変化が小さいため、推定耐用年数に達した構造物であっても非構造材に影響を及ぼす最大層間変形角に達していない。これは Test1 の構造物が安全側に設計されていることと、構造部材の許容腐食率 10 % が安全側を考慮して小さい値に設定されているためであると考えられる。これより、部材断面及び許容腐食率を安全側に設計した場合、構造物の腐食は LC 評価への影響が小さいと考えられ、特に許容腐食率の設定が解析結果に大きく影響することがわかる。

表 9 LC 評価

	LCC	LCCO ₂
Test 1	35029721	530658
Test 2	63774208	1010910

表 10 最大層間変形角の経年変化

	Test 1	Test 2
躯体の修繕周期	60	28
0	0.00159051	0.00159051
1	0.00159051	0.00159668
2	0.00159051	0.00160289
3	0.00159051	0.00160916
4	0.00159051	0.00161548
5	0.00159051	0.00162185
⋮	⋮	⋮

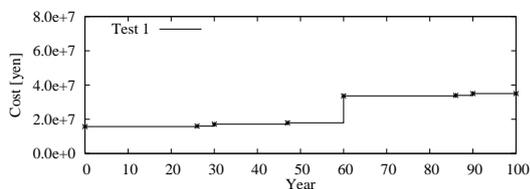


図6 Test 1 LCC 経年累積

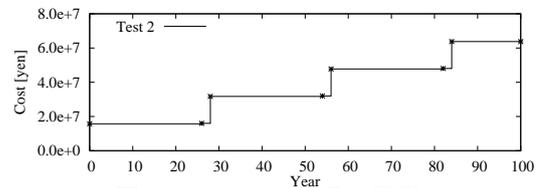


図7 Test 2 LCC 経年累積

表 8 Test 1 設計内容

部位名	部材	選択部材	周期
躯体	構法	1F-S造躯体(柱)-826(C1)	60
		1F-S造躯体(梁)-122(B1)	
躯体	構法	2F-S造躯体(柱)-819(C2)	60
		2F-S造躯体(梁)-118(B2)	
スラブ	構法	スラブS造デッキプレート	60
屋根	屋根下地材	屋根スラブS造デッキプレート	60
	屋根仕上材	屋根仕上化粧スレート	30
外壁	壁体	壁体(外壁)木造	47
	外壁下地材	外壁下地スレート板	26
	外壁仕上材	外壁仕上製材	26
	内壁	壁体	壁体(内壁) S 造
内壁	内壁下地材(外側)	内壁下地スレート板(外側)	30
	内壁仕上材(外側)	内壁仕上スレート板(外側)	30
内壁	内壁下地材(内側)	内壁下地スレート板(内側)	30
	内壁仕上材(内側)	内壁仕上スレート板(内側)	30
窓	窓サッシ	アルミサッシ	30
	窓	窓ガラス	30
天井	天井下地材	天井下地スレート板	30
	天井仕上材	天井仕上スレート板	30
床	床下地材	床下地製材	30
	床仕上材	床仕上製材	30

表 11 Test 2 設計内容

部位名	部材	選択部材	周期
躯体	構法	1F-S造躯体(柱)-826(C1)	28
		1F-S造躯体(梁)-122(B1)	
躯体	構法	2F-S造躯体(柱)-819(C2)	28
		2F-S造躯体(梁)-118(B2)	
スラブ	構法	スラブS造デッキプレート	28
屋根	屋根下地材	屋根スラブS造デッキプレート	28
	屋根仕上材	屋根仕上化粧スレート	28
外壁	壁体	壁体(外壁)木造	28
	外壁下地材	外壁下地スレート板	26
	外壁仕上材	外壁仕上製材	26
	内壁	壁体	壁体(内壁) S 造
内壁	内壁下地材(外側)	内壁下地スレート板(外側)	28
	内壁仕上材(外側)	内壁仕上スレート板(外側)	28
内壁	内壁下地材(内側)	内壁下地スレート板(内側)	28
	内壁仕上材(内側)	内壁仕上スレート板(内側)	28
窓	窓サッシ	アルミサッシ	28
	窓	窓ガラス	28
天井	天井下地材	天井下地スレート板	28
	天井仕上材	天井仕上スレート板	28
床	床下地材	床下地製材	28
	床仕上材	床仕上製材	28

4 腐食による経年劣化を考慮した LCD (Test 3)

本章では前章の設計例 Test2 に対して、腐食による経年劣化をあらかじめ考慮した LCC 単一目的最適化 (Test3) と比較する。本章では腐食による経年劣化を評価するため地震ハザードを考慮する⁵。サイト条件は名古屋とし、地震は東南海地震を想定する。評価対象期間の各年に一度地震が起こることを想定し、LC 評価値の期待値、期待 LCC ($E[LCC]$) を最小化する最適化問題を式 (12) に与える。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \quad f(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p) = E [C_{eval}(\mathbf{c}, \mathbf{t}_p)] \cdot \gamma \\ & \text{subject to} \quad g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

ここに

$E [C_{eval}]$: 期待ライフサイクルコスト

解析モデル, GA パラメータ, 構造材の制約条件は

表 12 LC 評価

	LCC	LCCO ₂
Test 2	63774208	1010910
Test 3	47515150	863994

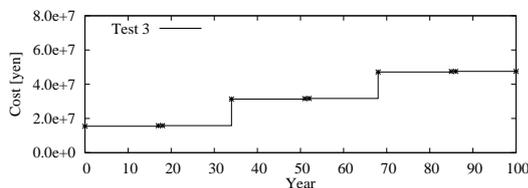


図8 Test 3 LCC 経年累積

表 13 Test 3 設計内容

部位名	部材	選択部材	周期
躯体	構法	1F-S造躯体(柱)-833(C1)	34
		1F-S造躯体(梁)-122(B1)	
躯体	構法	2F-S造躯体(柱)-826(C2)	34
		2F-S造躯体(梁)-126(B2)	
スラブ	構法	スラブS造デッキプレート	34
屋根	屋根下地材	屋根スラブS造デッキプレート	34
	屋根仕上材	屋根仕上モルタル	34
外壁	壁体	壁体(外壁)木造	34
	外壁下地材	外壁下地モルタル	34
	外壁仕上材	外壁仕上製材	17
内壁	壁体	壁体(内壁)木造	34
	内壁下地材(外側)	内壁下地モルタル(外側)	34
	内壁仕上材(外側)	内壁仕上プラスタ(外側)	18
	内壁下地材(内側)	内壁下地モルタル(内側)	34
	内壁仕上材(内側)	内壁仕上プラスタ(内側)	18
	窓サッシ	アルミサッシ	34
天井	窓	窓ガラス	34
	天井下地材	天井下地プラスタ	17
床	天井仕上材	天井仕上プラスタ	17
	床下地材	床下地製材	17
	床仕上材	床仕上製材	17

前章と同様とする。解析結果として Test2, Test3 それぞれの LC 評価値を表 12 に示す。Test3 の設計内容を表 13 に示し、LCC 経年累積を図 8 に示す。

表 12 より、Test2 に比べて Test3 の LCC は小さい。これは Test3 の推定耐用年数が Test2 と比べて大きく、評価対象期間 100 年の間に修繕回数が 1 回少ないためである。Test2 に対して、LCC 単一目的最小化により躯体の修繕回数を減少させる設計内容が得られたことがわかる。これらより、腐食による経年劣化の考慮が LC 評価に大きく影響を与えることがわかり、特に推定耐用年数は各パラメータの設定により LC 評価値を大きく変動させることがわかった。また、腐食による断面性能の劣化は LC 評価への影響が小さいことがわかったが、パラメータの設定により LC 評価値も大きく変化すると考えられる。

5 結語、今後の展望

本稿では、腐食による経年劣化を考慮した鉄骨造建築物の LCD 手法を提案し、腐食による経年劣化を考慮した場合に LC 評価値に及ぼす影響を検証した。また、LCC を目的関数として、腐食による経年劣化を考慮した設計例 (Test3) と比較し、あらかじめ腐食による経年劣化を考慮することが LC 評価値に影響を与えることを示した。今後の展望として、環境条件等により異なる各パラメータが LC 評価値に及ぼす影響を検証し、パラメータの感度を定量化したい。

参考文献

- 1) 弥田俊男, 宗本順三, 吉田哲, 高野俊吾: 独立住宅モデルの建材選択システムに伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題 - 住宅建材の選択システムへの GA 適用の研究 -, 日本建築学会計画系論文集, No. 524, pp. 77-84, 1999.
- 2) 宗本順三, 銚井修一, 張本和芳, 吉田哲, 高野俊吾: 独立住宅モデルの建材選択に伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題 - その 2. GA を用いた「標準問題の建物モデル」への住宅建材・工法選択システム -, 日本建築学会計画系論文集, No. 551, pp. 85-92, 2002.
- 3) 大森博司, 野田賢: 遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.601, pp.181-188, 2006.
- 4) 小林春之, 内藤雅子, 蜂須賀聖力, 大森博司: 劣化の不確定性を考慮した建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.235-240, 2008.
- 5) 内藤雅子, 蜂須賀聖力, 大森博司: 地震ハザードを考慮した建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究, 構造工学論文集, Vol.55B, pp.613-620, 2009.
- 6) 国土開発技術研究センター 建築物耐久性向上技術普及委員会. 鉄骨造建築物の耐久性向上技術 建築物の耐久性向上技術シリーズ 建築構造編, 技報堂出版, 1986.

平面要素を用いた形状最適化における非線形座屈荷重の感度評価について

藤井文夫¹⁾, 本間俊雄²⁾

1) 岐阜大学 工学部 数理デザイン工学科, 教授, *Dr.-Ing.*, ff@gifu-u.ac.jp

2) 鹿児島大学 大学院 理工学研究科 建築学専攻, 教授, 工博, honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

非線形座屈荷重を最大化する形状最適化問題 [1, 2, 3, 4]において、座屈荷重の感度評価の際に、座屈点の種類 (分岐点 BP または荷重極限点 LP) にかかわらず応用でき、大規模計算においても計算負荷を低く抑えることのできる定式化手法を紹介する。

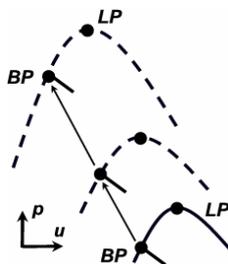


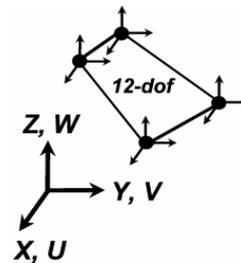
図1 (N+1)次元の平衡空間(u-p)での座屈荷重

本論文での最適化手法の概念を図1に示す。非線形座屈解析における平衡路には、座屈点(BP または LP)が出現する。そして形状の更新の度に、新たなる平衡応答 (非線形平衡路) が生まれるが、この更新後の平衡路に出現する座屈点の移動を逐次追いかけて、その荷重変数(後述の p) を最大化することが目的である。設計変数としては、平面構造の領域を縁取る線上にある節点の座標 (後述の X) を採用する。付帯条件としては後述するように、使用する材料の (面積) 一定条件、平衡条件式、そして剛性行列の特異性がある。研究のベースとなる計算数理的なノウハウは、使用した連続体要素 (平面要素) [5]の他にも、非線形座屈解析手法 [6, 7, 8, 9]、超円筒型拘束式 [4]、Rosen のこう配投影法 [10] などである。例題として非線形平面アーチの座屈挙動を解析し、提案する感度評価手法の妥当性を検証した [11, 12]。

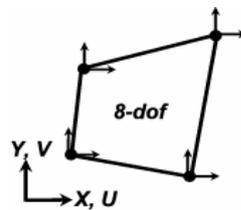
対象とする構造形態は、本研究では平面問題に限るが、使用する有限要素の非線形平衡方程式が、節点 (並進) 変位ではなく、節点の現在の座標位置 (=節点の初期座標 + 節点変位) を独立変数として定式化できるため、六面体ソリッド要素 (24 dof) を用いた3D問題への拡張も可能であり、その発展可能性は高い。

2 使用した有限要素 [5]

本研究の着想に至った鍵のひとつは、使用した有限要素 [5]にある。本間は文献 [5]において、節点の変位後の位置情報 \bar{X} (座標) を未知量とする三角形の空間膜要素 (9 dof) を開発している。この三角形要素の延長上に、図 2(a) にあるような四角形の空間膜要素 (12 dof) も定式化している。本研究では、この四角形空間膜要素 (12 dof) の不必要な節点自由度 W を拘束して、(XY)平面内に納まる平面要素 (8 dof) として使用する。



(a) 3D 膜要素



Plane Stress Element

(b) 平面要素

図2 (a) 3D 膜要素 および (b) 平面要素

節点変位を独立変数とする通常の有限要素の平衡方程式とは異なり、図2にある要素で離散化された非線形平衡方程式が、一般につきのような形式で与えられることに着目する。

$$R(\bar{X}) - pe = 0 \tag{1}$$

ここに R , p , e はそれぞれ、内力ベクトル、荷重変数、そして荷重モードである。特に R が、節点の変位後の位置情報 \bar{X} 、すなわち節点の初期座標 X (設計変数) と

節点変位 \mathbf{u} との和に依存して表現されている。

$$\bar{\mathbf{X}} = \mathbf{X} + \mathbf{u}(\mathbf{X}) \quad (2)$$

ここで節点変位 $\mathbf{u}(\mathbf{X})$ は、節点の初期座標 \mathbf{X} に依存する。非線形座屈解析に不可欠な剛性行列 \mathbf{K} は 通常の定義に従い、つぎのように導出できる。

$$\mathbf{K} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \bar{\mathbf{X}}} \frac{\partial \bar{\mathbf{X}}}{\partial \mathbf{u}} = \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{X}} \quad (3)$$

ここに式中の $\partial \bar{\mathbf{X}} / \partial \mathbf{u}$ は、式(2) により単位行列となる。

3 非線形座屈解析の概要

本研究の最適化手法では、従来の非線形座屈解析との相性（融合性）に特に着目して定式化を試みた。そこで本章では、非線形座屈解析の概要を簡単に説明しておく。平衡路を追跡する予測子・修正子ステップでは、つぎのような剛性方程式を解く。まず平衡点では、予測子 (\mathbf{du} , $d\mathbf{p}$) の求解に、

$$\mathbf{K} \mathbf{du} - d\mathbf{p} = \mathbf{0} \quad (4)$$

を解き、非平衡点では、修正子 ($\delta \mathbf{u}$, $\delta \mathbf{p}$) の求解に

$$\mathbf{K} \delta \mathbf{u} - \delta \mathbf{p} = -(\mathbf{R} - \mathbf{p} \mathbf{e}) \quad (5)$$

を解く。それぞれ増分制御と反復制御に、予測子と修正子に関するもう一本の制御式が必要となるが、紙面の都合上省略し、詳細は[9]にゆずる。ただし平衡反復の際の制御法のひとつであり、本研究で採用した Chan の方法[6]を概説しておく必要がある。まず修正子として

$$\delta \mathbf{u} = \delta \mathbf{u}_0 + \delta \mathbf{p} \delta \mathbf{u}_e \quad (6)$$

ここで

$$\delta \mathbf{u}_0 = -\mathbf{K}^{-1}(\mathbf{R} - \mathbf{p} \mathbf{e}) \quad (7)$$

および

$$\delta \mathbf{u}_e = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{e} \quad (8)$$

を計算する。式(6)の中で含まれる未知の荷重修正子 $\delta \mathbf{p}$ を決定する際に、 $\delta \mathbf{p}$ に関する $\delta \mathbf{u}$ の最小ノルム条件を反復制御の条件とするのが、Chan 法[6]の特徴である。

すなわち、

$$\frac{\partial (\delta \mathbf{u}^T \delta \mathbf{u})}{\partial (\delta \mathbf{p})} = \mathbf{0} \quad (9)$$

から

$$\delta \mathbf{p} = -\frac{\delta \mathbf{u}_e^T \delta \mathbf{u}_0}{\delta \mathbf{u}_e^T \delta \mathbf{u}_e} \quad (10)$$

として $\delta \mathbf{p}$ を求めることができる。この方法は、予測子情報を必要とせず、現在点を設計変数の更新後の平衡路に着地させる際に、非平衡点（更新前の平衡路の平衡点）から反復を開始できる点で有用な方法である。本研究もこの利点に着目している。

また一般に、剛性方程式の解法の際には剛性行列（対称行列）は、つぎのように \mathbf{LDL}^T 分解される。

$$\mathbf{K} = \mathbf{LDL}^T \quad (11)$$

ここに、 \mathbf{L} は単位下三角行列で、 \mathbf{D} は対角行列である。安定性情報や座屈モードは、すべてこの \mathbf{LDL}^T 分解から抽出できる。詳細は文献[9]を参考にされたい。

4 座屈荷重の感度評価

座屈荷重の評価にあたっては本研究では、座屈点のごく近傍で計算された正則平衡点の荷重パラメータを、座屈荷重とする。このような正則平衡点の荷重変数は、仮に座屈点をピンポイント反復法で精算した場合の収束点（座屈点）での荷重変数と比較しても実用上、数値的には差はなく（有効数字3ケタ）、非線形の座屈解析では十分に容認できる仮定である。

式 (1) の両辺を、ある一つ的设计変数 X_j で偏微分すると

$$\frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \bar{\mathbf{X}}}{\partial X_j} + \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \mathbf{X}} \frac{\partial \bar{\mathbf{X}}}{\partial \mathbf{u}} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_j} - \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial X_j} \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (12)$$

となる。ここに $\partial \bar{\mathbf{X}} / \partial X_j$ は、つぎのような単位基底ベクトルである。

$$\mathbf{b}_j = \begin{cases} 0 & \leftarrow \#1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 & \leftarrow \#j \\ 0 \\ 0 \\ 0 & \leftarrow \#N \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{u}^T \mathbf{b}_j \quad (19)$$

また $\partial \bar{\mathbf{X}} / \partial \mathbf{u}$ は単位行列である。したがって式(12)は、つぎのようになる。

$$\mathbf{k}_j + \mathbf{K} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_j} - \frac{\partial p}{\partial X_j} \mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (14)$$

ここで $\mathbf{k}_j = \mathbf{K} \mathbf{b}_j$ は、剛性行列 \mathbf{K} の第 j 列である。さらにさらに式(14)を変位感度について解くと、

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_j} = -\mathbf{b}_j + \frac{\partial p}{\partial X_j} \delta \mathbf{u}_e \quad (15)$$

となる。 $\delta \mathbf{u}_e$ はすでに、式(8)で定義済である。式(15)での未知感度量は、 $\partial \mathbf{u} / \partial X_j$ および $\partial p / \partial X_j$ である。そこで、 $\partial \mathbf{u} / \partial X_j$ を消去するために、つぎのような超円筒型拘束式[4]を導入する。

$$\mathbf{u}^T \mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}}^T \bar{\mathbf{u}} \quad (16)$$

ここで $\bar{\mathbf{u}}$ は、更新前の平衡路に出現した座屈点での全変位ベクトルである。式(16)の両辺を X_j で偏微分すると、つぎのような直交条件が出てくる。

$$\mathbf{u}^T \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial X_j} = 0 \quad (17)$$

この直交条件に着目して、式(15)の両辺に左側から、現在の全変位ベクトル \mathbf{u}^T をかけ、式(17)を考慮すると、つぎのように座屈荷重の感度を評価できる。

$$\frac{\partial p}{\partial X_j} = + \frac{u_j}{\mathbf{u}^T \delta \mathbf{u}_e} \quad (18)$$

ここで、

は、考えている設計変数 X_j に対応する節点変位である。式(18)の感度式は簡潔で、分岐座屈点 BP や荷重極限点 LP についても有効である。また特異点の近くでも分数表現の分母がゼロになることはない。すべての設計変数についてまとめると、式(18)は

$$\nabla p = \left\{ \frac{\partial p}{\partial \mathbf{X}} \right\} = + \frac{\mathbf{u}}{\mathbf{u}^T \delta \mathbf{u}_e} \quad (20)$$

となる。現在点での全変位ベクトル \mathbf{u} と増分変位ベクトル $\delta \mathbf{u}_e$ のみが必要とされ、座屈モードは関与してこない。これが本研究で提案する座屈荷重の感度式の特長である。

5 材料一定条件を伴う最適解の探査法

使用材料の条件として、設計変数 \mathbf{X} の如何にかかわらず、要素面積の総和 $A(\mathbf{X})$ を一定とする。

$$A(\mathbf{X}) = A_0 \quad (21)$$

A_0 は初期形状における形状領域の面積である。Rosen のこう配投影法 [10] は、設計空間 $(\mathbf{X}-p)$ において、式(21)で定義される A -等高線に沿って最適解を探査する手法である。式(20)で与えられる最急こう配方向 ∇p は、常に p -等高線と直交する。そこで図3にあるようにまず、小さなステップサイズ τ (正值) を用いて $\tau \nabla p$ (AB) を決め、これを A -等高線に投影することを考える。

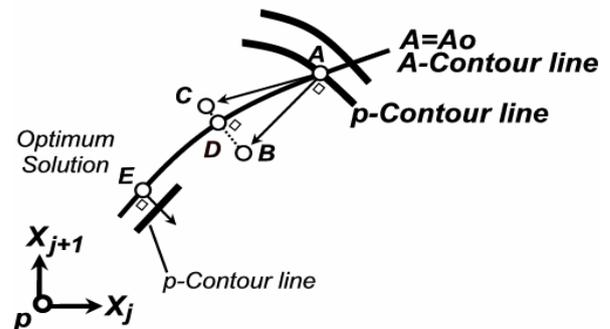


図3 (N+1)次元の設計空間(X-p)

このためにはまず、A-等高線の接線ベクトル $\tau \nabla p + \alpha \nabla A$ ($AC=AB+BC$) と、 $\alpha \nabla A$ (BC)との直交条件から、

$$\alpha \nabla A^T (\tau \nabla p + \alpha \nabla A) = 0 \quad (22)$$

を得る。そして係数 $\alpha (\neq 0)$ は つぎのように決まる。

$$\alpha = -\frac{\tau \nabla A^T \nabla p}{\nabla A^T \nabla A} \quad (23)$$

これから $\tau \nabla p + \alpha \nabla A$ ($AC=AB+BC$)が決まるが、接線ベクトル AC の先端点 C は A-等高線 (曲線) から外れるため、領域形状の面積を A-等高線 ($A=A_0$) に戻すために反復計算が必要となる。A-等高線との直交方向に $\beta \nabla A$ だけ移動して、A-等高線に到達するとすると、

$$A + \beta \nabla A^T \nabla A = A_0 \quad (24)$$

となる条件から、係数 β は

$$\beta = \frac{A_0 - A}{\nabla A^T \nabla A} \quad (25)$$

と決まる。この修正反復を、A-等高線に到達するまで繰り返す。

6 最適化手法と計算ステップ

本研究での形状最適化問題を、数理的に定義するとつぎようになる。

$$\begin{aligned} \text{Maximize : } & \rho(\mathbf{X}) \text{ of the stability point} \\ \text{subject to: } & \mathbf{R}(\bar{\mathbf{X}}) - \mathbf{p}\mathbf{e} = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\text{constant material volume } A(\mathbf{X})=A_0 \quad (21)$$

$$\det \mathbf{K} = \det \mathbf{LDL}^T = \det \mathbf{D} = 0 \quad (27)$$

計算ステップをまとめると、つぎようになる。

- Step 01: 初期形状を設定する (図3の点A)。
- Step 02: 平衡路を追跡する (無変形状態から出発)。
- Step 03: 座屈点を探索する。
- Step 04: 座屈点近傍で正則平衡点を特定する。

- Step 05: 座屈荷重感度を式 (20) で評価する。
- Step 06: ステップサイズ τ を設定する ($\tau \nabla p$ (AB))。
- Step 07: AB を A-等高線に投影する(Rosen 法)。
- Step 08: 接線ベクトル AC を決める。
- Step 09: 反復 (C→D)により $A=A_0$ に戻す($AD=d\mathbf{X}$)。
- Step 10: 設計変数を更新する。図3で $A(\mathbf{X}) \rightarrow D(\mathbf{X}+d\mathbf{X})$ 。
- Step 11: 領域形状 (平衡路) を更新する。
- Step 12: 収束を判定する ($AD=d\mathbf{X}$ はゼロベクトルか?)。
- Step 13: 収束の場合には、最適解の探索は終了 (& toast!).
otherwise, go to Step 14
- Step 14: Chan 法で更新後の平衡路にむけて
平衡反復する (図4で $A \rightarrow E$ or $A \rightarrow F$)。
- Step 15: 到達した平衡路について座屈点を探索する。
- Step 16: この座屈点の近傍で正則平衡点を特定する。
- Step 17: go to Step 05

この最適化手法では Rosen のこう配投影法[10]でA-等高線に沿いながら形状を更新して、最適解に至る。A-等高線を移動する度に Chan 法 [6] を用いて、更新後の平衡路に到達する。なお到達した平衡路を原点から新たに追跡する必要はなく、更新前の座屈点の近傍から直接、更新後の座屈点付近に到達できる。仮に遠くはずれる場合でも、通常平衡路追跡法で目標点 (更新後の座屈点) の近くにまで接近できるのがポイントである。

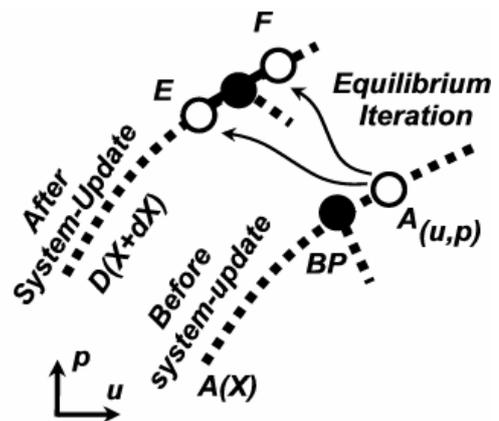


図4 更新後の平衡路に向かった反復

7 数値計算例

提案する座屈荷重の感度式(20)を用いた形状最適化手法の妥当性を数値計算で検証する。図5は設定した平面構造系の初期形状である。開き角が 60° で半径 100m の

両端ピン支持の円形アーチである。他の幾何学データや離散データも図5に示す。節点自由度の総数は4,006個である。材料物性は、Young率 $E=200$ GPa、Poisson比 $\nu=0.3$ である。つぎの異なる3種類の荷重条件に対して形状最適化を試みた。

図6(a)にあるように、スパン中央に集中荷重が作用する場合、左右の対称性が崩れる分岐座屈問題となり、最終的には図6(a)にあるようなトラスに似た形状に最適化された。曲げ効果を排除して軸変形だけで座屈荷重を最大化する古典解である。図6(b)の二番目の荷重ケースでは、右半分にだけ等分布荷重を想定した。この非対称荷重の場合は、飛び移り座屈問題となり、最適化された形状を図6(b)に示す。軸線は大きく湾曲し最大座屈荷重を実現するための形態となっている。図6(c)にある三番目の荷重条件では、全スパンに等分布荷重を想定する。最適形状は図6(c)に示すような圧縮カタナリー形状となっている。これも構造解析ではよく知られた古典解となっている。

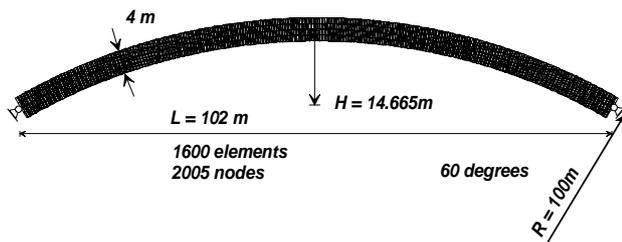


図5: 平面要素で離散化したアーチの初期形状

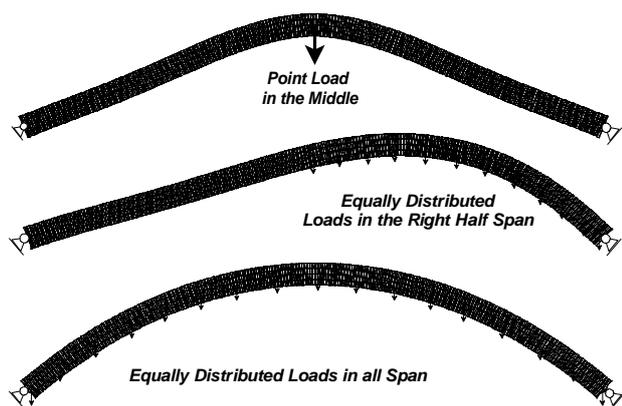


図6: 異なる荷重条件に対する最適形状
上から (a) 中央集中荷重
(b) 右半分に等分布荷重
(c) 全スパンに等分布荷重

以上の3ケースはいずれも、線要素(はり要素)を用いても解析可能である。そこで平面要素(連続体要素)の利点を示すため、つぎの例題では、側面に矩形のカット部をもつ断面の平面構造系の形状最適化を考える。図7はその初期形状を示す。幾何学データと材料物性は図5の初期モデルと同一とした。中央集中荷重に対して形状最適化された解を図8に示す。これを図6(a)の解と比較すると、ややトラスの形態に近づいてはいるが、連続体要素でカット部付近での応力の流れを把握しているためか、座屈点に達するまでに曲げ変形を許容する形態となっているのがわかる。



図7 カットアウトのあるアーチ断面



図8 カットアウトのある場合の最適解

8 まとめと結論

非線形平面構造系について、大規模な形状最適化問題でも使える簡潔な座屈荷重の感度式(20)を提案した。研究のポイントとしては、形状最適化手法と非線形座屈解析とが相互に融合できるような定式化を試みたことである。剛性行列の LDL^T 分解から、必要な座屈情報のほとんどが抽出できる。数値計算例では、提案する座屈荷重感度式の妥当性を検証できた。ソリッド要素については同様の定式化がすでに進行中であり、3D形状最適化手法への拡張を試みている。この他にも、今後の研究課題を掲げておく。

- 反復法で座屈点をピンポイント精算する手法の導入
- 最適解をより効率的に探索する数理手法の検討
- 最悪初期不整(最小座屈荷重)を求める形状最適化
- 立体膜構造の剛性を最大化のための感度評価

謝辞

本研究の一部に、(財)能村膜構造技術振興財団の研究助成金(平成22年2月交付)、およびメカニカルデザイン(株)からの奨学寄附金の一部を使用させていただいたことを、謝意とともに付記する。

参考文献

- 1) Ryu, Y.S., Harrian, M., Wu, C.C. and Arora, J.S.: Structural Design Sensitivity Analysis of Nonlinear Response, Computers and Structures, Vol. 21, No. 1, 245-255, 1985
- 2) Wu, C.C. and Arora, J.S.: Design Sensitivity Analysis of Non-linear Buckling Load, Computational Mechanics, Vol. 3, 129-140, 1988
- 3) Ohsaki, M: Design Sensitivity Analysis and Optimization for Nonlinear Buckling of Finite-Dimensional Elastic Conservative Structures, Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.194, Nos.30-33, 331-358, 2005
- 4) Noguchi, H. and Hisada, T.: Sensitivity Analysis in Post-buckling Problems of Shell Structures, Computers & Structures (ISSN 0045-7949), vol. 47, No. 4-5, 699-710, 1993
- 5) 本間俊雄, 合田雄策, 安宅信行: 座標値を未知量とした有限要素技術による張力構造解析の一方法, 日本建築学会構造系論文集, No. 602, pp. 161-169, 2006
- 6) Chan, S.L.: Geometric and Material Nonlinear Analysis of Beam-Column and Frames using the minimum Residual Displacement Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.26, 2657-2669, 1988
- 7) Noguchi, H. and Fujii, F.: Eigenvector-free Indicator, Pinpointing and Branch-Switching for Bifurcation, Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.19, Issue 6, 445-457, 2003
- 8) Fujii, F. and Noguchi, H.: The Buckling Mode Extracted from the LDL^T-Decomposed Large-Order Stiffness Matrix, Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.18, Issue 7, 459-467, 2002
- 9) 藤井文夫, 大崎 純, 池田清宏: 構造と材料の分岐力学, コロナ社、計算工学シリーズ3、2005年
- 10) Rosen, J.B.: The Gradient Projection Method for Nonlinear Programming, Part I, Linear Constraints, SIAM, Vol.8, 181-217, 1960, Part II, Nonlinear Constraints, SIAM, Vol.19, 514-532, 1961
- 11) Fujii, F., Shibata, S. and Honma, T: An Effective Buckling Load Sensitivity in Shape Optimization of Nonlinear Plane Structures, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, June 22-25, 2010, Kyoto
- 12) 柴田俊輔、藤井文夫、本間俊雄: 非線形平面構造系の座屈荷重の感度評価と形状最適化に関するひとつの定式、計算工学講演会論文集、Vol. 15, 2010年5月

骨組構造の構造性能指定設計法の開発

河合 良治¹⁾, 大森 博司²⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻, 大学院生, kawai@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序

空間骨組構造物は、主たる応力の伝達を軸力に依存し、座屈不安定現象による脆性的な崩壊の危険性を内在している。さらに、実設計では許容応力度設計のみによって構造物の安全性が検討されることが一般的であるため、冗長性の欠落した構造物となる可能性が高い。構造物の崩壊はヒューマンエラーや劣化損傷などの複合的な要因が複数重なり合って生じるものであるため、冗長性の有無によって、必ずしも構造物の安全性を保障できるわけではない。しかし、損傷を受けた状態を想定し、ある一定の余裕度が確保されるような設計を予め行うことができれば、万一の事態に直面しても、構造物を崩壊から回避させることができると考えられる。

そこで、本研究は構造物に冗長性を付与する手法の一提案として、構造耐力を直接的に制御する手法の提案を行う。

2 空間骨組構造物の崩壊荷重算出手法

2.1 新たな塑性崩壊条件の導入

一般的に荷重増分法は曲げ抵抗型であるラーメン構造物の極限解析として用いられる。その際、塑性ヒンジは全塑性モーメントを維持したまま回転可能であるという仮定が用いられ、骨組構造物は荷重の増加に伴って塑性ヒンジの数が増加するという性質を利用して設計される。このとき、塑性条件式は式 (1) で与えられる。

$$-M_p \leq M \leq M_p \quad (1)$$

一方、空間骨組構造物は、主に面内力による抵抗機構により荷重を支承部や支持構造物に伝えるため、座屈不安定現象に留意して設計されている。座屈不安定現象には全体座屈と局部座屈があるが、空間骨組構造物の場合には個材の座屈に見られるような局部座屈による崩壊に対する検討が重要となることが多い。なぜなら、軸力を用いることによって高い応力の伝達能力があり、それが引き金となり連鎖的に別の箇所に座屈

が発生する可能性があるからである。この場合、継続する過大荷重により次々に座屈現象が連鎖することにより崩壊に結びつくことが考えられる。そこで、軸力抵抗型の空間骨組構造物に適用可能となる、座屈不安定現象を考慮した式 (2), (3), (4) を塑性条件式として導入する。

$$-N_{cr} \leq N \leq N_y \quad (2)$$

$$N_{cr}^{(i)} = \frac{\pi^2 EI^{(i)}}{\ell^{(i)2}} \quad (3)$$

$$N_y^{(i)} = F \times A^{(i)} \quad (4)$$

N_{cr} : 座屈荷重ベクトル (> 0)

N_y : 降伏軸力ベクトル (> 0)

N : 軸力ベクトル

$EI^{(i)}$: i 部材の曲げ剛性

$\ell^{(i)}$: i 部材の部材長

F : 設計基準強度

$A^{(i)}$: i 部材の断面積

個材の座屈に関して、座屈後耐力が維持されることと、塑性座屈に関しては座屈後の耐力低下が大きいことが知られているため、座屈部材は塑性座屈が生じないような十分な大きさの細長比を有し、弾性座屈荷重が維持可能であるとする。

2.2 荷重増分法の空間骨組構造物への適用

空間骨組構造物を対象とした崩壊荷重係数の算出過程において個材の座屈不安定現象を扱う際、本手法において導入する新たな概念を概説する。図 1 のように、骨組構造物およびトラス構造物のそれぞれに対して、荷重節点における変位を δ としたとき、荷重 P を比例載荷することによって崩壊に達するまでの過程を考える。図 1 の左側の列は骨組構造物、右側の列はトラス構造物の崩壊過程をそれぞれ示す。中央列にそのときの $P-\delta$ の関係を示す。図中において、骨組構造物における塑性ヒンジを θ で図示し、トラス構造物における座屈あるいは降伏部材は破線で表す。このとき、両構造物が崩壊するまでの状態の変遷は図 1 の (A)~(D) を用いることで以下のように説明される。

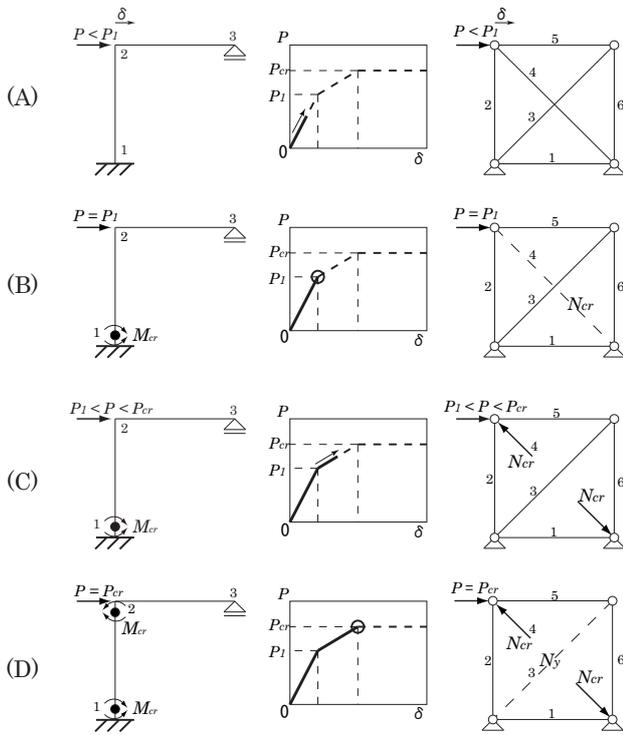


図1 ラーメンとトラスにおける荷重増分解析の過程

- (A) 初期状態であり，荷重増分を行うことが可能である。
- (B) 骨組構造物において塑性ヒンジが発生し，トラス構造物部においては座屈あるいは降伏部材が発生する。これにより，剛性が低下する屈曲点に達する。
- (C) 塑性ヒンジは当該の全塑性モーメントを維持し，座屈部材は当該部材の座屈荷重を維持する。これにより，他の健全な部材で構成される構造物が外力に抵抗するため，構造物全体の剛性は低下しながら荷重増分が行われる
- (D) 骨組構造物において新たな塑性ヒンジ，トラス構造物において新たな座屈あるいは降伏部材が生じ，構造物が不安定化する。以後，これ以上の荷重増分は見込めない。

このように，外力に対する構造物の挙動に関して，曲げ抵抗型の骨組構造物と軸力抵抗型のトラス構造物は，同一の $P-\delta$ 関係によって表すことが可能である。これが，骨組構造物で用いられる荷重増分法を，軸力抵抗型の空間骨組構造物に適用する原理である。ただし，荷重を維持する既座屈部材は弾性座屈荷重のみを扱い，局部座屈が生じないような十分な大きさの細長比を有しているとする。以上の考え方を導入することにより，軸力抵抗構造の空間骨組構造物の崩壊荷重係数を，複

雑な弾塑性解析を経ることなく求めることができると考えられる。

2.3 区分的線形問題の概念を用いた算出手法

本節では，空間骨組構造物の崩壊過程を追跡するため座屈あるいは降伏部材を発見するための手法として，区分的線形問題の考え方をとり入れた解析手法を提案する。区分的線形問題としてのアルゴリズムを以下に示す。

- Step 1 m -th Phase Model に対し，荷重 p を与えたときの各軸力 N'_m を求める。
- Step 2 m -th Phase Model における各部材が座屈するときの荷重係数 λ_{mcr} を求め，その Model における崩壊荷重係数 $\lambda_m = \min \lambda_{mcr}^{(i)}$ を求める。
- Step 3 m -th Phase Model における部材軸力 N_m を求め， m -th Phase までの累積軸力 $N_m^{accumulate}$ を求める。
- Step 4 Step 1 ~ Step 3 を， m -th Phase Model が不安定構造物に達するまで繰り返す。

i は要素数， m は Phase 数を表している。なお，Phase Model を構造物の崩壊過程の中で座屈あるいは降伏に至っていない構造部材で形成される構造物と定義する。ここで， R を全 Phase 数として，本手法は以下のように定式化される。

$$\lambda_{cr} \mathbf{p} = \left(\sum_{m=1}^R \lambda_m \right) \mathbf{p} \quad (5)$$

本節で提案した算出方法を空間骨組構造物に適用することで，崩壊に至る過程を追跡することが可能である。

3 構造耐力の直接制御設計法

3.1 構造耐力直接制御法の定式化

部材断面を設計変数とし，総重量を最小化するために総重量の逆数を目的関数として次式のような単一目的最適化問題を考える。解析において，各 Phase における荷重係数は Piecewise-Linear Method により計算される。

$$\text{maximize} \quad f(\mathbf{x}) = \frac{1}{W} \prod \gamma_j \quad (6)$$

$$\text{subject to} \quad -N_{cr} \leq N \leq N_y \quad (7)$$

$$(N_{cr} \geq 0, \quad N_y \geq 0) \quad (8)$$

- f : 評価関数
- \boldsymbol{x} : 部材断面形状を表すベクトル
- W : 構造物の総重量
- γ_j : 制約条件 j に対するペナルティ関数
- \boldsymbol{N} : 部材の軸力ベクトル
- \boldsymbol{N}_{cr} : 部材の座屈荷重ベクトル
- \boldsymbol{N}_y : 部材の降伏軸力ベクトル

3.2 短期許容応力度設計によるペナルティ

部材 i における軸力を $N^{(i)}$, 座屈荷重を $N_{cr}^{(i)}$, 降伏軸力を $N_y^{(i)}$ とすると, 短期設計荷重(長期荷重を含む)が与えられたときの, 許容応力度比 $r^{(i)}$ は次式で表される。

$$r^{(i)} = \begin{cases} -\frac{N^{(i)}}{N_y^{(i)}} & \text{if } (N^{(i)} < 0) \\ \frac{N^{(i)}}{N_{cr}^{(i)}} & \text{if } (0 < N^{(i)}) \end{cases} \quad (9)$$

全部材の中で最大の許容応力度比 r_{\max} は次式で表される。

$$r_{\max} = \max r^{(i)} \quad (10)$$

このとき, 短期設計荷重によるペナルティ関数を以下のように表し, 短期設計荷重を満足しない場合にはペナルティを課す。

$$\gamma_1 = \begin{cases} \frac{1}{r_{\max}} & \text{if otherwise} \\ 1 & \text{if } r_{\max} \leq 1 \end{cases} \quad (11)$$

3.3 耐力に関するペナルティ

m -th Phase の荷重増分過程で部分崩壊が生じる耐力を直接的に制御するためのペナルティ関数の定式化を以下に示す。

m -th Phase における耐力を, m -th Phase の部分崩壊時まで増分された累積荷重係数 $\lambda_m^{\text{accumulate}}$ として定義する。

このとき, 解析によって得られる m -th Phase ($m = 1, 2, \dots, R$) における耐力 $\lambda_m^{\text{accumulate}}$ に対して設計耐力範囲を設定し, 耐力が設計耐力範囲外であった場合にペナルティを与える。ペナルティの与え方は, 図 2 に示すように各 Phase に対して設計耐力範囲を設定し, 耐力が設計耐力範囲に納まらなかった場合, それらの差異の大きさに応じて, ペナルティ関数の値を小さく設定する。以上の考え方をを用いて, m -th Phase の耐力に関するペナルティ関数 γ_{bm} を以下のように定義する。

($m < R$) のとき

$$\gamma_{bm} = \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha + |\lambda_m^{\text{accumulate}} - \bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}}|} & \text{(if otherwise)} \\ 1 & \text{(if } \bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}} \leq \lambda_m^{\text{accumulate}} \leq \bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}} + \alpha \text{)} \end{cases} \quad (12)$$

($m = R$) のとき

$$\gamma_{bm} = \begin{cases} \frac{\alpha}{\alpha + |\lambda_m^{\text{accumulate}} - \bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}}|} & \text{(if otherwise)} \\ 1 & \text{(if } \bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}} \leq \lambda_m^{\text{accumulate}} \text{)} \end{cases} \quad (13)$$

- $\lambda_m^{\text{accumulate}}$: m -th Phase における耐力
- $\bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}}$: m -th Phase の設計耐力範囲の下限値
- α : 設計耐力範囲幅
- $\bar{\lambda}_m^{\text{accumulate}} + \alpha$: m -th Phase の設計耐力範囲の上限値
- R : 耐力制御を行う Phase 数

ここで, 耐力を R -th Phase まで制御すると考えたとき, m -th Phase の耐力に関するペナルティ関数を R -th Phase を用いて, 耐力に関するペナルティ関数 γ_2 を次式で定義する。

$$\gamma_2 = \prod_{m=1}^R \gamma_{bm} \quad (14)$$

3.4 既座屈部材の細長比によるペナルティ

部材の弾性座屈荷重は一定のひずみ量以下であれば維持されるが, 塑性座屈荷重に関しては, 座屈後の耐力低下が早期に現れることが確認されている。そこで, 部材の塑性座屈が先行する崩壊を回避することを目的として, 既座屈部材の細長比に応じたペナルティを設ける。このとき, 限界細長比を Λ , ($m - 1$)-th Phase における座屈部材の細長比を $\lambda_{\text{buckle}(m-1)}$ としたとき, i -th Phase ($i \geq 2$) における座屈部材の細長比によるペナルティ関数は以下のように表される。

$$\gamma_{sm} = \begin{cases} \frac{\lambda_{\text{buckle}(m-1)}}{\Lambda} & \text{if } \lambda_{\text{buckle}(m-1)} < \Lambda \\ 1 & \text{if } \Lambda \leq \lambda_{\text{buckle}(m-1)} \end{cases} \quad (15)$$

このとき, 構造物が不安定となる Phase 数である R -th Phase までの座屈部材の細長比によるペナルティ

関数 γ_{sm} をかけ合わせた値を，既座屈部材の細長比によるペナルティ関数 γ_3 と扱い，次式で表す。

$$\gamma_3 = \prod_{m=2}^R \gamma_{sm} \quad (16)$$

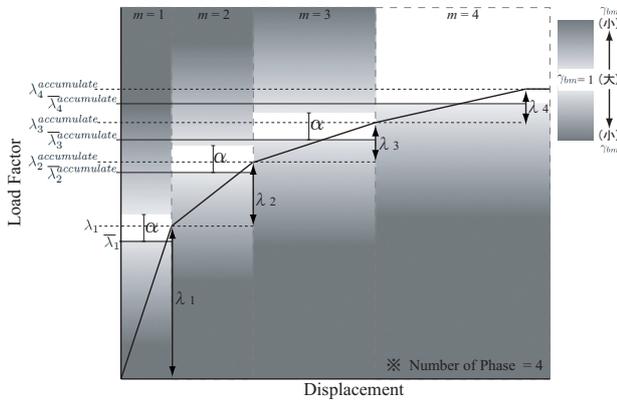


図2 m -th Phase の耐力に関するペナルティの概念図

3.5 数値解析例

3.5.1 解析モデル

解析の対象とするモデルとして，図3に示すような立体トラスを考える。GAパラメータを表1に示す。支持条件は四隅をピン支持とし，ピン支持の中心に位置する4つの外周上の節点は，X軸上に配置される節点はY方向のみ面外ローラーとし，Y軸上に配置される節点はX方向のみ面外ローラーとする。

荷重条件に関しては，自重および積載荷重を考慮するものとする。まず鋼材の単位体積重量である 76.93 kN/m^3 を用いて自重を与え，次にガラスの屋根面を想定した積載荷重として 300 N/m^2 を用いてトラス上端に積載荷重を与える。短期荷重として積雪荷重を増分させるものとし，名古屋市の短期積雪荷重である 600 N/m^2 を想定してトラス上端に積載荷重を与える。これらの荷重は等価節点荷重として各節点に分配する。積雪荷重のみを増大荷重として扱い，その荷重倍率を荷重係数 λ とする。

本解析例における耐力に関するペナルティ関数の諸量として，設計耐力範囲幅 α は 0.1 とし，各 Phase における設計耐力範囲の下限値は， $\bar{\lambda}_1^{accumulate} = 1.0$ ， $\bar{\lambda}_2^{accumulate} = 1.5$ ， $\bar{\lambda}_3^{accumulate} = 1.8$ ， $\bar{\lambda}_4^{accumulate} = 2.0$ と設定する。

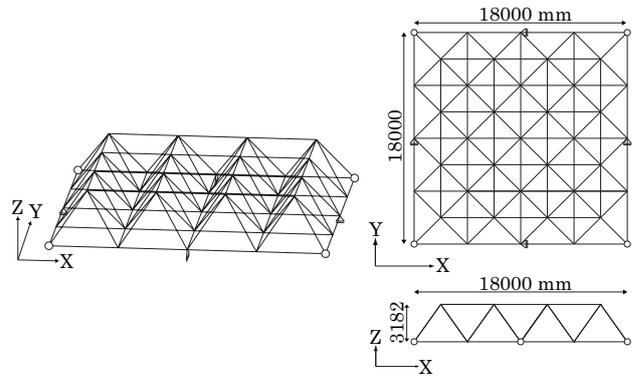


図3 Numerical model : 立体トラス

表1 GAパラメータ

アルゴリズム	単純GA
設計変数	20
個体数	100
世代数	10000
交叉率	0.7
突然変異率	0.3

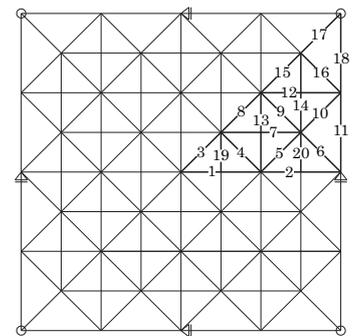


図4 部材のグルーピング

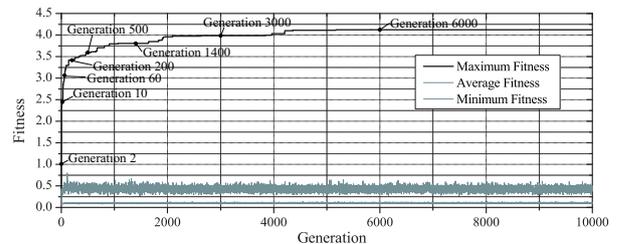


図5 適合度の推移

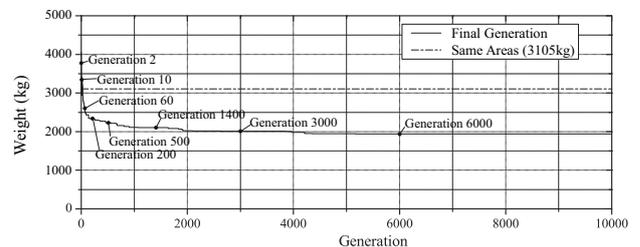


図6 総重量の推移

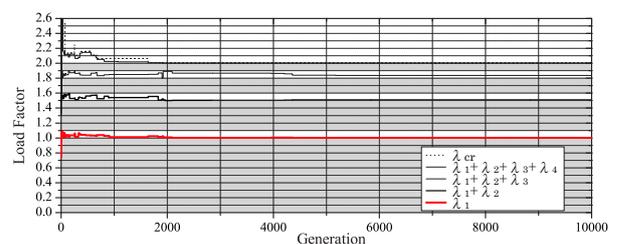


図7 各 Phase における累積荷重係数 $\lambda_m^{accumulate}$ の推移

以上の解析条件を用いて得られた構造物と、同一断面により短期許容応力度設計された構造物を比較することによって、本手法の有効性を検証する。

3.5.2 解析結果

各解析条件により得られた適合度の推移を図5に、総重量の推移を図6に示す。図中において同一断面による設計解の重量を一点鎖線で示した。全ての解析において10000世代を通した適合度の推移より、解が概ね収束したことが確認できる。また、各Phaseにおける累積荷重係数の推移を図7に示す。図中において、灰色で描かれた領域は耐力に関するペナルティが与えられる領域($\gamma_2 < 1$)であり、即ち耐力制御に関する制約条件を満たさない領域である。従って、最初期の世代を除いて、耐力が全Phaseに亘って設計耐力範囲内に収まっているため、構造物に対して行った耐力制御設計が実現されていることが確認できる。

3.5.3 力学的および冗長性の観点からの考察

同一断面設計解と最終世代における設計解を比較することによって、本手法の有効性を検証する。

同一断面設計解と最終世代における設計解の諸量を同時に表2に示す。これより、本手法によって、同一断面設計解の総重量よりも2/3程度の鋼材重量を用いて、崩壊荷重係数が4/3倍程度大きい形態が創生されたことが分かる。

また、両設計解の形態を図8に示す。このとき、各部材において選択された部材の断面積の大きさに比例して線幅を表した。これらを比較すると、本手法で得られた形態では、板の曲げモーメントが最も大きくなると考えられる中心部において上弦材、下弦材共に大きな断面積を有する部材が選択されていることがわかる。さらに、圧縮となる上弦材や支持点に接続された斜材にも大きな断面積を有する部材が選択されており、力学的な合理性が高い形態に進化していることが推察される。従って、本手法によって、崩壊荷重を増大させるために崩壊に直結するような部材に十分な断面性能が与えられているといえる。

同一部材設計解および最終世代における設計解の崩壊機構の形成過程を図9に示す。これらの崩壊機構形成までの過程を比較すると、耐力制御された形態の崩壊機構は全体崩壊に近い形態となっており、同一部材で設計された形態の崩壊機構は構造物の部分的な不安定化により崩壊機構を形成していることが確認できる。

表2 最終世代における諸量

	同一断面設計	耐力制御設計
W(kg)	3105	1940.36
$\lambda_1^{accumulate}$	1.38	1.00
$\lambda_2^{accumulate}$	1.54	1.51
$\lambda_3^{accumulate}$	-	1.84
$\lambda_4^{accumulate}$	-	2.00

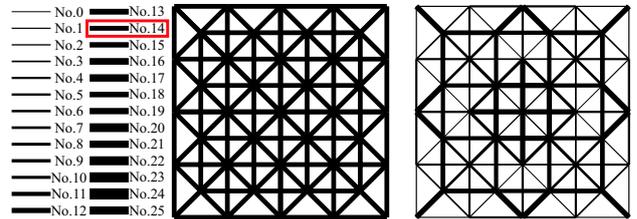


図8 同一断面設計解および耐力制御設計解の部材配置

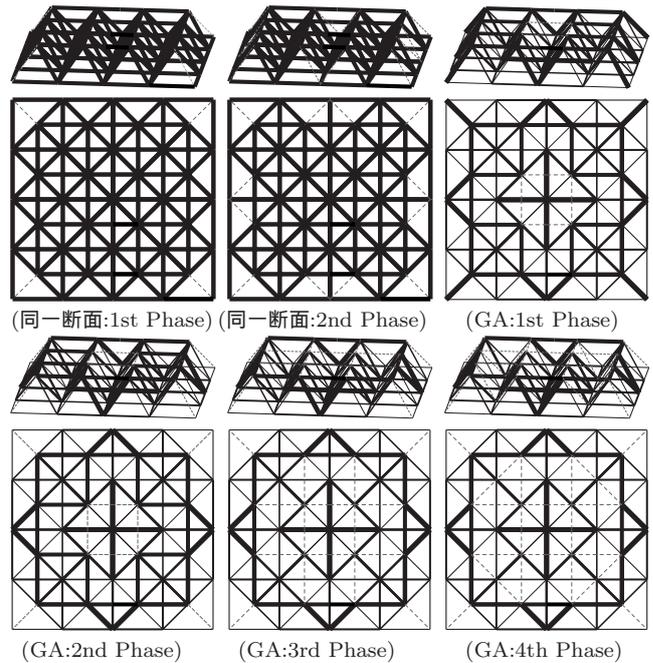


図9 崩壊機構の形成過程

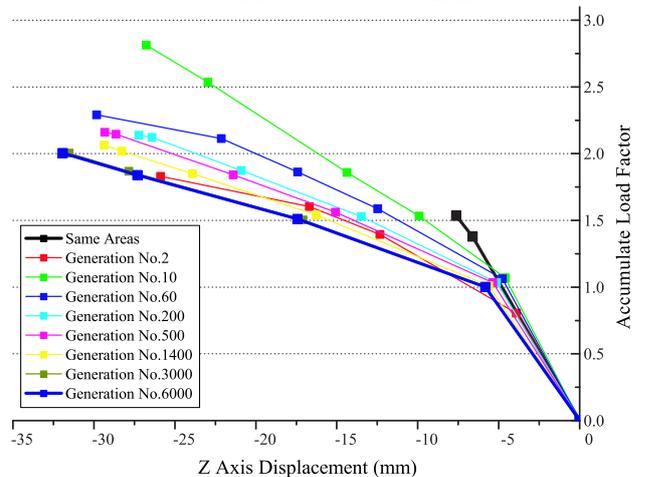


図10 各設計解における荷重係数 - 最大変位

表 3 設計変数の範囲

部材番号	$\phi - t$ (mm)	Area (mm ²)	I (mm ⁴)
No.0	21.7 - 2	123.8	6070
No.1	27.2 - 2	158.3	12600
No.2	27.2 - 2.3	179.9	14100
No.3	34 - 2.3	229.1	28900
No.4	42.7 - 2.3	291.9	59700
No.5	42.7 - 2.5	315.7	64000
No.6	48.6 - 2.3	334.5	89900
No.7	48.6 - 2.5	362.1	96500
No.8	48.6 - 2.8	402.9	106000
No.9	48.6 - 3.2	456.4	118000
No.10	60.5 - 2.3	420.5	178000
No.11	60.5 - 3.2	576.0	237000
No.12	60.5 - 4	710.0	285000
No.13	60.5 - 4.5	791.7	312000
No.14	76.3 - 2.8	646.5	437000
No.15	76.3 - 3.2	734.9	492000
No.16	76.3 - 4	908.5	595000
No.17	76.3 - 4.5	1015.0	657000
No.18	89.1 - 2.8	759.1	707000
No.19	89.1 - 3.2	863.6	798000
No.20	89.1 - 4.5	1196.0	1070000
No.21	101.6 - 3.2	989.2	1200000
No.22	101.6 - 4	1226.0	1460000
No.23	101.6 - 4.5	1373.0	1620000
No.24	101.6 - 5	1517.0	1770000
No.25	114.3 - 3.2	1117.0	1720000

同一断面設計解に部分的な不安定化が生じている原因は、構造物の中央部の部材が健全の状態であるにも関わらず、支持節点に接続される全ての斜材が座屈してしまったからである。一方、本手法により創生された構造物はそれらの部材に大断面積の部材が選択されており、支持部材の座屈による部分的な不安定化が避けられているといえる。

従って、冗長性の観点から言及すれば、本手法によってなされる部材配置によって、構造物が崩壊に至るまでのキーエレメントを限定しないような形態の創生が行われているといえる。

荷重変形関係に関して、同一断面設計解と最終世代における設計解との比較を行う。図 10 に示されるように、同一部材で設計された形態は構造物の剛性が高いことが分かる。また、損傷が生じた後の荷重の伸びや変形の伸びが小さく、剛性の低下も小さいことが分かる。一方、耐力制御された形態においては、荷重の伸びや変形の伸びが比較的大きく、座屈あるいは降伏部材数が蓄積されていくにつれて剛性が低下し、ラーメン構造物と類似した靱性能がもたらされている。

従って、冗長性の観点から言及すれば、空間骨組構造物が有する欠点の一つである、脆性的な崩壊に陥りやすいことを、本形態創生手法によって防ぐことができると考えられる。つまり、本手法により適切な変形性能を付与することによって、構造物の連鎖的な座屈を免れることができると考えられる。

4 結語

本研究では、空間骨組構造物を対象とした崩壊荷重算出手法を提案し、遺伝的アルゴリズムと併用するこ

とで構造耐力の直接制御設計法を提案した。平板立体トラスを用いた数値解析例より、同一断面を用いた設計解と本手法により得られた設計解との比較を行った。本手法により得られた結果を以下に示す。

- 本提案手法により耐力制御設計が可能であり、かつ力学的な合理性の高い形態を創生することができる。
- 構造物の崩壊に直結するようなキーエレメントに対して適切な強度が与えられたことが確認された。
- 本提案手法により創生された構造物において、変形性能および靱性能が付与されていることが確認された。

以上より、本提案手法を用いることによって、耐力制御設計が可能となり、空間骨組構造物の冗長性を向上させるための手法として、本提案手法は有用であると考えられる。

参考文献

- 1) Yu Qing , Xiao Xi. Redundancy measure and its application to the design and maintainance of marine structures. China Ocean ENgineering, Vol.11, No.2, pp.161-170, 1997
- 2) 大井研究室, 極限解析による立体骨組の鉛直荷重支持能力に対する部材感度解析. リダダンシーに優れた鉄骨構造建築の研究小委員会資料, 2003
- 3) Y. S. Feng. The theory of structural redundancy and its Effect on the structural design. Computer & Structures, Vol.28, No.1, pp.15-24, 1988
- 4) 船橋健吾, 大森博司. 空間骨組構造物における冗長性評価手法に関する研究. 日本建築学会大会講演梗概集, 構造 I, pp. 913-914, 2008.9
- 5) マッシス・レヴィ, マリオ・サルパドリー. 建物が壊れる理由. 建築技術, 1995
- 6) 空間構造の数値解析ガイドライン 2001. 日本建築学会. 2001.5
- 7) 北野宏明. 遺伝的アルゴリズム. 産業図書, 1993.6
- 8) R. K. Livesley. Matrix Methods of Structural Analysis 2nd Edition. Pergamon Press, 1975

Self Mass Damper を用いた既存学校建築リノベーションに関する研究

芋野匡俊¹⁾、新谷真人²⁾、永井拓生³⁾

1)早稲田大学創造理工学研究科（建築学）、大学院生、imm_msts@ruri.waseda.jp

2)早稲田大学理工学術院（建築学）、特任教授

3)永井構造計画事務所

1. はじめに

著者らは、既存学校建築リノベーションの設計支援システムについて検討してきた¹⁾。これは耐震改修計画が最優先され、2 次的な取り扱いに留まりがちであった建築計画上の改修を積極的に考慮する方法論を提案しようというものであり、耐震性能 f_1 および空間性能 f_2 を定義し最適化問題を定式化し(下式)、多目的遺伝的アルゴリズム (MOGA) を用いることでリノベーション案の例を示した(図1)。

$$\text{minimize } f(x) = \begin{cases} f_1(x) = \frac{1}{\frac{1}{n \cdot m} \sum_i \sum_j I_{s_{ij}}} \\ f_2(x) = \frac{1}{F \cdot \gamma} \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 x は設計変数ベクトル、 $I_{s_{ij}}$ は i 階 j 方向の I_s 値、 F は開口の形状や配置を評価²⁾した空間性能指標、 γ はペナルティ関数を表す。

本研究では、耐震壁配置による強度増加型ではなく、減衰を付加する方法として構造躯体の自重を動吸振器として用いる Self Mass Damper (以下 SMD)³⁾ を学校建築改修に適用した場合の効果や適用可否について検討する。

2. 固有周期・変形に関する考察

2.1 リノベーション案の評価

リノベーションにあたり、稀に起こる地震に対する考慮が重要であることは言うまでもないが、学校建築の場合には、特に、災害時に地域住民の避難拠点となるという重要な役割がある。したがってレベル2相当の地震時においても損傷を最小限に止め、また早急な機能回復が可能であることが求められる。既報において耐震性能は、改修の際に基準として用いられる I_s 値によって評価しているが、 I_s 値が変形性能や耐力といった耐震上の性能とどのような対応関係にあるのか、必ずしも明白になっていない。

そこで、既報において求めたリノベーション案の各パレート解集合に対して、固有周期およびレベル2相当の

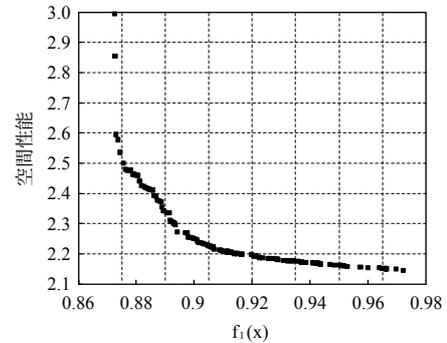


図1 文献1)におけるパレート解集合

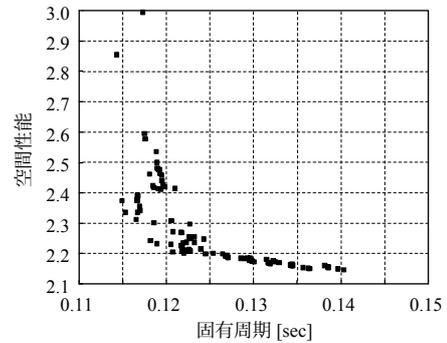


図2 固有周期と空間性能の関係

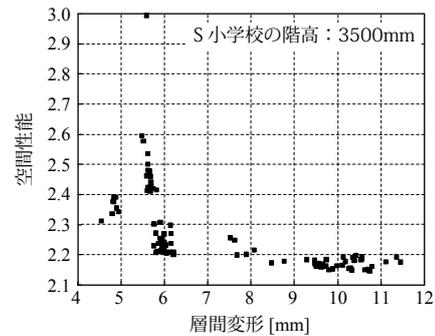


図3 最大層間変形と空間性能の関係

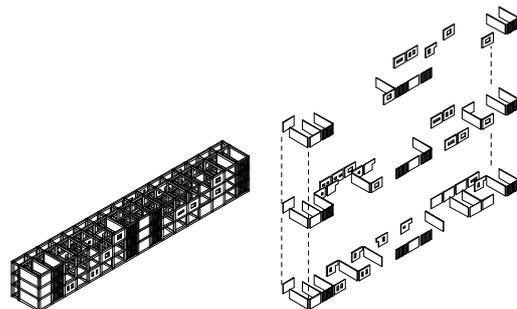


図4 最も空間性能が高いパレート解

地震力を受けた際の層間変形応答を算出し、図1における耐震性能の評価軸(x軸)を置き換えたものを図2、3に示す。レベル2相当の地震力に対する評価には、レベル2の告示応答スペクトルに適合させ、位相特性としてElCentro NS波を用いた模擬地震波3波を入力としたとき、最大層間変形の平均値を用いた。なお、地震応答解析にあたり建物のモデル化は増分解析を行うことで復元力特性を求め、質点系に置換しており、詳細については3節で述べる。また、主体架構の減衰は高次モードの減衰が大きくなるようレイリー減衰とし、減衰率は初期剛性に対して1次2次ともに2%とした⁴⁾。

図2、3から、レベル2相当の地震力を受けた際は多少ばらつきがあるものの、固有周期、最大層間変形ともに空間性能とトレードオフの関係にあることから、Is値との対応関係が確認できる。

2.2 既存建物の固有周期との比較

次に、リノベーション案と既存建物の固有周期について比較を行う。那仁満都拉ら⁵⁾は常時微動測定を行うことで、建物固有周期と建築年代の関係を調査している。

図5は建築年代ごとの3階建て建物の固有周期の分布である。これによると古い時期に建てられた建物ほど固有周期が長く、耐震基準の変化や経年劣化の影響が表れていると考えられ、1980年と1930年の固有周期には約1.5倍の差があることから、剛性にすると約2倍の差がある。また、図2で示したリノベーション案の固有周期は1980年のものよりさらに短くなっている。

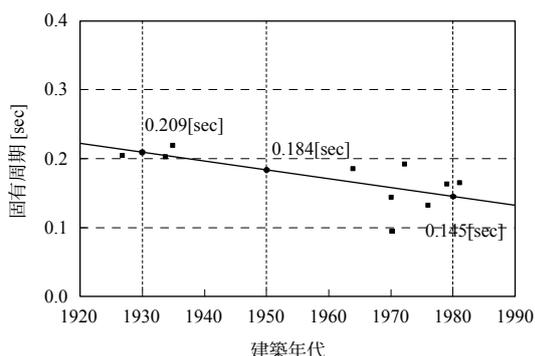


図5 建築年代と固有周期の関係⁵⁾

以上より、耐震壁による強度増加型の改修は大規模な補強が必要である。建築年代によっては補強により建築機能が制限され、現状の教育システムや学習スタイルに適合するようなリノベーションを行うことが困難となる

場合も生じると考えられる。一方で、床スラブを動吸振器として用いるSMDによる改修では、耐震壁やブレース等を必要としないため建築計画に与える影響は少ないと考えられ、SMDにより耐震性能を付与することができれば建築機能を満足したリノベーション案が提示し得ると考える。

本論文では、SMDを用いることで既存建物の損傷を抑え、レベル2相当の地震時でもリノベーション案の層間変形角と同等の1/200程度を目標として検討を行う。また、床スラブを動吸振器として活用しているため、動吸振器の応答に対しても考慮する必要がある。そのため、レベル2相当の地震時に既存躯体の損傷を抑えることを第一の目標にしたうえで、動吸振器の応答低減が可能な設計法について検討を行う。

3. SMDによる既存学校建築の改修

3.1 各建築年のモデル化

本節では、SMDによる既存学校建築の改修効果について検討を行う。ここでは図6のような3階建てRC造、階高3500mmの学校建築を想定した。また、単位床面積当たりの荷重を12[kN/m²]⁶⁾とし、初期剛性はAi分布に比例させ、その分布を定数倍することで図5に示した固有周期となるよう初期剛性を定めている。

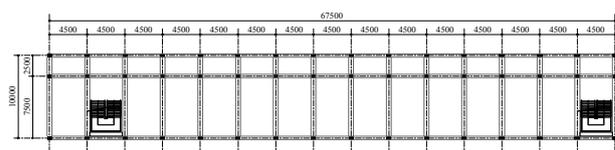


図6 想定した学校建築の基準階平面図

また、振動解析のモデル作成にあたっては、各年代と初期剛性が等しくなるよう耐震壁を配置した立体架構モデルに対して静的弾塑性解析を行うことで荷重変形関係を求め、得られた荷重変形関係からトリリニア型スケルトンカーブを作成する。

まず、初期剛性の80%の直線と元曲線との交点を第一降伏層せん断力 Q_1 と定める。次に、元曲線において層間変形角が1/200となる点を第二降伏層せん断力 Q_2 とし、履歴面積が元曲線と等しくなるように第2剛性を定めた。なお、耐震壁については原点指向型、ラーメンフレームは劣化型トリリニアモデルとして復元力特性のモデル化

し、両者を並列バネとしてモデル化を行った。応答評価は模擬地震波3波入力時の最大層間変形応答の平均値により行った。

図7が静的増分解析によって求めた各年代モデルの荷重変形関係であり、また地震応答解析を行った結果が図8である。また、1930年モデルの1層の履歴曲線を図9に示した。図8のように1層部分の層間変形角が1/80程度であり、2節で検討を行ったリノベーション案と比較すると、かなり大きな値となっている。

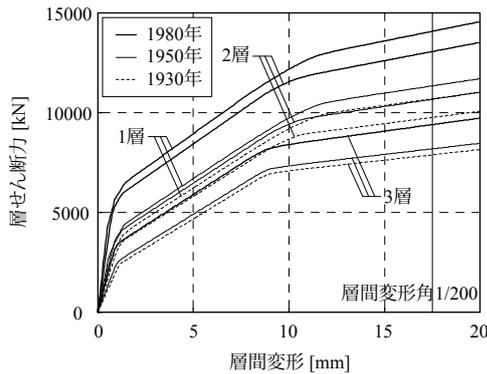


図7 静的増分解析の結果

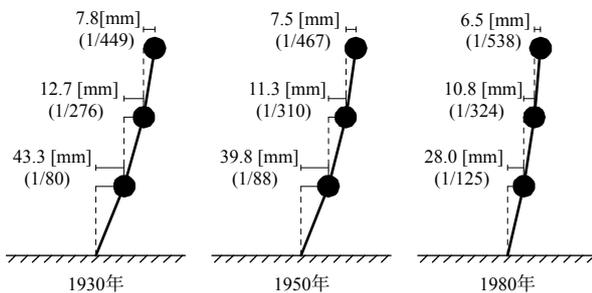


図8 既存建物の最大層間変形

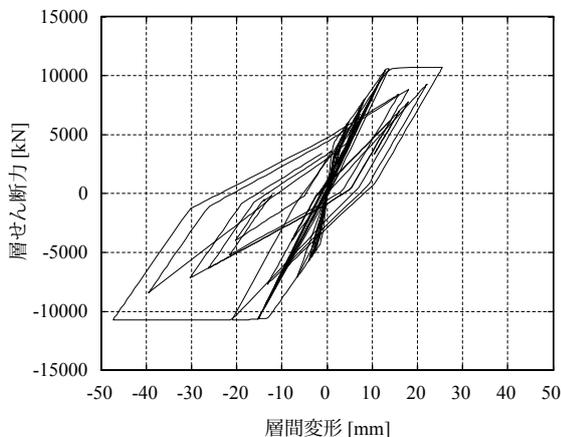


図9 1930年モデル1層の履歴曲線

3.2 SMDを用いた改修による効果

動吸振器による応答制御は一般に質量比が大きくなるにつれ効果も大きくなるので、各年代のモデルに対してSMDの質量比を変化させたとき、どの程度層間変形角を低減できるか検討する。

非線形特性を示すモデルに対して、適切なSMDの剛性や減衰を求めることは困難である。そこで、本論文では単目的遺伝的アルゴリズムによって、最も層間変形が小さくなるSMDの剛性および減衰を求めた。

なお、各モデルの有効質量を計算すると、全てのモデルともに1次モードの割合が90%ほどであるため、1次モードの応答低減を行えばよいと判断でき、1次モードに対して最も効果的な動吸振器の設計を行うことを考えると、最上部に動吸振器をとりつけることが望ましい。しかし、学校建築にSMDを適用するにあたり屋根に設置すると、防水等の問題が生じると考えられるため、3階床スラブに対して適用することとした。

2層全体に対するSMDの質量比 μ' を次式で定義する。

$$\mu' = \frac{m_{2t}}{m_{2t} + m_{2s}} \quad (2)$$

ここで m_{2t} は2層に取り付けるSMDの質量、 m_{2s} は2層の質量である。 μ' は床の面積に相当するため、SMD導入の際の改修工事の規模としての意味を持つ。

表1に各建築年代および μ' の値に対し、最適化を行った結果を示す。網掛部はレベル2相当の地震時でも層間変形角1/200以下に留まる範囲を示している。このように、建築年代により必要改修量に大きな違いがある。

表1 改修規模と最大層間変形 (u_{max} [mm])

μ'	1930年代	1950年代	1980年代
	u_{max}	u_{max}	u_{max}
0.05	38.27	33.89	19.18
0.10	37.96	35.14	17.93
0.20	32.88	28.50	16.05
0.30	29.68	22.83	14.04
0.40	27.06	21.21	13.05
0.50	25.77	20.63	12.17
0.60	20.01	17.25	10.83
0.70	17.69	15.13	9.02
0.80	15.03	13.64	8.24

4. 動吸振器に関する基礎的検討

4.1 応答の2乗平均平方根の算出

SMDを用いる場合、前節のように質量比が大きくなると考えられる。そこで本節では、質量比の大きな動吸振

器を用いた場合、パラメーター決定にどのような影響が生じるのか検討する。

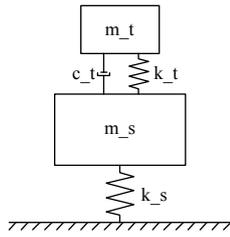


図10 質点モデル

図10の運動方程式は、

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = [M]\{1\}\ddot{y}_g \quad (3)$$

となり、2乗平均値が S_0 のホワイトノイズ地動に対するj層の変形応答値の2乗平均平方根(以下RMS)は、CQC法⁷⁾を用いると式(4)のように表せる。

$$\sigma_j = \sqrt{\sum_{s,r} (\beta_s u_{sj} \sqrt{\frac{S_0}{4h_s \omega_s^3}}) \rho_{sr} (\beta_r u_{rj} \sqrt{\frac{S_0}{4h_r \omega_r^3}})} \quad (4)$$

ここで、 ω_s はs次の固有振動数、 h_s は減衰定数、 $\beta_s u_{sj}$ はj層のs次刺激関数であり、モード相関係数 ρ_{sr} はs次とr次の振動数比 $r = \omega_r / \omega_s$ を用いると式(5)のように表される。

$$\rho_{sr} = \frac{8\sqrt{h_s h_r} (h_s + r h_r) r^{\frac{3}{2}}}{(1-r^2)^2 + 4h_s h_r (1+r^2) + 4(h_s^2 + h_r^2) r^2} \quad (5)$$

4.2 1自由度系への動吸振器の付加

前節で求めた変形応答のRMSを用いて検討を行う。本節で用いるパラメーターは以下の3つである。

$$\text{質量比 } \mu : \frac{m_t}{m_s}, \text{ 同調比 } \gamma : \frac{\sqrt{k_t/m_t}}{\sqrt{k_s/m_s}}$$

$$\text{減衰比 } \zeta : \frac{c_t}{2m_t \sqrt{k_s/m_s}}$$

質量比 μ を0.1、0.2、0.4の4通りについて検討を行ったものが図11~13である。なお、縦軸は2質点を剛に連結させた場合の静的変位により基準化を行った。

図11によると、 $\gamma = 0.9$ 付近で主振動系の応答が最も低減されており、質量比が大きくなるにつれ、最も主振動系の応答を低減する γ の値が小さくなっていく。また、主振動系の応答を低減する最適パラメーターは、質量比 μ を用いることで式(6)のように表現される⁸⁾。

$$\gamma_{\text{opt}} = \frac{1}{1+\mu}, \quad \zeta_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)^3}} \quad (6)$$

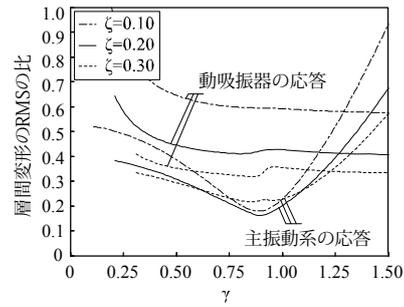


図11 $\mu=0.1$ のときの層間変形

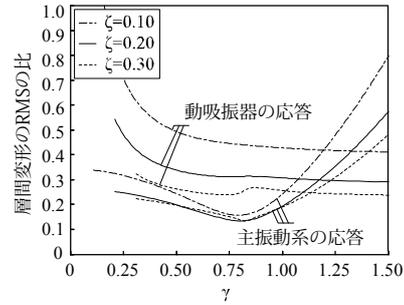


図12 $\mu=0.2$ のときの層間変形

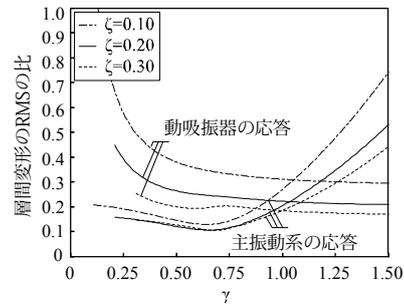


図13 $\mu=0.4$ のときの層間変形

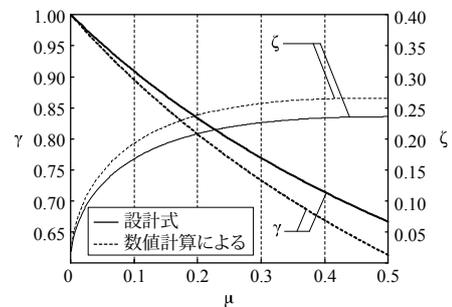


図14 μ に対する最適パラメーター

図14では、最も主振動系の応答が減少する γ 、 ζ を調べた。式(6)と比較すると、 μ の増大とともに差も増大する。

5. 3層学校建築へのSMD適用時の検討

5.1 等価線形化法による検討

多自由度系への動吸振器のパラメーター設定に関しては背戸ら⁹⁾により研究がなされており、各モードに対して動吸振器を設定するというものである。また、その中で、「ある注目する振動モード上の1点を1として固有ベ

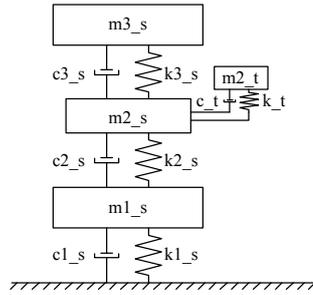


図15 質点モデル

クトルの正規化を行えば、その点上では物理量で表された等価質量が求まる」という性質を利用して、等価質量同定法を提案している。多自由度系に対して動吸振器を設計する際、等価質量は次式のように表される。

$$\{\phi\}^T [M] \{\phi\} = \begin{bmatrix} \bar{m}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{m}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{m}_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで、 ϕ は動吸振器を取り付ける位置を1として基準化した固有ベクトルである。

1次モードの等価質量に対する動吸振器の質量の比 μ は式(8)のように表される。

$$\mu = \frac{m_{2t}}{\bar{m}_1} \quad (8)$$

なお本節では既存建物を線形化したもので検討を行う。線形化するにあたり、1層の層間変形角が1/200となる時のj層の変形を δ_j 、割線剛性を等価剛性 k_{jeq} 、その時の定常履歴面積から等価減衰 c_{jeq} を算出した(式9)。

$$c_{jeq} = \frac{\int_0^{2\pi} Q_j \dot{\delta}_j d\theta}{\int_0^{2\pi} \dot{\delta}_j^2 d\theta} \quad (9)$$

等価剛性および等価減衰を用いることで運動方程式は次式のように表せる。

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C_0 + C_{eq}]\{\dot{y}\} + [K_{eq}]\{y\} = \{M\}\{\ddot{y}_g\} \quad (10)$$

ここで、 C_0 は初期減衰マトリクスである。

線形化したモデルに対してレベル2相当の模擬地震動を入力し、1980年のモデルに対し $\mu'=0.1, 0.2, 0.4$ の3種類について最大層間変形応答、および最大加速度を調べたものが図16~19である。なお、既存建物の絶対加速度応答は最上層の応答が最大となるため、最上層の値を用いた。

主振動系の値は μ の影響が大きく、 γ や ζ による変化は少ない。これは前節で検討した、主振動系が1質点の場合とは異なる傾向である。また、動吸振器の変形と加

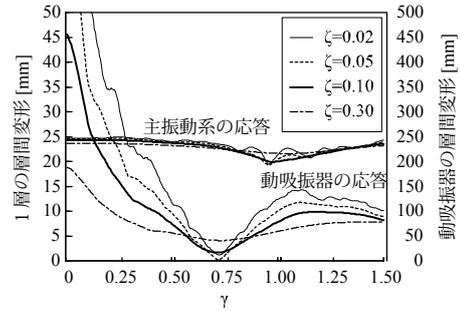


図16 $\mu' = 0.1$ ($\mu = 0.036$)

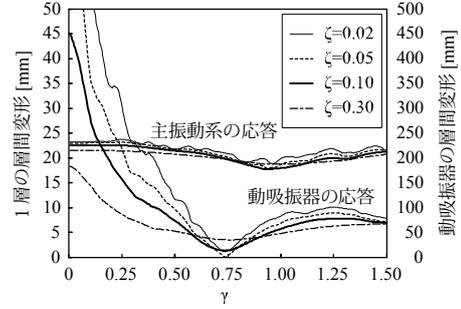


図17 $\mu' = 0.2$ ($\mu = 0.073$)

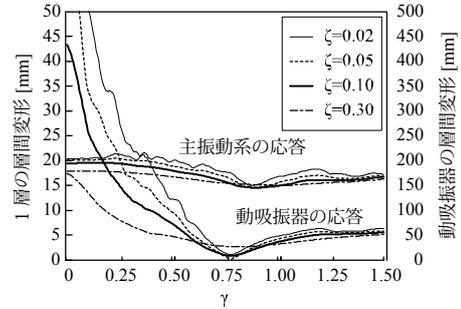


図18 $\mu' = 0.4$ ($\mu = 0.155$)

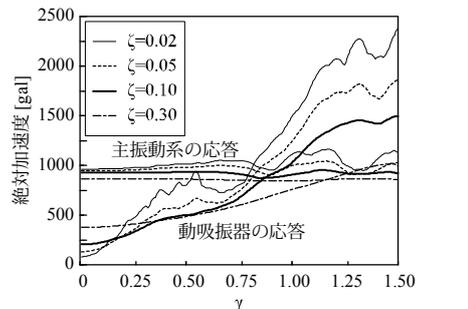


図19 $\mu' = 0.4$ の加速度応答

速度は γ が大きくなるにつれ変形は減少するものの、反対に加速度応答が増大することがわかる。

5.2 非線形モデルによる解析

1980年モデルの $\mu'=0.4$ に対し、非線形モデルでの解析を行い線形モデルで得られた傾向との比較、およびSMDパラメーターの検討を行う。このモデルの等価質量に対する質量比は $\mu=0.155$ であり、3節の検討で最も既存建

物の応答を低減できた同調比 γ 、減衰比 ζ はそれぞれ $\gamma=0.86$ 、 $\zeta=0.188$ であり、このときSMDの減衰機構に働く力は約1270[kN]、最大速度は約0.6[m/s]であった。

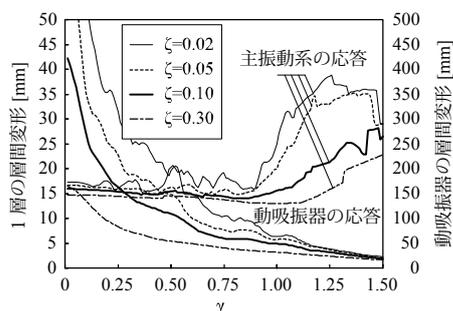


図20 $\mu' = 0.4$ の層間変形応答

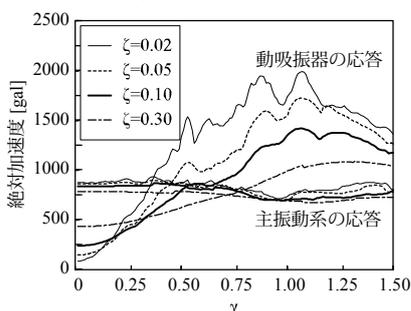


図21 $\mu' = 0.4$ の加速度応答

また γ 、 ζ を変化させ、非線形モデルでの変形応答の最大値を調べたものが図20であり、同様に加速度を求めたものが図21である。これらと前節で線形化を行って求めた結果を比較すると、 γ が1よりも小さい範囲では概ねよく一致していることが確認できる。

SMDによる既存建物の応答低減は、質量比 μ による影響が支配的であり、出来る限りSMDの質量比を大きくする必要がある。一方で、 γ や ζ は既存建物の応答に対する影響は小さいが、動吸振器に対する影響は大きい。 γ を大きな値に設定すると変形が抑えられるが、加速度応答が増大する。大地震時において学校が防災拠点としての機能を果たすためには、家具の転倒等を防止するため、加速度応答を低減する必要がある、 γ の値を小さく設定することが望ましい。特に重要な機材や重量の重い物がある箇所にSMDを導入することが望ましいと言える。しかし、 γ を小さくすると変形が大きくなり十分なクリアランスを設ける必要が生じる。また、 ζ に関しては大きな値とすることでSMDの応答を低減させることができるが、 γ が小さい範囲では ζ が大きくなるにつれ加速度応答が大きくなる。

以上より、まず建物の応答目標が決まると、必要な改

修規模を定める必要がある。改修規模を定めると同調比や減衰比によらず、建物の応答はある程度低減することが可能であるため、SMD部分の応答低減を行うことができる。SMD部分の変形と加速度応答はトレードオフの関係にあり、クリアランスを十分に確保できる場合は、加速度応答の低減が可能である。

6. まとめ

本論文では、SMDを用いた耐震改修に関して検討を行った。SMDを用いて既存建物の応答を低減させるためには、より大きな質量をSMDへと改修する必要があり、SMDの剛性や減衰を変化させることで床スラブの応答を調整できることがわかった。

今後の課題は、既存建物の耐震性能を正確に判断することは困難であるため、耐震性評価の不正確さに対するロバスト性を考慮した動吸振器の設計方法について検討が必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 林将利、芋野匡俊、永井拓生、新谷真人：既存学校建築リノベーションへの設計支援システムに関する研究 その1、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、構造1、pp.391-392、2010.9
- 2) 西野安香、ほか：学校空間研究—オープンペースにおけるクローズドスペースと児童の指向する場との相関—、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、建築計画1、pp.403-404、2009.8
- 3) 城所竜太：玉手箱の構造計画、建築技術、pp.28-35、2007.12
- 4) 社団法人 日本建築学会：建築物の減衰、丸善株式会社、2000.10
- 5) 那仁満都拉、國廣祥、川瀬博：常時微動計測に基づく中低層RC造建物の構造耐震指標の簡易推定、日本建築学会構造系論文集、Vol.74、No.639、pp.785-794、2009.5
- 6) 国土交通省住宅局建築指導課 監修：2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説、日本建築防災協会、2001.10
- 7) E. L. Wilson, A. Der Kiureghian and E.P.Bayo, 'A replacement for the SRSS method in seismic analysis', Earthqu. Eng. Struct. Dyn, Vol.9, pp.187-194, 1981
- 8) D. Hartog : Mechanical Vibrations, McGraw-Hill Inc., 1956
- 9) 背戸一登、岩浪孝一、滝田好宏：動吸振器による多自由度系の制振 第1報、動吸振器の設計理論、日本機械学会論文集、C編50(458)、1962-1969、1984-10-25
- 10) 柴田明徳：最新 耐震構造解析 第2版、森北出版株式会社、2003.5
- 11) 背戸一登：動吸振器とその応用、コロナ社、2010.8

細胞の増殖および消滅を応用したトラス構造物の形態創生に関する研究

小野聡子¹⁾, シタムマラッド・ワンナボン²⁾

- 1) 有明工業高等専門学校建築学科, 准教授, 博士(工学)
- 2) 千葉大学工学部建築学科, 学生, 準学士(工学)

1. 序

現在, 建築構造物の形態創生は, 計算機器および解析技術の発達により 種々の手法で様々な形態を創生することが可能な状況である. また, 形態創生を取り入れて設計された建築構造物は, デザイン的に優れたものが多い.

しかし, 今までの形態創生の手法は, あらかじめ設定された領域を対象として建築構造物の形態を創生している場合がほとんどである. そのため, 形態創生された建築構造物は, デザインに制約を生じている場合もある.

ところで, 自然界に生存する生物には, デザイン的に優れたものが多く存在する. そのため, 生物の「外殻構造」, すなわち, 生物の形態(形状)などを取り入れ

た建築物をみかける.

一方, 生物の「内部構造」, すなわち, 生物を構成する細胞の発生や成長などの細胞の性質に着目して形態創生された建築物はほとんどみられない.

このような背景より, 本研究では, 細胞の性質を応用して, 創生する領域にとらわれずに建築構造物を形態創生する手法の確立を目的としている. 代表的な細胞の性質のイメージを図 1 に示す. これまでに, 当該研究室では, 細胞の発生・成長や分裂・増殖などの細胞の性質を取り入れた形態創生手法を確立している. しかし, 重要な細胞の性質の 1 つである細胞の細胞死(以下, 消滅と称す(図 1(h) 参照))については, 本研究で考えている形態創生手法にまだ取り入れていない状況である.

そこで, 本研究で考えている形態創生手法に細胞の消滅も取り入れることにより, 建築構造物の形態創生を試みた. 本論文では, トラス構造物を対象として, 形態創生を試みた結果について述べる.

2. 形態創生に用いるモデル

図 2 はスプリングネットワークモデルとよばれるモデルであり, 粒子間をスプリングで接続しているモデルである. 前述のとおり, 本論文ではトラス構造物を対象としているが, このスプリングネットワークモデルはトラス構造物と類似している. そこで, 本論文では, このモデルをトラス構造の形態創生に応用することにした. つまり, 粒子部分はトラス構造物のノードとして, スプ

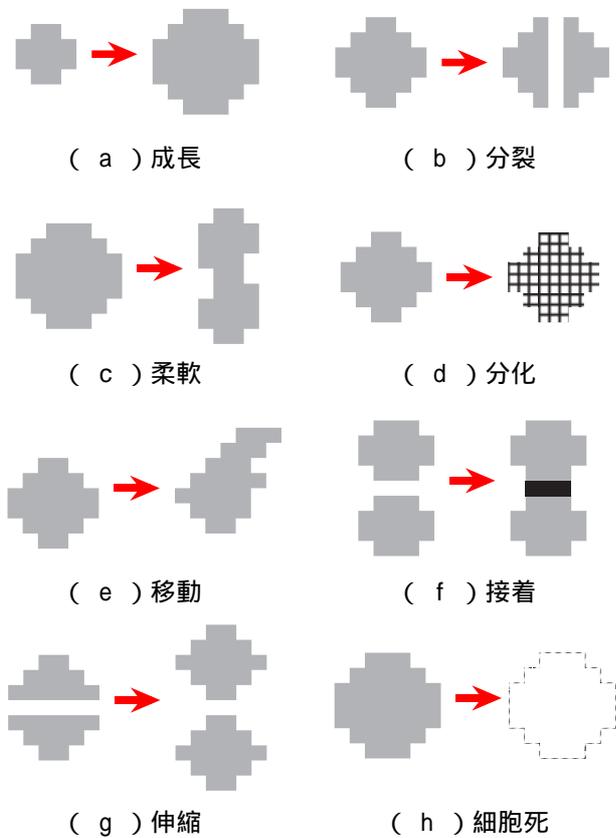


図 1 代表的な細胞の性質(イメージ)

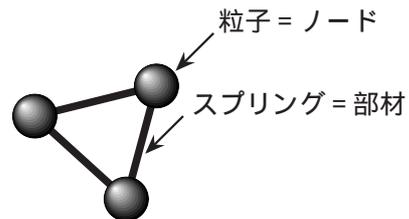


図 2 シミュレーションモデル

リング部分はトラス構造におけるトラス部材として、それぞれモデル化する(図2参照)。

3. 形態を創生するための目的関数

本論文では、トラス部材に生じる総ひずみエネルギー(全トラス部材のひずみエネルギーの総和)を目的関数とした、その総ひずみエネルギーを最小化させることにより、トラス構造物の形態を創生している。

4. 形態創生するためのアルゴリズム

本研究で考えている形態創生手法のアルゴリズムは下記のとおりである。

4.1 細胞の分裂・増殖などに関するアルゴリズム

細胞の発生・成長や分裂・増殖をシミュレーションするため、形態を創生する際に乱数を利用する。本論文では、乱数が粒子分裂確率以下の場合に、外側粒子のみ分裂あるいは増殖して形態を創生する(以下、この粒子を増殖決定粒子と称す)。この増殖決定粒子に連結している内側粒子数、および、増殖決定粒子とそれに連結している境界粒子とのなす角度により、増殖する粒子数(新しく生まれる粒子(以下、娘粒子と称す))を決定する(図3参照)。

増殖決定粒子に連結している内側粒子数の増殖については、たとえば、連結している内側粒子数が3個以上ならば娘粒子は1個、内側粒子数が2個ならば娘粒子は2個、内側粒子数が1個ならば娘粒子は3個となる。増殖決定粒子とそれに連結している境界粒子とのなす角度については、たとえば、なす角度が鋭角ならば娘粒子は1個となる。

また、各々の粒子に初速度を与えることにより初期形態を創生させるが、増殖決定粒子に連結している粒子の情報から重心および方向ベクトルを算出して、粒子の増殖方向を決定している。

殖方向を決定している。

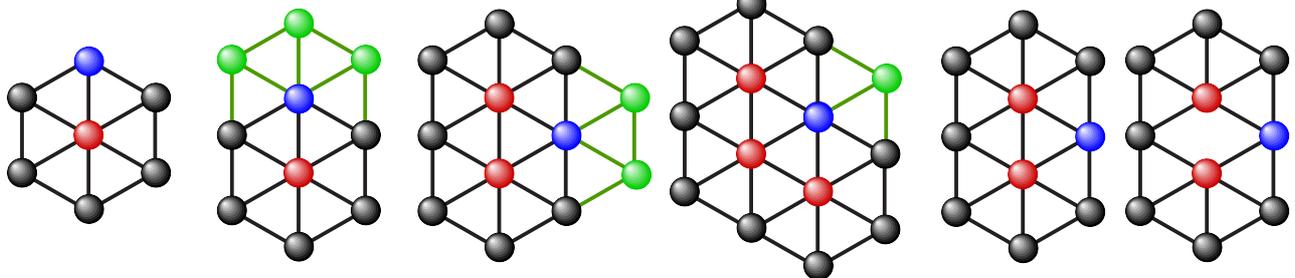
4.2 消滅性に関するアルゴリズム

細胞の消滅をシミュレーションするため、スプリング(トラス部材)の応力の大小から粒子(ノード)の消滅を決定する。つまり、応力が小さい場合、スプリング(トラス部材)を消滅させる(図4参照)。本論文では、トラス部材の伸びが0.0から0.5(mm)までの場合に、応力が小さいと判断して、ノードやトラス部材が消滅する。

5. 形態創生の手順およびその結果

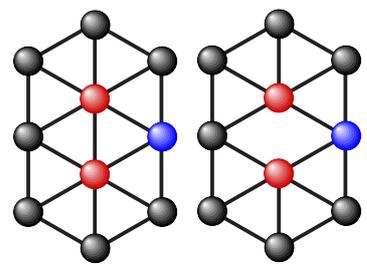
本論文では、トラス構造を形態創生するため、下記のような手順で形態を創生させた。なお、本研究で使ったプログラミング言語はProcessingである。

- (1) 使用する材料の選定およびその材料の力学的性質を設定する(今回はSUS304とする)。
- (2) トラス構造物が初期状態(外力を作用させることが可能な状態)となるまで、ノードやトラス部材を分裂・増殖させる。
- (3) トラス構造物が初期状態に到達したら、ノードやトラス部材の分裂・増殖を終了させる。
- (4) 上記(3)で発生したトラス構造物の支点を固定したのち、すべてのノードに等分布荷重を作用させる。
- (5) 上記(4)によりトラス構造物に変形が生じるため、トラス構造物が安定したことを確認したのち、ノードおよびトラス部材を消滅させる。
- (6) 総ひずみエネルギーが最小化となり、トラス構造物の形態に変化を生じなくなるまで、ノードやトラス部材の分裂・増殖および消滅させる。



(a) 初期状態 (b) 鈍角の場合 (c) 180°の場合 (d) 鋭角の場合

図3 ノードおよびトラス部材の分裂および増殖の状況



(a) 消滅前 (b) 消滅後

図4 トラス部材の消滅の状況

6 . 形態創生の結果およびその考察

図 5 に , 前節 5 の手順により創生されたトラス構造物の一例を時系列で示す . なお , ノード (粒子) の直径は 60 (mm) , トラス部材 (スプリング) の直径およびバネ係数はそれぞれ 30 (mm) および 6.0 (N/m) である . , 形態創生の最中に粒子数 (ノード数) およびトラス部材の長さは逐次変化するが , 粒子数 (ノード数) については , あらかじめ設定した粒子数 (最大粒子数) の範囲で変化し , トラス部材については , 初期長さを最初に設定する . 今回は , 発生する粒子数 (ノード数) の最大値は 100 (個) であり , トラス部材の初期長さは 600 (mm) である .

図 5 より , ノード数およびトラス部材数が増減して , トラス構造物を創生していることがわかる . これより , 細胞の消滅も形態創生のアルゴリズムに取り入れた本手法は , トラス構造物の創生が可能であることを示唆できた . 細胞の消滅をアルゴリズムに取り入れていない場合は , トラス構造物として適切な形状でない部分もみられたが 細胞の消滅をアルゴリズムに取り入れたことにより , この問題点も解消できた .

一方 , 図 5 において , ノード数やトラス部材があまり消滅していないことがわかる . これより , どの程度の応力の場合にノードやトラス部材を消滅させるかを再検討する必要がある .

7 . 本形態創生手法の検証

下記の 2 つの CASE について形態創生を試みることにより 本研究で考えている形態創生手法の特徴や問題点など検討した .

なお , 発生する最大粒子数 (ノード数) およびトラス部材の初期長さ以外は前節 6 と同条件であり , ノード (粒子) は 60 (mm) , トラス部材 (スプリング) の直径およびバネ定数はそれぞれおよび 30 (mm) および 6.0 (N/m) である .

(1) CASE 1

発生させる最大粒子数を 50 個 , 100 個 , 150 個および 200 個と変更した場合 .

(2) CASE 2

トラス部材の初期長さを 600 (mm) , 700 (mm) , 800 (mm) および 900 (mm) と変更した場合

CASE 1 および CASE 2 において得られた結果の一例を図 6 およ図 7 に示す . 図 6 および図 7 の縦軸はひずみエネルギーであり , 横軸はステップ数である .

図 6 は , CASE 1 における結果の一例であり , トラス部材の初期長さが 600 (mm) の場合の結果である . 図 6 は , 発生する最大粒子数と総ひずみエネルギーの関係を示しているが , 設定した最大粒子数が多いほど ,

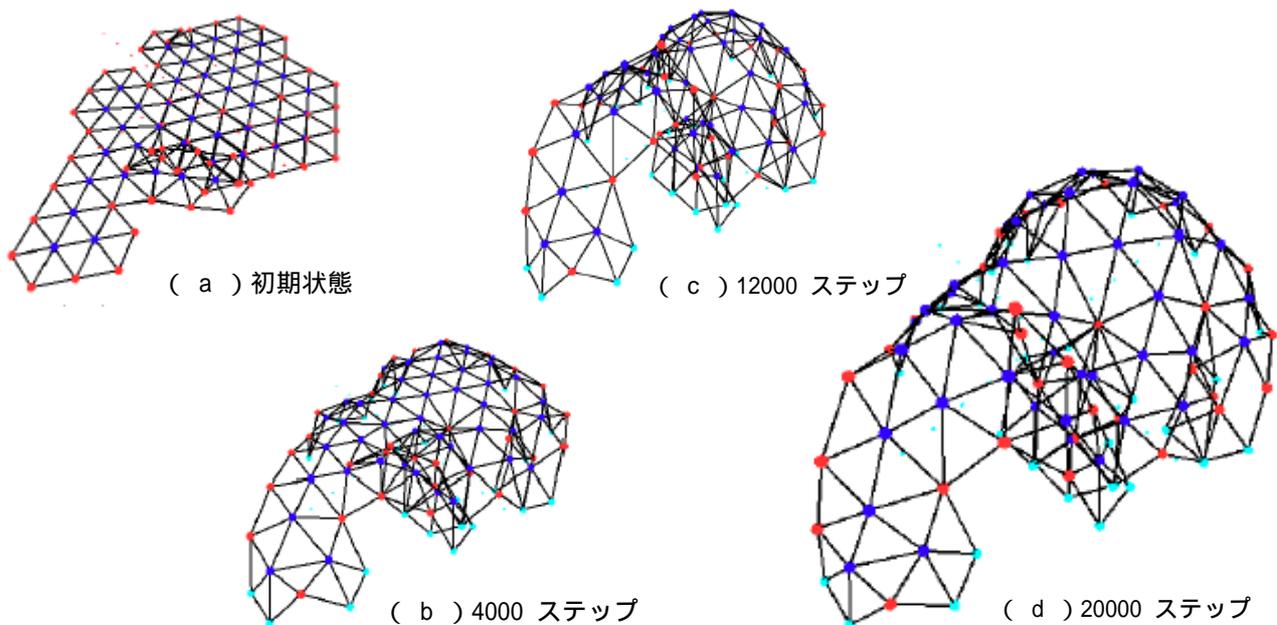


図 5 形態創生結果の一例 (粒子数 : 100 個 ・ 部材長さ : 600 mm)

ひずみエネルギーが一定値になるまでのグラフの勾配が緩やかである。また、設定した最大粒子数が多いほどトラス部材数も増加するため、ひずみエネルギーが一定値になるまでに時間を要している。トラス部材の初期長さが 600 (mm) 以外の場合についても、同様の傾向を示した。

図 7 は、CASE 2 における結果の一例であり、発生する最大粒子数(ノード数)が 100(個)の場合の結果である。図 7 は、トラス部材の長さとの総ひずみエネルギーの関係を示しているが、部材長さが異なるために創生される形態も異なり、それにもよって各部材長さにおける総ひずみエネルギー量も異なる。しかし、総ひずみエネルギーが一定値に到達するまでの各部材長さにおけるグラフの勾配はほぼ同じであることから、総ひずみエネルギーは等しいと考えられる。発生する最大粒子数(ノード数)が 100(個)以外の場合についても、同様の傾向を示した。

一方、図 6 および図 7 より、ノードやトラス部材が消滅した後も、最大総ひずみエネルギーからあまり総ひずみエネルギーが減少していないことが判明した。これは、初期状態からノード数およびトラス部材数があまり消滅していないことが原因である(図 5 参照)。前節 6 において問題点として記載したが、それが顕著にわかる結果である。

8 . 結論

細胞の消滅を形態創生のアルゴリズムに取り入れてトラス構造物の形態創生を試みた結果、応力負担が微小な部材を消滅させることにより、トラス構造物を形態創生することができた。一方、形態創生後にトラス構造物の総ひずみエネルギーが最大値からあまり変化していないパターンもみうけられた。ノードやトラス部材を消滅にはトラス部材の応力が関係しているが、この応力の設定が今後の課題である。

[謝辞]

本研究を進めるにあたり、松野哲也博士(有明工業高等専門学校電子情報工学科教授)および山田勇太氏(当時、同校専攻科生産情報システム工学専攻学生)には多大なるご協力をいただきました。ここに記して深甚の意を表します。

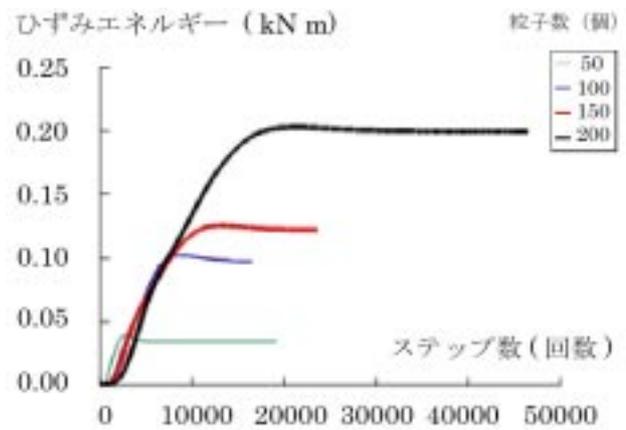


図 6 ひずみエネルギー - ステップ数関係
(部材長さ : 700 (mm) の場合)

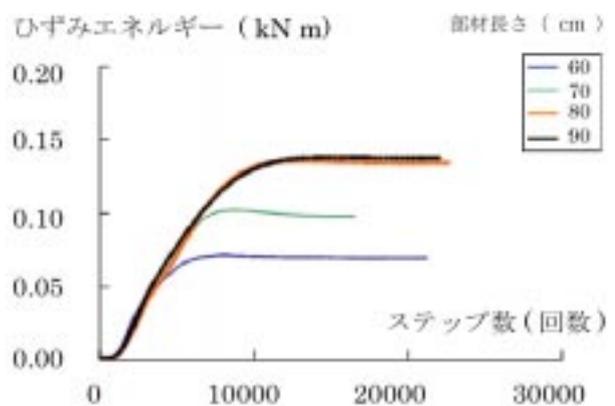


図 7 ひずみエネルギー - ステップ数関係
(最大粒子(ノード)数 : 100(個)の場合)

[参考文献]

- (1) 小野聡子, 松野哲也 : ピクセルクラスターオートマトンによる建築構造物の形態創生(その 1)シミュレーション方法, 日本建築学会学術講演梗概集(中国)・構造系 B - 1 , pp.787 ~ 788 , 2008 年 9 月
- (2) 松野哲也, 小野聡子 : ピクセルクラスターオートマトンによる建築構造物の形態創生(その 2)シミュレーション結果の一例, 日本建築学会学術講演梗概集(中国)・構造系 B - 1 , pp.789 ~ 790 , 2008 年 9 月
- (3) 小野聡子, 佐々木亜衣, シタムマラッド・ワンナボン : 細胞の性質を応用したトラス構造物の形態創生に関する研究(その 1)細胞の分裂性および増殖性を応用した場合, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸)・構造系 B - 1 , pp.383 ~ 384 , 2010 年 9 月
- (4) シタムマラッド・ワンナボン, 小野聡子 : 細胞の性質を応用したトラス構造物の形態創生に関する研究(その 2)細胞の増殖性および消滅性を応用した場合, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸)・構造系 B - 1 , pp.385 ~ 386 , 2010 年 9 月

形状・厚さ・位相の同時最適化による自由曲面シェル構造の形態創生に関する研究
(Tachira Club 計画案への適用)

前根 文子¹⁾, 木村 俊明²⁾, 大森 博司³⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, maene@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)佐々木睦朗構造計画研究所, 工修, sasaki@m-ssc.jp

3)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序論

「もっと自由な形態を創造したい」という建築家の思いは高まりつつあるように思われる。近年のコンピュータの急速な性能向上や施工・材料技術のめざましい進歩がこの思いを実現可能なものとし、多様な構造物を生み出してきた。一方で、近年に見る構造物は必ずしも力学的合理性を持つとは言えず、建築家の求める恣意的な形態をそのまま力学的に解決する例も多く見られる。今ここで「形と力」の関係を再認識し、構造家と建築家が一緒になって、力学的な強さと形態の美しさを同時に実現することが求められている[1]。

既報[2], [3]において著者らは、複雑・不定形で直感的な評価が困難な自由曲面シェル構造の曲面形状決定問題をひずみエネルギー最小化問題に帰着させ、逐次二次計画法により最適解を求める構造形態創生法を提案した。

本稿では、非幾何学的で不定形な曲面形状へも適用が可能な自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の開発を目指し、Tachira Club 計画案 (図1)を例題として採用し、3種の構造形態創生手法の有効性を示すとともに、得られた結果に基づき、曲面形状の変化に伴うシェル構造の力学性状の変化を考察する。

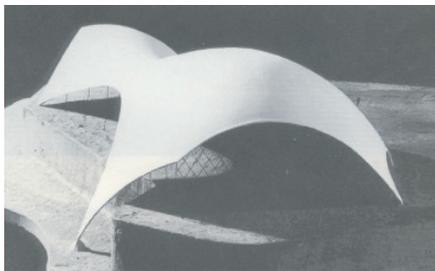


図1 Tachira club 計画案[4]

2 厚み分布決定による構造形態創生

本章では、建築家の求める曲面形状をそのまま実現させるため、厚み分布のみの制御を行うことで、力学的に合理性のある曲面を導出する手法を提案する。

2.1 設計問題の定式化

本手法では、厚み分布決定問題を、シェル総体積を一定、厚み分布の上下限值に制約を有するひずみエネルギーの最小化を目標とした最適化問題として取り扱う。

この問題の設計変数を厚み分布に関するNURBSの制御点座標 q^h とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{minimize} \quad & f(q^h) = \frac{1}{2}d^\top(q^h)K(q^h)d(q^h) \\ \text{subject to} \quad & h_\zeta^l \leq \tilde{B}q_\zeta^h \leq h_\zeta^u \\ & \Delta V(q^h) = 0 \end{aligned} \tag{1}$$

ここに、 $d \in R^{6n}$ は節点変位ベクトルを、 $K \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクスを、 $h_\zeta^u, h_\zeta^l \in R^n$ はそれぞれ各節点におけるシェル厚の上限値と下限値を表す。また ΔV は総体積の増減量を表す。

2.2 数値解析例

2.2.1 解析概要

例題はTachira Club 計画案(設計: Eduardo Torija, 1957年発表)を採用する。この解析モデルは図2(a), (c)に示すように、複雑な自由縁形状を持ち、異なる高さで点支持されたEPシェルである。短手方向で最大40.1m、長手方向で最大60mの不定形な平面形状を有し、最高

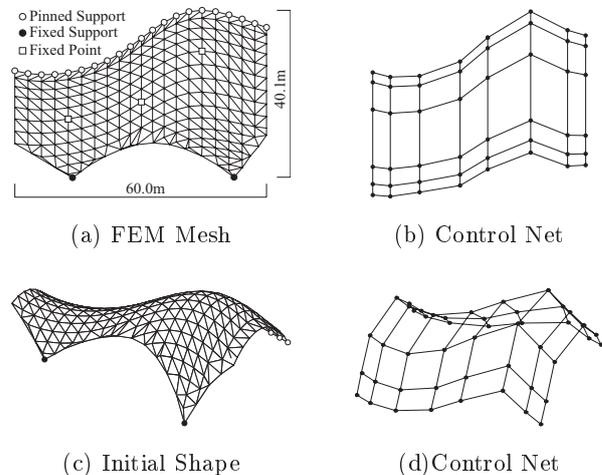


図2 解析モデル

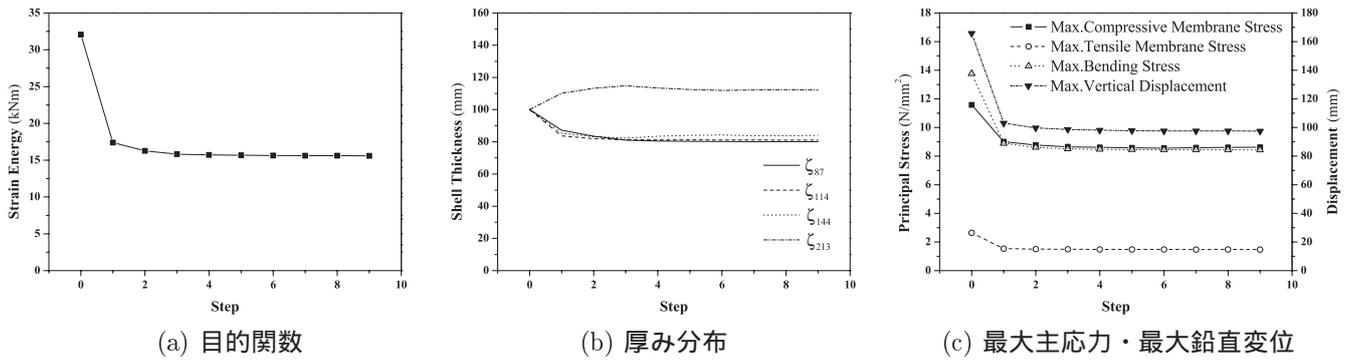


図3 収束履歴

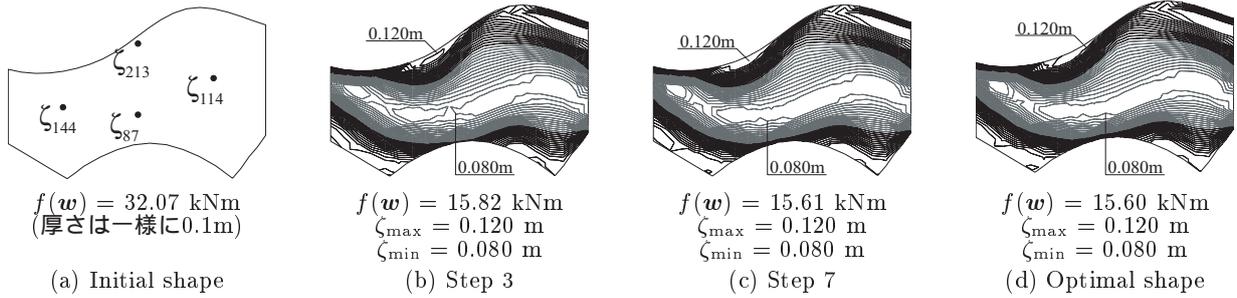


図4 原曲面、最適化段階及び最適解曲面の厚み分布性状の例

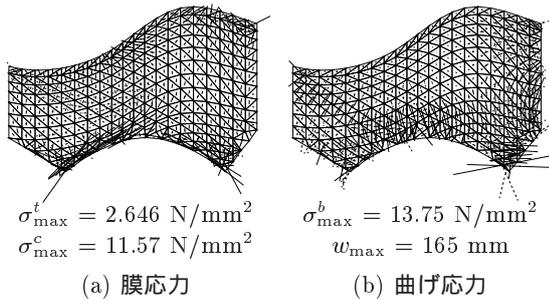


図5 原曲面の主応力図

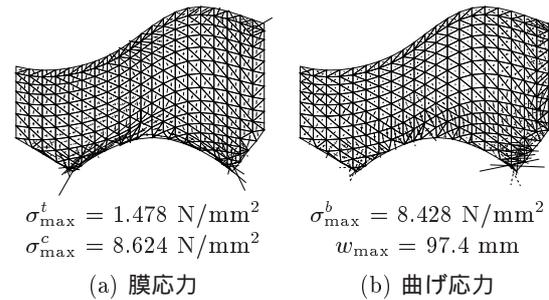


図6 最適解曲面の主応力図

高さは最も低い位置より21.4mである。NURBS制御点は図2(b), (d)に示すように配置する。厚み分布はシェル厚について修正することにし、シェル厚を表現するNURBS制御点 q_c を設計変数とする。要素分割は431要素とする。支持点は図2(a), (c)に示すようにピン支持点、固定支持点をそれぞれ配置する。外力は単位体積重量 24kN/m^3 として自重を、積載荷重として 1kN/m^2 を作用させる。ヤング率を 21GPa 、ポアソン比を 0.17 とする。初期シェル厚は一様に 0.1m とする。

不等式制約条件については、板厚の上限値を 0.12m 、下限値 0.08m と設定する。

2.2.2 解析結果と考察

目的関数であるひずみエネルギーの推移を図3(a)に、代表的な位置(図4(a)を参照)におけるシェル厚の推移を図3(b)に、最大主応力・最大鉛直変位の推移を図3(c)に示す。

原曲面と最適解曲面の厚み分布性状の例を図4に示す。図中に $f(w)$ として示した値は目的関数であるひずみエネルギーの値を、 ζ_{\max} として示した値はシェル厚の最大値を、 ζ_{\min} として示した値はシェル厚の最小値を表す。厚み分布性状は平面図を用いて示しており、図中の等高線で示す厚み分布の値は、全ステップのシェル厚の最大値と最小値の間を30分割して決定している。また図中の等高線は初期シェル厚(0.1m)より薄い場合には灰色の実線で、厚い場合には黒の実線で表している。

原曲面及び最適解曲面の、シェル中立面における膜応力及び曲げモーメントによる縁応力に関する主応力図を図5、図6に示す。各図において、実線、点線はそれぞれ各要素図心における圧縮応力、引張応力を表し、線の長さは主応力の大きさを示す。また、各図において σ_{\max}^t 、 σ_{\max}^c として示した値はそれぞれ各要素図心における引張膜応力のうちで最大の値、圧縮膜応力のう

ちで最大の値を示し、 σ_{\max}^b は各要素図心における曲げモーメントによる縁応力の絶対値のうちで最大の値を、 w_{\max} と示した値は各節点の鉛直変位のうちで最大の値を示す。

目的関数の推移の図3(a)を見ると、ひずみエネルギーが約1/2に低減しており、このことから本手法の有効性が表される。各シェル形状の厚み分布(図4)を見ると、厚み分布の修正が進むにつれて、短手スパン中央部で薄く、支持部近傍で厚くなるように変化する様子が確認できる。原曲面の主応力図(図5)と最適解曲面の主応力図(図6)を比較すると、すべての応力が減少し、特に曲げ応力は約4割減少している。また、最大鉛直変位も4割減少し、局所的な変形が生じにくくなっている。

3 形状と厚さの同時決定による構造形態創生

本章では、厚み分布の修正に加えて形状修正を行い、より力学的に合理的な曲面を求める手法を提案する。本手法は、形状及び厚み分布の表現にNURBSを用いることで、形状表現の高自由度性と曲面形状の滑らかさを維持しながら、未知量の低減を図っている。

3.1 設計問題の定式化

本手法では、形状と厚み分布の同時決定問題を、シェル厚とシェル総体積に制約を有する、ひずみエネルギーの最小化を目標とした単一目的同時最適化問題として取り扱う。この問題の設計変数を、NURBSの制御点座標位置ベクトル q^s と厚み分布に関するNURBS制御点ベクトル q^h を用いて表すと、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & f(q^s, q^h) = \frac{1}{2} d^T(q^s, q^h) K(q^s, q^h) d(q^s, q^h) \\ & \text{subject to} \quad h_{\zeta}^l \leq \tilde{B} q_{\zeta}^h \leq h_{\zeta}^u \quad (2) \\ & \quad \Delta V^l \leq \Delta V(q^s, q^h) \leq \Delta V^u \\ & \quad \bar{B} \Delta q^s = \Delta \bar{r} = 0 \end{aligned}$$

ここに、 $d \in R^{6n}$ は節点変位ベクトルを、 $K \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクスを、 $h_{\zeta}^u, h_{\zeta}^l \in R^n$ はそれぞれ、各節点におけるシェル厚の上下限値を、 $\Delta V^u, \Delta V^l$ は総体積の増減量の上下限値を表す。 $\bar{B} \in R^{m \times 3N}$ は不動点の座標拘束方向に関する行のみを、制御点座標と節点座標を関連づける係数マトリクスである B から抽出したマトリクスを表す。

3.2 数値解析例

3.2.1 解析概要

第2章と同様にTachira Club 計画案を解析対象とする。曲面形状は鉛直方向のみ、厚み分布はシェル厚について修正することにし、形状に関する制御点の z 座標を決定する制御点座標決定ベクトル ϕ_z と、シェル厚を表現するNURBS制御点 q_{ζ} を設計変数とする。

修正時に座標拘束を受ける不動点は図2(a)に示される支持点及びGauss曲率が負となる領域の中央部分とする。不等式制約条件については、板厚の上限値を0.12m、下限値0.08mと設定する。総体積の増減量の最大値はそれぞれ $\pm 0.21\text{m}^3$ (原曲面総体積の0.1%)と設定する。他の条件は、第2章と同様とする。

3.2.2 解析結果と考察

第2章と同様に形状修正を考慮した場合の解析結果を図7から図10に示す。

各シェル形状(図8)を見ると形状修正が進むにつれて、立面図前面にあるアーチの形状が次第にカタナリー状に変化し、アーチのライズが上昇していることを確認できる。また、それに併せて立面前面の左側にあるはねだし部分のライズも上昇し、シェル全体を補剛する曲率を持つ領域が生じている。

各シェル形状の厚み分布を見ると、厚み分布の修正が進むにつれて、短手スパン中央部で薄く、支持部近

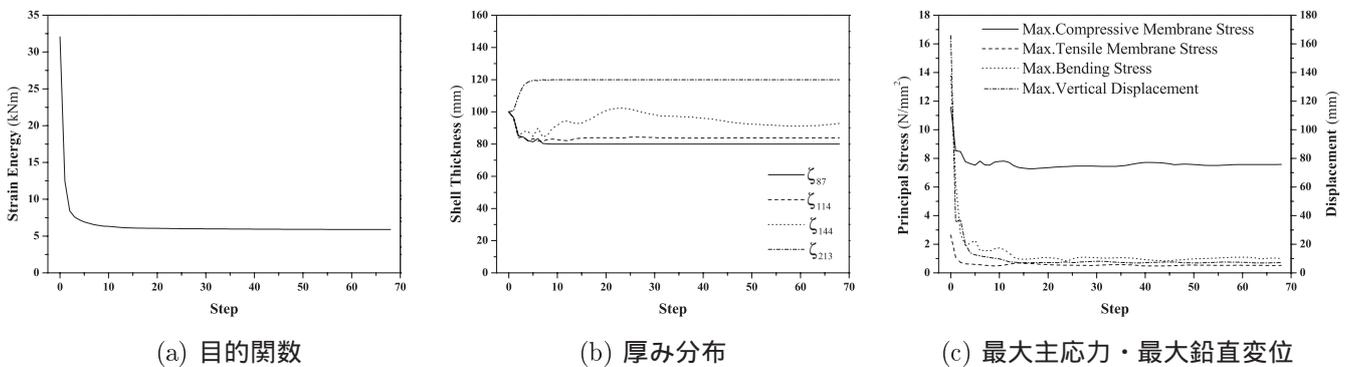


図7 収束履歴

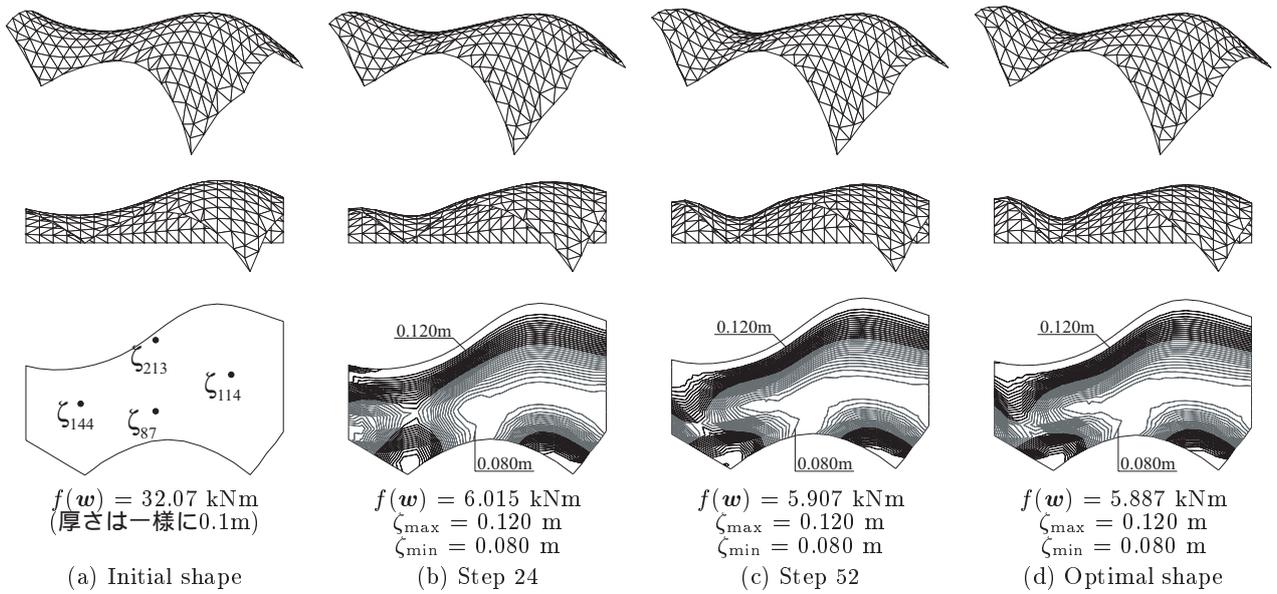


図8 原曲面，最適化段階及び最適解曲面の形状と厚み分布性状の例

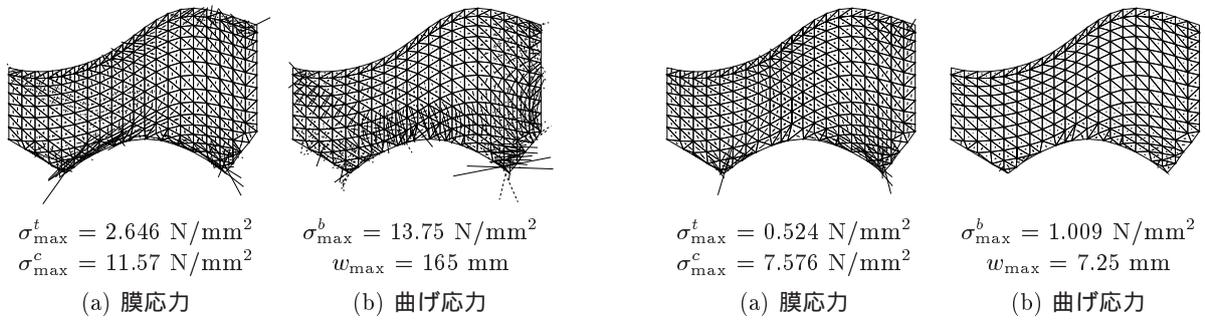


図9 原曲面の主応力図

図10 最適解曲面の主応力図

傍で厚くなるように変化する様子を確認できる。

各シェル形状の主応力図(図9, 図10)を比較すると、原曲面と比べ最適解曲面は、曲げ応力が非常に小さくなっており、シェル全面においてほぼ膜応力状態となっている。また、原曲面においては立面図前面にあるアーチ部分において大きな圧縮応力が生じているが、最適解曲面では応力が小さくなるように変化していることが確認できる。本例題の曲面形状は主としてアーチ部分で力を負担する形態から、シェル全体に力の流れる、圧縮力による軸力抵抗型の形態に変化していくことが分かる。この結果を第2章と比較すると、形状修正を加えた場合はひずみエネルギーをさらに約2/3削減でき、より力学的に合理性のある曲面を求めることができたといえる。

4 形状・厚さ・位相の同時決定による構造形態創生

本章では、建築家の自由曲面に開口を設けたいという要求に対して、局所的に大きな変位や応力が生じることの無く、開口領域を決定する手法を提案する。本

手法は第3章の形状・厚さの同時決定問題に、シェル厚に関する等値線を作成し、指定値より薄くなる領域に対して、「評価指標の改善に対しこれ以上寄与しない」とみなして領域の削除を、そうでない領域に対しては領域の付加を行うものである。

4.1 設計問題の定式化

本論文では、形状、厚み分布及び位相の同時決定問題を、シェル厚とシェル総体積に制約を有する、ひずみエネルギーの最小化を目標とした単一目的同時最適化問題として取り扱う。この問題の設計変数をNURBSの制御点座標 q^s, q^h とすると、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \text{minimize} \\ & f(q^s, q^h) = \frac{1}{2} d^T(q^s, q^h) K(q^s, q^h) d(q^s, q^h) \\ & \text{subject to} \quad h_\zeta = \tilde{B} q_\zeta^h \leq h_\zeta^u \quad (3) \\ & h_\zeta \in \Omega \quad \Omega = \{h_\zeta \mid \varepsilon \leq h_\zeta\} \\ & \Delta V^l \leq \Delta V(q^s, q^h) \leq \Delta V^u \\ & \tilde{B} \Delta q^s = \Delta \bar{r} = 0 \end{aligned}$$

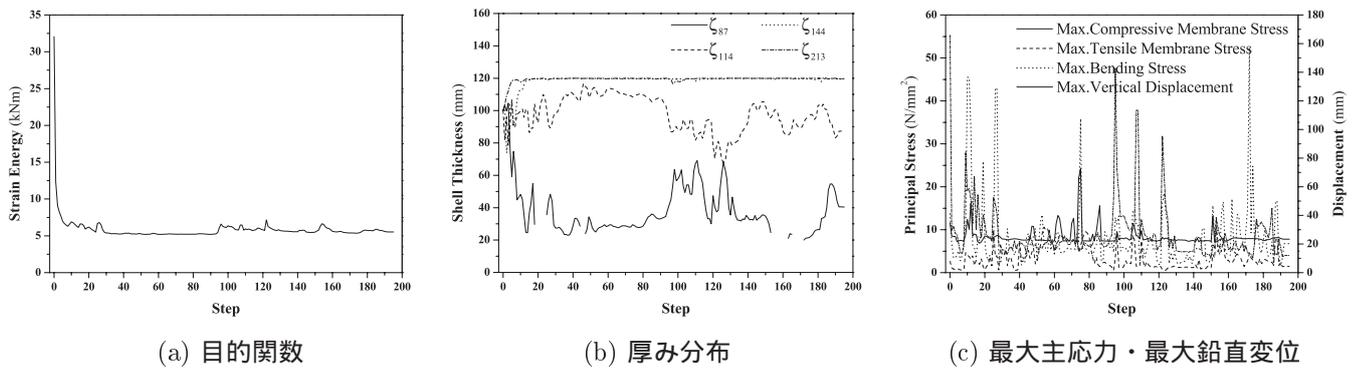


図11 収束履歴

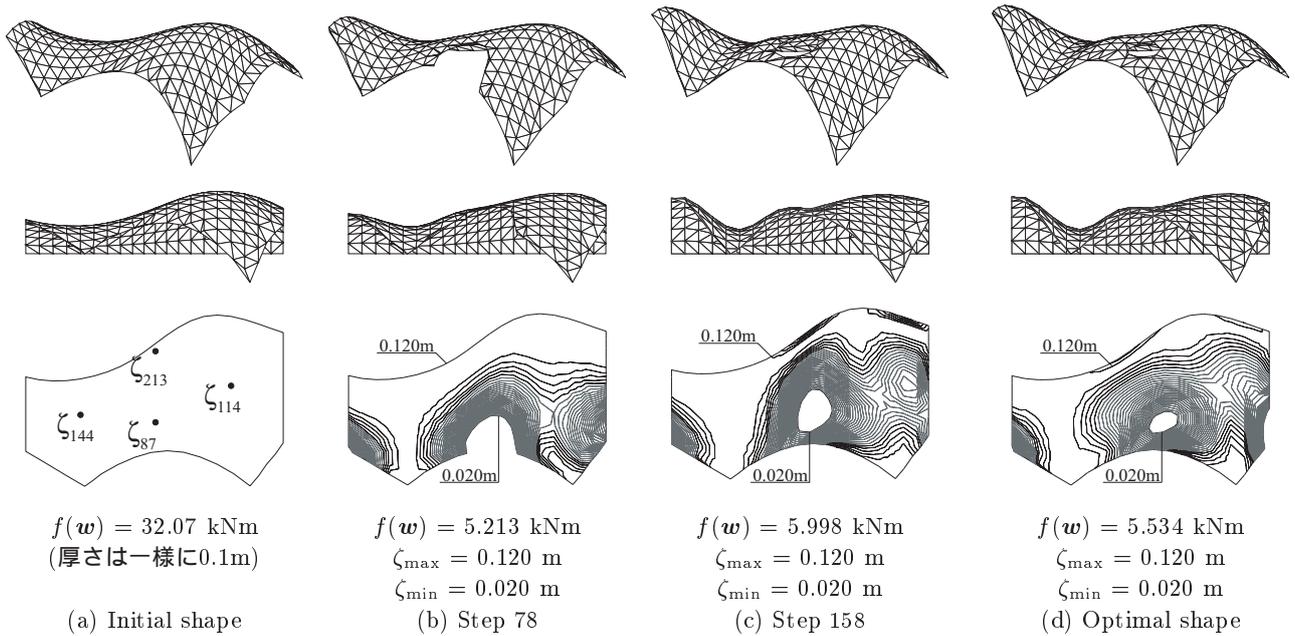


図12 原曲面，最適化段階及び最適解曲面の形状と厚み分布性状の例

ここに、 $d \in R^{6n}$ は節点変位ベクトルを、 $K \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクスを、 $h_\zeta^u \in R^n$ は各節点におけるシェル厚の上限値を、 $\varepsilon \in R^n$ は厚み分布の許容下限値を表す(本論文では厚み分布が指定値より小さくなる領域に対しては削除を施し、位相の修正を行うため、以下ではこれを削除基準値と呼ぶこととする)。また、 Ω は $\Omega = \{\bar{h}_\zeta \mid \varepsilon \leq \bar{h}_\zeta\}$ を満たす集合を、 ΔV^u 、 ΔV^l は総体積の増減量の最大値を、 $\bar{B} \in R^{m \times 3N}$ は不動点の座標拘束方向に関する行のみを B から抽出したマトリクスを表す。

4.2 数値解析例

4.2.1 解析概要

例題は、第2章・第3章と同様にTachira Club 計画案を採用する。曲面形状は鉛直方向のみ、厚み分布はシェル厚について修正することにし、形状に関する制御点の z 座標を決定する制御点座標決定ベクトル ϕ_z と、シエ

ル厚を表現するNURBS制御点 q_c を設計変数とする。

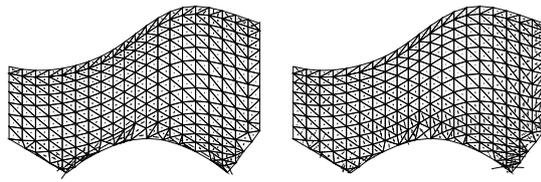
修正時に座標拘束を受ける不動点は図2(a)に示される支持点及びGauss曲率が負となる領域の中央部分とする。不等式制約条件については、板厚の上限値を0.12m、削除基準値を0.02mと定める。総体積の増減量の最大値はそれぞれ $\pm 0.21\text{m}^3$ (原曲面総体積の0.1%)と設定する。他の条件は、第2章と同値とする。

4.2.2 解析結果と考察

第2章や第3章と同様に位相修正を考慮した場合の解析結果を図11から図14に示す。

各シェル形状の厚み分布を見ると、修正が進むにつれて、支持部近傍及び支持点を結ぶ領域でシェル厚が大きくなるように変化の様子が確認できる。

曲面の位相について着目すると、主として応力が減少する立面図前面のアーチ頂部近傍の領域で位相の修正が行われている。最適化段階、最適解の位相を比較

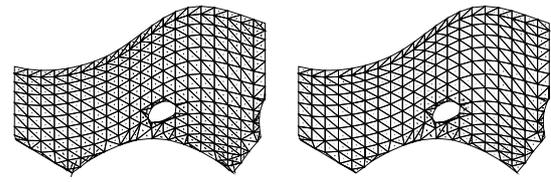


$$\sigma_{\max}^t = 2.646 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{\max}^b = 13.75 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\max}^c = 11.57 \text{ N/mm}^2 \quad w_{\max} = 165 \text{ mm}$$

(a) 膜応力 (b) 曲げ応力

図13 原曲面の主応力図



$$\sigma_{\max}^t = 1.456 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{\max}^b = 6.740 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{\max}^c = 7.786 \text{ N/mm}^2 \quad w_{\max} = 11.9 \text{ mm}$$

(a) 膜応力 (b) 曲げ応力

図14 最適解曲面の主応力図

してみると、削除のみならず設計領域の復活も確認でき、位相の修正が形状・厚み分布の修正と連動して行われていることが理解できる。

図11(c)を見ると本例題では構造体の位相の変化に対して力学的応答が敏感に変化し、位相操作が行われるステップでは曲げ応力や引張応力が大きく発生している。さらに、最適解曲面と原曲面を比較すると、ひずみエネルギーは約1/5に、最大引張応力は約1/2に、最大鉛直変位は約1/10に、曲げモーメントによる縁応力の最大値は約1/2にまで減少していることが確認できる。本手法を用いることにより、位相操作を行った場合にも高い剛性を有する曲面構造形態を求めることが可能であることが示された。

5 結語

本稿では、自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の開発を目指し、3つの手法、すなわちシェル厚みのみの決定手法、形状と厚さの同時決定手法、形状厚さ・位相の同時決定手法を示した。これらの手法ではNURBSを用いてシェルの形状と厚さを制御することで設計変数の低減を図り、評価指標としては構造物のひずみエネルギーを採用し、その最小化問題として定式化している。さらに複雑な自由縁形状を持つ Tachira Club 計画案を例題として採用し、本手法の有効性を示した。本論文の内容は以下のように要約される。

1. 厚み分布決定による構造形態創生手法では、自由曲面シェル構造の厚さのみを変化させることによって、ひずみエネルギーを低減させるとともに、曲げ応力や鉛直方向変位も減少させることのできる曲面を得ることができる。
2. 形状と厚さの同時決定による構造形態創生手法では、厚み分布の修正のみの場合と比べ、よりいっそうひずみエネルギーを低減させることができる。さらに、アーチ部分の曲げ応力で抵抗

する形態から、シェル全体に力の流れる、圧縮力による軸力抵抗型の形態を得られる。

3. 形状厚さ・位相の同時決定による構造形態創生手法では、シェルに開口を設けながら、力学的に合理性のある曲面を求めることができる。局所的に大きな変位や応力が生じることの無い、開口領域の設計が可能である。
4. 3つの手法を選択することにより、構造家は建築家の求める意匠上の要求に応じて、力学的に合理性のある自由曲面を提案することができる。

参考文献

- 1) 岡田章監修：フォルムと構造システム，建築技術，No. 709，pp. 92-175，2009
- 2) 木村俊明，大森博司：形状と厚さの同時最適化法の定式化とその応用 自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案（その1），日本建築学会構造系論文集，No.640，pp.1091-1098，2009
- 3) T.Kimura and H.Ohmori, Computational Morphogenesis of Free Form Shells, Proceedings of International Symposium on Shell and Spatial Structures, New Materials and Technologies, New Designs and Innovations -A Sustainable Approach to Architectural and Structural Design-, Abstracts pp.149-150, Acapulco, Mexico, 2008
- 4) エドゥアルド・トロ八著，川口衛監修，IASS2001 組織委員会訳：エドゥアルド・トロ八の構造デザイン，相模書房，2002
- 5) 浜田英明，大森博司，設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案 その2 最適性条件による理論的解法，日本建築学会構造系論文集，No. 618，pp. 143-150，2007.8

大域的・局所的最適化手法の連携によるアルミニウム押出型材の最適断面算出システム開発

川崎 将臣¹⁾, 大森 博司²⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, kawasaki@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

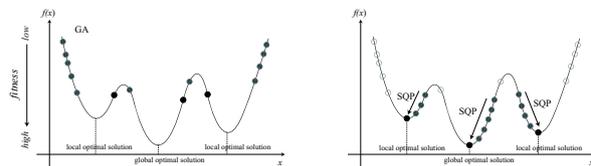
1 序論

環境への意識が高まる中, リサイクル性の優れたアルミニウム建築が多大な注目を浴びている。しかし, 未だ広く一般に普及しているとは言えず, その最大の理由の一つに, コストの問題が挙げられる。アルミニウム押出型材は, ある程度の制約があるものの, 比較的自由な断面形状を形成することができ, 建築構造に多くの可能性をもたらすと考えられている材料であるが, 鋼材に比べアルミニウム製造のコストが非常に高価であること, また鋼材のように規格品が存在せず断面形状を設計する必要があることなどが設計者にとって妨げとなっている。そのため, アルミニウム押出型材のコストを削減し, アルミニウム押出型材の規格品を作成することは, アルミニウム建築を普及させるための重要な課題になってくる。また, 現実の設計問題における目的関数は一般に多峰性関数であることが多い。つまり, 設計問題の解空間上には様々な局所最適解が存在している。これらの局所最適解のうちもっとも最適な解を大域的最適解と呼ぶ。そこで本研究では, 大域的最適解を効率よく探索するために, 田邊らの提案した発見的手法(大域的最適化手法)と理論的手法(局所最適化手法)の連携手法[1]を内部境界を有する断面に適用し, その汎用性を高めることを目的とする。

2 大域的・局所最適化手法の連携

大域的・局所最適化手法とは, まず遺伝的アルゴリズム(以下GAと呼ぶ)を用いて発見的に多峰性のある目的関数の様々な局所最適解を含む単峰領域の点を探索する。そして, GAによって得られた様々な単峰領域の点を初期点として非線形計画法(解法として逐次二次計画法を用いるため, 以後SQPと呼ぶ)を用いてそれぞれの単峰領域内の極小点(局所最適解)を理論的に算出する。この連携手法によって得られた局所最適解のうちもっとも最適な解が大域的最適解である可能性が高い。ここで, 大域的最適解である可能性が高いと言えるのは, 大域的最適解を探索するのに優れてい

るGAを用いているためである。この手法によって, 効率良くかつ高精度で局所最適解と大域的最適解を探索することが可能となる。



(a) GAの概念図 (b) SQPの概念図

図1 GAとSQPの連携手法の概念図

3 GAとSQPの連携手法を用いた断面形状最適化問題の定式化

本節では, 断面積の最小化を目的とした断面形状最適化問題の定式化について説明する。二種類の最適化手法を用いる今回の手法では, それぞれの手法によって解法は異なるが, 扱う最適化問題は断面形状最適化問題の一つであることを述べておく。

本手法では, 断面積と断面性能はデローニ三角分割法[2]により離散化し評価を行う。断面形状の境界上の節点数(内部境界, 外部境界)を N , 断面性能に関する不等式制約条件数を m として設計変数である境界上の節点座標を $r_i = [x_i, y_i] \in R^2, (i = 1, \dots, N)$ と表し, さらに, $r_x = [x_1 \dots x_N]^T, r_y = [y_1 \dots y_N]^T$ と表す。断面形状は座標位置ベクトル $r_p = [r_x^T r_y^T]^T$ によって表現されるものとする。この座標位置ベクトルを用いて, $f(r_p)$ を目的関数, $g(r_p) \leq 0$ を不等式制約条件とした最適化問題を以下のように表す。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && f(r_p) \\ &\text{subject to} && g(r_p) \leq 0 \end{aligned} \tag{1}$$

ここで, 目的関数 $f(r_p)$ は断面積を, 不等式制約条件 $g(r_p)$ は断面性能に関する制約条件や断面形状に関する制約条件である。

3.1 GAを用いた解法

GAにおいて，問題(1)で示す不等式制約条件 $g(r_p)$ は以下で表される内容である。

$$g(r_p) \leq \mathbf{0} \Leftrightarrow \begin{cases} I_{x_0} - I_x \leq 0 \\ I_{y_0} - I_y \leq 0 \\ i_{x_0} - i_x \leq 0 \\ i_{y_0} - i_y \leq 0 \\ Z_{x_0} - Z_x \leq 0 \\ Z_{y_0} - Z_y \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

ここに，

- I_x, I_y : X軸(Y軸)に関する断面二次モーメント
- i_x, i_y : X軸(Y軸)に関する断面二次半径
- Z_x, Z_y : X軸(Y軸)に関する断面係数
- I_{x_0}, I_{y_0} : X軸(Y軸)に関する断面二次モーメントの要求性能
- i_{x_0}, i_{y_0} : X軸(Y軸)に関する断面二次半径の要求性能
- Z_{x_0}, Z_{y_0} : X軸(Y軸)に関する断面係数の要求性能

断面形状に関する制約条件に関しては，初期に設定する実行可能領域グリッドで決定する。実行可能領域グリッドとは，各節点の座標修正可能な領域を格子状に分割したもので，この格子点の座標が設計変数となる。また，問題(1)は断面積最小化問題であるため，適合度関数は，目的関数の逆数にペナルティを乗じた式(3)と定式化する。また，式(4)に各断面性能に関するペナルティ関数 γ_j を示す。ペナルティ関数 γ_j は，制約条件を満足していれば1を，満足していなければ制約条件との比率を用いて表す。

$$fitness = \frac{1}{f(r_p)} \prod_{j=1}^6 \gamma_j \quad (3)$$

$$\gamma_j = \begin{cases} 1 & \text{断面性能} \geq \text{要求性能} \\ \frac{\text{断面性能}}{\text{要求性能}} & \text{断面性能} < \text{要求性能} \end{cases} \quad (4)$$

ここに，

- $f(r_p)$: 断面積
- γ_j : 制約条件 j に対するペナルティ関数

なお，個体の順位に関しては，極二次モーメント ($I_p = I_x + I_y$) を用いてエリートを選出する。

3.2 SQPを用いた解法

SQP(sequential quadratic programming, 逐次二次計画法)は各反復点における目的関数の二次近似式と制約

式の線形近似式により得られる二次計画問題を逐次解き，Lagrange 関数のヘシアン近似行列を更新公式により改良して最適解を求める手法である。

第 k 回目の反復段階において，点 r_p^k が求まっている時，問題(1)は各反復点において，目的関数の二次近似式，制約条件の線形近似式により得られる二次計画問題は式(5)で表される。この式(5)を主双対内点法[3]によって逐次解くことで最適解を求める。

$$\text{minimize} \quad \nabla_{r_p} f(r_p^k)^\top d + \frac{1}{2} d^\top B^k d \quad (5)$$

$$\text{subject to} \quad g(r_p^k) + \nabla_{r_p} g(r_p^k)^\top d \leq \mathbf{0}$$

ここで B^k は目的関数のヘッセマトリクス $\nabla_{r_p r_p}^2 f(r_p^k)$ の近似マトリクス， d は座標修正量である。

不等式制約条件を含むこの問題(式(5))で表されるLagrange 関数をLagrange 乗数 $u \in R^{4N+m}$ を用い，次のように定義する。

$$L(d, u) = \nabla_{r_p} f(r_p^k)^\top d + \frac{1}{2} d^\top B^k d + u^\top g(r_p^k) + u^\top \nabla_{r_p} g(r_p^k)^\top d \quad (6)$$

式(5)で表される問題の最適解を d^k とし，対応するLagrange 乗数を u^k とすれば，最適性条件は次式で表される。

$$\begin{aligned} \nabla_{r_p} f(r_p^k) + B^k d^k + \nabla_{r_p} g(r_p^k) u^k &= \mathbf{0} \\ g(r_p^k) + \nabla_{r_p} g(r_p^k)^\top d^k &\leq \mathbf{0} \\ U(g(r_p^k) + \nabla_{r_p} g(r_p^k)^\top d^k) &= \mathbf{0} \\ u^k &\geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (7)$$

ただし， $U = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_{4N+m}) \in R^{4N+m \times 4N+m}$ である。ここで $U(g(r_p^k) + \nabla_{r_p} g(r_p^k)^\top d^k) = \mathbf{0}$ は不活性な不等式制約条件に対応するLagrange 乗数が零になることを意味する相補条件である。

3.2.1 節点座標に関する不等式制約条件

本小節では節点座標に関する不等式制約条件の扱い方について述べる。最適化過程における断面性能の評価は断面形状を離散化して行う。離散化にはデロー二三角分割法による要素自動分割を用いる。この際，要素節点が近づきすぎないように，また，図2(b)に示すような不合理な位置関係にならないようにしつつ，条件寸法内で解形状を求める必要がある。こうした条件を満たす解の存在する適切な実行可能領域を前述の二

次計画問題の部分で導入する。どの節点とも交わることのない実行可能領域を作成すれば、デローニ三角分割法における読み込みのループ構造が崩れることなく座標修正を行うことができる。



(a) 入力に関するループ構造 (b) ループ構造の崩れた例
図2 要素自動分割の入力

3.2.2 各部位の板厚確保に関する条件

実設計では、それぞれの部位に対して最低限必要な板厚を満足する必要がある。そこで、本小節では実行可能領域の取り得る範囲（実行可能範囲）の設定方法について説明する。

この各部位の板厚確保の条件を実現するため、最適化過程における各節点の実行可能領域を場合に依じて変更させる方法を用いる。図3により実行可能領域の変更方法を説明する。図3のMAX_X, MIN_X, MAX_Y, MIN_Yは、板厚条件を考慮した場合に各節点の実行可能領域がとり得ることができる最大最小値を表し、(upper_x, upper_y), (lower_x, lower_y)は各節点の実行可能領域の上下限座標値を示している。実行可能領域変更のアルゴリズムを以下に示す。

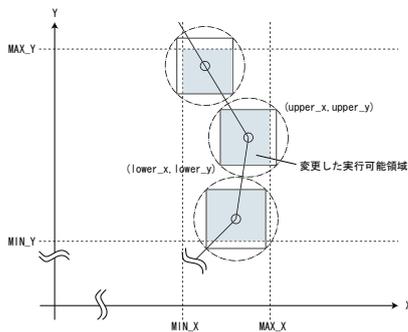


図3 実行可能領域の変更

実行可能領域変更のアルゴリズム

1. 板厚条件より各節点のとり得る実行可能範囲を設定する。
2. 各節点の実行可能領域の上下限値を計算する。
3. 実行可能領域の上下限値が実行可能範囲内に納まるかどうかの判断を行う。

- (a) 納まった場合、実行可能領域の変更を行わない。
- (b) 納まらなかった場合、実行可能領域の上下限値を変更する。

4 実設計物への適用

4.1 解析概要

図4に今回の解析モデルを、図5に初期断面形状と断面性能を示す。外部境界を変更しないこと、圧縮による局部座屈の条件より板厚を1.0mm以上確保すること、断面2次モーメントを I_x, I_y ともに $I = 15.25\text{cm}^4$ 以上とすることが条件である。今回、解析対象とする断面の初期節点を図4に示している。解析対象は上下左右で対称であり、また、 $y = x$ 軸に対しても対称に節点をとることとしているため、1/8対称となる。図中で示した節点番号1-34の34点は不動点として設定し、残りので示した17個の節点(節点番号35-40, 41-52)の座標を設計変数とする。節点番号36-39, 41-52の節点の実行可能範囲を、板厚1.0mm以上という条件を満たすよう、それぞれ図4に示す薄墨されている範囲とする。節点番号35と40の節点に関しては、それぞれx軸上、y軸上でのみの移動を許し、それぞれ節点番号1, 34の節点までの距離を1.0mm以上確保することとする。図5の初期断面性能を制約条件とし、表1にGAパラメータを示す。

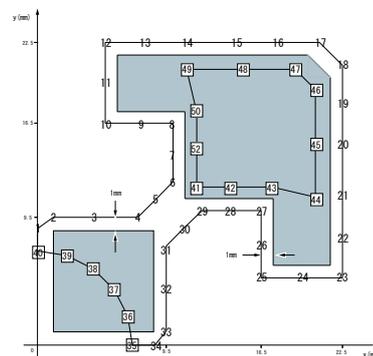


図4 解析モデル

表1 GAパラメータ

アルゴリズム	SGA	世代数	100
個体数	50	交叉方法	一点交叉
エリート保存数	2	突然変異率	1/遺伝子長
交叉確率	0.6	選択方法	グリッド分割数
選択方法	ルーレット選択		12 × 12

4.2 解析結果

GAで得られた4つの解をSQPで数値解析を行い、その中で最も多く断面積を削減した結果を示す。

図6に最適解の断面形状と断面性能を、図7にSQPによる解析時の解の目的関数と断面性能の収束履歴を示す。目的関数と断面性能の収束履歴は、横軸に反復回数、縦軸に各断面性能の制約条件との比率として示す。ただし断面積に関してのみ、SQP開始時との比率となっている。

今回の対象の解は19回の反復計算で座標修正量で解析が終了した。図7を見ると、2回目の反復計算時に断面2次モーメント、断面係数が増加しているが、その後元に戻っている。断面積は順調に減少していき、6回目の反復計算以降目立った変化は見られなかった。形状に関しては、GAとSQPによって中心の円が径を増加させていき、最適解では円形を崩し、実行可能範囲を満足しつつ、くり抜き面積が広がった形状となった。さらに4箇所内部領域に関しては、節点それぞれが原点に近づくように挙動し、扁平な形状になっている。最適解は、制約条件を満たし、約12%の断面積削減に成功した。

5 結論

本研究では、発見的手法である遺伝的アルゴリズムと理論的手法である線形計画法との大域的・局所的最適化の連携手法を内部境界の有する断面への適用が目的であり、解析は前述の通り、制約条件を満たしながら約12%の断面積削減成功という結果となった。数%削減するだけでもコストに大きく影響するアルミニウム押出型材にとって、大きな成果と言える。これによってこの連携手法は、多峰性の目的関数を持つ最適化問題に対して非常に有効な手法であることが確認でき、さらにきわめて高精度で複数の局所的最適解を得ることができた。また、本研究で扱った内部境界を有するアルミニウム押出型材のような様々な形状に関する制約条件、断面性能に関する制約条件の厳しい問題に対しても、大域的最適解と考えられる解を効率よく得ることが可能であることを示した。

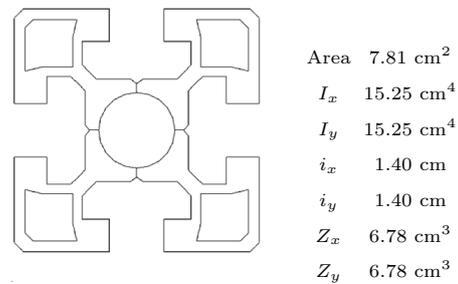


図5 初期断面形状と断面性能

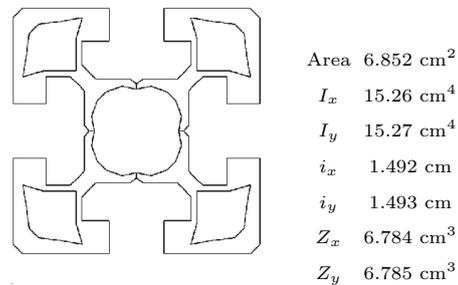


図6 最適解形状と断面性能

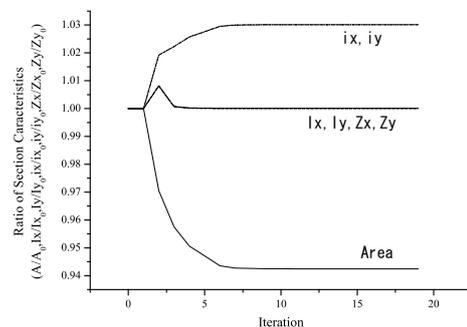


図7 断面性能の履歴

参考文献

- 1) 田邊昌基,大森博司,飯嶋俊比古,上村和男,松橋雅彦: アルミニウム押出型材の最適断面算出システムの開発, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.55B, pp.591-598,2009.3
- 2) 谷口健男:FEMのための要素自動分割 デローニー三角分割法の利用, 森北出版, 1992
- 3) 小島政和,土谷隆,水野眞治,矢部博:内点法, 朝倉書店, 2001

シフトフレーム構造の形態創生とその実例

後藤一真¹⁾, 城所竜太²⁾

1) Ove Arup & Partners Japan Limited, Structural Engineer, kazuma.goto@arup.com

2) Ove Arup & Partners Japan Limited, Associate, ryota.kidokoro@arup.com

1 序論

近年のコンピューターの発展に伴い、めまぐるしい勢いで新しい建築の形態が創出されている。一方、コンピューターの持つ潜在性は無形から有形を創出するばかりでなく、過去の人々の知恵を発展させ新しい価値を創出する役割ともなり得ることを忘れてはならない。その例として“組むことで空間を構成する”ことである。本稿では、ローテクな“組む”行為をコンピューターの力を用いた新たな“組む”を探る。

2 背景

2.1 シフトフレーム構造

シフトフレーム構造は、部材の軸芯をずらして“組む”構造システムである。シフトフレーム構造の代表例として、互いに巴状に接合する相互依存構造が挙げられる。部材を複雑な接合部を用いずにスパンができる特徴があり、昔の人々は、木材や竹などの比較的入手・加工が容易な短材を“組む”ことで大きな空間をつくらうとしてきた。レオナルド・ダ・ヴィンチもまた、複数の短材を組んで、大スパン屋根架構の提案をしている。



図 2.1 相互依存構造

“芯をずらして組む”という単純な構成原理にもかかわらず、部分と全体のジオメトリが密接に関係している為(図 2.2)、接合する部材の位置や部材の断面サイズなどのジオメトリを全部材同時にコントロールしながら把握する必要があり、形状定義が非常に難しい。さらに、幾何学的な複雑さに加え、内力が予測しにくいという問題点は、この構造システムが数多くの建築物に用いられない所以であるとされている^[1]。

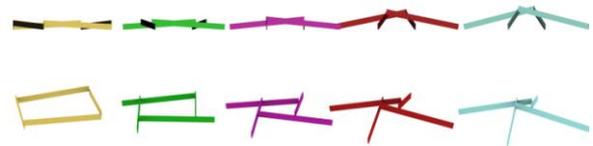


図 2.2 ジョイント位置による形状の変化

2.2 これまでの事例や研究

近年におけるシフトフレームを用いた建築物は、構成原理の単純性から幾つか提案されている。例えば、正方形ユニットを平面的に並列してできた清和文楽館や Forest Park Pavilion などが挙げられる^[2]が、何れも同一長部材を複数用いて単純な組合せて空間を構成するものであり、比較的単純な幾何的なルールに則して形状が定まっている。

一方、研究分野においても、曲面形状を構成する方法として、正多面体幾何学からのアプローチから論じている研究^{[3][4]}がされているが、シフトフレームの複雑な幾何学性から自由な形態まで言及する記述は数少ない。また、内部応力の状態を考慮しながら自由曲面形状の形態解析を行う研究も行われはいるものの、“同一長の部材を組む”という制約に留まっている^{[5][6]}。実際、同一長を組みながら自由曲面を構成しようとする、幾何学的な問題から、内部応力は設計できる応力オーダーからかけ離れてしまうという問題点もある。

2.3 目的

既述の背景のもと、本稿では、①任意部材長の材を用いて ②初期状態の内部応力が生じない 任意形状のシフトフレーム構造を構築する形態解析手法“変分原理に基づくシフトフレームの幾何解析手法”(Shift Frame Geometrical Analysis based on variational method (SFG 法))を提案し、デザインの可能性を広げることを目的とする。また、本解析手法を用いてデザインされたシフトフレーム構造の実際の設計施工事例を示す。

3 シフトフレーム構造の形態創生

3.1 SFG 法理論

上下の組む条件、オフセットする位置の条件を考慮しながら重量が軽量となる経済的な形状を実現させる。接合部と部材の関係を図 3.1 に示すようモデル化を行い、部材の長さを最小化するような最適化手法^[5]の理論を用いた“Shift Frame Geometry (SFG) 法”を構築した。

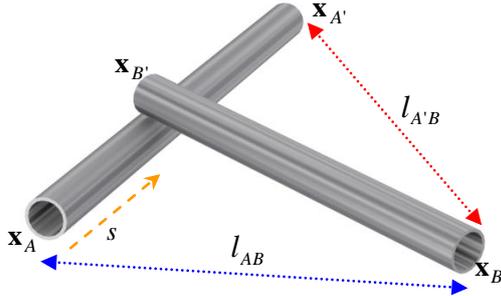


図 3.1 接合モデル

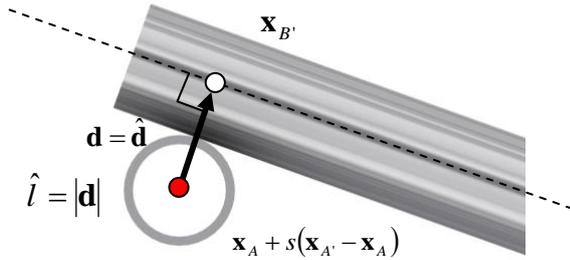


図 3.2 接合モデル拡大図

シフトフレーム構造の部材を軸方向に伸縮可能な要素とし、接合部の各部材の中立軸間の距離を拘束するようモデル化を行うと、目的関数は、式(1)に示すように、全部材の節点間の距離の和に、Lagrange 未定乗数を用いて部材の距離の制約条件を付加した形となる。

$$\min \pi \quad \text{s.t} \quad \pi = \sum_{i=1}^n l_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j (\mathbf{d}_j - \hat{\mathbf{d}}_j) \quad (1)$$

$$\mathbf{d} = -(\mathbf{x}_A + s(\mathbf{x}_{A'} - \mathbf{x}_A) - \mathbf{x}_B) \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{d}} = \hat{l} \frac{(\mathbf{x}_{A'} - \mathbf{x}_A) \times (\mathbf{x}_{B'} - \mathbf{x}_B)}{\|(\mathbf{x}_{A'} - \mathbf{x}_A) \times (\mathbf{x}_{B'} - \mathbf{x}_B)\|} \quad (3)$$

π :全部材長 n :部材数 m :接合部数

$\mathbf{d}, \hat{\mathbf{d}}$:2点間の位置ベクトル λ_j :Lagrange 未定乗数
 l_i :部材長

2つの部材芯が定められた位置でオフセットされる現象を記述するには、パラメータを含む位置ベクトルの加減算による位置ベクトル式(2)式と、二つの部材の単位外積ベクトルにオフセット距離を乗じて得られる拘束ベクトル(式(3))が同じサイズであることが条件となる。

任意の点におけるオフセットを実現するにあたり、(2)式に示すように、オフセットパラメータ($0 \leq s \leq 1$)を導入しジオメトリのコントロールができるように定式化した。(図 3.3)

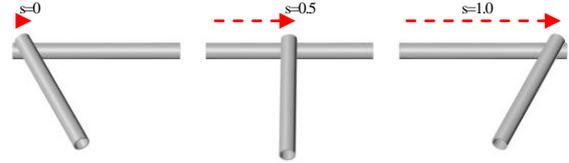


図 3.3 パラメータによるジョイントコントロール

式(1)の変分をとることで π の停留条件より(4)式と拘束条件式(5)を得られる。

$$\delta\pi = \sum_{i=1}^n \delta l_i + \sum_{j=1}^m \delta \lambda_j (\mathbf{d}_j - \hat{\mathbf{d}}_j) + \lambda (\delta \mathbf{d}_j - \delta \hat{\mathbf{d}}_j) = \begin{pmatrix} \delta \mathbf{U} \\ \delta \lambda \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{D} - \hat{\mathbf{D}} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{d}_j - \hat{\mathbf{d}}_j = \mathbf{0} \quad (j=1 \dots m) \quad (5)$$

\mathbf{x}_i :部材端の位置ベクトル

s :オフセット位置パラメータ \hat{l} :オフセット距離

式(4)は任意のシフトフレーム構造で成立し、高次の非線形問題となるため、Newton-Raphson 法を用いて変位を求め形態を導出した。Newton-Raphson 法は、予想される真の解に近いと思われる値をとり、次に、そこでグラフの接線を考え、その x 切片を計算する。この x 切片の値は、予想される真の解により近いものとなるので、以後、この値に対してグラフの接線を考え、同じ操作を繰り返すことで二次的に収束しながら解を辿る手法である。

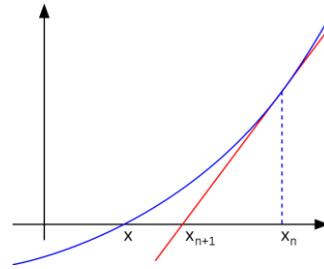


図 3.4 Newton-Raphson 法

$$d(\delta\pi) = \begin{pmatrix} \delta\mathbf{U} \\ \delta\Lambda \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} \mathbf{K}_e & \mathbf{K}_\lambda^T \\ \mathbf{K}_\lambda & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\mathbf{U} \\ d\Lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta\mathbf{U} \\ \delta\Lambda \end{pmatrix}^T (\mathbf{K}) \begin{pmatrix} d\mathbf{U} \\ d\Lambda \end{pmatrix} \quad (6)$$

(4)式を微分することで、ある点における接線行列式(6)となる。(6)式の逆行列をとり微小変形を導出し、イタレーションを重ね収束計算をさせることで、オフセット変位量が求まる。尚、全体接線行列は対称行列であるため skyline 法を用いて逆行列計算を行い、計算速度の向上を図った。

3.2 解析例

図 3.5 に複数の四つ巴型のシフトフレーム構造の各解析ステップごとの変遷を示す。1 回目の計算で凡その形状が導出されることがわかる。また、その際の収束していく様子を図 3.6 に示す。Newton-Rapson 法の特性通り、二次的に安定して収束していく様子がわかる。

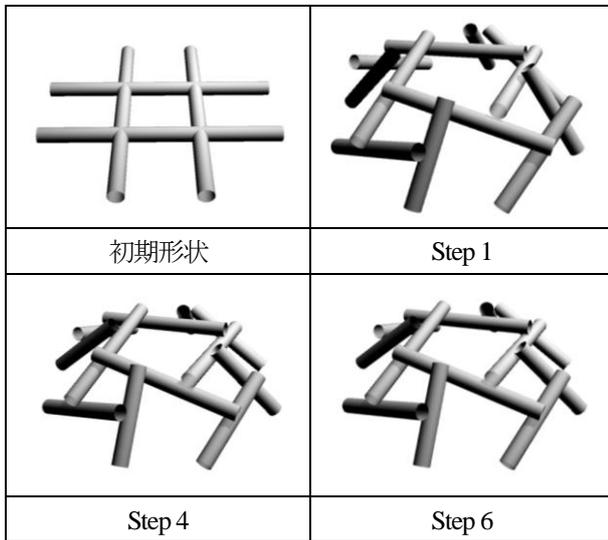


図 3.5 オフセットする様子

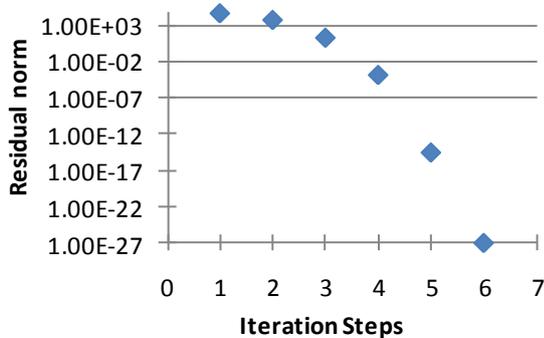
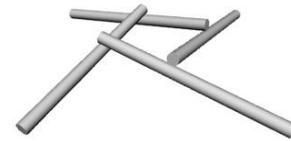


図 3.6 Newton-Rapson 法による収束の様子

他の任意の形状についても同様に、三つ巴や四つ巴などのシンプルな形状から、Delaunay pattern や Voronoi pattern をベースとした形状に至るまで、シフトフレームのジオメトリを導出することを確認した(図 3.7)。また、これらの形状すべてにおいて収束計算は二次的に安定に収束した。



三つ巴



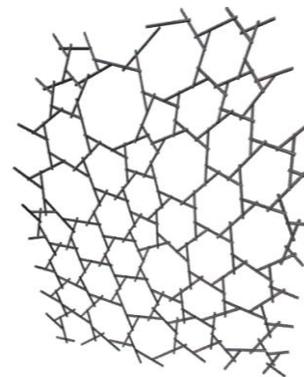
四つ巴



回転対称のシフトフレーム



Delaunay pattern をベースとしたシフトフレーム



Voronoi pattern をベースとしたシフトフレーム

図 3.7 様々なシフトフレームの事例

4 設計施工事例

4.1 プロジェクト概要

短材を組んで空間を構成する実例として”六甲枝垂れ”(意匠設計:三分一博志建築設計事務所、建築面積 127 m²、延べ床面積 66.5 m²)を挙げる。オーガニックをデザインコンセプトとしたこの建物は標高 887m に位置し、晴れている日には阪神の街並みを眺望することができる。夏には、冬場に貯めた氷で冷やされた空気が流れる部屋で涼むことができる。また、冬場には六甲山に吹付ける冷たい湿った空気によって発生する樹氷を観察することができる、自然と一体となった建物である。

構造は、①展望台全体の土台となる重要な下部構造は強固な八角形の平面形状をした鉄筋コンクリート造、②外装材の荷重を突き上げる役割を持つ中央に立つ曲率をもった円錐台状の構造、③繊細な短材(φ50 ステンレス)によって構成されているシフトフレーム構造(高さ 8m、直径約 16m)の3つのシステムによって構成されている。

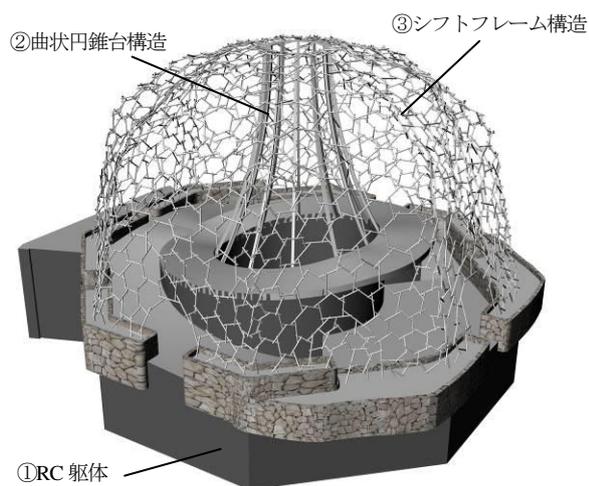


図 4.1 構造ダイアグラム

4.2 形態創生

短材のパターン定義は、オーガニックというデザインコンセプトに基づき細胞を模倣する方法からヒントを得ている。細胞単体だと安定した球状の状態だが、分裂して拡張拡大していくと、密に詰まった状態になり、それぞれの細胞がなわばりを主張する状態となる。拠点を中心に隣接する細胞へ影響を及ぼそうとする考え方は、それぞれの母点が他より自分に近い場所を自分の勢力圏として囲んで出来る”Voronoi 分割”に類似している。

Voronoiの母点の配置は、面で得られた構造解析結果を

フードバックし、応力が大きい傾向にある部分のボロノイの母点の密度を濃くするようにコントロールした。

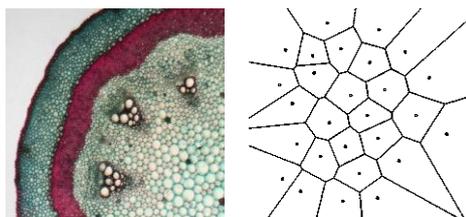
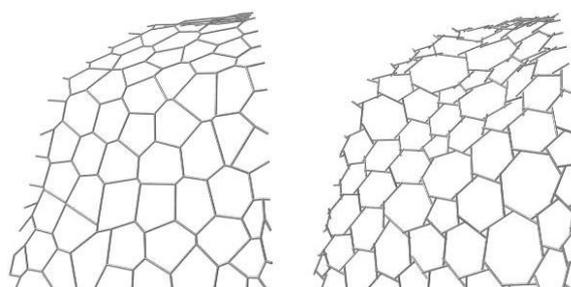


図 4.2 植物の茎イメージと Voronoi 分割

外装材のシフトフレームは下部の八角形の RC 躯体の上に設置され、8枚の構面による回転対称の形状である。そのため、実際の形態解析はそのうちの1構面を抽出してボロノイ分割を行い、形態解析を行っている(図 4.3)。



Voronoi Pattern に基づく初期ジオメトリ(左)
SFG 法により求めた最終ジオメトリ(右)

図 4.3 形態創生

建物の軸対称性を考慮しながら構面に隣接する部材についても部材がずれて接合するシフトフレームを実現するにあたり、回転テンソルを用いることで軸対称を定義した。隣接する構面があたかもシフトする部材近くに存在するように、回転テンソルを用いて隣接する節点を仮想的に定義(式(7))し、(1)~(6)式に代入することで、隣接部の部材の勾配を考慮しながらオフセットする現象を実現した。

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{R}\mathbf{x}_{0i} \quad (7)$$

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos 45^\circ & -\sin 45^\circ & 0 \\ \sin 45^\circ & \cos 45^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

\mathbf{x}_{0i} : 解析モデルに存在する節点

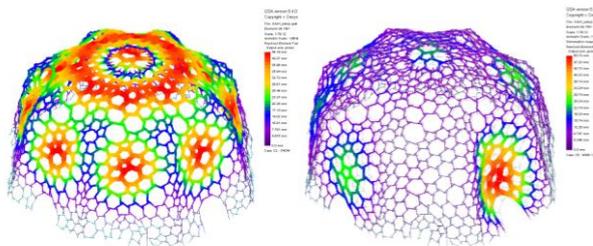
\mathbf{x}_i : Z 軸まわりに 45 度回転した位置に仮想的にある節点

\mathbf{R} : Z 軸まわりに 45 度回転する回転テンソル

4.3 設計

シフトフレームの各部材にかかる力を適切に評価するため、3次元構造解析を行った。構造解析モデルは、前節の形態解析で得られた形状をそのまま解析モデルに移行した。使用した解析プログラムはGSA Ver8.4を用い、ステンレスパイプは梁要素、接合部はLink要素でモデル化を行い応力を評価した。

設計は、法律に定められている地震荷重・風荷重・積雪荷重などの短期的に生じる荷重に対して許容応力度設計を行い計画建物が十分安全であることを確認している。さらに山頂という特殊性から、風荷重や温度荷重など法律に定められている荷重が生じる可能性があるため、それらに対して十分な安全率を有して設計を行った。また、ステンレスパイプ同士の溶接耐力が想定以上であることや、溶接部近傍で局部座屈が生じないか確認するため実験を行い、安全性を確認した。



積雪荷重時変形図

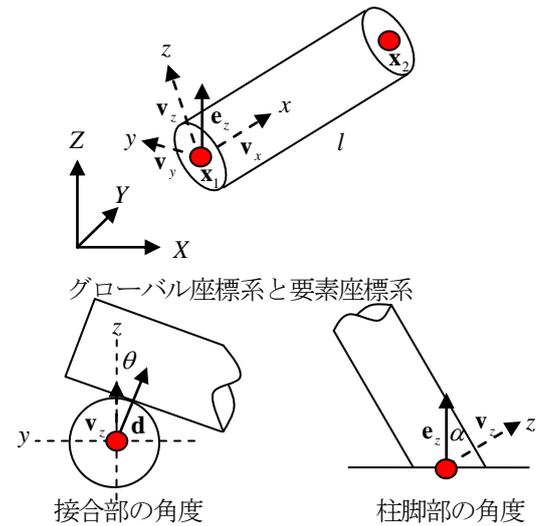
暴風時変形図

図 4.4 解析結果

4.4 製作者との協調

一般的な鉄骨製作図は、製作者が理解しやすくするために各部の寸法を2D図面に落とし込んでから制作を行うのが通常である。本物件の場合、直径50mmのステンレス鋼管を3000本近く、3次元のデータから2次元の図面へ落としこむ作業は、図面作成期間が膨大にかかり、人的ミスリスクも潜んでいた。

そこで、形態創生をすると同時に、図4.5に示す幾何学的な関係から、①部材の長さ、②接合点までの長さ、③接合角度、④柱脚部の切断角度といった製作者が最低限必要とする情報を自動生成するシステムを構築し、3Dデータと併せて製作者と共有することで、大幅な製作期間の短縮を実現した。



$$\mathbf{v}_x = \frac{(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)}{l}, \quad \mathbf{v}_y = \frac{\mathbf{e}_z \times \mathbf{v}_x}{|\mathbf{e}_z \times \mathbf{v}_x|}, \quad \mathbf{v}_z = \frac{\mathbf{v}_x \times \mathbf{v}_y}{|\mathbf{v}_x \times \mathbf{v}_y|}$$

$$\mathbf{e}_z = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \theta = \cos^{-1}\left(\frac{\mathbf{d}}{|\mathbf{d}|} \cdot \mathbf{v}_z\right), \quad \alpha = \cos^{-1}(\mathbf{e}_z \cdot \mathbf{v}_z)$$

\mathbf{v}_i : i 方向の方向余弦

θ : 部材接合角 α : 柱脚部材接合角

図 4.5 要素座標系の生成と部材接合角

4.5 施工

施工は鉄骨制作工場である程度のユニットを制作し、現場における溶接を極力減らす工程とした。工場溶接ではφ50の鋼管の接合角度と位置を調整する際、レーザーで位置を測定し、建設仮設用の足場に用いられるクランプを代用し固定することで特殊な治具を用いることなく位置を定めている。



工場溶接



搬入



シフトフレーム建方



竣工

図 4.6 施工写真

4.6 データフロー

本プロジェクトの実現にあたり、デザイン→エンジニアリング→製作の全ての段階において三次元データをベースとして情報連携を行っている。特に、形態解析で得られた情報は、そのまま解析モデルやCGモデル、そして製作用のExcel Sheetに書き出せるよう、データ形式変換プログラムを作成して、各スタディ毎の煩わしいデータ変換や初期設定の手間を省いた。(図4.7)。

5 結言

自由曲面を有するシフトフレーム構造の創出を目的として、SFG法を開発し、短材を組む手順の操作で自在な面形状のシフトフレーム構造を確実に定義することを実現した。また、3次元データの共有を設計レベルのみならず施工レベルまで導入し、必要最低限の情報のやりとりだけで、複雑な形状の設計・施工期間の短縮を実現した。

参考文献

- 1) J. P. RIZZUTO, M. SAIDANI, J. C. CHILTON, Multi-reciprocal element (MRE) space structure systems
- 2) Olga Popovic Larsen, Reciprocal Frame Architectuer, 2008
- 3) Rizzuto, J.P, The self-supporting multi-reciprocal grid (MRG) System using notched elements, IASS, vol41, n133, Aug. pp125-131,2000
- 4) Baverel, O., Multi-reciprocal grid system, IASS, vol40, n129, pp33-41, 1999
- 5) K. Goto, H. Noguchi, Form Finding Analysis of Multi-Reciprocal Element (MRE) Space Structure, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences '08, pp635, 2008
- 6) トウキョウ建築コレクション 2008 全国修士設計論文 文集 pp328-329,建築資料研究社, 2008
- 7) 久田俊明, 野口裕久：非線形有限要素法の基礎と応用,丸善株式会社, 1995

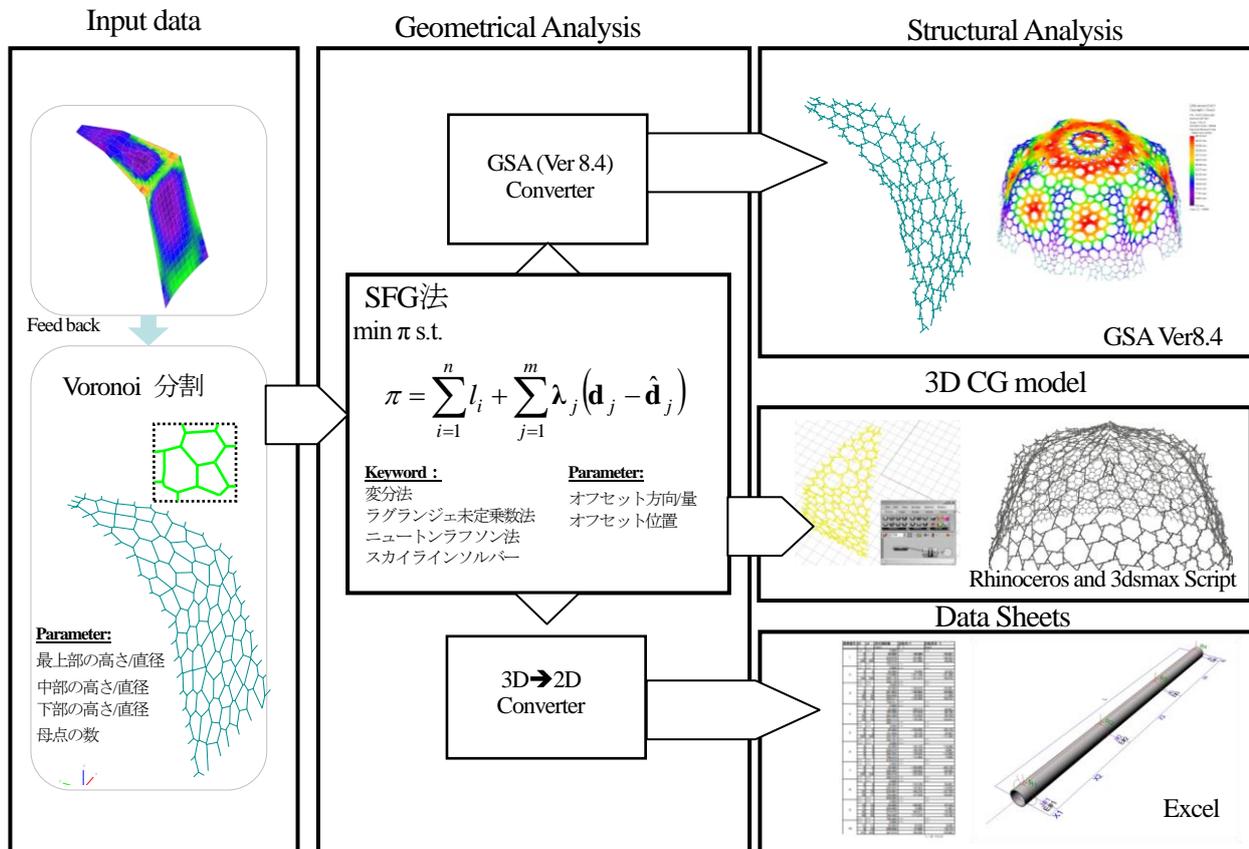


図4.7 “六甲枝垂れ”の設計データフロー

解の多様性を考慮したGA系解法によるラチスシェル構造の形態創生

沖田裕介¹⁾, 和田大典²⁾, 本間俊雄³⁾

1) 鹿児島大学工学部建築学科 学部生 okita@com.aae.kagoshima-u.ac.jp

2) 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生 wada@com.aae.kagoshima-u.ac.jp

3) 鹿児島大学大学院理工学研究科建築学専攻 工博・教授 honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

大スパン骨組構造物は軽量で複数部材の組合わせで構成できることから多くのドーム, 屋根架構に利用されている。しかし, その力学性状は部材単体での評価が一般的であり構造物全体の崩壊を有する座屈等の検討に対して解析的な手法を用いる必要がある。このような要求に対し, 構造最適化による形状決定が一つの設計手法として数多く研究・展開されている¹⁾。ただし, これらの解法はいずれも力学特性に対する最適化であり, 必ずしも意匠的な要求に軸足を置くものではない。

一方で, 大域的最適解を含む局所最適解など比較的评价の高い解(優良解)を積極的に利用することは, 設計者に多様な構造形状が提示でき, 設計支援につながると考える。本研究ではこの優良解探索手法として多点探索解法の一つである解の多様性を考慮したGA系解法ISGA(GA with immune system)を採用する⁴⁾。この解法は目的関数空間と設計変数空間の多様性を同時に満足する解法であり, 一度の試行で複数の解を獲得する。

本論文では, 著者らが自由曲面シェル構造に適用した手法⁵⁾を骨組ラチスシェル構造の構造形態創生に適用し, 多様な構造形状の獲得を目指す。解析例はまず, 総ひずみエネルギーを目的関数とした単層対称ラチスシェルの単一目的最適化(single-objective optimization)を扱い, 限界耐力計算による座屈条件をもって曲面形状を構成し, 線形座屈解析によって全体の座屈耐力を評価する。さらに, 非対称性を考慮したラチスシェルの単一目的最適化へ展開し, 感性的な制約を満足した構造形態創生の可能性を考察する。

2 解の多様性を考慮したGA系解法ISGA

ISGAは従来のGA系解法と比べて次の点が異なる。①形態決定に重要である設計変数空間の多様性を維持した解を探索する。②大域的最適解や局所最適解を含む比較的评价の高い優良解を探索する。

①に関してはいくつかの既往研究が報告されているが, ②まで踏み込んだ考え方は確立されていない。本GA系解法は従来のGAの計算パラメータの他に, グループ数 r と上位個体選択率 H , 記憶細胞数 M の設

定を行う必要がある。グループ数 r は設計変数空間の解状況, 上個体選択率 H は個体の評価の上限値に関係する。記憶細胞数 M は上位個体を記憶する上限値であり, 解の収束性とニッチ操作を行う際の個体間距離に関係する。これらのパラメータは問題毎に設定値を変更することで, 解空間特性を把握した優良解探索が可能となる。さらに, 既往の解法の殆どが目的関数空間上でニッチ操作を行っているのに対し, 本GA系解法は設計変数空間上で行う。これは目的関数空間上の一点における設計変数空間上の複数の解の選択を可能にするためである。詳細なアルゴリズムは文献4)を参照されたい。

3 最適化問題の定式化

3.1 単一目的問題の定式化

構造最適化問題は単一目的最適化問題を扱い, 一般に以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 & \text{Find} && \mathbf{A}, \mathbf{R} && \text{(設計変数)} \\
 & \text{Minimize} && \Phi(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \{f(\mathbf{A}, \mathbf{R})\} && \text{(目的関数)} \\
 & \text{subject to} && \sigma^L \leq \sigma_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq \sigma^U && \\
 & && \sigma_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) < N_{ci} / A_i && \text{(制約条件)} \\
 & && \mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U &&
 \end{aligned} \tag{1a,b,c}$$

ここで, \mathbf{A} :部材情報ベクトル, \mathbf{R} :節点情報ベクトル, $f(\mathbf{A}, \mathbf{R})$:目的関数, $\sigma_i(\mathbf{A}, \mathbf{R})$: i 部材の部材応力度, σ^L :許容応力度の下限値(圧縮力), σ^U :許容応力度の上限値(引張力), N_{ci} : i 部材の曲げ座屈限界耐力, A_i : i 部材の部材断面積である。

本研究で扱う設計変数は有限要素の節点座標と部材断面とする。その際, 設計変数の削除と滑らかな曲面表現のために, パラメトリック曲面の一つである有理テンソル積ベジェ曲面⁶⁾を用いる。有理テンソル積ベジェ曲面は複数の制御点と基底関数で定義される。曲面上に $m \times n$ 配置された有限要素上の任意の位置ベクトルを $\mathbf{r}_{kl}(x, y) = [r_x(u_k, v_l), r_y(u_k, v_l), r_z(u_k, v_l)]^T(u_k, v_l; [0.0, 1.0] \quad k=1,2,3,\dots,m, \quad l=1,2,3,\dots,n)$ とすると, この位置ベクトルは曲面形状を決定する $m+1 \times n+1$ 配置された制御点 $\mathbf{P}_{ij} = [x_i, y_j, z_j]$ より次式で表現される。

$$\mathbf{r}_{kl} = \mathbf{r}(u_k, v_l) = \frac{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u_k) B_j^{n'}(v_l) \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u_k) B_j^{n'}(v_l)} \quad (2a,b)$$

$$B_i^{m'}(u) = \frac{m'!}{i!(m'-i)!} u^i (1-u)^{m'-i} \quad (\text{バーンスタイン基底関数})$$

ここで、 w_{ij} :制御点 \mathbf{P}_{ij} の重み係数、 $B_i^{m'}(u)$: m' 次のバーンスタイン基底関数である。部材断面についても制御点を用いて同様な記述で定式化する。なお、断面積の値は鋼管リストを作成しリスト番号に設計変数を対応させる。

3.2 制約条件の設定

構造解析は許容応力度設計による制約条件に加えて座屈制約条件を与える。圧縮材の座屈に対する耐力は終局限界状態設計で用いる曲げ座屈限界耐力の式で評価する⁷⁾。なお、計算例はこれらを制約条件として与え、最終世代で得られた解に対して線形座屈解析を行う。

4 格子状対称ラチスシェルの構造形態創生

数値計算例は一辺が20mの正方形平面を有する格子状ラチスシェルの単一目的最適化を行う。解析モデルの初期形状は図1a, bに示す隅角部ピン支持の平板モデル(Model-A, 節点数:441, 要素数:840)である。なお、解析の際は対称性を考慮した1/4モデル(節点数121, 要素数:220)を採用する。解析領域と制御点配置は図1b, cである。

目的関数は総ひずみエネルギー最小化であり、次式で与えられる。

$$\text{Minimize } f(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K} \mathbf{d} \quad (\text{総ひずみエネルギー}) \quad (3)$$

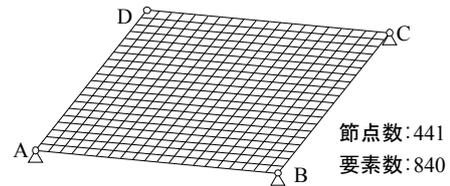
$$\text{subject to } \sigma^L \leq \sigma_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq \sigma^U \quad (\text{応力制約条件})$$

$$\sigma_i(\mathbf{A}, \mathbf{R}) < N_{ci} / A_i \quad (\text{座屈制約条件})$$

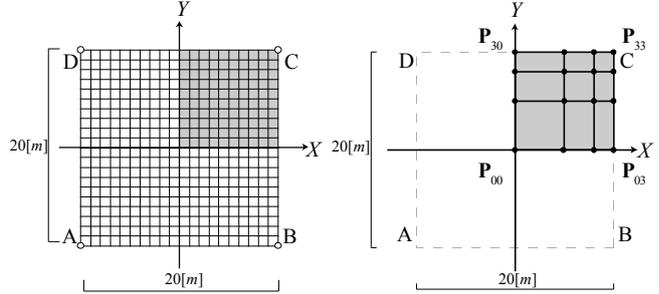
$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \quad (\text{側面制約条件})$$

ここで、 \mathbf{d} :節点変位ベクトル、 \mathbf{K} :剛性マトリクス、 $\mathbf{A}^L=1$, $\mathbf{A}^U=21$, $\mathbf{R}^L=0.0[m]$, $\mathbf{R}^U=7.0[m]$ である。載荷荷重は既往研究を参考に、長期に自重 $78.5[kN/m^3]$ と等分布荷重 $1.0[kN/m^2]$ を設定する²⁾。設計変数は曲面を表現する制御点のz軸座標と各部材の鋼管リスト番号である。なお、部材断面で扱う鋼管リストは表1に示す一般構造用炭素鋼管(STK400)21種類である。材料定数は、弾性定数 $E=2.1 \times 10^8[kN/m^2]$, せん断弾性定数 $G=7.8 \times 10^7[kN/m^2]$ とする。基本的なGAパラメータは表2の通りである。

解析結果を図2-4に示す。図2はISGA ($r=10$, $H=0.01$,



a. 初期形状(鳥瞰図)



b. 初期形状(平面図)

c. 解析領域と制御点

図1 解析モデル Model-A

表1 鋼管リスト[一般構造用炭素鋼管:21種類]

number	外径(mm)	厚さ(mm)	number	外径(mm)	厚さ(mm)
1	165.2	4.5	12	216.3	6.0
2	165.2	5.0	13	216.3	7.0
3	165.2	6.0	14	216.3	8.0
4	165.2	7.1	15	216.3	8.2
5	190.7	4.5	16	267.4	6.0
6	190.7	5.3	17	267.4	6.6
7	190.7	6.0	18	267.4	7.0
8	190.7	7.0	19	267.4	8.0
9	190.7	8.2	20	267.4	9.0
10	216.3	4.5	21	267.4	9.3
11	216.3	5.8			

表2 ISGAパラメータ Model-A

個体数	200	突然変異率	0.005
世代数	10000	記憶細胞数	100
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉

0.05, 0.1)の試行結果3例(form-1-9)をプロットした図である。ここで、横軸は世代数、縦軸は目的関数値を表している。図3は得られた解の構造形状(form-2-5)と線形座屈モード、座屈荷重係数 Λ である。なお、形状は部材断面の比率を表現して示す。form-2, 5の力学性状を図4に示す。ここで、図4断面分布の実線太さは部材断面面積の比率、軸力図の実線太さは軸力の比率を表す。

5 格子状非対称ラチスシェルの構造形態創生

5.1 凹凸曲面の制御

ここでは、曲面の凹凸形状を考慮した非対称ラチスシェルの構造形態創生を行う。凹凸形状の表現は文献5)で用いられている制御点高さ制約条件による方法を

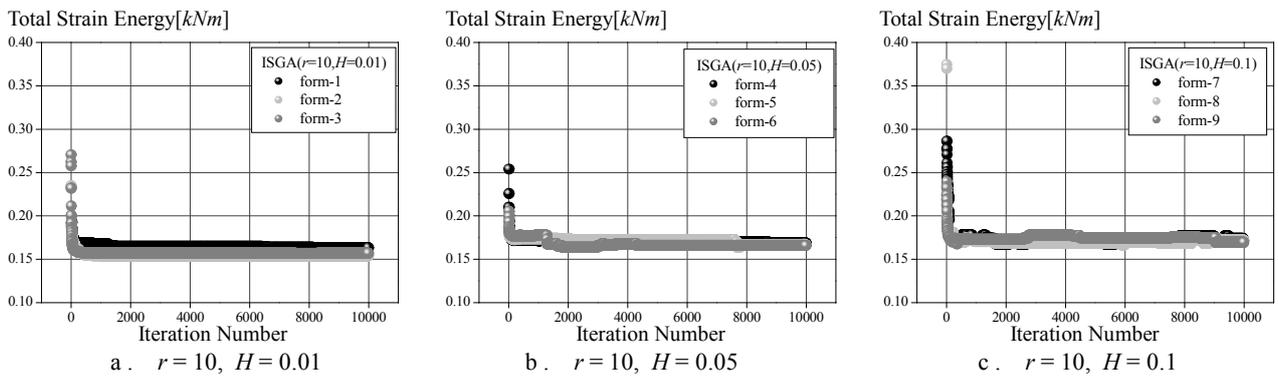


図2 解析結果 Model-A

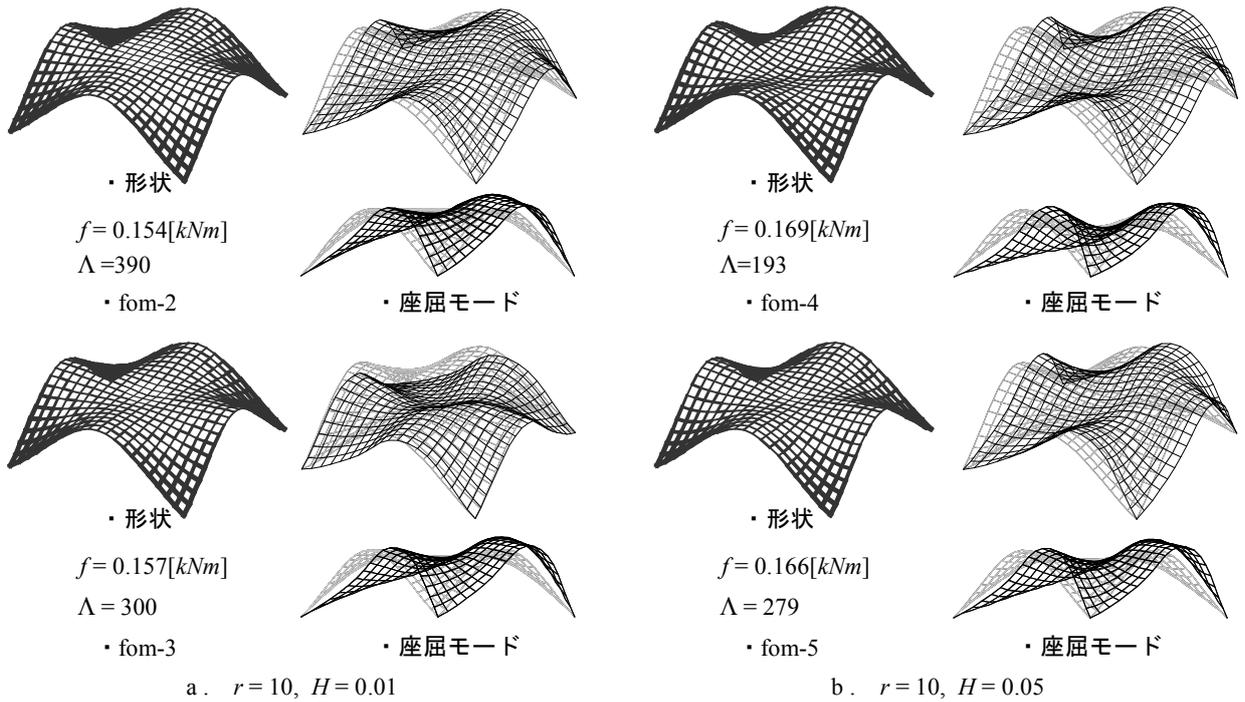


図3 構造形状例と座屈モード ($r = 10, H = 0.01, 0.05$) Model-A

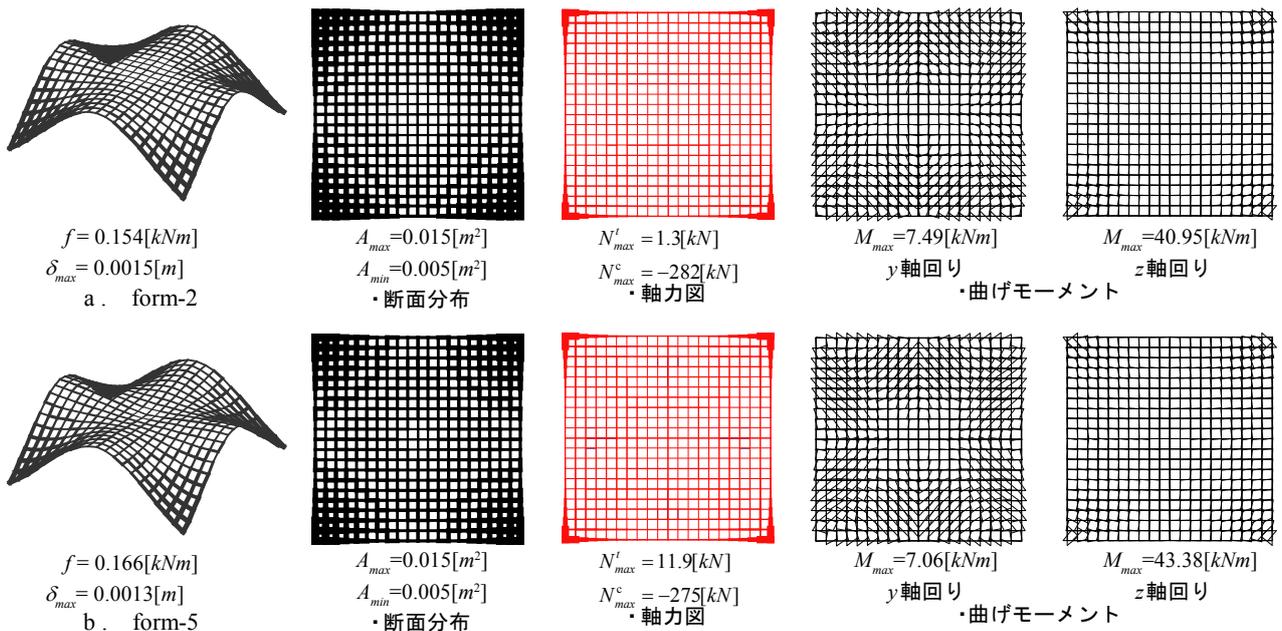


図4 form-2, 5の力学性状 ($r = 10, H = 0.01, 0.05$) Model-A

採用する。なお、この制約条件はRC曲面シェル構造の最適化で凹凸形状が得られることを確認しており、ここでは骨組構造においても同様な数値結果が得られるか検証する。曲面の凹凸制御は高さ制約を側面制約条件の外側に与えることで決定する。つまり、高さ制約値が側面制約の上限値以上であれば上に凸、下限値以下であれば下に凸となる。制御点高さ制約による凹凸形状イメージは図5a,bに示す。

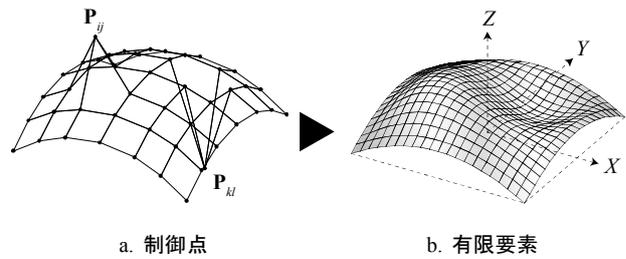


図5 凹凸形状イメージ

5.2 数値計算例

非対称ラチスシェルの形態創生例は図6aに示す解析モデル(Model-B)を初期形状とし、制御点は図6bに示す7×7配置とする。設計変数、各種制約条件、材料定数、荷重条件はModel-Aと同一であり、基本的なGAパラメータは表3とする。目的関数は式(3)総ひずみエネルギー最小化とし、高さ制約条件は以下に示す2ケースを与える。

i) Case-1

図6b黒●でプロットした点(P₁₁)が上に凸となるような制約条件を次式で与える。

$$z p_{11} = 25.0[m] \quad (4)$$

解析結果を図7-9に示す。図7はISGA (r=10, H=0.01, 0.05) の2度の試行結果(form-10-13)を同一空間上にプロットした図である。図8は得られた解の構造形状(form-10-13)であり、線形座屈モードと座屈荷重係数Λも示す。form-11の力学性状を図9に示す。

ii) Case-2

図6bに示す高さ制約条件を2点与えた計算例である。凹凸形状は左下の黒●でプロットした点(P₁₁)が上に凸、右上の黒●でプロットした点(P₅₅)が下に凸となるような制約条件を次式で与える。

$$z p_{11} = 25.0[m] \quad (5)$$

$$z p_{55} = -10.0[m]$$

解析結果を図10-12に示す。図10はISGA (r=10, H=0.01, 0.05) の2度の試行結果(form-14-17)を同一空間上にプロットした図である。図11は得られた解の構造形状(form-14-17)であり、線形座屈モードと座屈荷重係数Λも示す。図12にform-15の力学性状を示す。

6 考察

対称ラチスシェルの最適化において、ISGAはパラメータ設定を変更することで複数の解を探索する。H=0.01の時は試行毎の収束値がほぼ一点であり、Hの値を0.05, 0.1とすると収束値にバラつきが生じる(図2)。

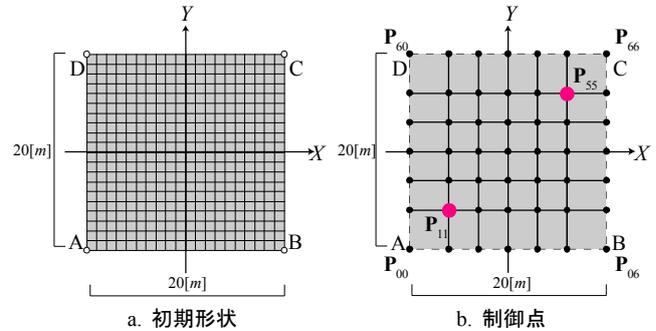


図6 解析モデル Model-B

表3 ISGAパラメータ Model-B

個体数	200	突然変異率	0.001
世代数	2000	記憶細胞数	100
世代交代率	0.9	選択方式	トーナメント
交叉率	0.7	交叉方式	二点交叉

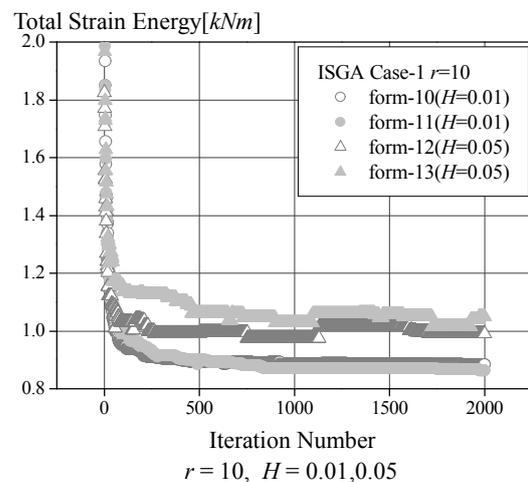


図7 解析結果 Model-B Case-1

得られた解の構造形状はH=0.01の時、シェル中央・境界部のライズが高い形状が探索され図4a, bより形状、断面が同時に最適化されていることが確認できる。なお、form-2はSGAで得られた大域的最適解と一致する。H=0.05とすると中央部ライズの異なる構造形状を複数探索した。これはHの値を高く設定することで設計変数空間上での解の多様性が維持された結果である。座屈荷重係数Λについて、H=0.01で探索された解は高い値を示す。また、H=0.05の時に得られたform-4, 5は目

的関数値がほとんど同値であるにもかかわらず座屈荷重係数が大きく異なる(図 3b)。

非対称性を考慮した単一目的最適化でも ISGA による試行結果は Case-1,2 とともに同様のパラメータ特性を示した(図 7, 10)。なお、 $H=0.05$ とした試行結果において目的関数値が収束途中で上下する傾向がある。これは ISGA がエリート戦略をとっておらず解の多様性に従って母集団を更新しているためである。図 8, 11 より高さ制約を与えることで得られた解は、いずれも制約位置が凹凸となるような形状を示した。また、Case-1 で得られた form-12, 13 は、同じ高さ制約であるにも関わらず制約点位置のライズが異なる形状が探索される(図 8b)。Case-2 高さ制約条件を 2 点与えた場合も、複数の形状が探索された。ただし、Case-2 は得られる解に類似性が見られ、今後試行回数を増やし解の多様性について検討する必要がある。座屈荷重係数は Case-1, 2 と対称時に近い値を示し、形態の安定性が確保されて

いる。

7 まとめ

本研究は解の多様性を考慮した GA 系解法を格子状ラチスシェル構造の構造形態創生に利用し多様な構造形状の獲得について検討した。数値計算例では格子状平板モデルを初期形状に縊ひずみエネルギー最小化を行った。対称性を考慮した最適化では応力制約、座屈制約に対して大域的最適解を含めた複数の解が探索され、得られた構造形状に多様性があることを示した。非対称性を考慮した単一目的最適化では、制御点の高さ制約というシンプルな方法を用いて凹凸形状を有したラチスシェル構造が獲得されることを確認した。優良解探索は感性的な制約を与えた際も、一定の評価値で多数の形状を獲得することができる。これらの結果より意匠面を考慮できる有効な解法の可能性が示せたと考えている。今後は得られた知見を基に種々の単一・多目的最適化問題に展開したい。

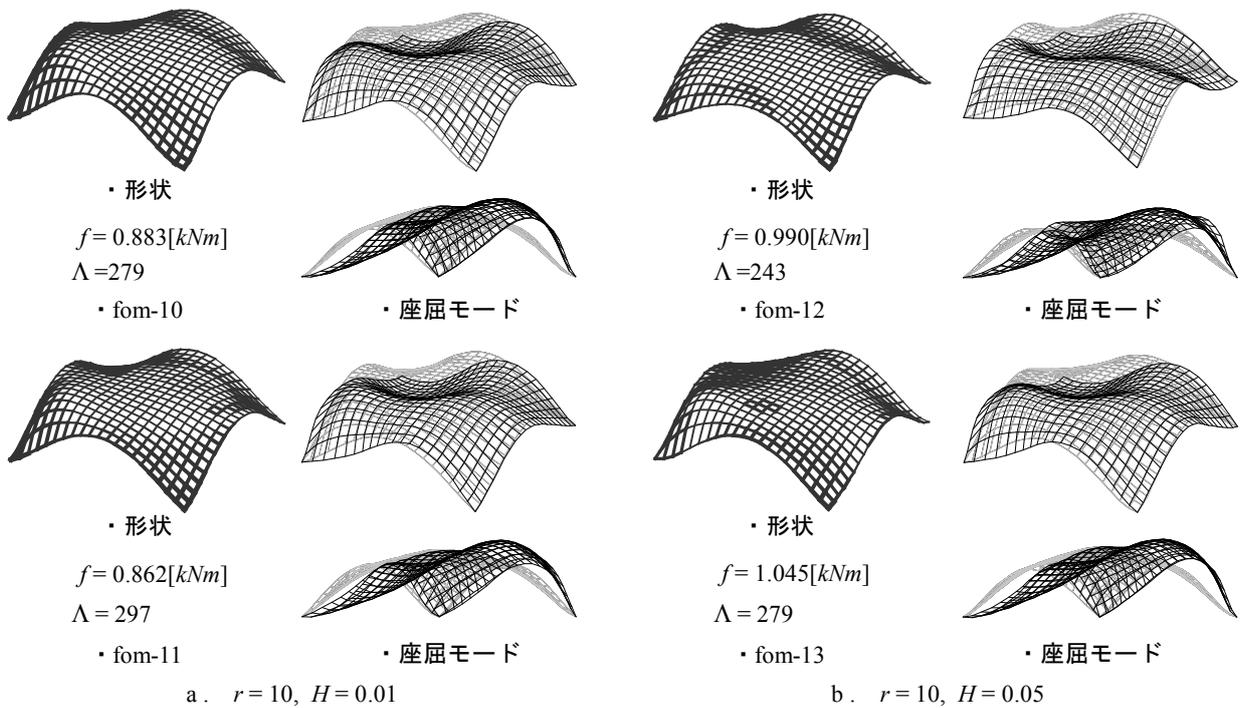


図 8 構造形状例と座屈モード ($r = 10, H = 0.01, 0.05$) Model-B Case-1

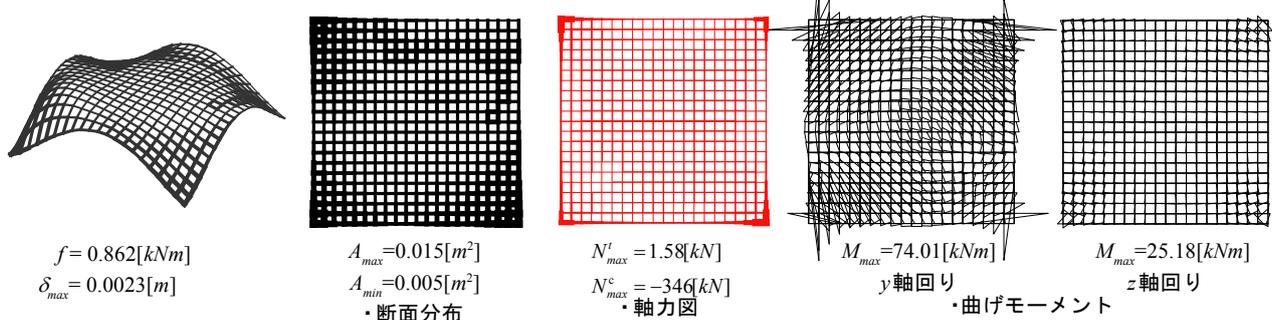


図 9 form-11 の力学性状 ($r = 10, H = 0.01$) Model-B Case-1

参考文献

- 1) E. Ramm, "Shape Finding Methods of Shells", Bulltin of the International Association for Shell and Spatial Structures:IASS1992, **33**, 89-98, 1992
- 2) 大森博司, 山本憲司: 応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究その2 スペースフレームへの適用, 日本建築学会構造系論文集, **503**, 77-83, 1998. 1
- 3) 藤田慎之輔, 大崎純: ラチスシェルの部材長一様化制約下でのひずみエネルギー最小化, 日本建築学会大会学術講演会, 821-822, 2010. 9
- 4) 本間俊雄, 野瑞憲太: 解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, **614**, 35-43, 2007. 4
- 5) 和田大典, 本間俊雄: パラメトリック曲面の制御点制約条件を利用した非対称曲面シェルの構造最適化一解の多様性を考慮したGA系解法の適用一, 日本建築学会

大会学術講演会, 823-824, 2010. 9

6) 杉原厚吉: グラフィックスの数理, 共立出版, 1995

7) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 日本建築学会, 2002

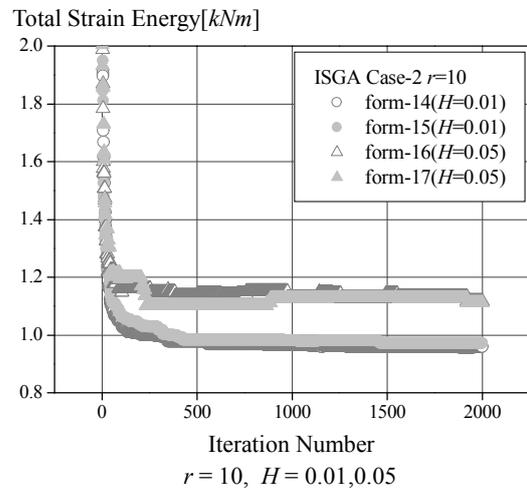


図 1 O 解析結果 Model-B Case-2

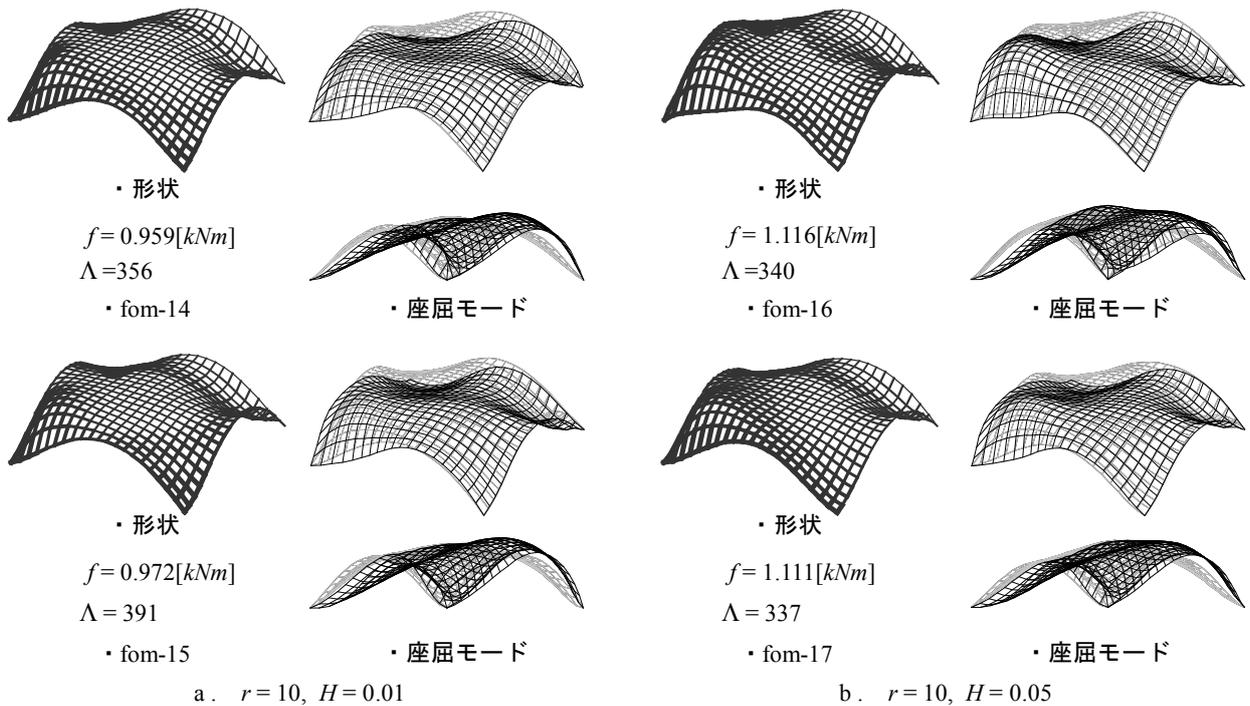


図 1 1 構造形状例と座屈モード ($r = 10, H = 0.01, 0.05$) Model-B Case-2

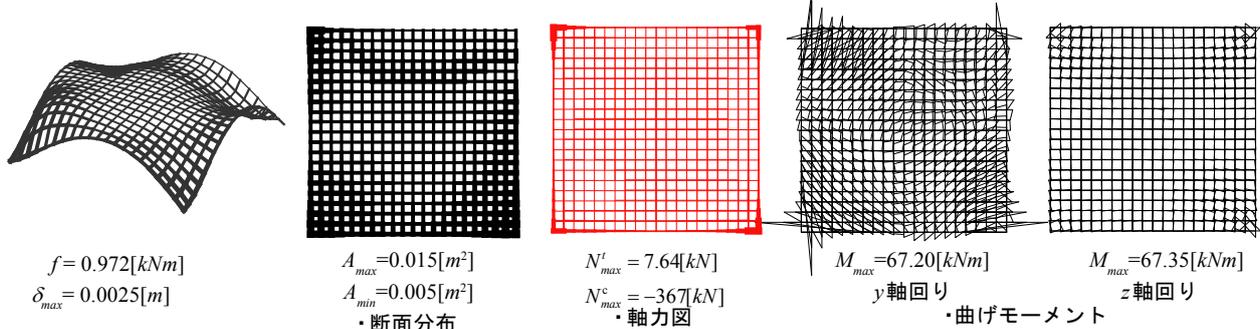


図 1 2 form-15 の力学性状 ($r = 10, H = 0.01$) Model-B Case-2

部材転用・再利用効率を目的とした 住宅設計支援システムに関する研究

林将利¹⁾，堀駿²⁾，新谷真人³⁾

1)早稲田大学創造理工学研究科建築学専攻，大学院生，masa.h.407@akane.waseda.jp

2)早稲田大学創造理工学部建築学科

3)早稲田大学理工学術院（建築学），教授

1 序

近年の産業廃棄物削減に対する世情の高まりを受け、住宅産業分野においては「長期優良住宅（いわゆる 200 年住宅）」の制度化や、国内企業による建設廃棄物抑制に繋がる住宅の開発等が数多くなされている。一方で、そのような問題に対し、最適化手法等の数値シミュレーションによる解決方法を提案している研究も多くなされてきている。大森ら¹⁾は最適化手法の目的関数としてライフサイクルコストを直接的に扱う方法を提案しており、また澤田ら²⁾は、詳細な調査に基づいた鋼構造のコスト算出法を考慮した実際の最適設計を提案している。

また、生活スタイルのサイクルはおよそ 20 年であるとの見方もあり³⁾、比較的短期間の使用を前提として住宅を解体・再生利用し、廃棄量を抑えるという考え方も示されている。このような立場においては、様々なプランや計画の変更に対して、いかに高い再利用率を保ちながら部材の転用が可能かということが課題となる。

本研究では後者のように住宅を 20 年程度の短中期間で新築・解体・転用するリサイクルシステム（以降「20 年住宅」と称す）の可能性を数値的にシミュレーションすることを目的とし、複数の住宅プランのモデルを想定して検討を行った結果を示す。

2 メタボリズムから長期優良住宅へ

日本においては建築のリサイクルということを主眼とした主張は 1950 年代後半から存在し、特に黒川紀章や槇文彦らによるメタボリズム運動が有名である⁴⁾。これは、生物の細胞が新陳代謝を繰り返すように、社会の成長や変化に対応するような建築の概念を体現したものであり（図 1）、近代建築がモチーフとした恒久的な機能を持つ機械のイメージと対照的なものである。

その一方で、メタボリズムの建築には、後年に部材ユニットの交換や設備機能の更新を行う事が非常に困難であるという実際上の問題が明らかになっている。

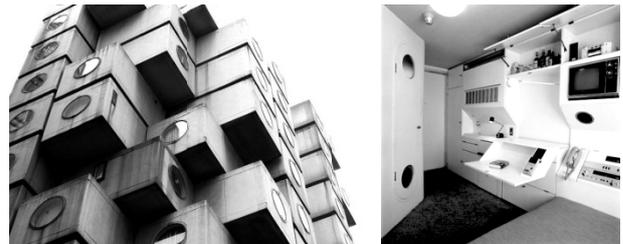


図 1 中銀カプセルタワービル（左：外観 右：内観）

メタボリズムの一部の価値観を踏襲するような形で取り組まれた制度が、今日の「長期優良住宅（200 年住宅）」となっている。2007 年に自民党住宅土地調査会から「200 年建築住宅ビジョン」が発表された。スケルトン（構造躯体）は耐久性・耐震性を確保、インフィル（内装・設備）は可変性を確保することを掲げ、計画的な維持管理と住宅の質（省エネ、バリアフリー）を具現化する為、家歴書の作成やリフォームローンの充実化、補助金制度も導入されている⁵⁾。

しかし、この制度は景気対策の一環として導入された側面が決して小さいわけではなく、インフィルの更新や老朽化の対策、また将来的な気候や災害、今後の法律の改正によっては既存不適格となる場合も可能性として十分考えられ、技術的な観点からは裏付けが十分であるとは言いがたい。また、200 年建ち続けることを前提とした頑強な構造躯体が、ライフサイクルの観点から常に経済的であるとも限らない場合がある。

前述のように、本研究では 20 年前後の短中期間の周期で解体・創生を繰り返し、使用した柱、梁などの部材が循環するという 20 年住宅リサイクルシステムの可能性を検討する。短中期のサイクルにおいては、部材の再利用に無配慮な計画では結局スクラップアンドビルドに陥る可能性があり、住宅設計においては、各部材がどのように再利用可能か十分にシミュレーションされる必要がある。

3 20年住宅の設計支援システム提案

転用可能な部材の割合を高めていくことをコンセプトに掲げた事例として、セキスイハイムによる「再築システムの家」がある⁶⁾。90%近くの部品を工場で組み立て出荷するというシステムの為、ユニット単位での増改築が容易であるが、「ユニット」を最小単位としている為、法規上で定められた搬入する際のサイズ(高さ3150mm、幅2500mm)が建築計画上の制約となり得る⁵⁾(図2,3)。



図2 ユニットの搬入⁷⁾



図3 ユニットの運搬⁷⁾

上記のようなユニット住宅のように、部材リサイクルが可能とされている従来の住宅は、設計段階である程度の転用用途を想定している。つまり、解体後、ほぼ同規模の住宅に転用するといった想定のもとで設計している。もしくは、数種類の規格化された住宅間でのみ部材の転用を行うという前提がある。いずれにせよ、部材を効率良くリサイクルする為には、転用後の用途を十分に検討しておく必要があると考えられる。

本論で提案する20年住宅においても同様の事が言え、部材リサイクルを行う為には、例え1つの住宅を設計する際にも、あらかじめ20年毎にプランがどのように変遷していくのかを想定し、そのことを踏まえた上で実際にリサイクルする部材の設計を行う必要がある。しかし、住宅に対する要求は多岐に亘り、20年毎の変遷を先だつて想定しておくという事は極めて非現実的である。よって、これまでのプランや寸法体系を分析した上で、分析に基づく住宅の図形的モデルを大量に与え、数値シミュレーションを用いて確率統計論的に計算を行い、部材が再利用しやすい住宅を提案することを本研究の目的とする。一般的には、構成部材が小さいほど転用が容易と考えられ、そのような寸法体系を有する住宅が部材を再利用しやすいと言えるが、構成部材が小さいほど全体の部材数が大きくなる為、解体や組み立て時の効率性が低下する。そこで、これら2つの因子を効率よく評価できる目的関数を設定し、最適化問題としてシミュレーションを行っていく。

4 多目的最適化問題の定式化

4.1 概要

本論では住宅の平面計画に対して壁を線分に置換することで住宅プランを模式化し、図形的に扱われた住宅の辺上に「割当単位」を配置していく。割当単位とは、柱や梁といった部材配置の基準となる要素であり、ここでは高さを階高とし幅は3種類の寸法600mm、1200mm、1800mmを与え、それぞれ割当単位a、b、cとする。同一の割当単位の内部には同寸法、同量の部材が配置されると考えられるので、割当単位が効率よく住宅プランに充足されれば、効率の良い部材配置が可能である。また、複数の割当単位を与えることで割当単位の総数を減らすことができ、結果として解体や組立の効率性の向上を期待できる。

・目的関数 (Objective Function)

本論では多目的遺伝的アルゴリズムの1つであるSPEA2⁸⁾を最適化手法に用いて多目的最適化問題を解く。3種類の割当単位を住宅プランに配した後、 k 番目の住宅における任意の割当単位の割合 ${}_k R_i$ を算定する(表1)。 ${}_k R_i$ は(2)式で与える。各部材ごとに ${}_k R_i$ の変動係数(COV)を求め、それらの平均値 f_V を目的関数の一つとする。また、住宅の割当単位数と非割当単位数の合計 ${}_k N$ に対する割当単位数の比率を f_N とする。 f_N が高い値を示すと、後に各住宅で共通の基準寸法部材を抽出する際の基準寸法部材率向上に繋がる一方で、構成部材が小さくなる為了解体や組立の効率性が低下する事になる。

$$\text{minimize } f = \begin{cases} f_V = \frac{\sum COV({}_k R_i)}{3} \\ f_N = \frac{\sum {}_k N_i}{\sum {}_k N} \end{cases} \quad (i = a, b, c) \quad (1)$$

$${}_k R_i = \frac{{}_k N_i}{\sum {}_k N_i} \quad (i = a, b, c) \quad (2)$$

$${}_k N = \sum {}_k N_i + N_r \quad (i = a, b, c) \quad (3)$$

${}_k N_i$: k 番目の住宅における各割当単位数
 N_r : 非割当単位数

表1 割当単位の割合

	model-1	model-2	...	model-n
割当単位a	${}_1 R_a$	${}_2 R_a$		${}_n R_a$
割当単位b	${}_1 R_b$	${}_2 R_b$...	${}_n R_b$
割当単位c	${}_1 R_c$	${}_2 R_c$		${}_n R_c$

・設計変数 (design variable)

設計変数は、住宅の構成部材に対する割当単位の配置とする。割当単位の配置が変わることで、規格ごとの転用部材数及び住宅の構成部材数が変動する。寸法の大きい構成部材に対し割当単위를割り付ける場合、600mmの割当単位3つと1800mmの割当単位1つでは、割当単位数が同等でありながら割当単位数が異なる。

4.2 数値解析例

二つの目的関数がトレードオフの関係性にあるかを例題により確認する。60000mmの線 (Wall Line) を住宅の壁に見立て、それぞれ model-1、model-2...、model-50 とする。Wall Line の壁と開口部の寸法は乱数で与える (図5)。

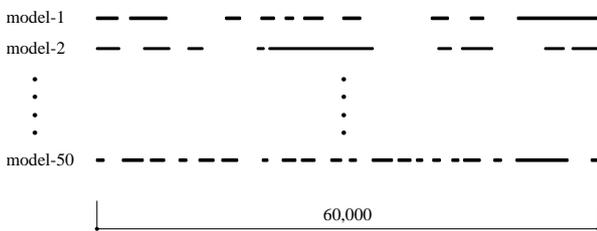


図4 例題における解析モデル

例題では Wall Line の総数を 50 とし、多目的最適化問題を解いた。以下、目的関数である f_V を横軸、 f_N を縦軸にとり、双方の目的関数の最小化問題として得られた Pareto 解の結果を示す (図6)。

表2 GA パラメータ

個体数	Population	100
世代数	Generation	300
交叉率	Probability of Crossover	1
突然変異率	Mutation rate	0.02

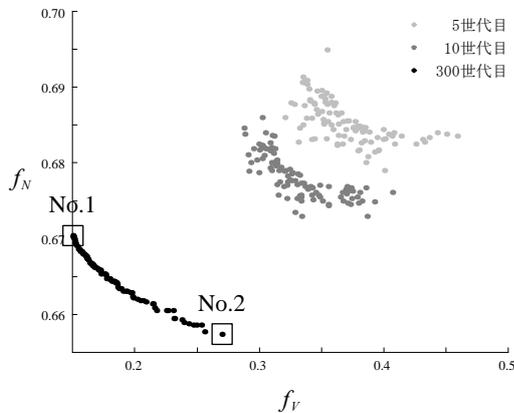


図5 例題の Pareto 解

4.3 解析結果と考察

得られた Pareto 解に含まれる 100 個体数のうち、2つの解 (No.1、No.2) を提示する。No.1、No.2 それぞれについて、model-1 から model-50 までの割当単位数 R_i と構成部材数 N 、割当単位数 N_i の結果を表3、4にまとめる。No.1 について割当単位数 R_i をみると、No.2 よりも割当単位 a、b、c それぞれの割合がモデル間で平滑化されていることがわかる。

表3 No.1 の結果一覧

	model-1	model-2	...	model-50
割当単位a数	12	13		13
割当単位b数	8	8		7
割当単位c数	5	6		5
${}_k N$	35	35		43
$\Sigma {}_k N_i$	25	27	...	25
$\Sigma {}_k N_i / {}_k N$	71%	77%		58%
${}_k R_a$	48%	48%		52%
${}_k R_b$	32%	30%		28%
${}_k R_c$	20%	22%		20%

表4 No.2 の結果一覧

	model-1	model-2	...	model-50
割当単位a数	9	10		12
割当単位b数	8	8		9
割当単位c数	6	7		4
${}_k N$	33	33		43
$\Sigma {}_k N_i$	23	25	...	25
$\Sigma {}_k N_i / {}_k N$	70%	76%		58%
${}_k R_a$	39%	40%		48%
${}_k R_b$	35%	32%		36%
${}_k R_c$	26%	28%		16%

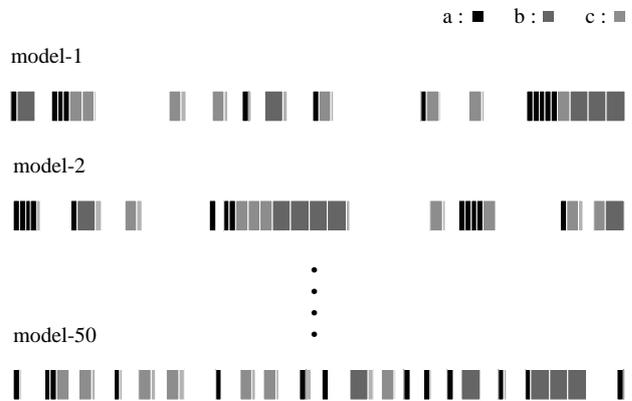


図6 No.1 の解析モデル結果

5 住宅モデルへの適用

5.1 住宅モデルの設定と割当単位の配置問題

以上に設定した最適化問題の定式及び条件を用いて、住宅への適用を行う。本論では、4つの住宅 model-1、model-2、model-3、model-4 (図 8) に対して各部材の転用・再利用効率に関するシミュレーションを行う。住宅の規模がそれぞれ異なるため、住宅プランにおける全部材数もそれぞれ異なる値となる。

4つの住宅モデルに3種類の規格寸法 600mm、1200mm、1800mm を与えた割当単位 a、b、c を配置する。各住宅モデルの割当単位数 $k R_i$ のばらつきを抑制することで、複数の住宅モデルに対する各割当単位の割合を一定に保つことを目的とする。

5.2 構造躯体の架構システム

図 10 に各モデルの割当単位の配置の最適化、及び実際に構造部材を配置した結果を示す。最左列は、各住宅における割当単位を割り付けた段階である。その割当単位を元に、柱、梁、ブレースを配置したものの中及び右列である。ここで、柱、梁、ブレースは以下の基準を元に

配置した。

柱に関しては、割当単位の割り付けが各住宅、各階の平面上に与えられているので、割当単位の両端には必ず配置する。その際、割当単位が重なる地点においてはその位置に共通の柱を配置する。

柱位置を決定した後、大梁・小梁を架ける。その際、制約として梁間寸法の最小値を設定し、短すぎる梁が生じたりあまりに柱の間隔が狭くなりすぎたりしないようにした。

柱・梁の断面寸法は接合部を全てピン接合とした上で長期許容応力度設計に基づき算定する。

水平力はブレースに全て負担させることとし、割当単位の位置に適宜ブレースを配置していく。ブレース断面を決定すると、割当単位の位置に内装された各ブレースが負担する事の出来る耐力が決まるので、層せん断力以上となるブレース本数を算出し、その本数を各方向に割り当てる。

割当単位の内部に配置される部材は、3種類の基準寸法に統一されるので、お互いのプランに対して転用が可能な部材と言える。

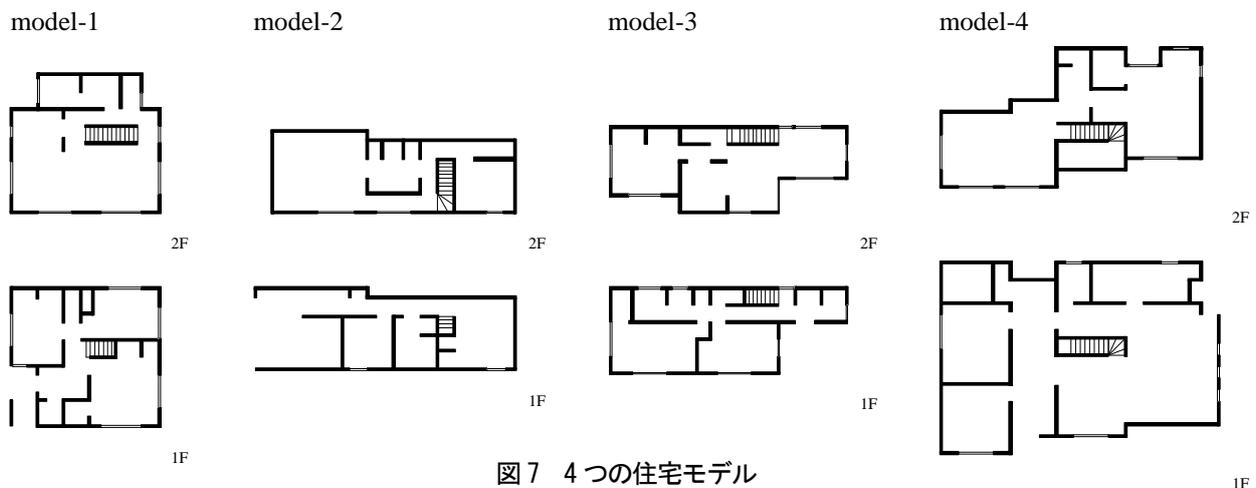


図 7 4つの住宅モデル

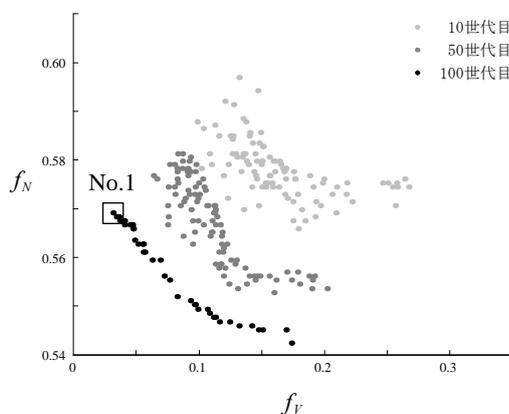


図 8 住宅モデルの Pareto 解

表 5 No. 1 の結果一覧

	model-1	model-2	model-3	model-4
割当単位a数	30	41	35	63
割当単位b数	21	27	21	41
割当単位c数	6	8	7	13
$k N$	116	121	114	199
$\Sigma_k N_i$	57	76	63	117
$\Sigma_k N_i / k N$	49%	63%	55%	59%
$k R_a$	53%	54%	56%	54%
$k R_b$	37%	36%	33%	35%
$k R_c$	10%	10%	11%	11%

	割当単位の配置	梁伏図	構造アイソメ図
model-1	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>
model-2	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>
model-3	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>
model-4	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>	<p>2F</p> <p>1F</p>

図9 各住宅モデルにおける部材配置

表6 部材断面リスト

部材		断面サイズ	単位重量 (kg/m)
梁	B1	H-100×50×5×7	9.3
	B2	H-125×60×6×8	13.1
	B3	H-148×100×6×9	20.7
	B4	H-175×90×5×8	18
	B5	H-200×100×5.5×8	20.9
	B6	H-194×150×6×9	29.9
柱	C1	□-50×50×3.2	4.5

表7 各部材の個数

部材	長さ(mm)	個数				
		model-1	model-2	model-3	model-4	
梁	B1	600	30	41	35	63
		1200	30	28	21	41
	B2	1800	6	8	7	13
柱	C1	3000	78	116	100	146
ブレース	M16	3050	20	10	30	2
		3200	42	46	28	74
		3450	6	6	8	16

表8 各部材重量 (kg)

		model-1	model-2	model-3	model-4
基準寸法部材重量	梁	644	730	595	1116
	柱	1053	1566	1350	1971
	ブレース	280	257	271	386
全重量		4106	4411	3860	7107
重量比		(48.1%)	(57.9%)	(57.4%)	(48.9%)

表9 目的関数の比較

		割当単位段階	躯体割当段階
f_V	梁	0.027	0.093
	ブレース		0.397
f_N		0.569	0.525

割当単位として与えた規格寸法 600mm、1200mm、1800mm を有する梁とそれぞれの割当単位に対応した 3 種類のブレースの総数を表に示す (表 7)。また、柱に関しては全て同一断面とし、階高 3000mm を制約としたので全て転用可能部材となっている。さらに、柱、梁、ブレースを等価に扱う目的で、各重量を算出し、基準寸法部材の合計重量と全重量との比を纏めた物が表 8 である。概ね 50% 以上の割合で基準寸法部材となっている事がわかる。

割当単位段階と同様に、住宅を構成する全部材重量に対する基準寸法部材の重量の割合を算出した値が表 9 の f_N である。また、各住宅モデルの梁及びブレース数を対象として、そのばらつき具合を算出した値が表 9 の f_V である。 f_N に関しては、躯体架構計画の際に与えた小梁等

の 2 次部材が増えたとはいえ、全重量に占める割合が小さいため、割当単位段階とさほど差異はなかった。一方、 f_V においては、各住宅モデルのブレース数にばらつきが生じたため、割当単位段階と大きな差が生じた。ブレース数にばらつきが生じた理由としては、住宅によって建築面積当たりの壁枚数に差があり、少ない壁で多くの層せん断力を負担したり、逆に割当単位全てにブレースが充填されなかったりするからと考えられる。従って、割当単位の段階と躯体架構計画段階で、 f_V の差を微小にするためにはブレースのばらつきを抑える必要がある。

6 結語

本論では部材循環の効率化を目指し、共通する基準寸法を定め、それらを複数の住宅モデルに亘って割り付けていくことで、転用効率を高めるという方法を検討した。

具体的には、各割当単位の比率を各々の住宅で平滑化すること、且つより多くの割当単位で住宅を構成することを目標に多目的最適化問題を定式化した。

今後は、従来のプランや寸法体系を分析した上で、より多くの試行を可能とする住宅モデル生成の確立、および割当単位段階と実際に躯体に構造部材を配置する段階において、部材量を的確に評価できる目的関数の設定が必要である。以上を踏まえ、個別の住宅を設計する際にも転用可能な部材を抽出できるような手法を纏めていき、環境負荷低減を目指した住宅設計指針を提案したい。

参考文献

- 1) 大森博司、野田賢：遺伝的アルゴリズムによる建築構造物のライフサイクルデザインに関する研究、日本建築学会構造系論文集第 601 号、pp181-188、2008.5
- 2) 澤田樹一郎、松尾彰、清水斉、安井孝、南波篤志：鉄骨制作コストの簡易評価手法と鉄骨骨組の最適設計、日本建築学会中国支部研究報告集第 28 号、pp221-224、2005.3
- 3) Daniel J. Levinson(著)、南博(翻訳)：ライフサイクルの心理学、講談社、1992.5
- 4) 吉松秀樹：メタボリズム、INAX 出版、1997.10
- 5) 社団法人 住宅生産団体連合会 HP 参考 URL：
<http://www.judanren.or.jp/200/index.html>
- 6) セキスイハイム再築システムの家 参考 URL：
<http://www.uru.sekisuiheim.com/saichiku/index.html>
- 7) 公害対策技術同友会：資源環境対策、vol.44、No.1、2008
- 8) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. :SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. In Technical Report 103 , Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, 2001.5
- 9) 三井和夫、大崎純、大森博司、田川浩、本間俊雄：発見的最適化手法による構造フォルムとシステム、コロナ社、2004.7

海洋波の生成アルゴリズムに基づく空間構造

— 形態の生成理論と適用例の考察 —

○朝山秀一¹⁾

1)東京電機大学未来科学部建築学科, 教授, 工学博士, asayama@cck.dendai.ac.jp

1 はじめに

筆者らは樹木や地形など自然界に存在する形態システムの合理性を建築構造に取り込むことで、新たな構造形態の可能性を拡大することを試みてきた¹⁾²⁾。本論文では、同様な主旨で、海洋波の一種である「うねり」の生成理論を用いて空間構造の形態を誘導し、その適用例を示す。波動は、万物に存在する基本的現象で、固体、液体、気体のいずれにも存在する。また、波形トタン板のように、金属にその形態を適用すれば、面の剛性を高める効果があることも知られている。本論文では、はじめにベルヌーイの定理と波動方程式から海洋波のうねりの解に至る過程を示し、うねりの曲面をもつ空間構造形態と、ほぼ同体積の材料で構成されるアーチ構造を比較して、その力学的特徴と可能性を考察した。なお、本論文の式展開の部分は、本年度の日本建築学会大会で既に発表したものであり³⁾⁴⁾、ここでは新たな比較例題を加えて、空間構造への応用の可能性を考察した。

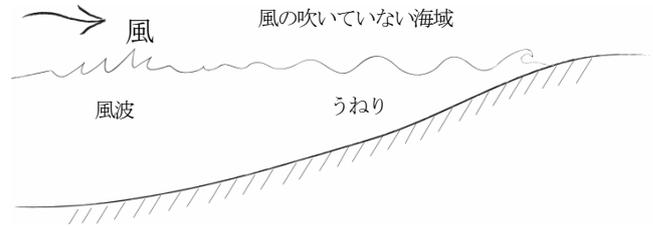


図1 うねりの発生メカニズム

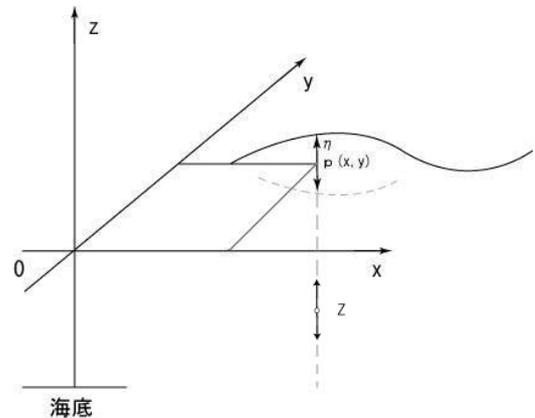


図2 平均水面と海面下における波の揺れ

2 うねりの生成理論

2.1 海洋物理学におけるうねりの概念

海面には風、起潮力、地震などが原因となり様々な種類の波が生じている。図1のように、海面上の強風域で風が引き起こした風波は、次第に発達・伝播する。風の吹いていない領域に達すると、風によるエネルギー供給が無くなり、波は発達をやめてそのまま伝播するが、これをうねりと呼んでいる⁵⁾。

2.2 基本方程式

よく知られているベルヌーイの定理は、

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(\mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) + \frac{P}{\rho} + gz = \text{一定} \dots \dots (1)$$

と書くことができる。海洋のうねりは、一定気圧下の等密度流体($P/\rho = \text{一定}$)として取り扱えるので⁴⁾、(1)式は速度ポテンシャル ϕ を用いて、

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right) + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)^2\right] + gz = \text{一定} \dots \dots (2)$$

となる。図2のように、平均水面 $z=0$ (位置 $P(x,y)$)における波の揺れは、波の振幅が海底までの距離に対して十分に小さい時、(2)式は水面下で成り立つことになり、運動エネルギーが小さいと仮定⁶⁾すれば、

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right) + gz = \text{一定} \dots \dots (3)$$

となる。波の鉛直方向の速度 V_z は海水の z 方向変位の時間的変化なので、

$$V_z = w = \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = \frac{\partial z}{\partial t} \dots \dots (4)$$

ここで(3)式の両辺を時間 t で微分すれば、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right) + g \frac{\partial z}{\partial t} = 0$$

式(4)の関係により、

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right) + g \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = 0 \dots \dots (5)$$

ここで、平均海面 $z=0$ においても (5) 式は成立するので、

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\right)_{z=0} + g\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=0} = 0 \dots\dots (6)$$

また、海底 $z=-h$ では、上下方向に揺れることができないので、

$$v_z = \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=-h} = 0 \dots\dots (7)$$

一方、音波を除くと、海水は比圧縮性流体と考えることができるので⁶⁾、それを数式で次のように表すことができる。

$$\text{div}V = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \dots\dots (8)$$

次に、うねりを図2の xy 平面内を正の方向に進む波⁶⁾と考え、さらにその鉛直方向の速度は z 方向の位置に依存するとして、速度ポテンシャル ϕ を求める。解を、

$$\phi = Z(z)\cos(k_1x + k_2y - \omega t) \dots\dots (9)$$

と仮定して、(8)式の解を、境界条件(6)、(7)式の下に解くと、

$$\phi = A(e^{kz} + e^{-2kh}e^{-kz})\cos(k_1x + k_2y - \omega t) \dots\dots (10)$$

但し、 $k^2 = k_1^2 + k_2^2$ を得ることができる。

ここで、水深 z における z 方向の振幅を η とすると、(4)式より、

$$V_z = \left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right) = \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

となり、(8)式を z で微分したものを、時間 t で積分して、 $x = y = t = 0$ における初期値を $\eta = 0$ とすれば、

$$\eta = \frac{Ak}{\omega}(e^{kz} - e^{-2kh}e^{-kz})\sin(k_1x + k_2y - \omega t) \dots\dots (11)$$

を得る。ここに、 η は、海水の z 方向の振幅を示す。

波の進行方向と波数

本項では、うねりが図3に示すような方向余弦 l 、 m を持ち、 x, y 平面内を伝播する平面波と考える。

$$\xi = a \sin(lx + my - ct) \dots\dots (12)$$

で表せる波は速度 c で原点から θ 方向に進んでおり、時刻 t における振幅 ξ は、

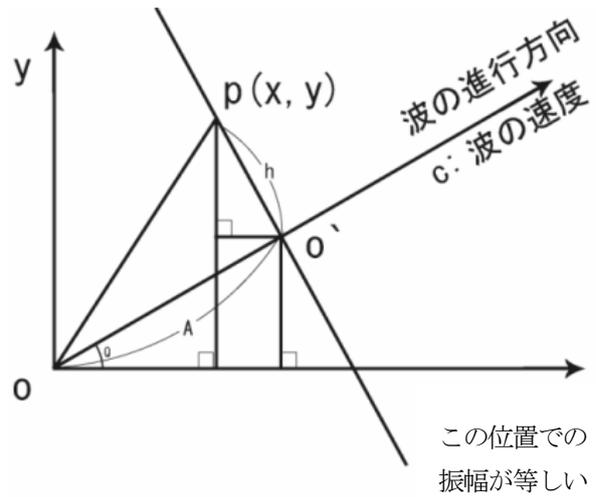


図3 波の進行方向と振幅の関係

$$\xi = a \sin(A - ct) = \text{一定}$$

となり、波の進行方向に直交する線上で一定となることが知られている。

海洋のうねりの変位を示す(11)式は、波動方程式

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} \dots\dots (13)$$

を満たさなくてはならない。

(11)式を(13)式に代入して、

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} = \omega / c \dots\dots (14)$$

の関係を得ることができる。

また、(11)式を

$$\eta = \frac{A(1 - e^{-2kh})}{c} \sin \left(\sqrt{k_1^2 + k_2^2} \left(\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} x + \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} y - \frac{\omega}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} t \right) \right) \dots\dots (15)$$

と変形し、(12)式と比較すれば、波数と方向余弦の関係、

$$\frac{k_1}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = l = \cos \theta, \frac{k_2}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} = m = \sin \theta$$

が得られ、(11)式で示される海水の z 方向の振幅 η は、(14)式から、波の速度 c 、周波数 ω 、海底の深さ h の影響を受けることが分かる。

図4は上述の理論に基づいて計算したうねりの振幅と水深の関係で、水深100m、波の速度20m/sec、波高10mとし、海水の粒子の動きが深さ方向に変化する状況を示している。海面下25mでは振幅が2m、50mでは0.4m、海底では0と水深が深くなるにつれて急速に振幅が小さくなる事が分かる。

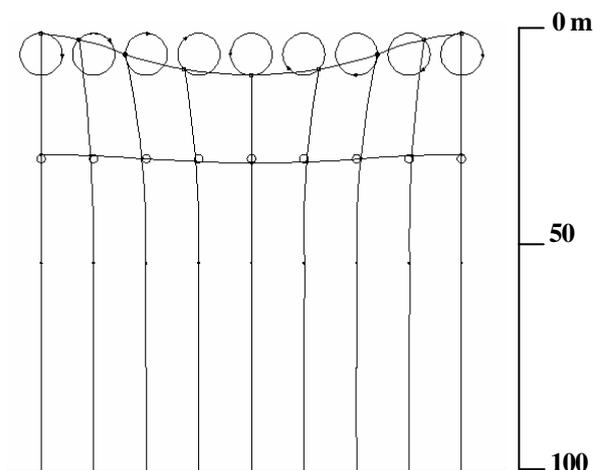


図4 水深と振幅の関係

3 海洋波に基づく構造形態

ここでは、前章で求めたうねりの基本式に基づき、うねりを持つ海面のような形態をした構造を生成することを試みる。図5は、うねりの基本式において水深を4000m(太平洋の平均水深)とし、波の速度 c 、波高 hw 、波の伝搬方向 θ 、周波数 ω 、波動の継続時間 t をパラメータとして生成した形状である。表1は、Model 1~6に関するパラメータの一覧表である。図5、(a)、(b)、(c)は方向に波が伝搬した波形で、継続時間を10、20、30秒としたものである。図5(d)はx、y方向に波が伝搬したものである。図5(e)、(f)はx、y方向とx軸に 30° の方向に波が伝搬した場合の波形で、様々な波形が確認できる。

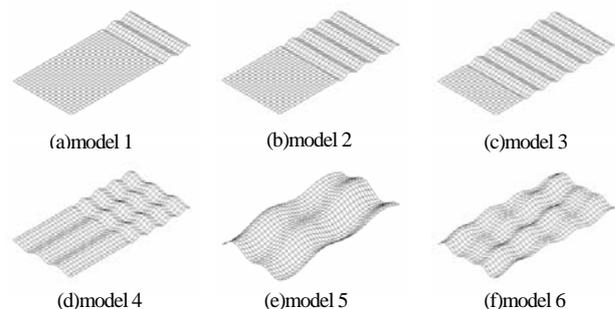


図5 各パラメータにおけるうねりの波形

次に、パラメータを波の速度 $c=5\text{m/sec}$ 、波高 $hw=2\text{m}$ 、波の伝搬方向は、x方向、y方向、 $\theta=30^\circ$ 方向、波の周期 t_w をx、y方向共に6秒、 θ 方向2.4秒、波動の継続時間 $t=39.6$ 秒として、生成した空間構造の形態を図6に示す。柱は、架構が最も低い部分で高さ2.4mになるよう定めた。図7は、上述のパラメータで継続時間を $t=40.3$ 秒とした場合の形態である。

4 力学的性質の検討

流体の波動現象から得た形態がフレーム構造として役立つ論理的根拠はないので、ここではその力学的性質を検討する。図6および7に示すモデルの平面は、1.5mの

表1 各波形におけるパラメータ

Model	model 1	model 2	model 3	model 4	model 5	model 6
波の速度(m/s)	5	5	5	5	10	10
水深(m)	4000	4000	4000	4000	4000	4000
x方向周期(s)	5	5	5	5	10	5
y方向周期(s)	0	0	0	7	10	5
r方向周期(s)	0	0	0	0	5	3
波高(m)	5	5	5	5	10	5
継続時間(s)	10	20	30	20	40	40
r/θ	0	0	0	0	30	30

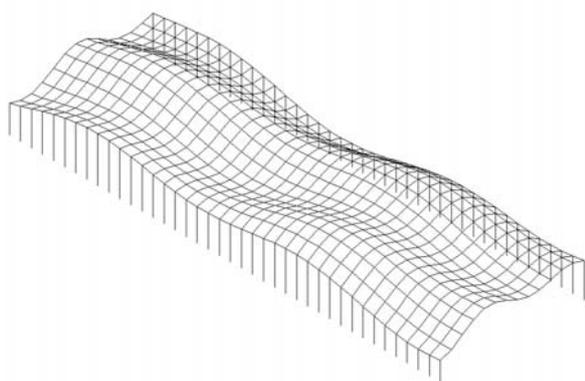


図6 海洋波から生成した構造形態(model 7, $t=39.6$ sec)

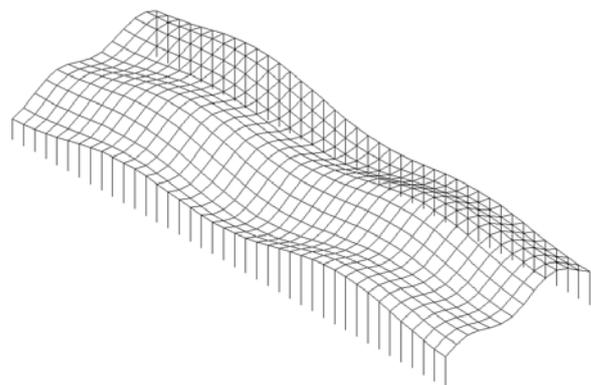


図7 海洋波から生成した構造形態((model 7, $t=40.3$ sec)

正方形グリッドが、スパン方向に13、桁行方向に40個で構成されている(19.5m×60m)。部材は全て、SS400の断面260.74×9.3のパイプで、柱の注脚はピン支持とした。ヤング率は、21000000. N/cm²、せん断剛性率は、8080000. N/cm²、ポワソン比=0.3、質量密度=0.078 N/cm³とした。荷重は、自重と鉛直荷重1KNを各節点に作用させた。解析には、3次元有限要素法(NASTRAN)を用いている。

図8~11は、model 7 (図6)の変形図、曲げモーメント図、せん断力図、軸力図である。各々の最大値は、6.60cm、7546852Ncm、25016N、77314Nである。今回の解析では、変形と曲げモーメントに対して、せん断力と軸力が小さい傾向を示した。また、曲げモーメントは、間口で屋根が単純な正弦波の形状をしている部分(図9、○印)で突出し、それ以外の部分では、相対的に小さい値となる傾向を示した。

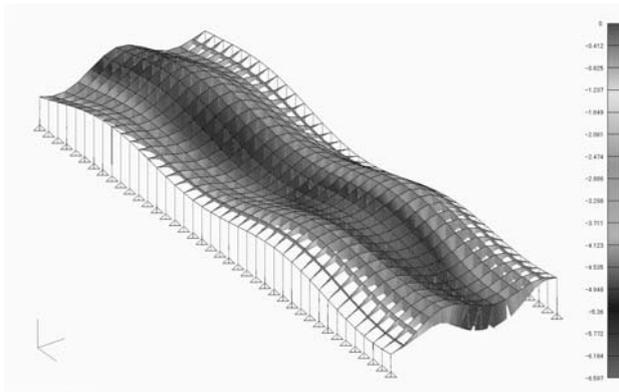


図8 変形図(model 7, t=39.6 sec)

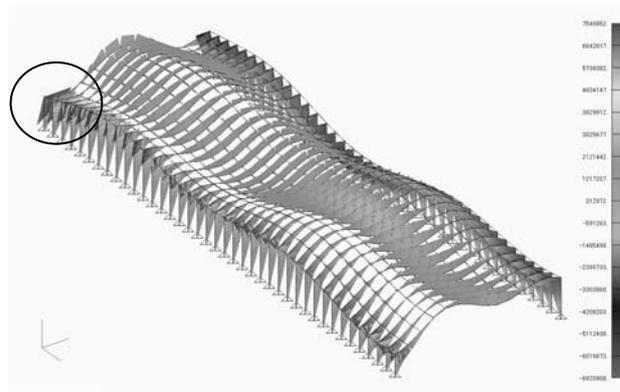


図9 曲げモーメント図(model 7, t=39.6 sec)

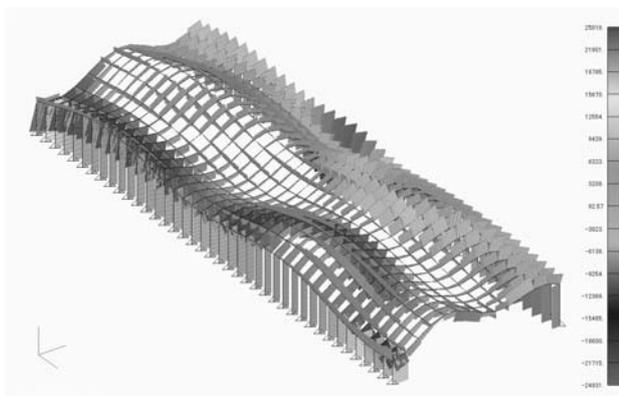


図10 せん断力図(model 7, t=39.6 sec)

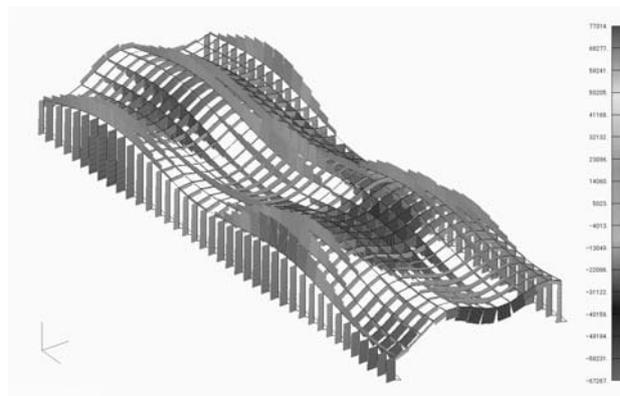


図11 軸力図(model 7, t=39.6 sec)

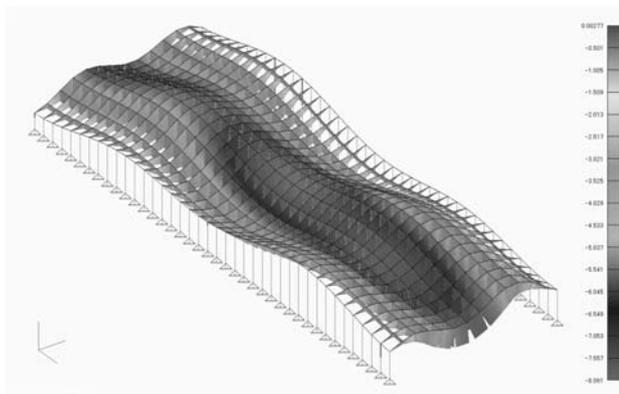


図12 変形図(model 8, t=40.3 sec)

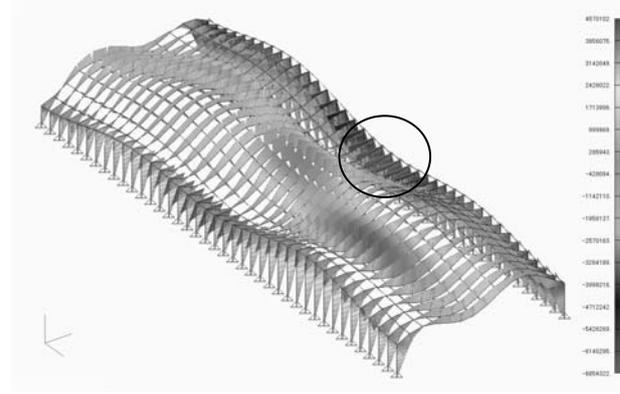


図13 曲げモーメント図(model 8, t=40.3 sec)

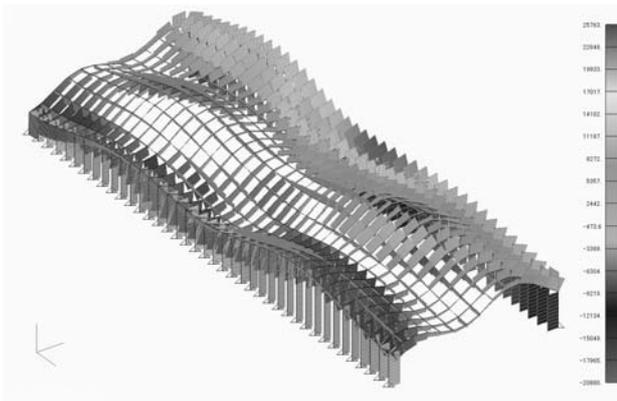


図 14 せん断力図(model 8, t=40.3 sec)

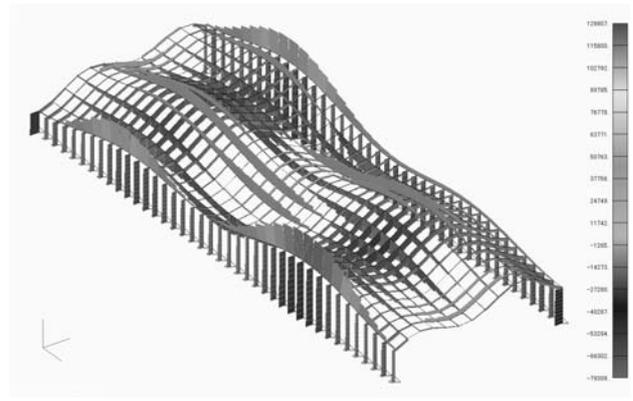


図 15 軸力図(model 7, t=40.3 sec)

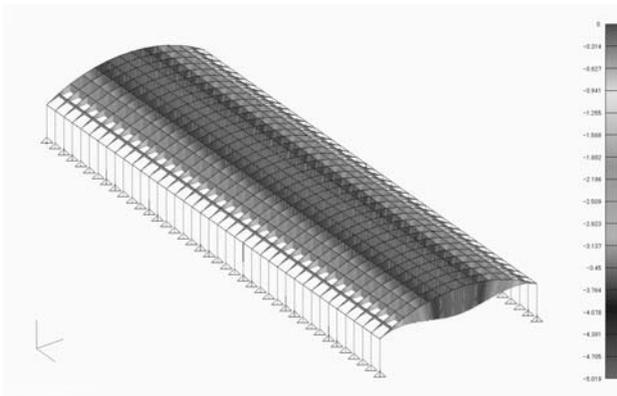


図 16 変形図(model 9, アーチ構造)

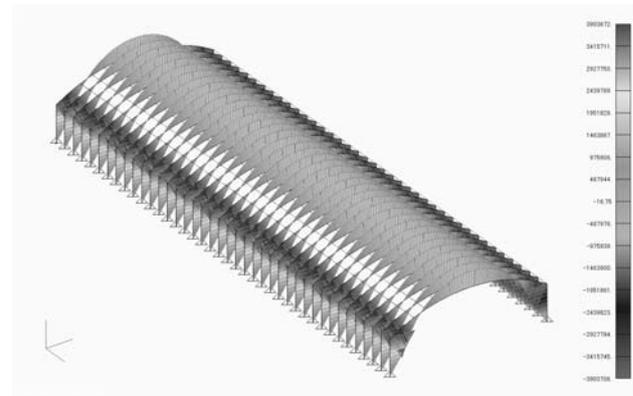


図 17 曲げモーメント図(model 9, アーチ構造)

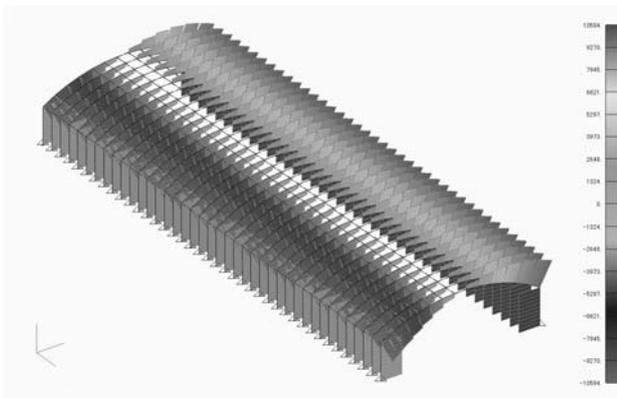


図 18 せん断力図(model 9, アーチ構造)

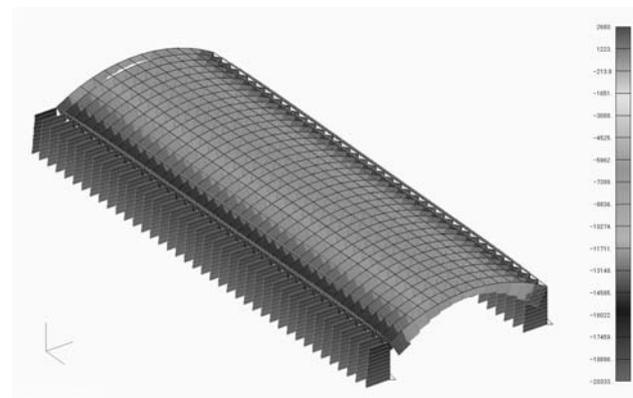


図 19 軸力図(model 9, アーチ構造)

図 12~15 は、model 8 (図 7) の変形図、曲げモーメント図、せん断力図、軸力図である。各々の最大値は、8.09cm、6854322Ncm、25736N、128807N である。前述同様、変形と曲げモーメントに対して、せん断力と軸力が小さい。傾向を示した。また、曲げモーメントは、架構中央部右端で屋根が model 7 同様単純な正弦波の形状をしている部分 (図 13、○印) で突出し、それ以外の部分では、相対的に小さい値となる傾向を示した。

図 16~19 は、model 7 (図 6) のうねりの波面の最高高さ、最低高さの中間の高さを持つ円弧に、柱の平均高さに相当する柱を用いて作成したアーチ構造で (model 9)、変形図、曲げモーメント図、せん断力図、軸力図の順になっている。なお、部材の断面は、model 7、8 と同様である。各々の最大値は、5.02cm、3903706Ncm、10594N、20333N である。前述の海洋波に基づくモデルに対して、最大変形で、76.0%と 58.4%、最大曲げモーメントで

51.7%と57.0%となっている。なお、今回の構造体の体積は、同様な順番で15.26 m³ (model 7)、15.62 m³ (model 8)、15.07 m³ (model 9) で、平米あたりの重量に換算すると103kg/m²、105kg/m²、101kg/m²となっている。

海洋波に基づくモデルの場合、曲げモーメントは、図9、13のように屋根架構が1つの緩やかな正弦波の部分で大きくなり、屋根架構が複数回波打つ場合に小さくなる傾向を示している。この事から類推して、屋根が複雑に波打つ場合、曲げモーメントの減少を期待できる可能性があると考えられる。

5 結論

本研究では、海洋のうねりと建築構造の形態を、数理的に結びつけることにより、科学的に海洋のうねりと形態システムの一部を共有する構造体を示すことができた。今回のモデル2例では、ほぼ材料の体積が等しいアーチ構造と比較すると構造体としての性能は劣るが、今後、屋根面に複雑な波形を用い最適化を行い、性能の向上を図る予定である。

謝辞：本論文を作成するに際し、データ処理に協力してくれた東京電機大学未来科学研究科建築学専攻大学院生の新垣雄也氏と金城忠之氏に感謝します。

参考文献

- 1) 中村直義, 朝山秀一: 地形の侵食アルゴリズムに基づく空間構造の平面形態と力学特性, コロキウム構造形態の形態と創生2009, pp.31-36, 2009年11月
- 2) 朝山秀一, 前稔文: フラクタル幾何学にもとづく積層アーチの自由形状生成とその応用に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No557, pp. 181-189, 2002年7月
- 3) 金城忠之, 朝山秀一: 海洋のうねりを用いた構造形態の概念について —海洋波の生成アルゴリズムに基づく構造形態の創生(その1)—
- 4) 新垣雄也, 朝山秀一: 海洋のうねりを用いた構造形態の力学的考察 — 海洋波の生成アルゴリズムに基づく構造形態の創生(その2)—
- 5) 関根義彦: 「海洋物理学概論」, pp. 32-38, 成山堂書店, 2003年7月
- 6) 磯崎一郎, 鈴木靖: 「波浪の解析と予報」, 東海大学出版, 1999年2月

格子状平板の初期曲げによるグリッドシェルの形成に関する基礎的研究

山本 憲司¹⁾, 中村 達哉²⁾, 本間 俊雄³⁾

1) 鹿児島大学大学院理工学研究科, 助教, 博士 (工学), yamamoto@aac.kagoshima-u.ac.jp

2) 鹿児島大学大学院理工学研究科, 技術職員

2) 鹿児島大学大学院理工学研究科, 教授, 工博

1 はじめに

シェル構造の曲面を容易に施工する方法として、マンハイム多目的ホール¹⁾やEXPO2000日本館²⁾など、部材の初期曲げによって曲面を形成する方法がある。これらの構造材には柔軟な木材が用いられることが多いが、近年ではFRPのような軽量で高強度な材料も現れ、今後この種の研究や施工例は増えていくものと考えられる^{3)~6)}。一方で、実験やコンピュータの利用により力学的に合理的な自由曲面シェルの形態を作り出す試みがなされている⁷⁾。これらの自由曲面は単純な幾何学関数で表現されないため、施工性が悪い欠点がある。上述の施工法はこの種の曲面を実現する上でも、有効な方法として期待される⁵⁾。

部材の初期曲げによって曲面を形成する方法のうち、最も施工が容易と考えられるのは、予め地表面で直線材を格子状にピン接合し、この格子状平板の材端に強制変位を与えて曲面を形成する方法であろう(図1)。この場合、変形後の釣合形状を構造形状とする為に、通常何らかの初期形状解析が必要になる^{1),3),6)}。

著者らは既報⁸⁾において、変形後の釣合形状が指定した曲面に出来る限り近づくような格子状平板の材端強制変位を最適化手法を用いて求める方法について示した。この方法を用いれば、設計者の望む任意の曲面形状を平板の状態から形成することが可能である。

本報は、既報の提案手法によって得られた曲面が、実際に精度良く再現可能であるか否かを模型実験により調査を行った結果について報告し、提案手法の有効性を示す。

2 最適化の方法

最適化の方法については文献8)で既に述べているが、論文の完結性の為に以下に概要を示す。

2.1 目的関数

格子状平板の境界節点(直線材材端)に強制変位を与え、直線材の面外曲げ変形とピン接合された格子の面内せん断変形により曲面を形成する。変形後の釣合形状を目標とする曲面にできるだけ近づけるような境界節点の

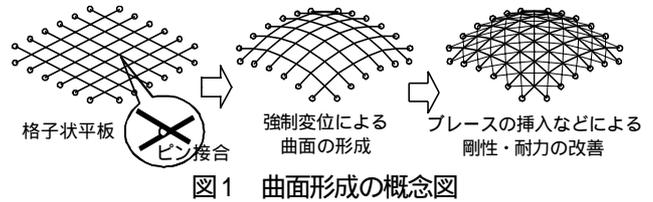


図1 曲面形成の概念図

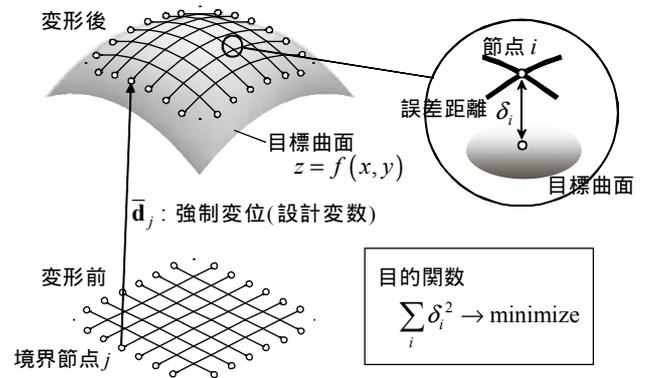


図2 最適化の概念図

強制変位を求める最適化問題を考える(図2)。

強制変位を与えた後の釣合形状は幾何学的非線形性を考慮した梁要素⁹⁾を用いて求める。格子状平板は梁要素により分割され、境界節点数を M 、それ以外の節点(内部節点)数を N とする。便宜上内部節点の節点番号を $1, \dots, N$ とし、境界節点の節点番号を $N+1, \dots, N+M$ とする。境界節点はピン支持とし、設計変数を $\bar{\mathbf{d}} = [u_{N+1}, v_{N+1}, w_{N+1}, \dots, u_{N+M}, v_{N+M}, w_{N+M}]^T$ とする(ここに、 u_i, v_i, w_i はそれぞれ i 節点の x, y, z 方向変位を表す)。強制変位後の釣合形状における各節点 z 座標と目標曲面座標 $z = f(x, y)$ との誤差ノルムを最小化する次の目的関数を設定する。

$$\min_{\bar{\mathbf{d}}} \sum_i^{N+M} \{f(x_i + u_i, y_i + v_i) - (z_i + w_i)\}^2 \quad (1)$$

ここに x_i, y_i, z_i は i 節点の初期(平板)状態における節点座標を表す。

2.2 制約条件

(1)式の目的関数に対し、最適解は無数に存在する。例えば目標曲面を $z = 0$ の平面とした場合、自然状態の図

3-a は最適解であるが、材端に面内方向の曲げ変形を与えた図3-bの釣合状態も最適解となる。これは曲面の場合でも同様であり（図3-c,d）最適解を一意に決めるには面内方向の強制変位を決定する何らかの条件を与える必要がある。

図3-b,dに示すような材端の面内曲げを除去し、構造上現実的な最適解を得る為、境界節点の面内方向強制変位に対し制約条件を導入する。境界*i*節点に対し、直線材に沿って内側にある2つの接合部節点をそれぞれ*p*節点、*q*節点とする（図4左図）、強制変位後における節点*ip*間の*z*軸周りの部材角 R_z^{ip} と節点*pq*間の*z*軸周りの部材角 R_z^{pq} を等しくする等式制約条件を次式のように与える。

$$\min \sum_i^{N+M} \{f(x_i+u_i, y_i+v_i) - (z_i+w_i)\}^2 \quad (2-1)$$

$$\text{subject to } R_z^{ip} = R_z^{pq} \quad (i = N+1, \dots, N+M) \quad (2-2)$$

(2-2)式の制約条件により、材端の面内曲げモーメントの発生を抑制することが期待できる。(2)式的最適化問題の解法には逐次二次計画法⁹⁾を用いる。なお、強制変位の感度係数の計算方法については既報⁸⁾を参照されたい。

3 最適化計算例

3.1 解析モデルと初期釣合形状

モデルは後述の模型実験の試験体寸法と同じ一辺1800mm、格子間隔200mmの格子状平板とし、要素分割は格子の一辺が2要素となるように分割する（図5）解析は対称性を考慮して1/4部分について行う。部材はGFRP製の6の丸棒とし、ヤング率37GPaとする（ただし自重等の外力を与えず自己釣合形状を求め、ヤング率は釣合形状に影響しない）、格子接合部は*x, y, z*軸周りの回転を全て自由とする3方向ピン接合を仮定した。

最適化を行う前に、適当な強制変位の初期値を与えて初期解となる釣合形状を作成する。強制変位の初期値

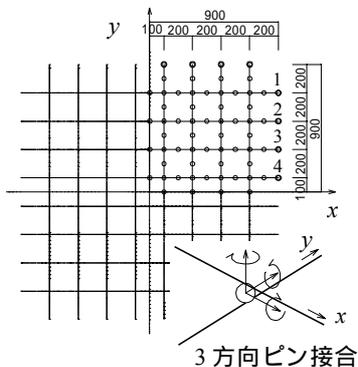


図5 解析モデル

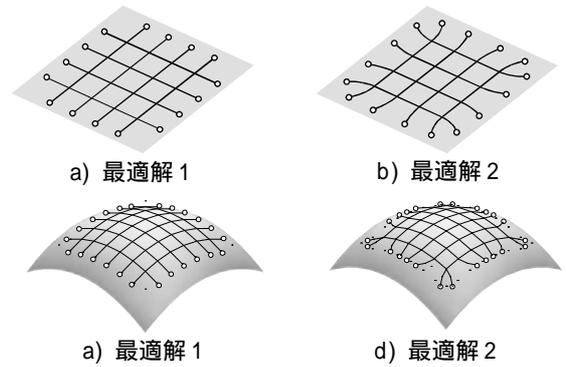


図3 目標曲面に沿う釣合形状の例

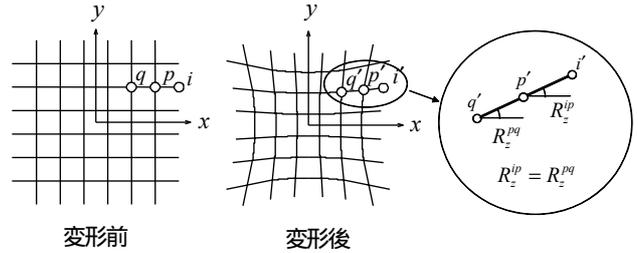


図4 部材角の等式制約条件

は、釣合形状が便宜的に

$$z = -0.5(x^2 + y^2) \quad (\text{unit:m}) \quad (3)$$

で表されるEP曲面（図6-a）に出来るだけ近くなるように設定した。このような強制変位は最適手法を用いずとも幾何学的な関係から近似的に求めることができる。例えば(3)式の曲面上の $y = \text{const.}$ とする曲線は $z = -0.5x^2 + C$ の形式で表される。この為、この曲線に沿った長さが丁度直線材の長さ1800mmに一致する*x*座標を簡単な反復演算により求め、これが境界節点の変形後の座標と一致するよう、各境界節点の強制変位を算定した。算定された強制変位（forced displacement）を表1の最上段Model Oと書かれた欄に示す。

上述の強制変位に到るまで、境界節点に徐々に強制変位を与えて非線形増分解析を行い、初期釣合形状を求めた。得られた釣合形状について、図7-aに示す。また、釣

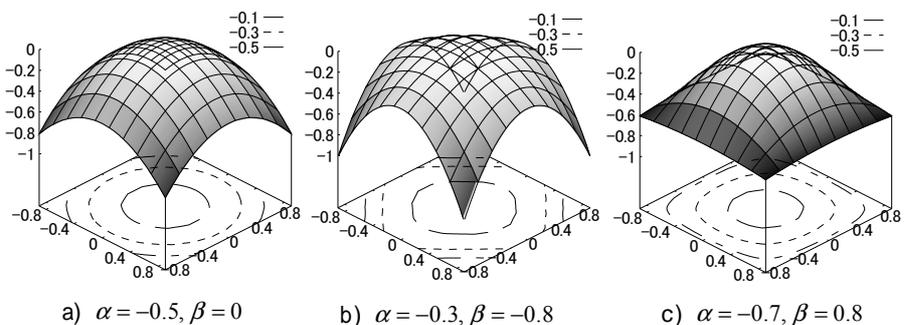


図6 目標曲面： $\alpha(x^2 + y^2) + \beta x^2 y^2$

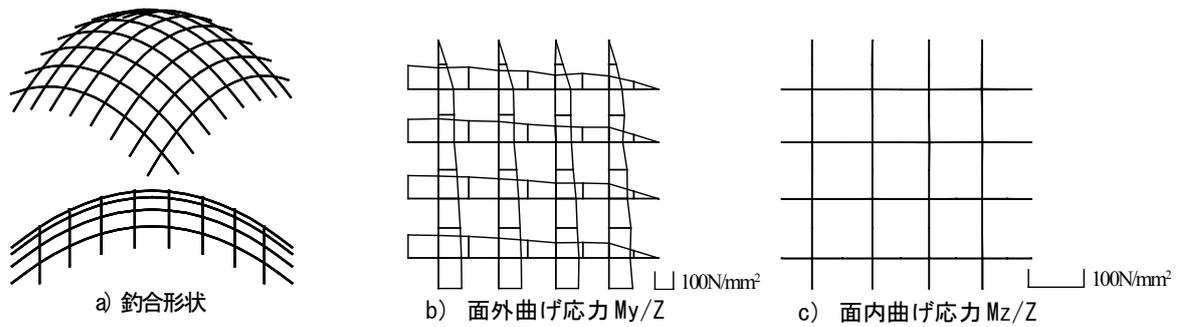


図7 初期釣合形状と応力図 (Model O)

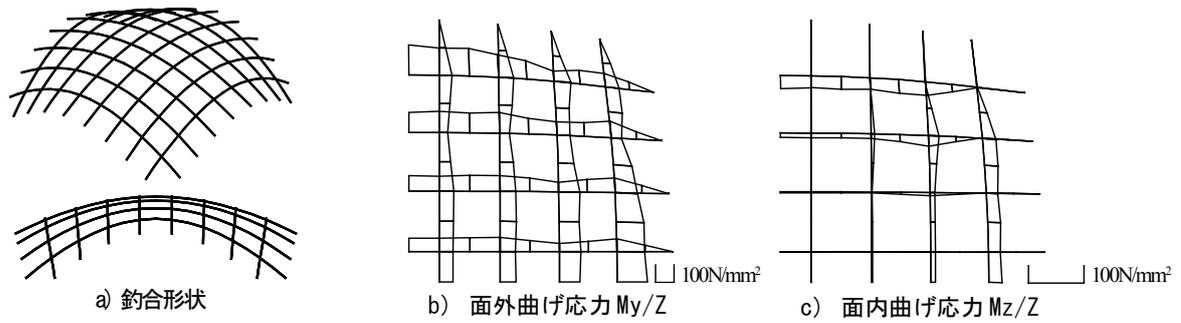


図8 最適釣合形状と応力図 (Model A)

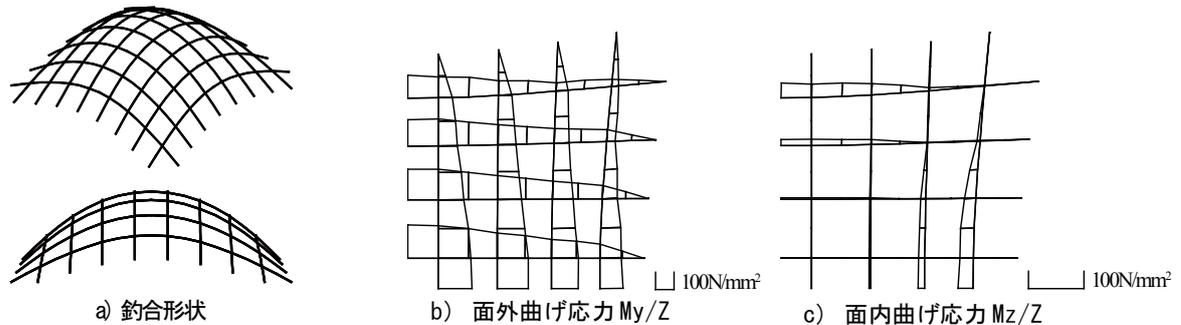


図9 最適釣合形状と応力図 (Model B)

表1 最適化結果

	Coefficients of Curved Surface Function (1/m)		Forced Displacement (mm)				Objective Function (mm ²)	max. error δ_i (mm)	
			Node 1	Node 2	Node 3	Node 4			
Model O (Initial Shape)	α	-0.5	x	-83.3	-83.3	-83.3	-83.3	(14.0)	1.4
	β	0	y	-0.2	-4.3	-18.1	-44.3		
	z	-338.5	-377.2	-449.6	-548.4				
Model A	α	-0.3	x	-38.1	-51.7	-74.4	-101.9	62.0	2.0
	β	-0.8	y	-0.4	-9.0	-34.9	-75.5		
	z	-230.0	-290.0	-389.3	-507.4				
Model B	α	-0.7	x	-128.5	-114.2	-88.9	-57.8	55.1	1.9
	β	0.8	y	-0.1	-2.8	-9.7	-18.1		
	z	-419.4	-449.7	-500.3	-557.3				

合時における曲げ応力図を図7-b,cに示す。表1中にmax. errorと書いた欄は、釣合形状の節点z座標と目標曲面(3式)との最大誤差を表す。誤差は1.4mmと小さく、最適化を行わなくとも良く一致することが分かる。

3.2 釣合形状の最適化

上の例では、目標曲面に近い釣合形状を幾何学的な関係から比較的容易に得ることができた。様々の曲率分布を持つ一般の曲面ではこうした釣合形状を得ることは難しかった

め、以下では最適化によって強制変位を求める。目標曲面は、ここでは便宜上次の関数で表されるものを扱う。

$$z = f(x, y) = \alpha(x^2 + y^2) + \beta x^2 y^2 \quad (4)$$

上式の係数 α, β を以下の2種類とした場合について、それぞれ最適化を行う。

$$\text{Model A: } \alpha = -0.3, \beta = -0.8$$

$$\text{Model B: } \alpha = -0.7, \beta = 0.8$$

これら目標曲面の形状を図6-b,cに示す。

前節で得られた釣合形状を初期値として最適化を行った。最適解の強制変位、目的関数値、目標曲面との座標誤差を表1に示す。また、Model A,Bの最適釣合形状及びその応力図をそれぞれ図8,9に示す。Model A,Bともに目標曲面との最大誤差は2mm程度であり、最適釣合形状は目標曲面を良く表現していることが分かる。

4 模型実験との比較

4.1 実験概要

前節で得られた釣合形状が実際に再現可能であることを確認する為、模型実験を行い、最適化計算との比較を行う。

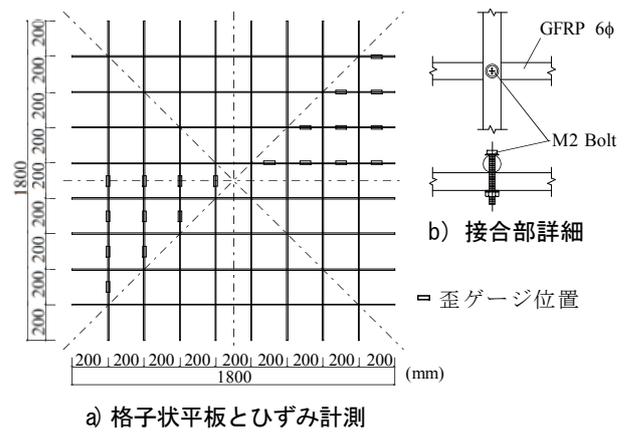
実験にはGFRP製の6φの丸棒、材長1800mmを使用する。丸棒は200mmピッチで直径2mmの穴を空け、格子状に組み、ボルト接合する(図10)。格子状平板の材端に人力で強制変位を与え、鋼製の架台(図11)に設置することで曲面を形成する。鋼製の架台は、部材を受ける為の支持部が長穴や全ねじボルトによってx,y,z方向に可動となっており、前節の表1に示したModel O, Model A, Model Bの3つの強制変位位置に支持部を移動させて、これら3つの曲面をそれぞれ形成する。

架台に設置後の釣合形状は複数の方向からデジタルカメラで写真撮影を行い、三次元写真計測ソフト(EOS Systems Inc., PhotoModeler 6)によりボルト接合部の座標を計測する。また、図10に示す位置の上面と下面にひずみゲージをそれぞれ貼付し、面外方向の曲げ応力を計測する。

実験に使用する丸棒の3点曲げ試験によりヤング率及び曲げ強度を計測した。曲げ試験の概要を図12に示す。支点間距離は格子状平板のピッチと同じ200mmとし(図12-a)、ボルト穴による断面欠損の影響を調べる為、試験片の支点間中央(加力位置)にボルト穴を開けた場合の試験片(図12-b)についても試験を行った。得られたヤング率、曲げ強度を表2に示す。表中下段のボルト穴がある場合の値は、断面欠損が無いものと仮定して算定された見かけのヤング率及び曲げ強度である。なお、値はそれぞれ3本の試験片から得られた平均値である。

4.2 釣合形状の比較

写真計測ソフトから得られたグリッドシェルの節点座標(接合部座標)と最適化計算の節点座標の誤差距離の最大値、平均、標準偏差を表3に示す。また、Model Oにおける実験と最適化計算の釣合形状の比較を図13-aに示す。上段の図はx-z平面、下段の図はy-z平面での比較を表し、図中の○印が実験値を+印が数値計算の値を表す



a) 格子状平板とひずみ計測

図10 模型実験試験体

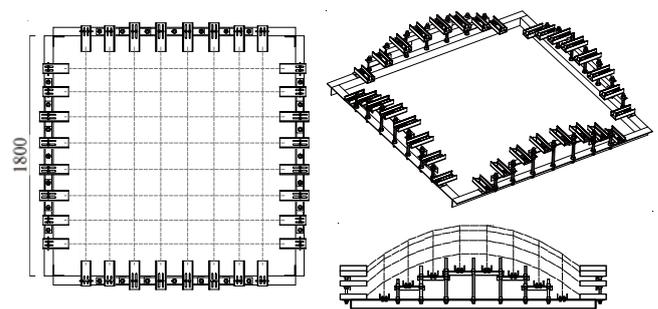


図11 鋼製架台

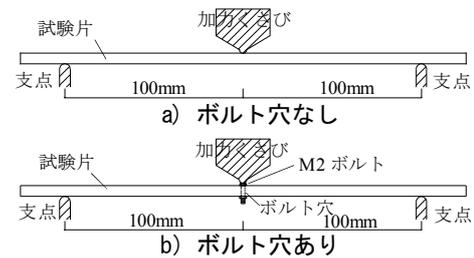


図12 3点曲げ試験

表2 3点曲げ試験結果

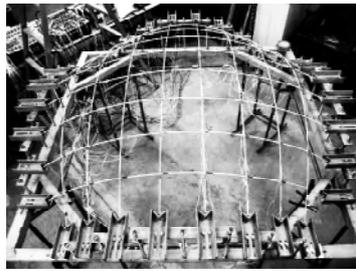
	Bolt Hole	Young's Modulus	Maximum Bending Stress
		(N/mm ²)	(N/mm ²)
GFRP	without	36800	825
	with	32100	542

表3 接合部座標の実験と数値計算との誤差

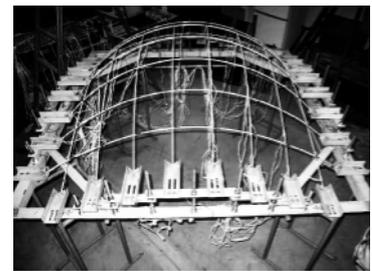
		Maximum Distance		Average Distance		Standard Deviation (mm)
		(mm)	ratio (%)	(mm)	ratio (%)	
Model O (span:816.7mm) (rise:538.3mm)	x-dir.	5.9	0.7	1.1	0.1	1.5
	y-dir.	10.4	1.3	5.3	0.6	2.5
	z-dir.	13.3	2.5	5.3	1.0	3.7
Model A (span:861.9mm) (rise:502.2mm)	x-dir.	7.3	0.8	2.9	0.3	2.0
	y-dir.	13.2	1.5	4.6	0.5	3.5
	z-dir.	11.2	2.2	4.8	1.0	3.1
Model B (span:842.2mm) (rise:542.1mm)	x-dir.	12.1	1.4	4.8	0.6	3.4
	y-dir.	20.8	2.5	7.0	0.8	5.6
	z-dir.	10.7	2.0	3.0	0.5	2.3



a) Model 0

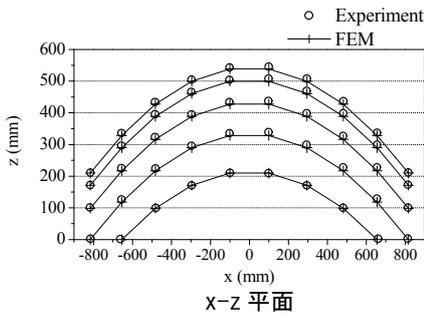


b) Model A

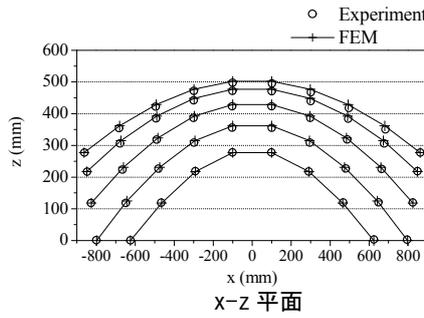


c) Model B

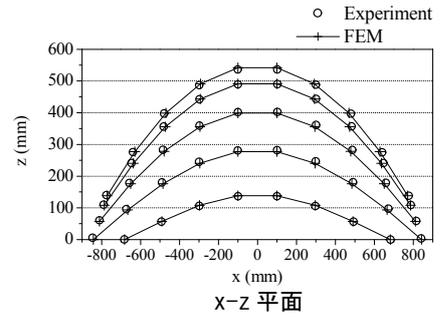
写真 1 鈎合形状



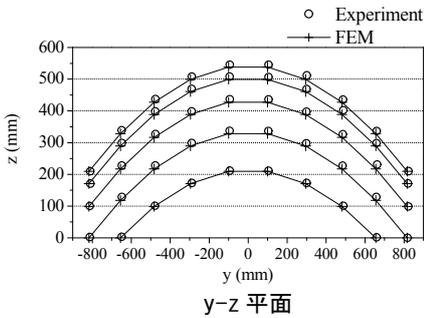
X-Z 平面



X-Z 平面

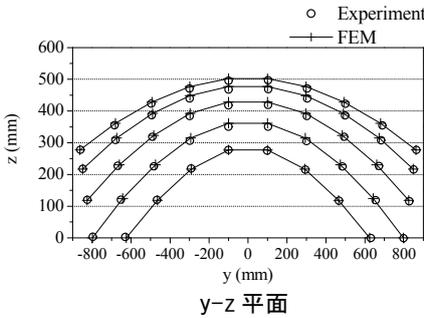


X-Z 平面



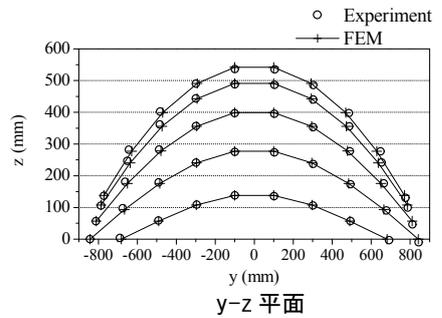
y-z 平面

a) Model 0



y-z 平面

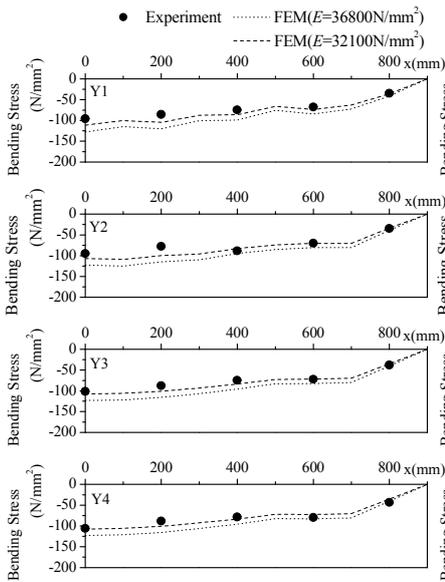
b) Model A



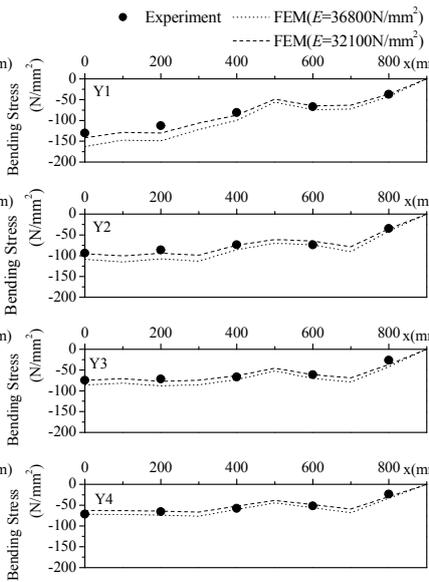
y-z 平面

c) Model B

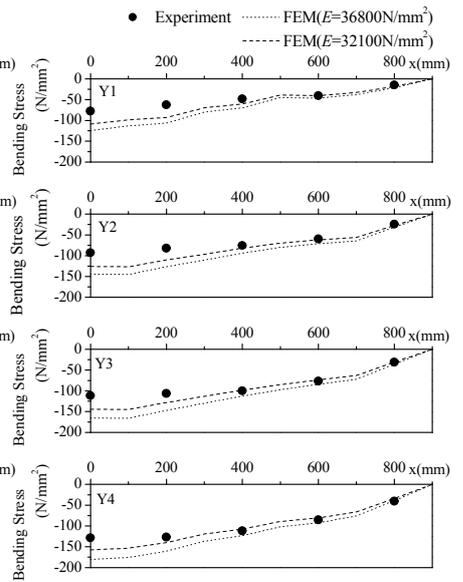
図 13 鈎合形状の比較



a) Model 0



b) Model A



c) Model B

図 14 面外曲げ応力の比較

(釣合形状を側面から見た場合、手前と奥に2本の部材が重なって見えることになるが、これらの図は手前側の部材の座標のみを比較している)。同様に、Model A及びModel Bの釣合形状の比較を図13-b,cに示す。節点座標の実験と最適化計算の最大誤差は、Model Oでz方向13.3mm(ライズの2.5%)、Model Aでy方向13.2mm(最大スパンの1.5%)、Model Bでy方向20.8mm(最大スパンの2.5%)であり(表3)、いずれのモデルにおいても実験結果は最適化計算時の釣合形状を概ね再現できていることが分かる。

4.3 曲げモーメント分布の比較

ひずみゲージから算出した面外曲げ応力分布と最適化計算時の幾何学的非線形解析によって得られた曲げ応力分布の比較を図14-a,b,cに示す。図は4分の1の部分の応力分布を示しており、上段であるほど境界に近い部材、下段ほど曲面中央付近を通る部材の分布を表す。図の横軸は部材中央から材端までの部材に沿った座標を表す。図中●印は実験値を、点線及び破線は数値計算により得られた値を表し、それぞれ点線は材料試験結果のヤング率 $E=36800\text{N/mm}^2$ を用いた場合を、破線はボルト穴の断面欠損による剛性低下を考慮する為にボルトを空けた試験片の材料試験から得られた見かけのヤング率 $E=32100\text{N/mm}^2$ を用いた場合の値を表す。これらの結果から、実験と数値計算の曲げモーメント分布は良く一致していることが分かる。

5 まとめ

格子状平板材端の強制変位を設計変数とし、変形後の釣合形状が目標とする曲面に出来るだけ近づくような強制変位を最適化手法により求める方法を示した。更に、最適化計算で得られる釣合形状が実際に再現可能である事を確認する為に、GFRP材によって構成される格子状平板を用いて曲面形成の模型実験を行い、形状や応力分布の計測を行った。本報で得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 直線材を互いにピン接合して形成される格子状平板から、任意の曲率分布をもつ曲面を形成する為に、材端の強制変位を設計変数とし、目標曲面との座標誤差ノルムを目的関数とする最適化手法が適用できる。
2. 模型実験と最適化計算の結果の比較を行った。その結果形状の誤差は最大でもスパンやライズの2.3%程度であり、断面力も数値計算と比較的良く一致し、計算結果を概ね再現可能であることを確認した。これによ

り提案した最適化手法が有効な手法であることが確認できた。

示した例題は曲率分布の滑らかな比較的シンプルな曲面であり、より複雑な曲率分布を持つ曲面が形成可能であるかについては検討が必要である。また、提案した最適化手法では、強制変位前の格子状平板の形状は正方形としており、任意の曲面を形成するには、材端の強制変位は水平方向だけでなく高さ方向にも与える必要がある。今後の課題として、格子状平板の境界の形状も設計変数として考慮し、材端の強制変位を水平方向のみによって任意の曲面を形成する方法について検討してみたい。

謝辞

模型実験では、当時修論生の谷川正明氏、卒論生の増田龍二氏、及び現在卒論生の谷淵且浩氏に多くの協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Otto, F. et al.: Gitterschalen= Glid shells= 格子シェル, IL 10, Institut für Leichte Flächentragwerke, 1974
- 2) 坂茂他: 2000年ハノーバー国際博覧会 日本館, 建築雑誌, Vol.117, No.1484(作品選集2002), pp.214-215, 2002
- 3) Douthe, C., Baverel, O., Caron, J.-F.: Form-finding of a grid shell in composite materials, Journal of I.A.S.S., Vol.47, No.150, pp.53-62, 2006
- 4) Douthe, C., Baverel, O., Caron, J.-F.: Gridshell in composite materials :towards wide span shelters, Journal of I.A.S.S., Vol.48, No.155, pp.175-180, 2007
- 5) 村野清文, 今川憲英, 藤田一雄, 西本靖士: 無仮設コンクリートシェル構造, 無仮設コンクリートシェル構造の概要と施工例, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B, pp.1155-1156, 1989
- 6) 豊田良平, 斉藤公男, 岡田章, 宮里直也, 吉野誠一: F. Otto 型ラチスシェルの形状決定手法に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.715-716, 2006
- 7) 例えば, 日本建築学会: コロキウム構造形態の解析と創生2009, 2009
- 8) 山本憲司, 本間俊雄: 格子状平板の強制変位による自由曲面に関する基礎的研究, 日本建築学会コロキウム構造形態の解析と創生2008, pp.133-138, 2008
- 9) 茨木俊秀, 福島雅夫: FORTRAN77 最適化プログラミング, 岩波書店, 1991

Truss Optimization Using Genetic Algorithm Considering Ultimate Resistance

王 華国¹⁾, 大森 博司²⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, hyoshida@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 Introduction

Truss structures are widely employed in the industrialized world. They appear as bridges, towers, pylons, roof supports, building exoskeletons or high technology light space structures.¹ Since truss structures have regular structural forms as well as sole material, optimal design of truss structure has always been an active area of research in the field of search and optimization in the past decades.^{2,3} Recently research focusing on practical truss optimization using Genetic Algorithm includes the work accomplished by Kawamura et al.^{4,5} However, research work finished so far is still somewhat far from application to real truss structural design for that many design requirements are required for a practical truss. For example, requirements such as allowable stress, maximum nodal displacement, no crossing members, on collision between truss members must be considered and always dealt with as constraints when using Genetic Algorithm⁶ as the optimization method. Based on these design requirements above, this paper increases another design requirement in the scheme of truss optimization, which is the ultimate resistance ability of truss structure. According to the design code in Japan, structural design procedure can be conventionally divided in two design stages. At the first stage, it is required that structure can keep its structural-load-carrying capacity under the load level of ordinary load such as dead load, live load etc., or their combinations. At the second design stage, it is needed to prevent the structure from collapsing in a sudden loading caused by a extremely big earthquake, or typhoon. In general, structural members are checked their load-carrying capacity by performing elastic analysis using finite element method (FEM) at the first stage, while

at the second stage, structure is conventionally performed plastical analysis to predict its ultimate collapse load factor. The incremental elasto-plastic analysis method⁷ is one of those plastical analysis methods, especially for frame structure. In this paper, it is applied to the truss structure and the obtained ultimate collapsed load factor⁷ is compared with the load factor of the sudden load case. By setting the ratio as a constraint in the Genetic Algorithm, the truss optimization considering its ultimate resistance ability is therefore to be carried out.

2 Incremental elasto-plastic analysis method for truss structure

The incremental elasto-plastic analysis method is based on the plastic hinge concept for fully plastic cross sections in a structure under increasing proportional loading in frame structure. It assumes that a plastic hinge would occur if the bending moment at a section reaches the plastic moment, and will maintain that value with the bending moment increase in other sections until the whole structure reaches a collapse mechanism. However, for truss structure, there is no bending moment, only axial force in structural members. Therefore, based on the assumption of steel being an elastic-perfectly-plastic material, we suppose that a 'plastic hinge' would happen in truss structure when a member bearing tension force reaches yield stress, or a member bearing compressive stress reaches buckling force. Similarly, like the plastic hinge in a frame structure, we also assume that members in tension, or in compression, would maintain their ultimate stress state as forces increase in other members until the whole truss structure becomes collapsed. As a result, the incremental elasto-plastic analysis method

can be used to predict collapse load for truss structures. Fig. 1 shows the collapse process of a plane truss with a comparison to the occurrence of plastic hinges in the frame structure.

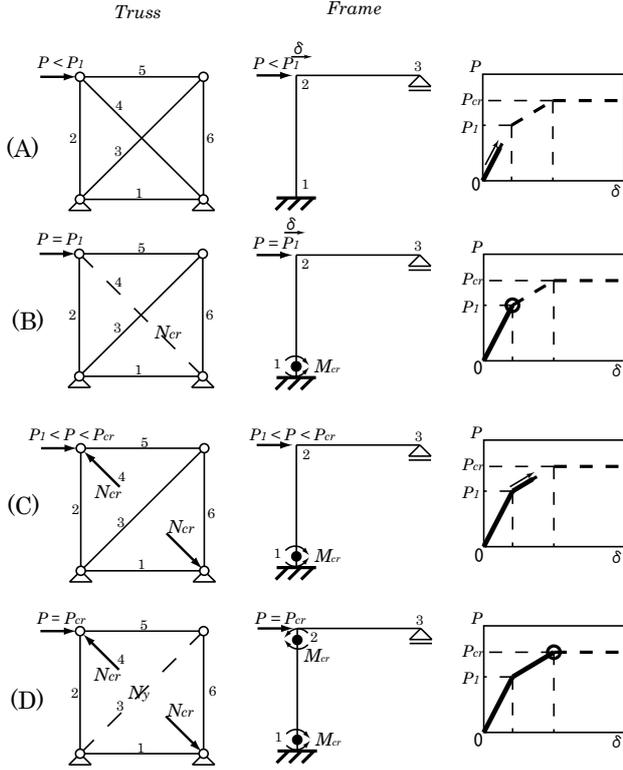


Fig. 1 Application of incremental analysis method to truss structure.

3 Formulation of optimization problem

3.1 Statement of the optimization design problem

The elasto-plastic truss optimization problem for minimizing the total truss weight with topology, cross section as variables is formulated as

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(\mathbf{x}, \mathbf{A}) = W(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \\ & \text{subject to} && g(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

where W is the total weight; \mathbf{x} is the vector of nodal coordinate and truss topology; \mathbf{A} is the vector of cross section of members; $g(\mathbf{x}, \mathbf{A})$ is the function of constraint condition. The total weight $W(\mathbf{x}, \mathbf{A})$ can be further described as

$$W(\mathbf{x}, \mathbf{A}) = \sum_i^m c\rho_i l_i \alpha_i + \sum_j^n w_j \quad (2)$$

where c is the compensation coefficient of members due to the extinction of the cross section at both of

their ends; ρ_i is the density of the material of member ; l_i is the calculated length of member i ; α_i is the cross section of member i ; w_j is the globe mass of joint j ; m is the number of members; n is the number of nodes. A flow chart for the optimization problem using Genetic Algorithm is demonstrated in Fig. 2, where the step of 'Elasto-plastic Analysis' is detailedly demonstrated in Fig. 3.

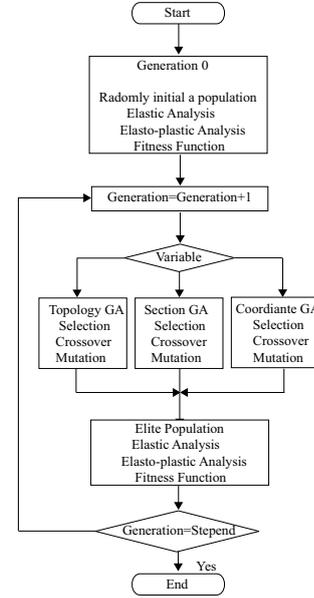


Fig. 2 Application of incremental analysis method to truss structure.

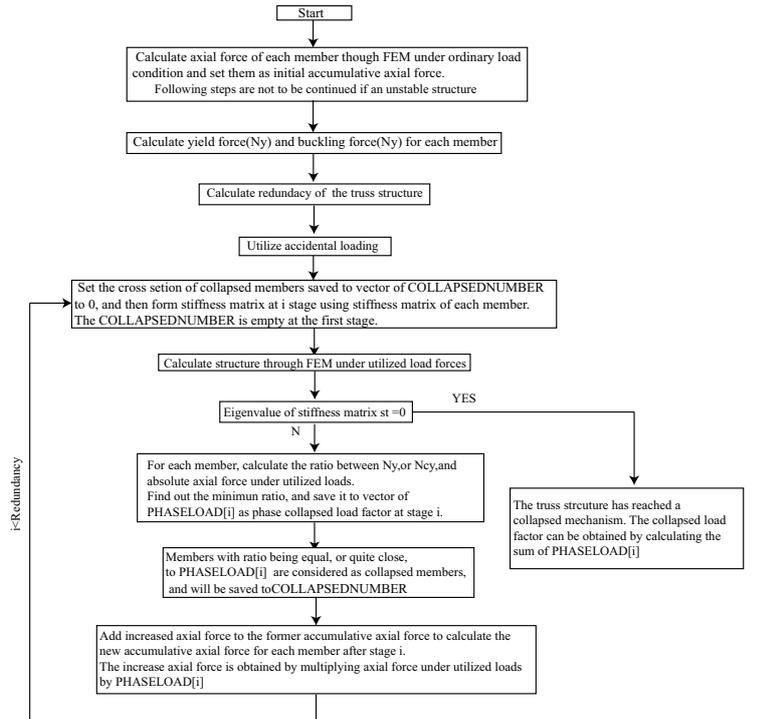


Fig. 3 Application of incremental analysis method to truss structure.

3.2 Fitness function

A fitness function is of a great significance to evaluate the individuals at the phase of reproduction in Genetic Algorithm. The inverse of total weight multiplied by several penalty terms associated with the violation of constraints, is adopted as the fitness function and mathematically described as follows

$$F_{fitness} = [W(\mathbf{x}, \mathbf{A}) \times \left(\prod_j \rho_{stressj} \right)^{C1} \times \left(\prod_j \rho_{dispj} \right)^{C2} \times (\rho_{collapse})^{C3} \times \prod_m (C4\rho_{angle}) \times (\gamma_{cross})^k]^{-1} \quad (3)$$

where $W(\mathbf{x}, \mathbf{A})$ is the total truss weight; $C1, C2, C4, C4$, including the later explained $C5$, are the weight coefficients of penalty of constraints corresponding to stress, nodal displacement, collapse load, and angle between members at joint, respectively. Specific penalty terms for those constraints are explained in the following sections.

3.3 Constraint on allowable stress

The first design stage allows no member stress to exceed the allowable stress. Suppose the characteristic value of strength of material is denoted as F with consideration of the long term effects of loads, the allowable stress for tension members and compressive members are

$$f_t = \frac{F}{1.5} \quad (4)$$

$$f_c = \begin{cases} \frac{1-0.4(\frac{\lambda}{\Lambda})^2}{\nu} F & \lambda \leq \Lambda \\ \frac{0.277}{(\frac{\lambda}{\Lambda})^2} & \lambda > \Lambda \end{cases} \quad (5)$$

where λ is slenderness ratio; Λ is the critical slenderness ratio; ν and 0.277 are safety coefficients according to the design code in Japan. Therefore, the penalty term for stress ρ_{stress} in Eqn. (3) is specified as

$$\rho_{stress} = \begin{cases} \frac{|\sigma|}{\sigma_{lim}} & \text{if } |\sigma| > |\sigma_{lim}| \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

where σ_{lim} represents the different values according to the stress type in question.

3.4 Constraint on displacement

The penalty term of displacement ρ_{disp} in Eqn (3) is defined as;

$$\rho_{disp} = \begin{cases} \frac{d}{d_{lim}} & \text{if } d < d_{lim} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

where d_{lim} is the maximum nodal displacement set by designer or related specifications.

3.5 Constraint on collapse load

To avoid collapsing in an accidentally big load case, the collapse load factor of the structure calculated by elasto-plastic analysis must be larger than the value of the sudden load case at the second design stage. Therefore the penalty term $\rho_{collapse}$ in Eqn. (3) is described as

$$\rho_{collapse} = \begin{cases} \frac{\lambda_l}{\lambda_c} & \text{if } \lambda_l > \lambda_c \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

where λ_l is the load factor of accidental load and λ_c is collapsed load factor.

3.6 Constraint on member interference at joint

As can be seen in Fig. 4, interference between members at a connecting joint should be avoided from the view point of construction. As a result, the angle between two members needs to be limited to a certain value to keep them from colliding with each other. In addition, the interference is also associated with the connecting globe size. Therefore, the globe sizes prepared for selection are to be tested in an ascending order for assembly without interference. If the largest globe size for selection is equipped without satisfaction, the angle is to be penalized. The penalty term of the angle in Eqn. (3) is

$$\rho_{angle} = \begin{cases} \frac{\theta}{\theta_{lim}} & \text{if } \theta > \theta_{lim} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

where θ_{lim} is the limited angle when maximal globe size is equipped.

3.7 Constraint on member-crossing

The existence of crossing members is also considered as unviable from the view point of construction

(Fig. 5). Therefore, distance between members is constrained and the corresponding penalty term is defined as $(\gamma_{cross})^k$ in Eqn. (3), where γ_{cross} is a constant, k is the number of pairs of crossing members. The principle of judging member crossing is

$$\gamma_{cross} = \begin{cases} C5 & \text{if } d < R_A + R_B \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

where R_A and R_B are the radius of two members; d is the distance between the two members; $C5$ is a constant greater than 1, given by designer.

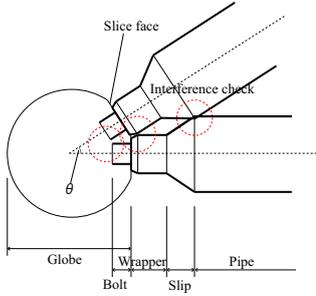


Fig. 4 Interference between two members

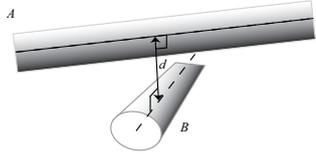


Fig. 5 Crossing between two members

4 Numerical Example

The analysis model is a double-layer space truss structure restrained in all directions by pinned supports at its four corners (shown in Fig. 6). Loading contains a vertical uniform load of 0.534 kN/m^2 on the top and a seismic load of $0.98 g$ in the term of acceleration in reverse x direction; the g represents the acceleration of gravity. The vertical uniform load is assumed as an ordinary load at the first design stage, and the seismic load is considered as an accidental load at the second design stage. In fact, both the uniform load and the accidental load in form of acceleration are transformed into single loads when performing structural analysis during Genetic Algorithm. All the lower chord nodes are allowed to move in a range of up to 1 m from their original coordinate. For all truss elements, the Young's modulus is $E = 205 \text{ Gpa}$, characteristic value of strength 235 N/mm^2 ,

density 7.85 kg/m^3 . The tetrahedron is used as the basic stable element⁴ when generating truss structures at the first generation of Genetic Algorithm. The generated structures are confined to a ground structure^{8,9} as shown in Fig. 7, having a maximum member length of 5.1 m . Several commercially available cross sections and globes for selection are listed in Tables 2 and 3, respectively. The GA parameters and constraints can be observed in Tables 4 and 5, respectively.

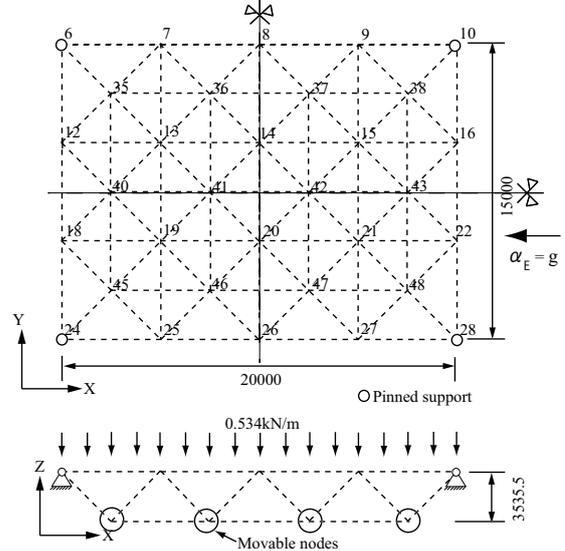


Fig. 6 Domain of double-layer space truss optimization

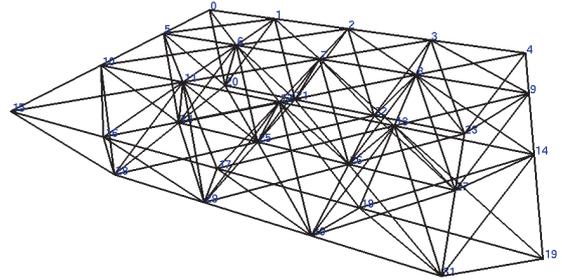


Fig. 7 Ground structure

Table 1 Cross sections

Number	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Area (cm ²)	Moment (cm ⁴)
1	34.0	2.3	2.29	2.89
2	42.7	2.3	2.92	5.97
3	48.6	3.2	4.56	11.82
4	60.5	3.2	5.76	23.7
5	76.3	3.2	7.35	49.2
6	76.3	4.2	9.51	62.03
7	89.1	3.2	8.64	79.8
8	89.1	4.2	11.20	101.18
9	101.6	4.2	12.85	152.6
10	114.3	4.5	15.52	234.32
11	139.8	4.5	19.13	438.17
12	165.2	4.5	22.72	733.94
13	165.2	5.0	25.16	808.05
14	190.7	5.3	30.87	1327.45
15	216.3	4.5	29.94	1679.76
16	216.3	5.8	38.36	2126.05
17	267.4	6.0	49.27	4210.72
18	267.4	6.6	54.08	4600.50
19	318.5	6.0	58.90	7193.19

Table 2 Globes

Number	Radius (mm)	Mass (kg)
1	25.0	0.514
2	42.5	2.52
3	55.0	9.03
4	65.0	3.2
5	75.0	13.09
6	90.0	23.97
7	100.0	32.88
8	110.0	43.88
9	130.0	72.43
10	150.0	111.26

Table 4 Constraints

Admissible stress	157 N/mm^2
Maximum displacement	75 mm
Section types	≤ 4
Collapse	Not allowed
Member-cross	Not allowed
Member interference	Not allowed

Table 3 GA Parameters

Population Size	60
Generation Size	2000
Probability for Crossover	0.80
Probability for Mutation	0.06

The optimization run on WindXP 2.61GHz AMD 64 × 2Dual took 5 hours 27 minutes. Fig. 8 shows the variation of the weight associated with the string with the highest fitness value in each generation of Genetic Algorithm. It is noted that a great decrease in total weight has happened during GA evolution history. The optimal truss structure obtained after 2000 generations is shown in Fig. 9, in which different colors represent different cross sectional areas. It weighs only 2.06 ton, almost 10 percent of elite at the first generation. From its side view, we can find that the lower chord nodes are effectively moved into a mechanically reasonable form (shown in Fig. 10). The collapse mechanism is shown in Fig. 11, having a collapse load factor of 6.2g which is larger than the value of the seismic load factor (1.0g). In addition, from Figs 12 and 13, it can be observed that other constraints are also well satisfied. Consequently, the truss optimization with consideration of two design stage is successfully and effectively realized.

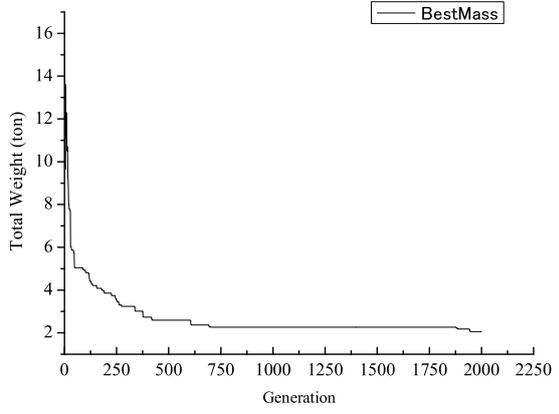


Fig. 8 Optimal truss after 2000 generations

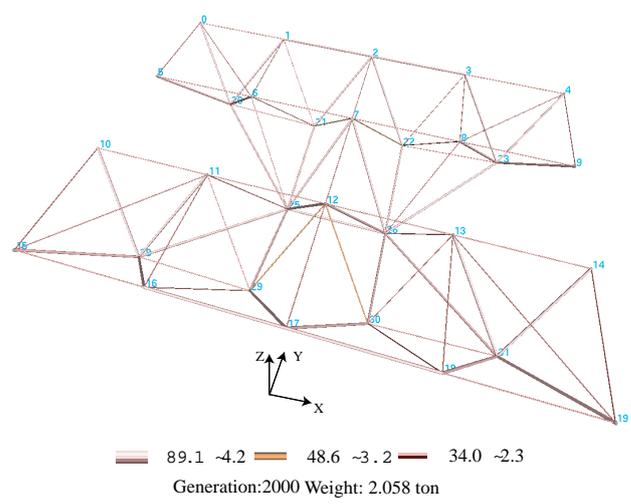


Fig. 9 Optimal truss after 2000 generations

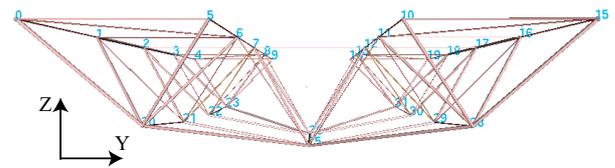


Fig. 10 Side view

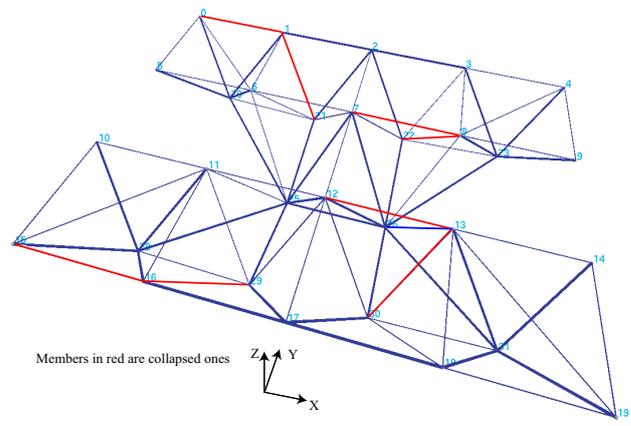


Fig. 11 Collapse Mechanism

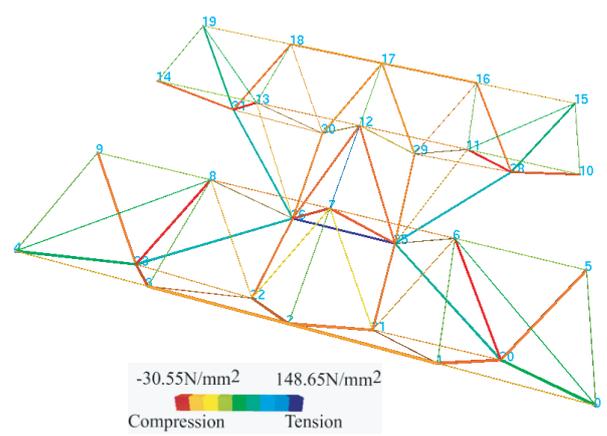


Fig. 12 Stress distribution

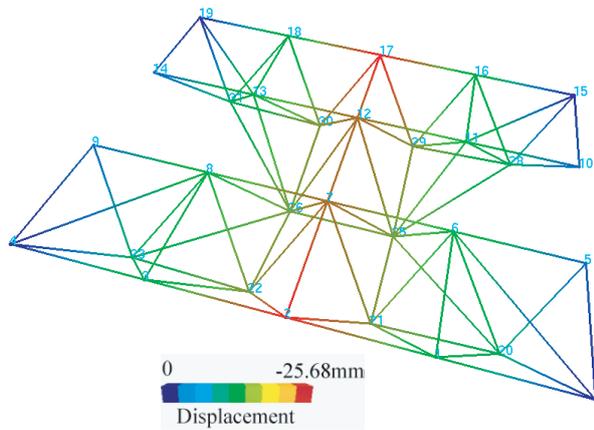


Fig. 13 Displacement distribution

5 Conclusion

Incremental elasto-plastic analysis method is successfully applied to calculate the collapse load factor of truss structure that is the fundamental design basis for structural design at the second design stage. The obtained collapse load factor is then imposed as a constraint in the scheme of truss optimization using Genetic Algorithm (GA) so that truss optimization with consideration on both the first design stage and the second design stage can be proposed. Numerical example converged at a simple and light truss structure with all constraints being well satisfied, indicating the successful realization of designed scheme.

REFERENCE

- 1) A. Dominguez: Practical Design Optimization of Truss Structures Using Genetic Algorithms, Research in Engineering Design, 2006.
- 2) Ponslet, E. and H. H. Curney: Optimal Placement of Tuning Masses on Truss Structures by Genetic Algorithms, 34thAIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. AIAA/ASME Adaptive Structures Forum Lajolla, pp. 2448-2457, 1993.
- 3) Rajan, S. D: Sizing, Shape, and Topology Design Optimization of Trusses using Genetic Algorithm , Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 10, pp. 1480-1487, 1995.
- 4) H. Kawamura, H. Ohmori and N. Kito : Truss Topology Optimization by a Modified Genetic Al-

gorithm, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 23, No. 6, pp. 467-473, 2002.7

- 5) S.Kunda, H. Ohomri: Multi-objective Optimal Design of Truss Structures for Large Telescope , Summaries of Technical Papers of annual Meeting, Architectural Institute of Japan, pp. 917-918, 2007
- 6) Holland, J: Adaptation in Natural and Artificial Systems: an Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence, University of Michigan, 1975.
- 7) M.Bill Wong : Plastic Analysis and Design of Steel Structures, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2009.
- 8) Grieson, D. E. and W. H. Pak: Optimal Sizing, Geometrical and Topological Design using a Genetic Algorithm, Structural Optimization, Vol. 6, pp. 151-159, 1993.
- 9) Hajela, P: Genetic Search - An Approach to the Nonconvex Optimization Problem, AIAA Journal, Vol. 28, No. 7, pp. 1205-1210, 1990.

1.5 層スペースフレームに関する基礎研究

川村 誠¹⁾, 陳 沛山²⁾

1)八戸工業大学大学院工学研究科建築工学専攻, 大学院生

2)八戸工業大学大学院工学研究科建築工学専攻, 教授, 工博

1 はじめに

「1.5 層スペースフレーム」は、虹橋という古代木造橋に関する研究の過程に発見した新しい構造システムである。虹橋とは、中国北宋時代 (A.D.960-1127) の都の開封 (現在の河南省開封市) に造られたアーチ状の木造橋である (図 1)。既往の研究では、虹橋の構造原理を現代空間構造に応用する方法として、「Lap-Beam」という構造システムを提案した^{1,2,3)}。

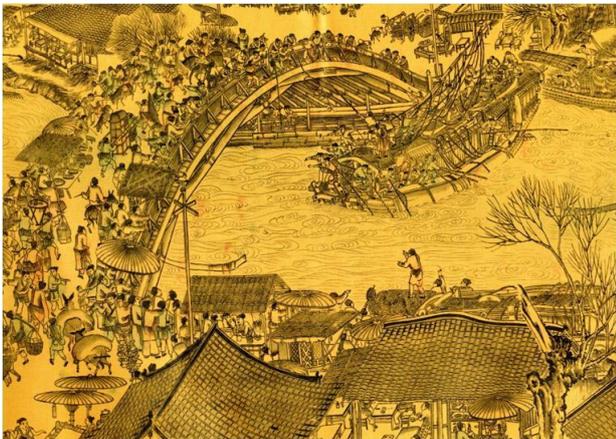


図 1 虹橋



図 2 Lap-Beam ドーム



図 3 籠

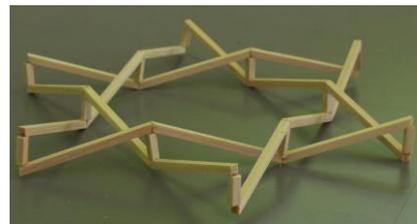
図 2 に示す Lap-Beam ドームの構成原理は、調理用具の笊や籠に類似しているように見える。図 3 のような籠の構造部材の材芯線を着目して観察すると、図 4 (a) のような立体構造物にも見える。この構造に上弦材を加えると、図 4 (b) に示すスペースフレームができ、本研究では、これを 1.5 層スペースフレームと呼んでいる。単層スペースフレームと複層スペースフレームは広く知られている。本研究で発見した構造は、節点は 2 層に分布しているが、節点を繋ぐ上弦材又は下弦材が存在しない

スペースフレームであり、新しい構造システムである。

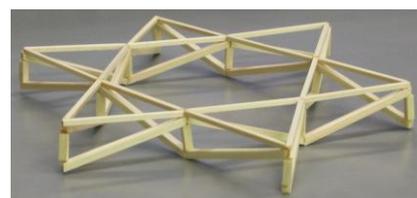
1.5 層スペースフレームは、虹橋に関する研究の過程に発見したものであるが、Lap-Beam とは別物であり、虹橋から派生したものではない。ただし、両者とも笊や籠との関連性はあると考えられる。

この構造システムを用いた構造物は、部材数を少なくすることにより従来の構造物よりも軽量化することができる。節点に集まる部材数の減少により、生産性が良くなる。また、大空間を覆うことができるのではないかと考えている。さらに、片側に弦のない 1.5 層スペースフレームは、芸術性に富むと思われる。

本論文では、1.5 層スペースフレームの幾何学構成を紹介し、力学解析手法によりその安定性についての研究結果を報告する。



(a)



(b)

図 4 1.5 層スペースフレームの成り立ち

2 1.5 層スペースフレームの幾何学構成

1.5 層スペースフレームの幾何学構成について説明する。図 5 (a) のように 4 本の棒状部材が四角形を構成し、2 本の上弦材の節点は上弦中央節点、2 本の斜材の節点は下部中央節点と呼ぶ。上弦材と斜材を接合する節点は端部節点と呼ぶ。上弦中央節点と下部中央節点を束材で結び、一つの安定した構造物となる。このように、5 本

の棒状部材上弦材（2本）、斜材（2本）、束材で構成した一つの単位構造体となる。単位構造体の2本の上弦材は、図5 (a) に示すように角度をつけて接合することができる。あるいは、図5 (b) に示すように直線上に接合することができる。

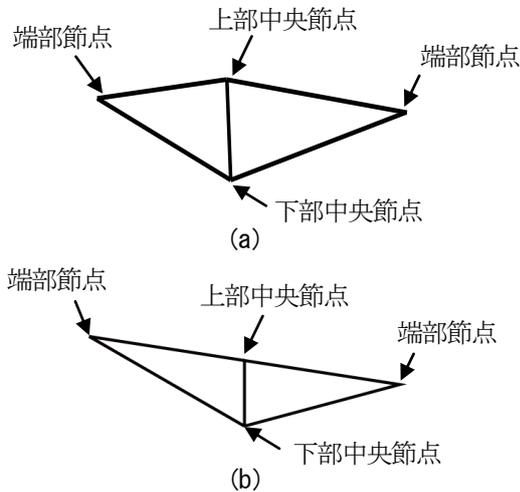


図5 基本パーツ

単位構造体と、他の単位構造体の組み方の例を図6に示す。1つの単位構造体の端部節点と、他の単位構造体の上弦中央節点を接合する方法により、複数の単位構造体を繋ぎ合わせ、1つの構造体を創生できる。また、構造の安定性を高めるために、下部中央節点と他の単位構造体の端部節点を棒状部材でつなぎ合わせるができる。この組み方で単位架構を繰り返して接合すると、平面あるいは曲面状の1.5層スペースフレームを組み立てることができる。

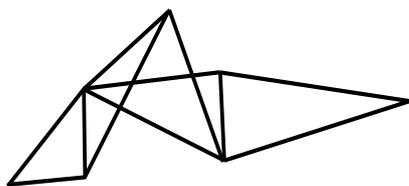


図6 基本パーツの組み方例

図5 (b) のパーツの組み合わせ方によって、様々な形を形成することができる。図7に示す模型は、六芒星を連続して繋いだものであり、六角形と三角形から構成されている。図8に示す模型は、基本パーツを垂直に繋ぐことによって、四角形のユニットが形成されている。これにより、部材の本数を少なくすることができ、大空間を覆うことができるのではないかと考えられる。

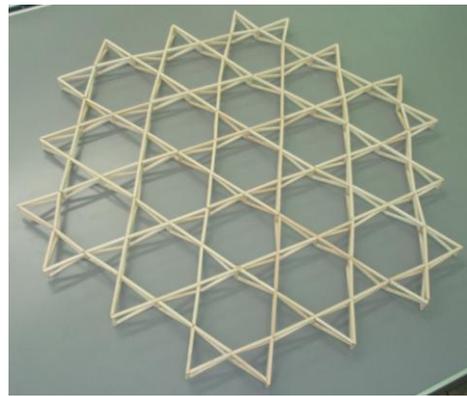


図7 増量させた1.5層スペースフレーム

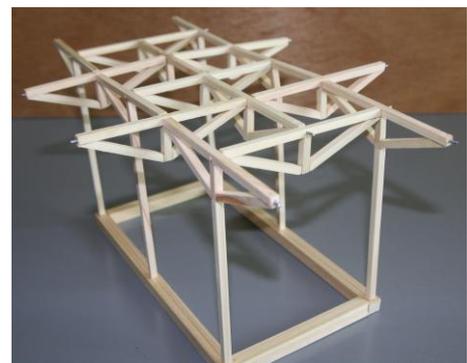


図8 四角形にした1.5層スペースフレーム

3 1.5層スペースフレームの解析

3.1 平面モデルの解析

1.5層スペースフレームが安定して成り立つかを調べるために、図9に示す平面モデルの解析を行った。このモデルは、構造の安定性を高めるために下部中央節点と端部節点を部材で繋いでいる。

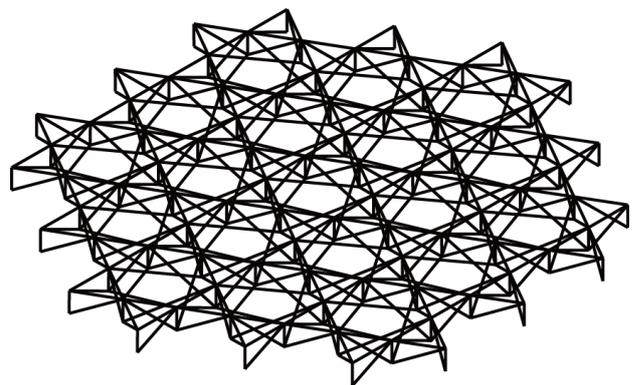


図9 1.5層スペースフレームの平面モデル

本解析では、1.5層スペースフレームとダブルレイヤスペースフレームのモデルを用い、下弦材が存在する場合と存在しない場合の変位と軸力を考察する。

解析モデルは、各節点をピン接合とし、モデルの下層部の外周をピン支持とする。1本あたりの材長を3.0m(束材は1.5m)、最大スパンを33.0mとする。材料を鋼材とし、ヤング係数を $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、部材の断面積を 100cm^2 とする。20.5kNの集中荷重を上部の各節点に作用させて解析を行った。

解析結果を表1にまとめ、2種類の解析モデルの軸力ピーク値の発生位置を、それぞれ図10と図11に示す。

表1 平面モデルの解析結果

		1.5層 スペースフレーム	ダブルレイヤ スペースフレーム
変位のピーク値	X軸	0.79cm	0.09cm
	Y軸	0.78cm	0.10cm
	Z軸	4.70cm	0.91cm
軸力のピーク値	引張	255kN	106kN
	圧縮	-558kN	-204kN

注：図10、図11に示す軸力の発生場所を、引張は△、圧縮は※で表す。

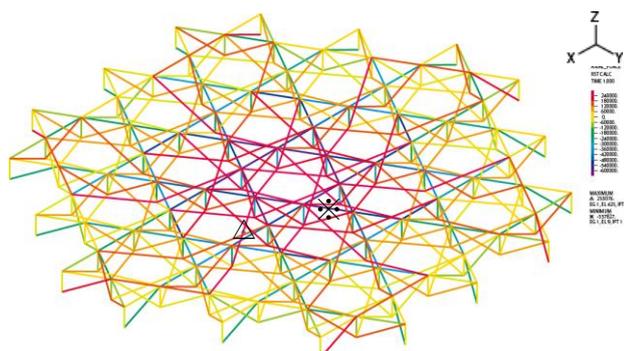


図10 1.5層スペースフレームの軸力図(平面)

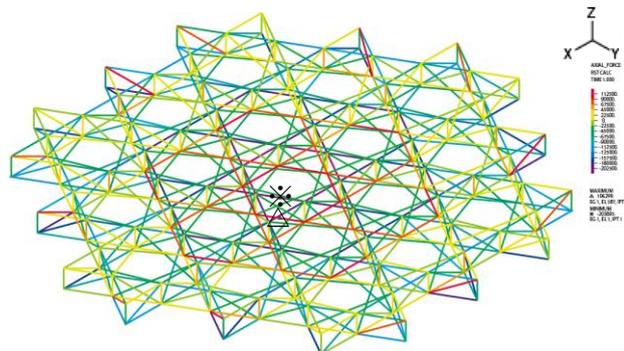


図11 ダブルレイヤスペースフレームの軸力図(平面)

この解析を通して、1.5層スペースフレームは安定していることを証明できた。また、1.5層スペースフレームは、ダブルレイヤスペースフレームに比べて全体的に変位と

軸力が大きくなっていることが数値から読み取れる。1.5層スペースフレームの解析結果を、ダブルレイヤスペースフレームの解析結果と比較すると、X軸方向の変位ピーク値が約9倍、Y軸方向の変位ピーク値が約8倍、Z軸方向の変位ピーク値が約5倍、軸力の最大値が約2倍、軸力の最小値が約3倍である。1.5層スペースフレームのZ軸方向の変位は4.70cmであり、数値だけを見ると大きい。軸力のピーク値を見ると、1.5層スペースフレームの部材圧縮軸力のピーク値が-558kNである。図10と図11を見ると、どちらも中心部付近に軸力が集中していることが分かる。この結果、1.5層スペースフレームの平面モデルは、下弦材が無いことによって下方向への沈みが大きくなったため、圧縮力が大きくなったと考えられる。上記2種類の解析モデルの部材断面は同じであり、ダブルレイヤスペースフレームの部材数が多いことも、その原因の一つである。構造試行設計を行ってから力学特性を調べることは、今後の課題となっている。

3.2 曲面モデルの解析

次に、平面モデルを曲面化し、図12に示す曲面モデルの解析を行った。このモデルは、構造の安定性を高めるために下部中央節点と端部節点を部材で繋いでいる。

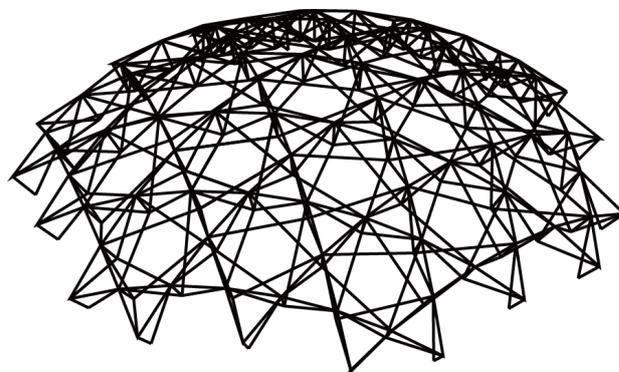


図12 1.5層スペースフレームの曲面モデル

本解析では、1.5層スペースフレームとダブルレイヤスペースフレームのモデルを用い、下弦材が存在する場合と存在しない場合の変位と軸力を考察する。

解析モデルは、各節点をピン接合とし、モデルの下層部の外周をピン支持とする。1本あたりの材長を3.0m(束材は1.5m)、最大スパンを33.0mとする。材料を鋼材とし、ヤング係数を $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、部材の断面積を 100cm^2 とする。20.5kNの集中荷重を上部の各節点に作用させて解析を行った。

解析結果を表2にまとめ、2種類の解析モデルの軸力ピーク値の発生位置を、それぞれ図13と図14に示す。

表2 曲面モデルの解析結果

		1.5層 スペースフレーム	ダブルレイヤ スペースフレーム
変位のピーク値	X軸	0.34cm	0.008cm
	Y軸	0.36cm	0.009cm
	Z軸	0.56cm	0.042cm
軸力のピーク値	引張	255kN	22kN
	圧縮	-275kN	-68kN

注：図13、図14に示す軸力の発生場所を、引張は△、圧縮は※で表す。

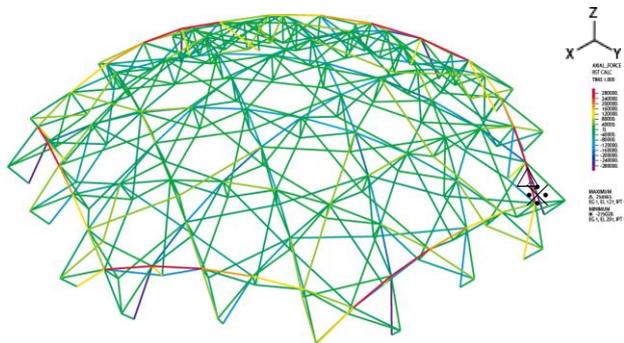


図13 1.5層スペースフレームの軸力図（曲面）

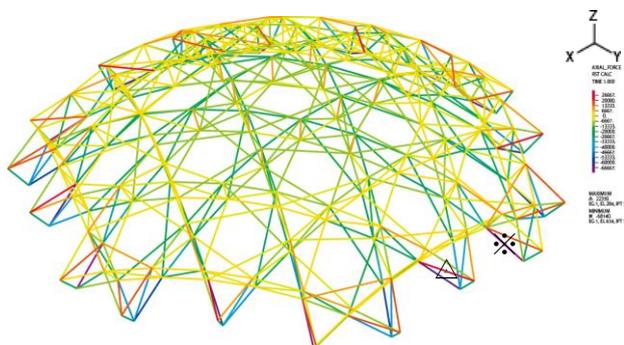


図14 ダブルレイヤスペースフレームの軸力図（曲面）

この解析を通して、1.5層スペースフレームは安定していることを証明できた。また、1.5層スペースフレームは、ダブルレイヤスペースフレームに比べて全体的に変位と軸力が大きくなっていることが数値から読み取れる。1.5層スペースフレームの解析結果を、ダブルレイヤスペースフレームの解析結果と比較すると、X軸方向の変位ピーク値が約43倍、Y軸方向の変位ピーク値が約40倍、Z軸方向の変位ピーク値が約13倍、軸力の最大値が約12倍、軸力の最小値が約4倍である。図13と図14を見ると、どちらも軸力が外周に集中していることが分かる。

この結果、1.5層スペースフレームの曲面モデルは、下方向への沈みが小さくなった分、圧縮力も小さくなったと考えられる。

表3 1.5層スペースフレームの比較結果

		平面モデル	曲面モデル	差
変位のピーク値	X軸	0.79cm	0.34cm	0.45cm
	Y軸	0.78cm	0.36cm	0.42cm
	Z軸	4.70cm	0.56cm	4.14cm
軸力のピーク値	引張	255kN	255kN	0kN
	圧縮	-558kN	-275kN	-283kN

1.5層スペースフレームの平面モデルと曲面モデルを比較結果を表3に示す。平面モデルのZ軸の変位が4.70cmだったのに対して、曲面モデルのZ軸の変位は0.56cmであり、4.14cm下方向への変位が小さくなった。また、平面モデルの圧縮軸力のピーク値が-558kNだったのに対して、曲面モデルの圧縮軸力のピーク値は-275kNであり、圧縮力が283kN小さくなった。

4 まとめ

本論文で提案した1.5層スペースフレームの構造は、新しい構造システムであり安定したものであることが分かった。平面モデルと曲面モデルを用いて解析した結果、平面と曲面の1.5層スペースフレームは、実用化できると考えている。1.5層スペースフレームについては、まだ分からないことが多く、継続して研究する必要がある。

謝辞：本研究に携わった陳研究室の皆様に、心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 陳沛山, 大川原恵美, 原田恵美子, 細川美穂: 宋代「虹橋」の構造原理についての研究, コロキウム構造形態の解析と創生, pp.89-94, 2007.10
- 2) Pei-Shan Chen, A Study Report on an Ancient Wood Bridge Hongqiao, Str. Eng. International (SEI) Vo.18, No.1, pp.84-87, 2008.2
- 3) 陳沛山, 大川原恵美, 原田恵美子, 細川美穂: 中国宋代虹橋の構造原理についての研究, 構造工学論文集 Vol.54B, pp.259-265, 2008.3

多目的最適化法による鋼構造物の構造創生支援に関する研究 - 基礎梁の最適設計への拡張 -

小玉 真一¹⁾, 大森 博司²⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 大学院生, kodama@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1 序

建築物には、外的条件から身を守る安全性、快適な居住性、恒久的な強さ、美観などが要求される。建築構造設計とは、経済性や機能性、安全性、施工性、美観、あるいはその土地の風土や歴史、文化、地域環境や地球環境への配慮など多岐にわたる条件に対し、力学、材料学および施工に関する知識などをもとに、その建築物の骨格を形成する構造物の形状および寸法を決定する行為である。構造設計者には、このような設計行為の中で経験や知識、構造解析技術などを用いることで応力状態や構造性能を明らかにし、建築デザインと構造の整合性を調整、施工段階での不確定要素の考慮、基準や法規、あるいは指針を参考にしながら、構造に要求される性能に関して多くの判断を下し、許容できる設計解を見出すことが求められる。澤田ら[1]は、近似的離散最適化手法の比較検証用の厳密解法として、有効な手法を提案している。吉富ら[2]は、二段階緩和法を用い、連続関数の最適解を得た後に離散的に構成される規格断面を近似解とする手法を提案している。澤田ら[3]は、重量制限を課した遺伝アルゴリズムを用いることによって単純GAよりも正解率、求解速度が改善されると報告している。高田ら[4]は、トラス構造物や剛接骨組構造物の弾性設計を多目的最適化問題として取扱い、多目的遺伝的アルゴリズムを適用することでPareto最適解集合から部材全重量と最大応力および最大節点変位におけるトレードオフ関係を示した。また、Liuら[5]は鋼構造物に対してライフサイクルコストと耐力を目的関数とした多目的最適化を行い、設計の過程においてPareto解を提示することにより、意思決定に寄与することのできる手法を提案している。

離散変数を取り扱う問題に対して、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)は有効で、さらに多目的遺伝的アルゴリズム(Multi-Objective Genetic Algorithm, MOGA)によれば、構造設計のような多様な要求事項を同時に考慮すべき問題がある場合に対して、

Pareto最適解集合を設計者へ提案することが可能となり、設計者はそれらの中から他の条件を勘案した上で解の選定を行う設計のプロポーザルとして用いることができる。筆者らはこのような考え方に基づいて鉄骨ラーメン構造やブレース構造の設計に対してこうした手法を適用できることを示している。[6][7]そこで本論文においてはその発展的研究として基礎梁の設計にこの手法を適用することを考える。上部構造の柱梁が鋼構造であっても、一般的には下部構造の基礎梁はRC造である。よって、RC部材に最適設計の考え方を適用することになる。RC造の最適設計は藤谷ら[8]によって提案されている。通常、上部構造の柱・梁と下部構造の基礎梁は同時には設計されない。また、RC部材の設計は複雑であり、鋼材に比べ最適化により得られる効果の大きい分野といえる。鋼材とRC材を同時に最適設計することで、より経済的にまたは構造的に優れた複数の設計解が得られるならば、構造設計者の時間的負担を大きく軽減できると考えられる。

2 解析手法

2.1 多目的遺伝的アルゴリズム

多目的最適化とは、複数の評価基準を同時に考慮しながら制約条件を満足する解を探索する操作であり、そこでは非劣解*の集合である Pareto 最適解集合を求めることが目的となる。多目的遺伝的アルゴリズムは、遺伝的アルゴリズムを用いて、解の優越関係に基づいて選択演算を行い、近似Pareto最適解を求める発見的解法である。この方法によれば1度の探索で多数の解が得られるため、設計者は明示的に与えられた設計条件を満足する多数の設計解の存在を確認することができる。本研究では多目的遺伝的アルゴリズムの解法として、Zitzlerら[9]による、Pareto 最適解集合の探索性能が特に優れているSPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2)を採用している。

*ある評価値を改善するためには、少なくとも他の1つの評価値を改悪せざるを得ないような解

2.2 多目的最適化問題の定式化

多目的最適化問題の定式化を行うにあたり、経済性の指標である構造物の鋼材コストと建物強度の指標である最大層間変形角を目的関数として、多目的最適化問題を次式で与える。ここでいう鋼材コストはサイズや材質による違いを考慮した材料費を指している。基礎梁の剛性が支持部の固定度に影響を及ぼす点を重要視し、ここでは目的関数として最大応力度ではなく最大層間変形角を採用した。

$$\text{minimize } f(x, y) = \begin{cases} f_1(x, y) = \frac{C(x, y)}{\prod_j \gamma_j} \\ f_2(x, y) = \frac{\max_k (R_k(x, y))}{\prod_j \gamma_j} \end{cases} \quad (1)$$

- C : 構造物の鋼材 RC材コスト
- R_k : k 層の層間変形角
- x : 断面形状
- y : 部材配置
- γ_j : 制約条件 j に対するペナルティ関数

2.3 ペナルティ関数

最適化を行う際の制約条件には、設計変数の自由度を制約し、設計空間における変数の動きうる範囲を決める側面制約条件と、ある設計変数によって得られる応答値に対して制約を行う挙動制約条件がある。コスト最小化問題等の最適設計には、挙動制約を行うことで設計者が望ましい解を得るという研究が多く、これは設計変数の組合せに対して、応答が非線形であることに起因する。本研究においても制約条件を複数設定し、設計者の要求を満足する設計解の提案を行う。制約条件の扱い方には、ペナルティ関数を用いて、遺伝的アルゴリズムにおけるある情報体を持つ個体が設計者の要求性能を満たしていない場合に適合度に罰則を与える方法がよく用いられる。これは適合度を直接低減あるいは増大させることによって、望ましくない個体を淘汰することを目的としたものである。ペナルティの与え方は設計者が任意に決定することができ、また様々な方法が存在する。本研究では、それらの方法のうち各制約条件に対して独立した関数を設けそれぞれ

制限値を越えた割合だけ適合度を低減あるいは増大させるという方法を用いる。しかし、制約条件を設けることによって、解探索の性能が下がり、収束に多くの計算回数を要するようになる可能性があることに注意しなければならない。

ペナルティ関数 γ_u は次式で表せる。

$$\gamma_u = \begin{cases} \frac{u_{lim}}{u} & \text{if } u > u_{lim} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 u : 応答値 ($u \geq 0$)
 u_{lim} : 制限値

3 解析例

3.1 計算モデル

対象とする構造物は図1に示す1×3スパン、3層の鋼構造の事務所ビルである。設計概要を表1に示す。長期荷重および地震荷重を想定した短期荷重を設定する。床荷重は、実際に設計された際の値を採用する。地震荷重は、一次設計では、 $C_0=0.2$ とし、二次設計では、 $C_0=1.0$ とした A_i 分布に基づく地震力を各層の重心位置にX方向またはY方向へ作用させるものとする。基礎梁をRC造、それ以外の柱梁をS造とし、上部構造と基礎梁を同時に最適化する。支持部の境界条件はピン接合とし、柱梁の接合部は剛接合とする。ここでは独立基礎を想定する。よって基礎梁には地盤反力がかからないものとする。

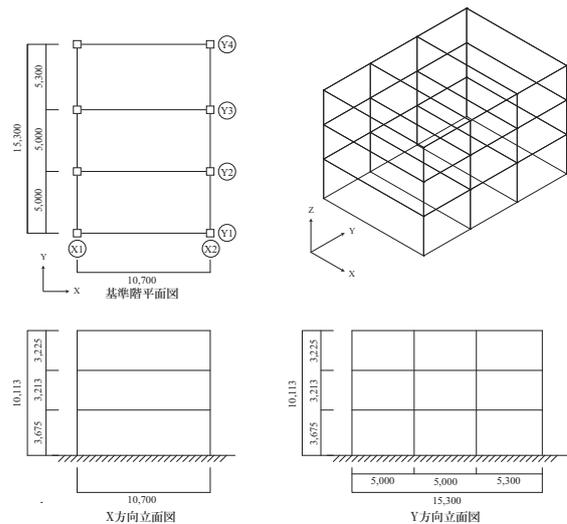


図1 計算モデル

3.2 設計変数

図2に示すように各階、各層ごとに柱を2種、X方向梁を2種、Y方向梁を2種としてグループ化し、上

表 1 設計概要

用途		事務所ビル	
建物形状	X 方向	1 スパン	
	Y 方向	3 スパン	
	階数	3 階	
構造形式	ラーメン構造	高さ	9.6m
材質			
柱	角型鋼管	SS400	
梁	H 形鋼	SS400	
鉄筋	異形鉄筋	SD295	
コンクリート		24N/mm ²	
地域係数	Z	1.0	
振動特性係数	R _t	1.0	
標準層せん断力係数	C ₀	0.2	

表 2 鋼材の設計変数の範囲

グループ	部材番号
C1 ~ C6	106 ~ 131
B _X 1 ~ B _X 6	4 ~ 25
B _Y 1 ~ B _Y 6	4 ~ 25

表 3 基礎梁断面形状の設計変数の範囲

梁せい(mm)	梁幅(mm)			
	400	600	800	1000
400	○	○	○	○
600	○	○	○	○
800	○	○	○	○
1000	○	○	○	○
1200	○	○	○	○
1400	○	○	○	○
1600	○	○	○	○
1800	○	○	○	○
2000	○	○	○	○

部構造全体で 18 種類のグループ化を行う。柱については付表 1 の角型鋼管 26 種類の中から、梁については付表 2 の細幅 H 形鋼 22 種類の中から選択を行う。

図 3 に示すように基礎梁に関するグループ分けは上部構造の梁と同様に行い、断面形状の組み合わせと鉄筋の呼び・本数の組み合わせを設計変数とするため、基礎梁全体で 8 種類のグループ化を行う。基礎梁の断面形状は表 3 の組み合わせ 36 通り、鉄筋に関しては表 4 の組み合わせ 30 通りから選択するものとする。

表 4 基礎梁に入る鉄筋の設計変数の範囲

本数	呼び					
	D16	D19	D22	D25	D29	D32
4	○	○	○	○	○	○
6	○	○	○	○	○	○
8	○	○	○	○	○	○
10	○	○	○	○	○	○
12	○	○	○	○	○	○

3.3 解析条件

上部構造に関する制約条件を表 5 に、基礎梁に関する制約条件を表 6 に示す。基礎梁の許容応力は式 (3) ~ (5)[10] で算出する。

コストに関しては、上部構造の鉄骨に加え基礎梁のコンクリート、鉄筋、型枠、根切りのコストを考慮する。なお、型枠は単価を 3000 円/m²、根切りは単価を 450 円/m³ とし、それぞれ式 (7)、(8) で計算する。型枠に関して、基礎梁の下には通常捨てコンクリートが敷いてあるため、基礎梁底面には型枠は必要ないと考える。また、実際に根切りを行う体積は基礎梁部分とその周辺のみだが、余分に残土処理費がかかることも考慮し、ここでは根切り体積を建築面積全体に基礎梁の最大せいを乗ずることで計算する。

本解析では独立基礎を想定する。よって基礎梁には地盤反力がかからないものとする。また、基礎梁が必ず設置されるものとして解析を行い、基礎梁の有無は設計変数としない。基礎梁の有無を設計変数とした解析は別の機会で報告する。

MOGA で解析を行う際の最適化パラメータを表 7 に示す。この表中の突然変異率は設計変数の個数の逆数とするが、それ以外の値は経験的に定めている。

$$M = Cbd^2 \quad (3)$$

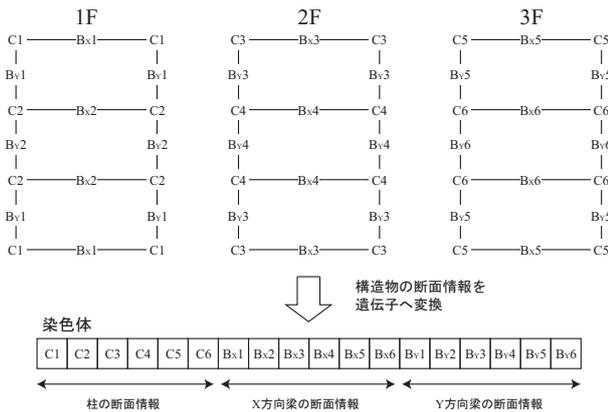


図 2 上部構造のグループ化と染色体

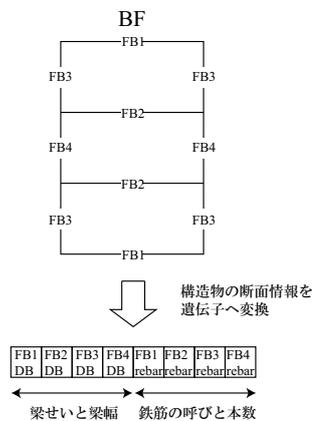


図 3 基礎梁のグループ化と染色体

表 5 上部構造制約条件 表 6 基礎梁制約条件

応力度	許容応力度以下	応力度	許容応力度以下
層間変形角	1/200 以下	引張鉄筋比	0.4%以上
剛性率	0.6 以上	あき	鉄筋直径の1.5倍以上
偏心率	0.15 以下		かつ2.5 cm以上
たわみスパン比	1/250 以下	かぶり	3 cm以上
ディテール制約	あり	鉄筋配置	2段以下

表 7 最適化パラメータ

設計変数	26
個体数	50
アーカイブ数	50
世代数	5000
交叉率	0.8
突然変異率	0.04

ただし、式 (3)中のCはC₁、C₂のうち、小さいほうとする。

$$C_1 = \frac{np_t f_c}{3x_{n1}} \times \left\{ (1-x_{n1})(3-x_{n1}) - \gamma \left(x_{n1} - \frac{d_c}{d} \right) \left(3\frac{d_c}{d} - x_{n1} \right) \right\} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{p_t f_t}{3(1-x_{n1})} \times \left\{ (1-x_{n1})(3-x_{n1}) - \gamma \left(x_{n1} - \frac{d_c}{d} \right) \left(3\frac{d_c}{d} - x_{n1} \right) \right\} \quad (5)$$

$$x_n = ndp_t \left\{ \sqrt{(1+\gamma)^2 + \frac{2}{np_t} \left(1 + \gamma \frac{d_c}{d} \right)} - (1+\gamma) \right\} \quad (6)$$

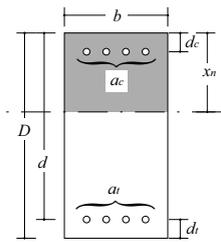


図4 基礎梁の断面

- M : 梁の許容曲げモーメント
- n : ヤング係数比
- p_t : 引張鉄筋比 (=a_t/bd)
- f_c : コンクリートの許容圧縮応力度 (kN/m²)
- f_t : 鉄筋の許容引張応力度 (kN/m²)
- x_{n1} : 中立軸比 (=x_n/d)
- γ : 複筋比 (=a_c/a_t)
- φ : 許容モーメント時の曲率
- E_c : コンクリートのヤング係数
- E_t : 鉄筋のヤング係数

$$C_{formwork} = \sum_i 2 \cdot D_i \cdot l_i \cdot P_{formwork} \quad (7)$$

- C_{formwork} : 基礎梁iの型枠のコスト
- D_i : 基礎梁iの断面せい
- l_i : 基礎梁iの部材長
- P_{formwork} : 型枠の単価

$$C_{excavation} = D_{max} \cdot a \cdot P_{excavation} \quad (8)$$

- C_{excavation} : 根切りコスト
- D_{max} : 基礎梁の最大せい
- a : 建築面積
- P_{excavation} : 根切りの単価

3.4 解析結果

解析によって得られたPareto解集合を図5に示す。これより、コストと最大層間変形角がトレードオフの関係にあることが確認できるため、基礎梁を含んだ二目的の最適設計が正常に行われていることがわかる。

表10～表12、図6では図5のPareto解集合のうちのNo.1、No.10、No.20、No.30、No.40、No.50の6つの解について詳細を比較する。

表10は各解において上部構造(柱・梁)に選択された部材を示している。これより、コストをおさえて設計する際は内側の柱(C2、C4、C6)の部材を大きくし、層間変形角を抑えて設計する際は外側の柱(C1、C3、C5)の部材を大きくすべきことが読み取れる。また、梁に関してはおおむね負担面積によって部材が選択されていると考えられるため、柱ほど層間変形角への影響がないことが予想できる。

表11は各解において選択された基礎梁を構成する設計変数(梁せい・梁幅・鉄筋の呼び・鉄筋の本数)について示している。一般的に基礎梁は梁幅より梁せいが大きくなるよう設計するが、表11には400×400という値が多く選択されている。これは選択リストの中で最も面積の小さな解であり、コストを抑えようとした結果である。また、Pareto No.が大きな解では幅よりもせいが大きくなる断面が選択されている。これは効率よく断面力を増やそうとした結果である。また、面積に関してFB2>FB1、FB3>FB4という傾向が見られる。このことから同一構面内の基礎梁でバランス良く一階柱脚のモーメントを負担するのではなく、一部の基礎梁に多くのモーメントを負担させていることが読み取れる。また、基礎梁のせいや幅を固定したまま鉄筋量を変えることで断面力を調整していることが分かる。これは、せいや幅を大きくすると型枠費や掘削費にも影響が出るためだと考えられる。

表12は各Pareto解のコストの内訳を示している。上部構造のコスト以外を基礎梁のコストと考えると、最もコストを抑えた解では基礎梁コストが全体の約20%であるのに対し、最も最大層間変形角を抑えた解では

表 10 各解の上部構造の選択部材 (表中の数字は付表に対応)

Pareto No.	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6	Bx 1	Bx 2	Bx 3	Bx 4	Bx 5	Bx 6	By 1	By 2	By 3	By 4	By 5	By 6
1	116	120	111	120	110	120	21	25	22	25	11	13	22	19	13	24	8	23
10	116	120	111	120	110	120	21	25	22	25	11	13	22	16	22	25	16	22
20	120	121	120	121	120	121	23	25	21	25	13	13	22	25	22	24	16	25
30	127	121	127	121	120	122	23	25	21	25	13	13	25	23	25	25	23	25
40	131	121	125	121	116	122	24	25	21	25	13	13	25	25	25	25	25	25
50	131	121	125	121	116	122	24	25	21	25	25	25	25	25	25	25	25	25

表 11 各解の基礎梁の構成要素

Pareto No.	FB1			FB2			FB3			FB4		
	せい×幅 (mm)	呼び	本数									
1	400×400	D16	4	1000×400	D16	4	400×400	D16	4	400×400	D16	4
10	400×400	D16	4	1000×400	D16	4	600×400	D16	4	400×400	D16	4
20	400×400	D16	4	1400×400	D19	4	600×400	D16	4	400×400	D19	10
30	400×400	D16	6	1400×400	D29	4	1000×400	D19	8	400×400	D16	12
40	400×400	D25	8	1400×400	D25	4	1800×400	D29	12	400×400	D19	4
50	800×600	D29	10	1400×400	D16	10	2000×800	D32	12	1600×800	D32	12

約34%と増加している。このことから、層間変形角を抑えるためには上部構造に比べ基礎梁の剛性を増すことが重要であると考えられる。

図 6は各解における各構面の短期曲げモーメントを示している。この図から、表 10~表 12に見られる傾向通りの応力の伝達が読み取れる。また、Pareto No.によらず、どのモーメント図も同様な挙動が見られる。そのため、計算モデルに対し最適な剛性のバランスは一意に定まり、同一Pareto解においては許容応力に対する余裕度が全ての部材において一様となるよう設計することが望ましいと考えられる。

表 8 解析結果 (鋼材コスト)

Max Cost (Yen)	Average Cost (Yen)	Min Cost (Yen)
6,135,285	4,077,799	2,900,672

表 9 解析結果 (最大層間変形角)

Max Maximum Drift Angle	Average Maximum Drift Angle	Min Maximum Drift Angle
0.00386	0.00227	0.00167

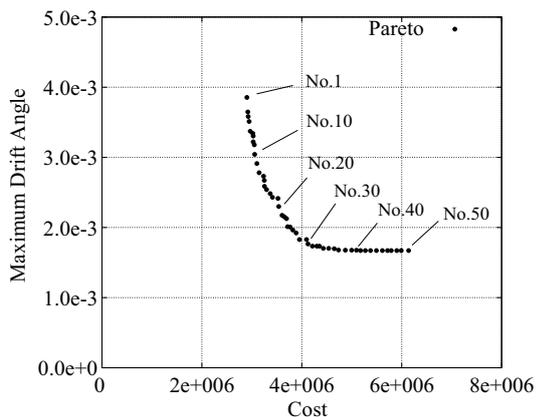


図5 Pareto最適解

表 12 コストの内訳 (万円)

Pareto No.	上部構造 (柱・梁)	基礎梁			掘削費	合計
		コンクリート	鉄筋	型枠		
1	232	19	7	25	7	290
10	243	21	7	28	7	306
20	277	24	10	33	10	354
30	319	28	17	38	10	412
40	380	35	33	48	13	509
50	408	75	53	63	15	614

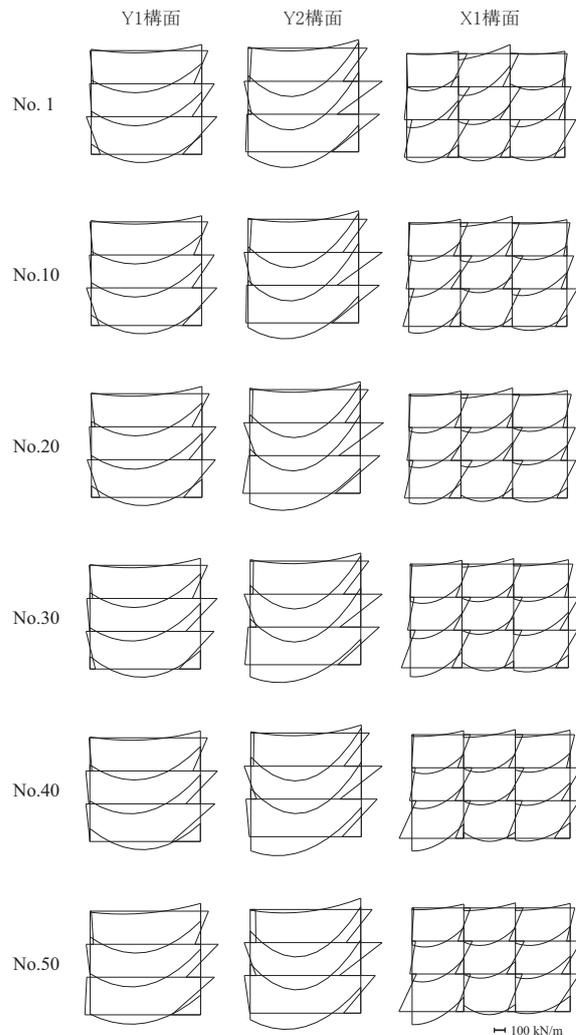


図6 短期モーメント図 (紙面左から右に加力)

4 結語

本報では許容応力度等設計法について基礎梁を有する構造物を対象として、構造安全性としての最大層間変形角と経済性としての鋼材コストを勘案した多目的最適化法の利用による、実用的な設計支援の方法を提案した。RC部材である基礎梁を、上部構造と同時に且つそれを構成する要素レベルで最適設計することで、より実務に近く人間には到達できないレベルで費用対効果の高い設計を行うことができると考えている。ただし、構造設計においては構造設計者の思想、様々な条件を加味した判断が重要である。そのため本報で述べた一連の構造計算、進化計算は設計者、構造設計の全てを代替することを可能とするツールではなく、合理的で効率的な構造設計をあくまで支援するツールとしてあるべきである。今後、こうした手法の利用により構造設計者の創造的な構造計画、構造設計が行われるような環境を整えて良質な建築資産を個人および社会に供することが望ましいと考える。

参考文献

- 1) 澤田樹一郎, 松尾彰, 弾性・塑性制約下における鋼構造建築骨組の離散最適化問題に対する列挙型アルゴリズムの改善解法, 日本建築学会構造系論文集, No.574, pp. 93-98, 2003.
- 2) 吉富信太, 山川誠, 上谷宏二, 二段階緩和法に基づく鋼構造骨組の最適離散断面選択法, 日本建築学会構造系論文集, No.586, pp. 95-100, 2004.
- 3) 澤田樹一郎, 松尾彰, 重量制限を課した遺伝アルゴリズムによる鋼構造建築ラーメン骨組の最小重量設計, 日本建築学会構造系論文集, No.600, pp. 89-96, 2006.
- 4) 高田豊文, 松嶋圭吾, 服部勇, 骨組構造物の弾性設計に対する多目的遺伝的アルゴリズムの応用 (その1~その3), 日本建築学会大会講演梗概集, 構造 I, pp. 273-278, 2003.
- 5) M. Liu, S. Burns, and Y. Wen, Optimal Seismic Design of Steel Frame Buildings Based on Life Cycle Cost Considerations. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 32, pp. 1313-1332, 2003.
- 6) 大森博司, 田村尚士, 伊藤智幸, 多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 54, pp.251-258, 2008

- 7) 大森博司, 田村尚士, 伊藤智幸, 多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援手法の提案-ブレース配置最適化問題への適用-, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 55, pp.239-246, 2009
- 8) 藤谷義信, 藤井大地, 春日康博, 尾中敦義, 平田裕一, 荒井宏, 塩崎洋一, 山本憲司, 鉄筋コンクリート建物の最適設計プログラムの開発, 日本建築学会技術報告集 第5号, pp.63-68, 1997.12.20
- 9) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele, SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), 2001.
- 10) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説. 2010

付表 1 角型鋼管

No.	H	B	t	A(cm ²)	Ix(cm ⁴)	Z(cm ³)
106	250	250	6	58	5672	454
107	250	250	9	85	8093	647
108	250	250	12	111	10254	820
109	250	250	16	143	12751	1020
110	300	300	6	70	9963	664
111	300	300	9	103	14340	956
112	300	300	12	135	18334	1222
113	300	300	16	175	23088	1539
114	300	300	19	196	24262	1617
115	350	350	9	121	23181	1325
116	350	350	12	159	29824	1704
117	350	350	16	207	37886	2165
118	350	350	19	234	40670	2324
119	350	350	22	264	44377	2536
120	400	400	9	139	35064	1753
121	400	400	12	183	45323	2266
122	400	400	16	239	57946	2897
123	400	400	19	272	63145	3157
124	400	400	22	308	69528	3476
125	400	400	25	337	73071	3654
126	450	450	9	155	49729	2210
127	450	450	12	204	64163	2852
128	450	450	16	267	81802	3636
129	450	450	19	310	92636	4117
130	450	450	22	352	102683	4564
131	450	450	25	387	109136	4850

H:せい, B:幅, t:厚さA:断面積, I:断面二次モーメント(強軸), Z:断面係数

付表 2 H 形鋼 (細幅)

No.	H	B	t ₁	t ₂	A(cm ²)	Ix(cm ⁴)	Z(cm ³)
6	248	124	5	8	33	3537	52
7	250	125	6	9	38	4052	78
8	298	149	5.5	8	41	6318	67
9	300	150	6.5	9	47	7209	99
10	346	174	6	9	53	11094	108
11	350	175	7	11	63	13559	193
12	354	176	8	13	74	16097	314
13	396	199	7	11	72	20019	219
14	400	200	8	13	84	23704	357
15	404	201	9	15	96	27486	543
16	446	199	8	12	84	28697	301
17	450	200	9	14	97	33451	468
18	456	201	10	17	113	40397	799
19	496	199	9	14	101	41869	478
20	500	200	10	16	114	47846	702
21	506	201	11	19	131	56516	1127
22	596	199	10	15	120	68716	636
23	600	200	11	17	134	77632	906
24	606	201	12	20	152	90395	1398
25	612	202	13	23	171	103487	2053

H:せい, B:幅, t:厚さA:断面積, I:断面二次モーメント(強軸), Z:断面係数

CA-ESO 法を用いた構造形態創生法の解の精度

間野明人¹⁾, 藤井大地²⁾, 真鍋匡利³⁾

1)近畿大学大学院システム工学研究科大学院生, hd103018@hiro.kindai.ac.jp

2)近畿大学工学部建築学科, 教授, 博士 (工学)

3)京都大学大学院工学研究科大学院生, 修士 (工学)

1 はじめに

境界形状だけでなく、内部の穴の数や穴の形状まで最適化できる位相最適化手法は、機械部品の軽量化や建築分野の構造形態の創生手法として、幅広く応用が進んでいる。このような位相最適化手法は、大きく分けて、均質化法¹⁾²⁾、密度法 (SIMP 法)³⁾⁴⁾などの数理計画法にもとづく方法と、CA 法⁵⁾⁶⁾、ESO 法⁷⁾¹⁰⁾などの発見的手法にもとづく方法がある。どちらの方法も多くの論文が発表されているが、これら2種の方法を同じ解析条件で比較した研究は見あたらない。

本研究では、粒子法による位相最適化手法で提案された CA 法と ESO 法を組み合わせた発見的手法 (CA-ESO 法)¹¹⁾¹⁴⁾を有限要素法に適用し、数理計画法にもとづく密度法¹⁵⁾と、OPTISHAPE-ES¹⁶⁾との比較により、CA-ESO 法の有効性を検討する。

2 CA-ESO 法の有限要素法への適用

本研究では、図1に示す4節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法¹⁵⁾に、CA-ESO 法を適用する。この場合、要素内変位と要素内座標は次式で表される。

$$u(x) = \mathbf{N}\mathbf{u}^e, \quad v(x) = \mathbf{N}\mathbf{v}^e, \quad x = \mathbf{N}\mathbf{x}^e, \quad y = \mathbf{N}\mathbf{y}^e \quad (1)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \mathbf{N} &= [N_1 \quad N_2 \quad N_3 \quad N_4] \\ \mathbf{u}^e &= [u_1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4], \quad \mathbf{v}^e = [v_1 \quad v_2 \quad v_3 \quad v_4] \\ \mathbf{x}^e &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4], \quad \mathbf{y}^e = [y_1 \quad y_2 \quad y_3 \quad y_4] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta), & N_2 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta) \\ N_3 &= \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta), & N_4 &= \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta) \end{aligned}$$

有限要素法の定式化は一般的なもので、要素内積分はガウス積分の2点積分で行い、シアールッキングを防ぐため、せん断ひずみ成分は1点積分で行っている。

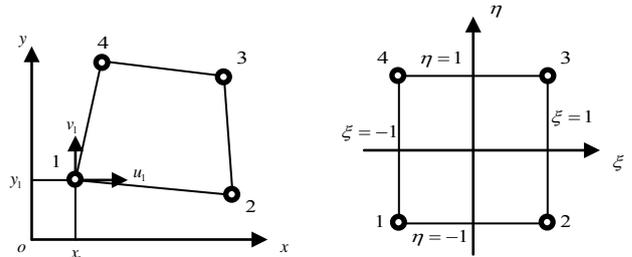


図1 4節点アイソパラメトリック要素

CA-ESO 法は、大森らの拡張 ESO 法の考え方をういて要素を消去し、また CA 法の考え方をういて要素を復活することで、最適位相を求めるものである。図2は、本手法の計算フローを示したものである。

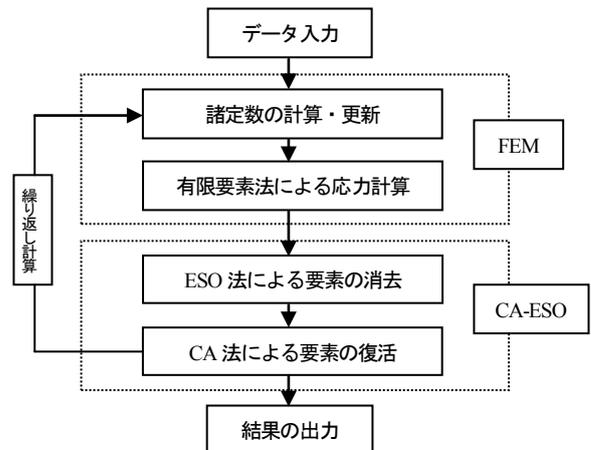


図2 CA-ESO 法による位相最適化計算のフロー

まず、ESO 法の敏感数 (要素消去の条件) として、次式で定義される von Mises 応力 σ^{VM} を用いる。

$$\sigma^{VM} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 6\tau_{xy}^2} \quad (3)$$

ESO 法では、各要素の敏感数が与えられた閾値よりも小さくなるとその要素が消去される。大森らの拡張 ESO 法では、この敏感数 (ここでは応力 σ^{VM}) の閾値 X_{cr} は、応力の平均値 σ_c と平均値からの偏差平均 ϕ を用いて次式で定義される。

$$X_{cr} = \sigma_{cr} - \eta \cdot \phi \quad (4)$$

ここに、 η は適当に与えられる制御変数である。また、 σ_{cr} と ϕ は次式により定義される。

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sigma_i^{VM}, \quad \phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_i^{VM} - \sigma_{cr})^2}{N}} \quad (5)$$

ここに、 N は要素数を示す。

ただし、有限要素法では、要素を消去すると計算が不安定になるため、消去された要素のヤング係数を $1/10^3$ にすることで対応する。(4)式の X_{cr} は、応力の不均等性が高い場合は緩い閾値となり、応力が平均値に均等化されてくると平均値に近い閾値となる。また、制御変数 η が大きくなると粒子が消去されにくくなり、 η が小さくなると消去されやすくなる。

次に、消去された要素を復活させる条件として CA 法の考え方をを用いる。CA 法は、各要素の敏感数にしたがってその要素の近傍要素の生滅を決めるもので、ここでは、各要素の σ^{VM} が σ_{cr} より大きい場合にその要素の近傍要素を発現(復活)させるものとする。

ただし、ここでは、近傍要素を影響半径 r_e によって決めるものとする。すなわち、各要素の中心から影響半径 r_e 以内の要素を近傍要素とする。さらに、この影響半径は、最適化計算の各ステップの残存要素数(ESO法で消去されなかった要素数)によって変化させるものとし、残存要素数が多い時は影響半径を大きくし、残存要素数が目的の要素数に近づくにしたがって影響半径を絞り込む。すなわち、初期の要素数を N 、最適化計算の k ステップの要素数を $N^{(k)}$ とし、各ステップの要素数比を $R_N^{(k)} = N^{(k)}/N$ とする。また、目標とする要素数比を R_N^{obj} とし、影響半径を次式で定義する。

$$r_e^{(k)} = \alpha^\psi \cdot r_0, \quad \psi = \sqrt{\frac{R_N^{(k)} - R_N^{obj}}{1 - R_N^{obj}}} \quad (6)$$

ここに、 r_0 は影響半径の初期値で、均等要素分割の場合、要素辺の長い方の長さを与える。また、 α は倍率を設定する係数で、ここでは、2 としている。また、 ψ は $0 \leq \psi \leq 1$ で変化するため、(6)式の設定は、初期倍率が α で、最終的に倍率 1 に収束する。なお、倍率 1 の場合は Neumann 近傍となる。

なお、比較に用いる密度法は、文献 15) に示されている手法を用いる(本書にプログラムも付属している)。

3 解析例

3.1 CA-ESO 法の有効性の検討

まず、図 3 に示す解析モデルで解析を行う。ただし、ヤング係数 $E = 206 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、要素分割数は 120×75 とする。

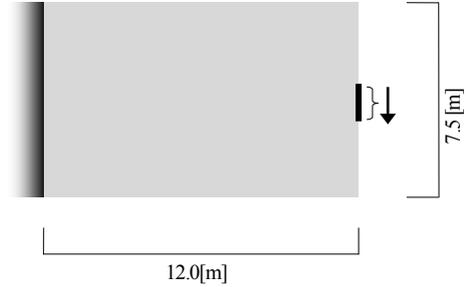


図 3 解析モデル 1

図 4 は、(4)式の制御変数 η の影響について調査したものである。ただし、要素数比 $R_N^{obj} = 0.3$ としている。図に示すように、 η の値が大きくなると目標の要素数比に到達せずに収束することがわかる。この解析例では $0.8 \sim 0.9$ が妥当な設定となっていることがわかる。

図 5 は、 $\eta = 0.8$ の場合で、図 2 に示す最適化計算ステップ数と位相の変化の関係を示したものである。図より、ほぼ 8 ステップで最終位相に収束していることがわかる。

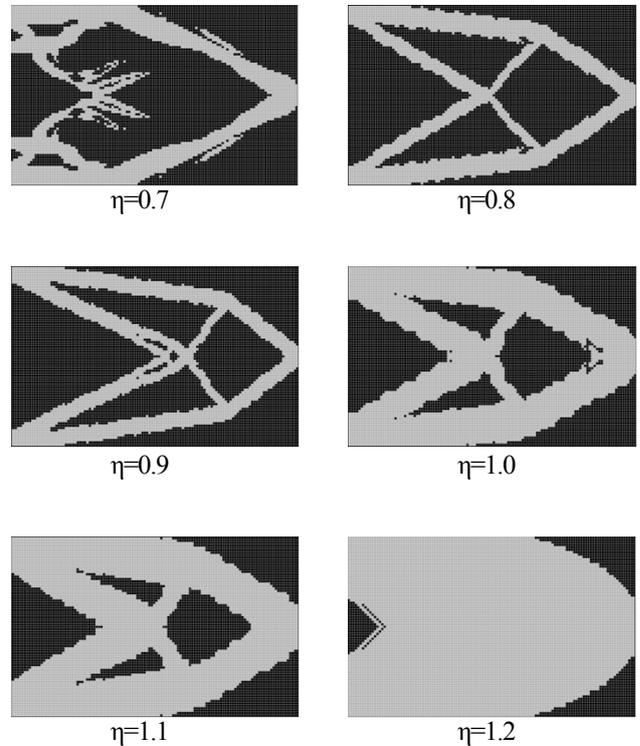


図 4 制御変数 η の影響に関する調査

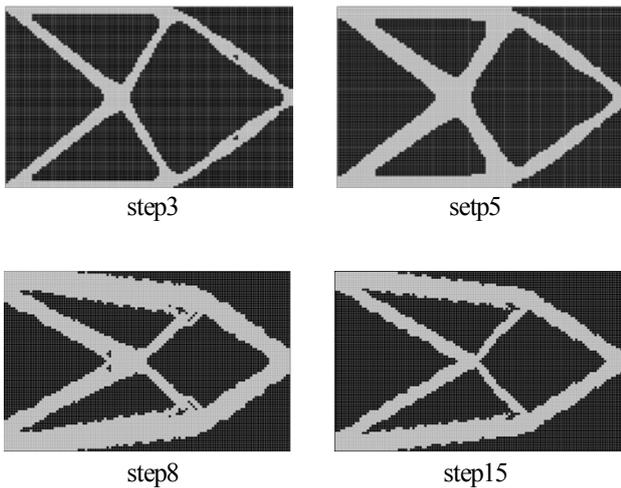


図5 最適化ステップ数と位相の変化

図6は、要素数比 R_N^{obj} を0.3~0.8に変化させた場合の位相を示したものである。図には、 η の値も示している。図に示すように、要素数比の制約が0.6以上になると、異なる位相が求まることがわかる。

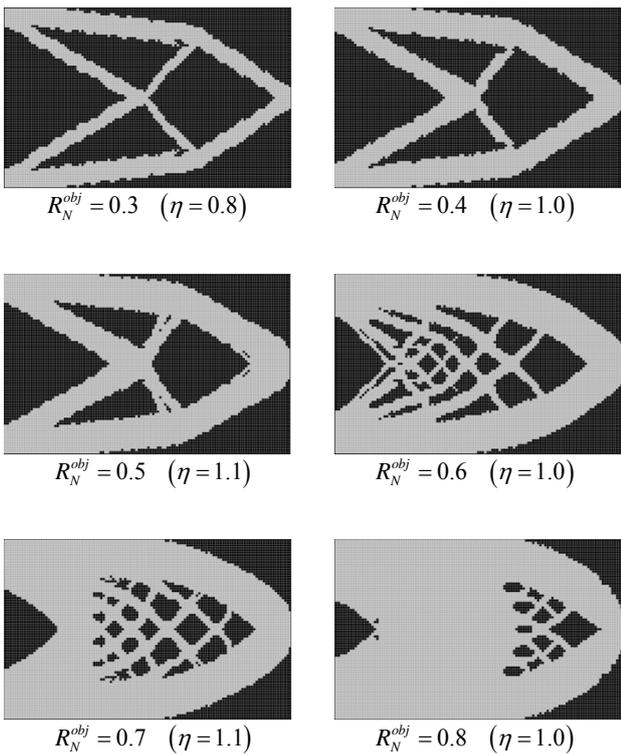


図6 各要素数比制約における位相

3.2 CA-ESO 法と密度法, OPTISHAPE-ES の比較

次に、図3, 図7, 図8の解析モデルで、CA-ESO法と密度法とOPTISHAPE-ESの比較を行う。

なお、図7のモデルと、図8のモデルは、荷重の位置と支持条件以外の条件は図3と同じである。

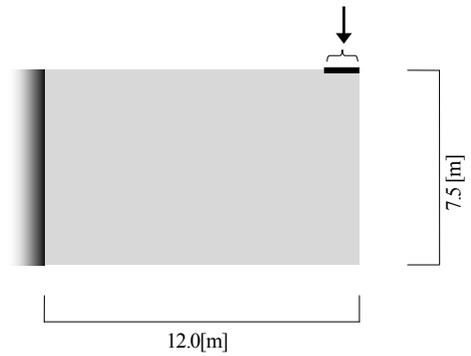


図7 解析モデル2

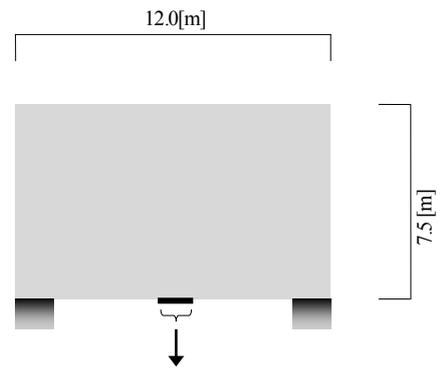
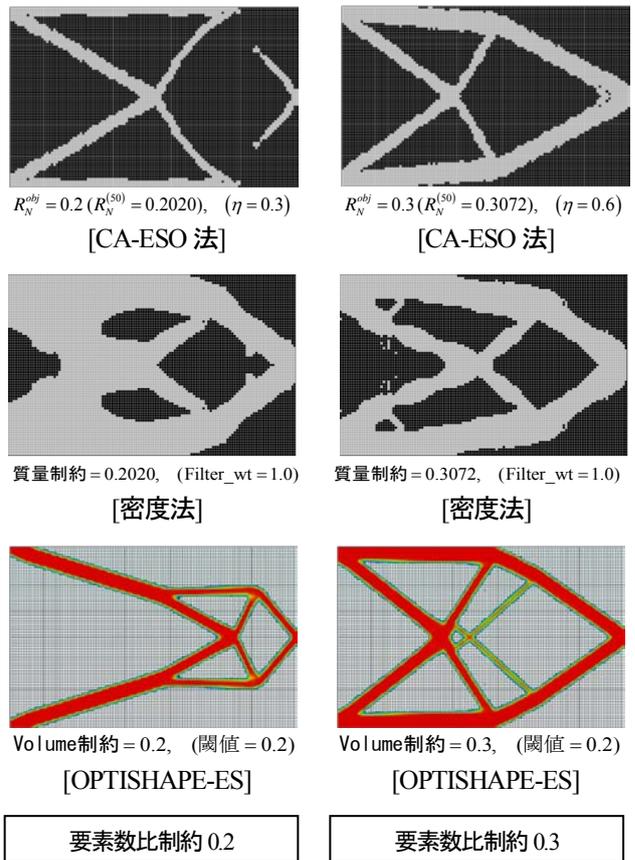


図8 解析モデル3



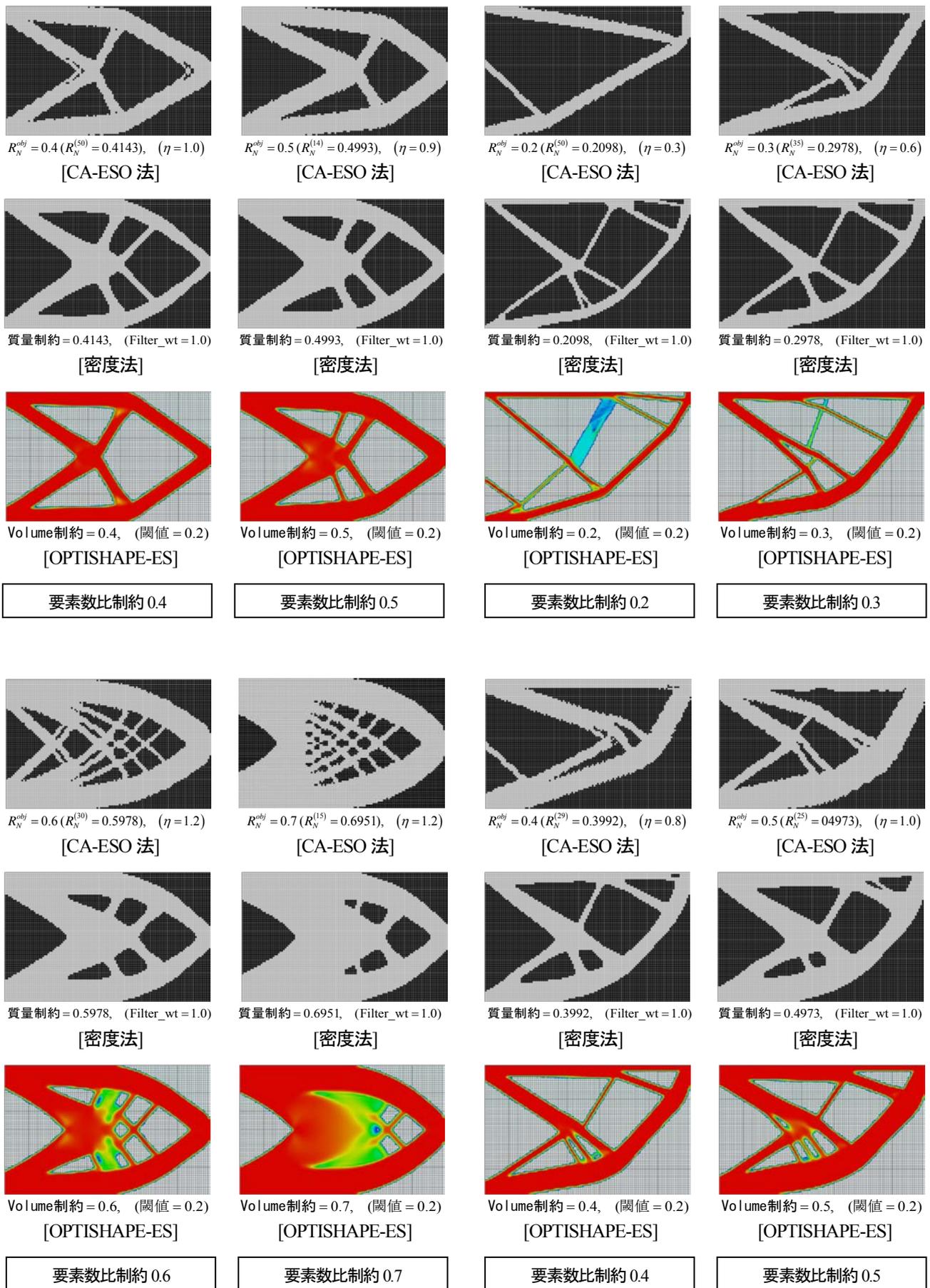


図9 解析モデル1での比較

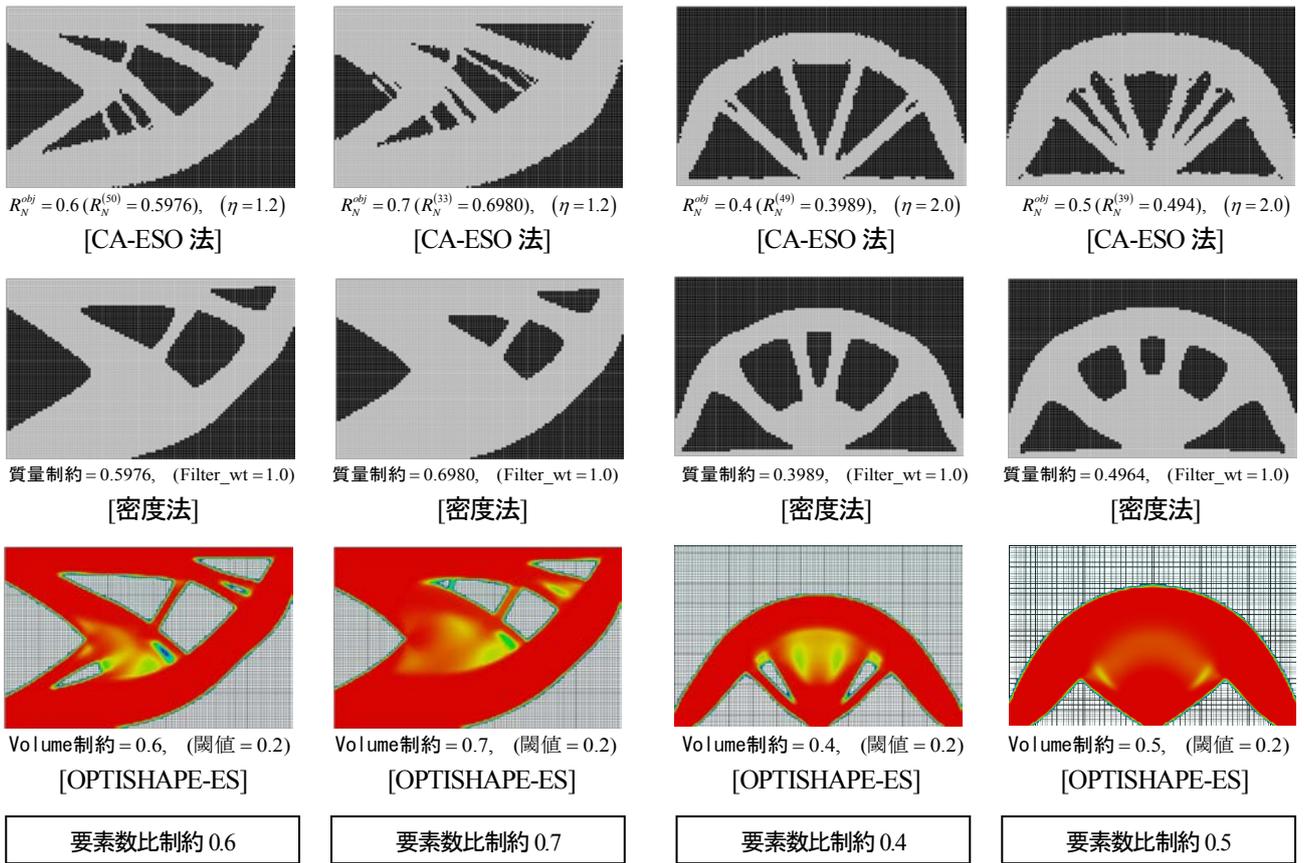


図 10 解析モデル 2 での比較

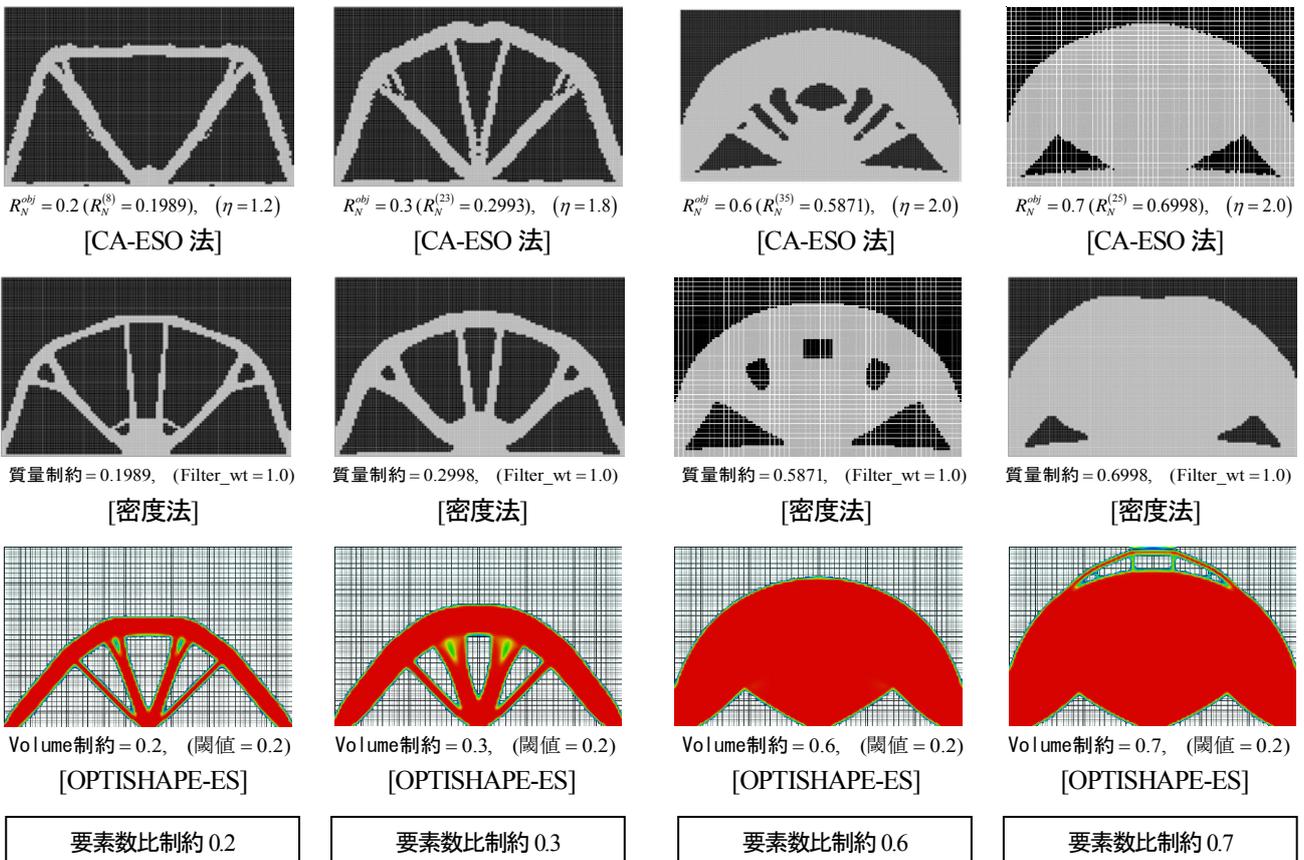


図 11 解析モデル 3 での比較

図9, 10, 11は, 図3, 図7, 図8の解析モデルで, 要素数比(密度法では質量比, OPTISHAPE-ESではVolume)の制約を変化させた場合(0.2~0.7)の最適位相を, CA-ESO法と, 密度法と, OPTISHAPE-ESで, それぞれ比較したものである。

なお, CA-ESO法の場合, 目標とする要素数比に収束しない場合があるため, R_N^{obj} の横の括弧内に最終ステップの要素数比を示している。また, 密度法の質量制約とOPTISHAPE-ESのVolume制約は, CA-ESO法の最終ステップの要素数比に対応したものとしている。

図9, 10, 11より, CA-ESOの最適位相と密度法, OPTISHAPE-ESの最適位相は, 必ずしも一致しないことがわかる。また, 密度法とOPTISHAPE-ESの位相がほぼ同じであり, 要素数比制約が変化しても最適位相はほとんど変化しないが, CA-ESO法では, 要素数比の制約値により位相が変化することがわかる。

4 まとめ

本研究では, 粒子法による位相最適化手法¹¹⁾¹⁴⁾で提案されたCA-ESO法を有限要素法に適用し, 数理計画法にもとづく密度法とOPTISHAPE-ESとの比較により, CA-ESO法の有効性を検討した。

その結果, 有限要素法に適用したCA-ESO法では, 得られる位相が, 要素除去の閾値を制御するパラメータ η に依存すること, 要素数比の設定値が大きくなると位相が変化することなどがわかった。

また, 密度法とOPTISHAPE-ESとの比較により, CA-ESOの最適位相と密度法の最適位相は必ずしも一致しないこと, 密度法とOPTISHAPE-ESでは, 質量制約が変化してもほぼ同位相が得られるが, CA-ESO法では, 目標とする要素数比の設定により位相が変化することがわかった。

参考文献

- 1) M. P. Bendsøe and N. Kikuchi, Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, pp.197-224, 1988
- 2) K. Suzuki and N. Kikuchi, A homogenization method for shape and topology optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.93, pp.291-318, 1991

- 3) Zhou, M. and Rozvany, G.I.N., The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **89**, 309-336, 1991
- 4) Yang, R.J. and Chuang, C.H., Optimal topology design using linear programming, Computers & Structures, **52**(2), 265-275, 1994
- 5) 北 栄輔, 豊田哲也, 野村壮史, セルラ・オートマタを用いた構造物の設計, 日本機械学会論文集 A, **64** (622), pp.1717-1724, 1998.
- 6) 三井和男, セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.555, 2002.
- 7) Xie, Y.M., GP. Steven, Evolutionary Structural Optimization for Dynamic Problems. Computers and Structures, Vol. 58, No. 6: pp. 1067-1073, 1996.
- 8) 大森博司, 崔昌禹, 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生. 日本建築学会構造系論文集, Vol. , No. 539: pp. 87-94, 2001.
- 9) 大森博司, 崔昌禹, 拡張 ESO 法による構造形態の創生—多目的適応型構造とシェル構造への適応—. 日本建築学会構造系論文集, Vol. 552, No. : pp. 109-116, 2002.
- 10) 大森博司, 崔昌禹, 佐々木睦朗, 拡張 ESO 法による構造形態の創生—三次元構造への拡張—, 日本建築学会構造系論文集, No.576, pp. 79-86, 2004
- 11) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた位相最適化手法の提案, コロキウム構造形態の解析と創生 2008, pp. 41-46, 日本建築学会, 2008
- 12) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた弾性体の位相最適化 CA-ESO 法の適用, 日本建築学会中国支部研究報告集, Vol.32, 201, 2009. 3
- 13) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた有限変形を伴う弾性体のトポロジー最適化, 計算工学講演会論文集, Vol.14 , 2009.5
- 14) 真鍋匡利, 藤井大地, 粒子法を用いた発見的手法に基づく有限変形を伴う弾性体のトポロジー最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 構造 I , pp.349-350, 2009.8
- 15) 藤井大地, 「建築デザインと最適構造」, 丸善, 2008
- 16) 株式会社くいんと, 「教育用位相最適化プログラム OPTISHAPE-ES」, <http://www.quint.co.jp/jp/pro/oes/index.htm>

形態創生コンテスト 2010

形態創生コンテスト2010

コンテスト概要

1. コンテストの主旨

形態創生のアルゴリズムや考え方をを用いた、「新しいかたち」や「独創的なアイデア」を評価するコンテストを実施しました。様々な分野の多くの人に参加して頂き、形態創生のおもしろさや可能性を感じてほしいというのが、開催主旨です。そのため、形態創生のフリーウェアも提供します。また、コンピュータプログラムによらない方法でかたちを創生するアイデアも可能としています。

2. 審査基準

審査は、主に次の二つの観点で行いました。

フェーズ1；創生された形態（かたち）の独創性、合理性、美しさ

フェーズ2；形態創生プロセスのアイデア性、独創性

一次審査は匿名審査とし、二次審査において審査員と同じ所属である場合は投票権を無効とみなすことで公平性を保ちます。

3. 課題（テーマ）

課題は以下のテーマとしました。

「環境性能に優れた、あるいは資源負荷の少ない建築の『かたち』を創生する」

なお、応募要項の詳細は、「コロキウム構造形態の解析と創生 2010」ホームページ
<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s17/>に掲載しました。

4. 審査委員（敬称略、50音順）

審査委員長：大森博司（名古屋大学）

審査員：新谷真人（早稲田大学 / オーク構造設計）

齋藤公男（日本大学名誉教授）

坂口紀代美（日本美術家連盟会員 / 彫刻家）

特別審査員：小嶋一浩（東京理科大学 / C+A）

弓削康平（成蹊大学）

5. コンテストの経緯

2010年3月20日；建築雑誌2010年3月号に応募要項掲載

2010年6月15日；応募要項に関する質疑締め切り

2010年7月16日；応募エントリー締め切り

2010年8月31日；応募締め切り

2010年9月17日；一次審査（日本建築学会会議室にて）

2010年9月21日；一次審査結果の通知

2010年10月20日；コロキウム構造形態の解析と創生2010にて二次審査および表彰



1次審査風景

6. 応募状況および一次審査での選出作品数

エントリー数 ; 57 件
 応募総数 ; 20 作品
 入選作品数 ; 5 作品
 佳作作品数 ; 3 作品

入選作品

エントリー -No	タイトル	所属	氏名 (○は代表者)
3	Adaptable Wave	(株)大林組構造設計部	○蔵野昌浩 小縣恭子 勝部千絵 北村有希子 齋藤元嗣
20	ヒダ ヒダ	鹿児島大学大学院	○和田大典
25	Lingering Nature		○杉田宗
52	そらにえんとつをならべてみた	(株)梓設計	○井戸川達哉 増田彩乃 佐川真美 大澤元嗣 石井衣利子 墓田京平 松竹祐介
55	digital woods	慶應義塾大学大学院	○谷垣内晶彦 青山みのり キムジョンソブ 阿部祐一

佳作 (本年度は協議のうえ、特徴ある作品など佳作数点を併せて選出することにしました。)

エントリー -No	タイトル	所属	氏名 (○は代表者)
21	原始的な道具による曲面の発見	東京大学大学院	○三木優彰
32	こもれびのさんかく	山口大学大学院理工学研究科	○首藤徹郎 寺本晃浩
53	steel's running	早稲田大学創造理工学研究科	○堀駿 林将利

□応募全作品の講評

本年のコンテストのテーマは、資源負荷の低減や環境性能に対するアプローチを求める課題である。形態創生という観点からどうテーマと結びつけるか、やや難解な課題であったと思われるが、本年のエントリー件数は過去最高の 57 件、応募総数も 20 件に上った。

応募作品のそれぞれに、設定された環境のテーマに対する解釈をめぐって様々な議論が飛び交う白熱した一次審査会となった。全体の傾向として、形態を形創る技術や手法、アルゴリズムは非常に成熟してきたこと、加えてその表現力も非常に高くなってきていることが挙げられる。一方、テーマに対してどのようにその原理を適用したか説明が不足していたり、理屈が不十分な作品も多く、その点は惜まれる。

審査は作品の内容、形態が形創られるプロセスを特に重視し、プレゼンテーションの技術のみが高く評価されるようなことがないように慎重を期した。

本コンテストに参加された応募者の方々に敬意を示すとともに、今後の益々のご活躍を期待する。

(以下、[]はエントリー番号を示す。)

[1] 漣-sazanami-

この作品の切り口は、次の[3]の作品とともに環境に密接なところから入っており、省エネのテーマに合う作品であった。さざなみの形はとてもきれいであるが、形を完結させてしまうと既視感があって形が新鮮でなくなってしまう。また、構造体としての抵抗機能が「曲げ」による抵抗である点はもう少し工夫が欲しかった。

[3] Adaptable Wave <入選作>

パッシブ制御を用いた提案で、環境というテーマに密接な関連を持ち、リアリティも高い作品であった。敷地の状況や環境に応じてアイデアを展開できる可能性を含む。この機構を単独に用いるのではなく、ルーバーなど別のものと組み合わせると建物の外皮に用いると面白いかもしれない。

[12] ねっこどうむ

実際に制作されたねっこどうむの中で遊ぶ親子の写真や、さまざまな形に対して実験を行った点については好感が持てる。ただ、せっかくマングローブという木を選択したのだから、海水と淡水の間に生きるこの木の根っこのユニークな特性をもっとさらに活かす提案が望まれた。

[14] point + plane

絵はとてもよく描き込んであるが、「森の階層性」や「プラントスタッキング」など言葉として理解できない箇所があり、作品の内容を十分に伝えきれていない印象がある。結果的に、形がなぜ三角錐になるのかは不明であるが、その利点を絵から推測すると、周囲の木の根を害さないよう基礎形状が小さく、地中への負荷が最小限に留められている点かと思われる。

[17] Synergetic Structure

プレゼンテーションは大変上手だが、表現・発想の仕方を含め、昨年の入選した作品の一つによく似ていて、もう一步工夫が欲しかった。形としてのフレキシビリティは伝わるが、提案されたユニットがどう組み合わせられたら写真にある構造システムが形成されるのか、また、エアチューブがシステムにどう組み込まれているのかなど、肝心のメカニズムが伝わってこない。審査員より頭蓋骨の真下に存在するくも膜に通ずる形状を連想させるというコメントもあった。

[20] ヒダ ヒダ <入選作>

薄い板をヒダヒダにして構造体にするアイデアは合理的である。しかし表面積が大きいことがなぜ良いのか、前提となる部分についてももう一步踏み込んでほしかった。20年以上前の香港において、エアコンが普及していないために表面積を増やす計画が取り入れられたこともある(ラジエーター原理)。今回の提案が、風通しを前提にしたインテリアであればよかったが、それにしても開口部が小さいのが残念である。また、メインのパースが見上げの視点を選んだものであり、威圧感を感じるという意見もあった。見せる角度にも配慮があると良いであろう。

[21] 原始的な道具による曲面の発見 <佳作>

簡潔な表現は確信か、それとも時間がなかったか？しかし表現を抑えながらも、スケールなど当然指摘されるであろうことは押さえてある完結された作品。近年のパラメトリックなモデリングやデザインの傾向に対するある種の批判であると読むこともでき、一次審査会で大きな注目を集めた。反面、今回のコンテストのテーマに対する回答としてはやや説明が不足していると判断せざるを得ない。今後のコンテストに応募される作品の幅を広げるような意味を持ち得ると評価し、佳作とした。

[25] Lingering Nature <入選作>

微細な木材が無数に集積した形態は全作品のなかでも屈指のインパクトがあり、日本人離れした表現が目をはく達者な作品。建築としての機能と形態との関係が説明不足であるが、アートとしての表現と割り切って見れば大変美しい。しかし構造的に成立するかどうか疑問であり、また内部空間についても断片的で十分に表現されていない点が惜しまれる。実際の敷地が想定され実現するとされており、力量を評価し、入選作品とした。さらに説得力のあるプレゼンテーションを期待している。

[29] 平行四辺形の無限の可能性～平面から立体へ、立体から平面へ～

出発点として、何故平行四辺形に拘ったのか、という点において説明が不足しており、作者の意図が十分に表現されていない点が惜しまれる。平行四辺形を選んだ利点、魅力がもっと表現されればよかった。しかし、おそらく若い研究者もしくは学生の作品であると思われ、実際に可動・変形できる模型を作ったの試行は、アルゴリズム・デザインの入門者のトライアルとして大変よい挑戦であったと思われる。

[32] こもれびのさんかく—呼応する外皮— <佳作>

シンプルで分かりやすい案。人々が寄りそって和むような規模の提案として、よい雰囲気が出ている。しかし、パネルが開いた状態で構造的に形態を保つ方法が示されていないことや、実際にはかなり面外にたわむと思われ、さらなる工夫が欲しい、例えば2層(ダブルスキン)にして剛性を上げたり、それによってより複雑な光の状態を表現することも可能と思われる。今後の発展性を期待できる案と評価し、佳作とした。

[37] ■ Block ■■ House ■

本コンテストのテーマに対して実直に取り組みられた案であり、軽量化に対する配慮や、内部に水をいれるなどのアイデアが言及されていることも評価できる。表現は素朴で銜いが無いが、実寸の模型も作られていて好感の持てる取り組みである。しかし、既に隈研吾氏により提案されている「水ブロック」や玩具のレゴ・ブロックなどと比べると、ユニットが複数必要であることや、新しい使い方などの提案に欠ける点が惜しまれる。

[38] HONEYCOMB 自然が創生する最も ECO な「かたち」

ハニカムを使った提案はこれまでに多くあるが、本作では六角形の板を積んで階段を作るなど、独特の使い方が見られる。よく言えば原理に対して忠実であると言えるが、実際の建築や空間にハニカムのルールを落とし込んでいく方法にもっと工夫があると良かった。

[42] KAZAGURUMA

新しい要素技術が良く調査されており、それらを高層ビルに組合せ適用することで様々な可能性が示されている。面白くひきつけられる作品である。しかし、個々の技術をどのように組み合わせたいのか、あるいは個別に適用したいのかが見えてこない。説明、アピールにもう一工夫欲しかった。

[44] Generation of NEXT～使いまわしの美学～

ポリカーボネートのパイプによって展開構造を作る提案。展開構造を構成する部材を、材料・素材の循環サイクルの中に組み込もうという着眼点は新しい。ただし、材料の提案を除けば、作者のオリジナリティはやや乏しく、実際のスケールを想定した構造的な検討や、実寸の模型を作ってみるなど、より実現を見据えた試みがあれば良かったと思われる。

[45] Let's defend the coral reef

グランドストラクチャー法を現実の課題に適用しており興味深い。ただ、部材の最小化だけで珊瑚等の環境を守ることになるか等、問題の設定や解決手法の適用により深い考察があればより優れた作品になったと思われる。このアイデアを実現した場合、サンゴに光が届かず死滅させる危険も予想される。また、海底（支点）にレベル差を設けたり、もっとスケールの異なる対象（OAフロアの支持材）に適用する等、問題設定に工夫の余地が考えられる。

[49] Climb in the center of a city 大地の侵食アルゴリズムを用いた複合施設

[45]もそうだが、最適化や形態創生の手法をよく知り、使いこなす人材が育ってきていることを感じる。技術的に高い水準であるが、本作品においては人が歩けることが強調されていない、また秋葉原を選んだ意図が明らかでない等、プレゼンテーションにもう一工夫欲しかった。この手法に興味を持つ建築家あるいは都市計画家と協働することで面白いものが生まれる可能性がある。

[52] そらにえんとつをならべてみた <入選作>

ユニット化、使いまわしの作品が多い中で、異なるアプローチを試みており面白い。構造と形態と都市が上手く着地している。しかし、自動車の存在を前提とした環境改善には疑問も呈された。鉄道の上に配置する等リファインすればより良くなるであろう。提案のヒントや出発点を与えるものとして、高く評価された。

[53] steel's running <佳作>

壁の切り出し寸法の決定を最適化問題として定式化しており技術的には優れているが、形態創生に対する回答には至っていない。部材の標準化と言うことであれば、この分野では過去に多くの研究がなされ、近年ではecomis等のように企業による提案も既になされており、関連情報を収集してから始めることで、より良い作品になったのではないと思われる。ラフなプロポーザルとしては、今後の発展が期待でき、佳作作品とした。

[55] digital woods

コンピューショナルデザインによるサステナブルな木造構法 <入選作>

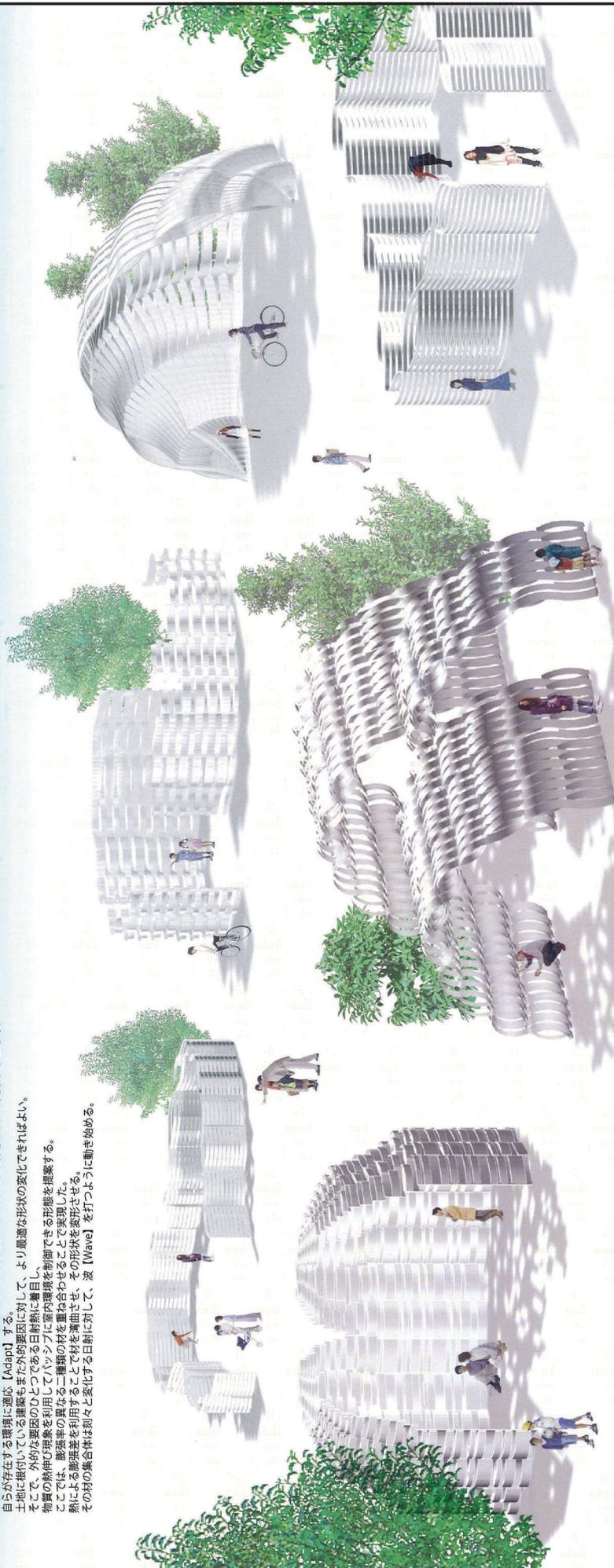
基準線を指定することでユニットの配置と部品番号、組立図が自動生成されるというストーリーは良くできている。また創生された形態のセンスも良い。結果として現れた「かたち」には藤本壮介氏の影響を少し感じるが、作品のオリジナリティが失われるほどではないとの意見が大勢を占め、入選作とした。

[57] snake curtain

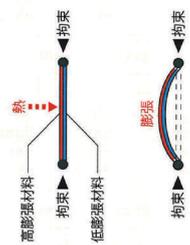
発想が単純明快で面白い。絵の見せ方にもセンスを感じ、目指しているものは分かりやすく表現されている。ただ、類似の発想は数多くあると思われる。実現に向けた接続部分や材料等のリアリティをもっとアピールできていれば、より新しい作品として評価されたと思われる。

Adaptable Wave

光、風、水...etc
 移動することができない種物は、上記のような外的な要因に対して、より最適な形状に変形することで、自らが存在する環境に適応 (Adapt) する。土地に根付いている建築もまた外的要因に対して、より最適な形状の変化できればよい。そこで、外的な要因のひとつである日射熱に着目し、物質の熱伸の原理を利用してハット型に室内環境を制御できる形態を提案する。ここでは、膨張率の異なる二種類の材を組み合わせることで実現した。熱による膨張差を利用することで材を湾曲させ、その形状を変形させる。その材の集合体は刻々と変化する日射に対して、波 (Wave) を打つように動き始める。



System



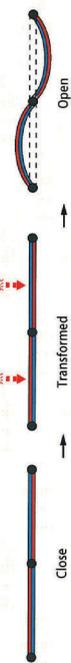
熱膨張率の異なる二種類の材を組み合わせる。熱による膨張差があるため、高膨張材側に湾曲する。

$$\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T$$

ΔL : 伸び
 L : 材料の元の長さ
 α : 熱膨張係数
 ΔT : 温度変化

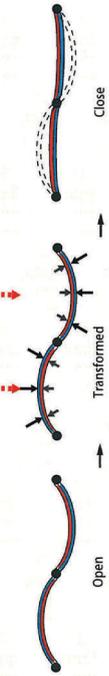
【Unit-A FLAT】

初期形状をフラットな形状とする。熱による高膨張材の伸びに低膨張材が追従し、開口が開き、空間は開放される。



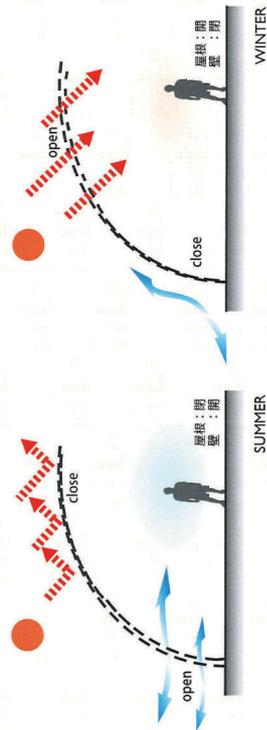
【Unit-B CURVATURE】

初期形状を湾曲した形状とし、湾曲の外側を高膨張材、内側を低膨張材とする。熱による内側の高膨張材の伸びは低膨張材により拘束されるため逆側に膨張し、開口が閉じ、空間は閉鎖される。



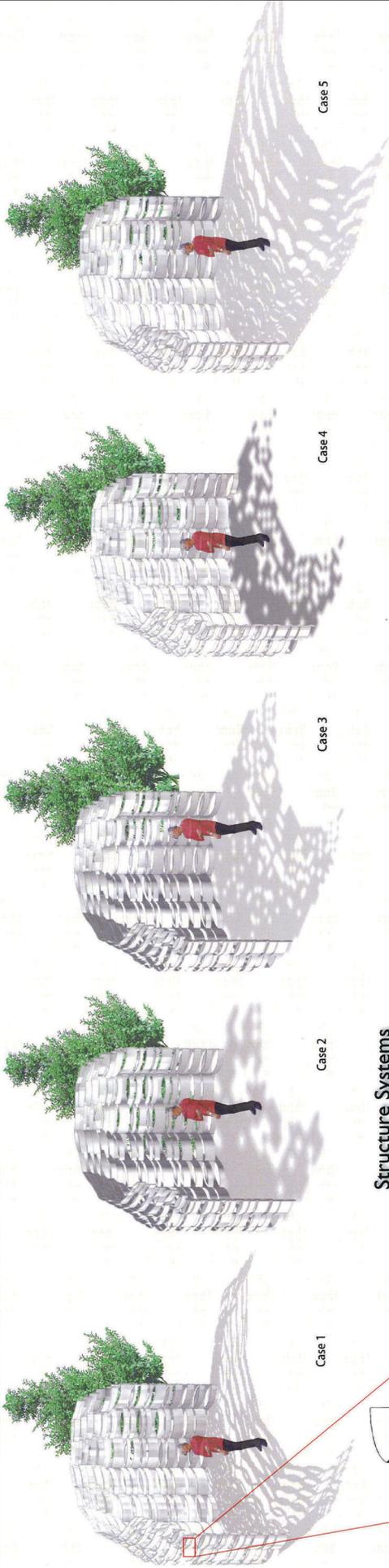
Passive Control

【Unit-A -FLAT】と【Unit-B -CURVATURE】を組み合わせることで、年間を通して安定した室内環境を実現することができる。例えば、初期形状としてアーチの頂部を【Unit-B】で、側面を【Unit-A】で構成する。日射が厳しい夏季においては、頂部は日射熱により開口が小さくなり、日射が遮断される。一方で、側面は日射熱により開口が大きくなり、風が内側に流入し、室内環境が改善される。日射が穏やかな冬季においては、日射が種やかに変形し、日射は流入し、風は遮断される。



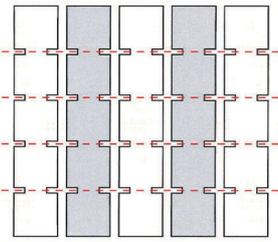
Adaptable Wave

温熱環境は一日を通して、また年間を通して穏やかに変化する。また日射軌の変化に合わせて、開口の形状も種やかに変化する。内部に差込む光の形状は、太陽の方位と高度に加え、開口の形状によっても刻々と変化し、木漏れ日のような複雑で豊かな表情を生み出す。Adaptable Wave のつくりだす空間は植物のつくりだすようなやわらかな空間となる。



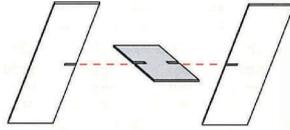
Structure Systems

STEP1 切り込みを入れる

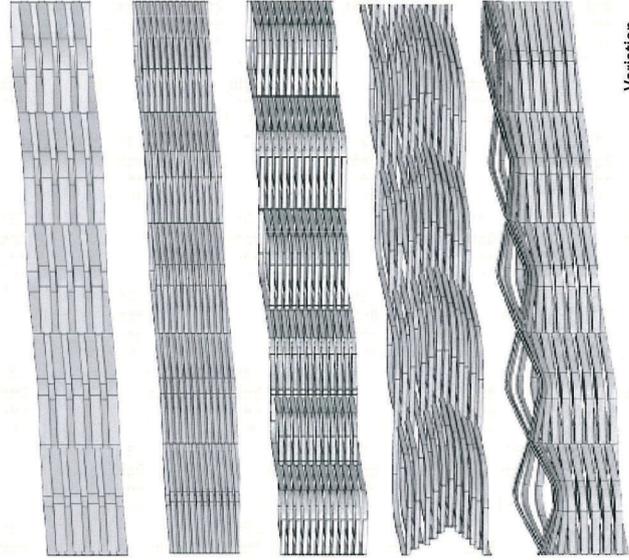


Easy & Portable

STEP2 かみ合わせる

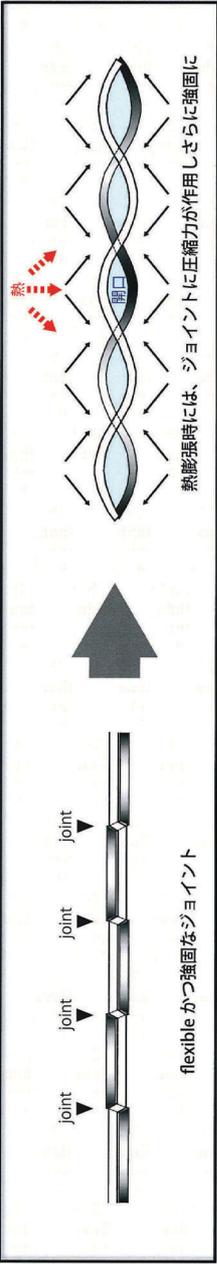


STEP3 積層する



Variation

構部は材に切り込みを入れてはめ込むだけの単純なものとす。この形状は材は互に押しはめ込むことが可能なジョイントであり、様々な積層パターンを生み出すことができる。材のみで接合できるため接合部材が不要であり、解体を含め施工、が容易である。



ヒダ ヒダ

Concept

人間の脳や腸、エンジンの放熱フィンなどは大きな表面積を獲得することで、周辺環境に対して機能や性能を向上させているカタチであると言えます。そこで、本提案では「環境性能に優れたカタチ=表面積の大きいカタチ」と捉え、表面積の大きなヒダ状の建築を提案します。

表面積が増えた建築はより多くの外部空間に接し、光・熱・風などの周辺環境に大きく関係してきます。また、その建築は自重が増える反面カタチを細分化していくことから壁面長さが短くなる等々です。

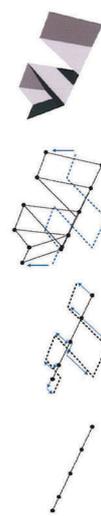
ここでは、表面積と力学指標の同時最適化を行い、環境と構造の両方に適した建築形態を示します。

Diagram

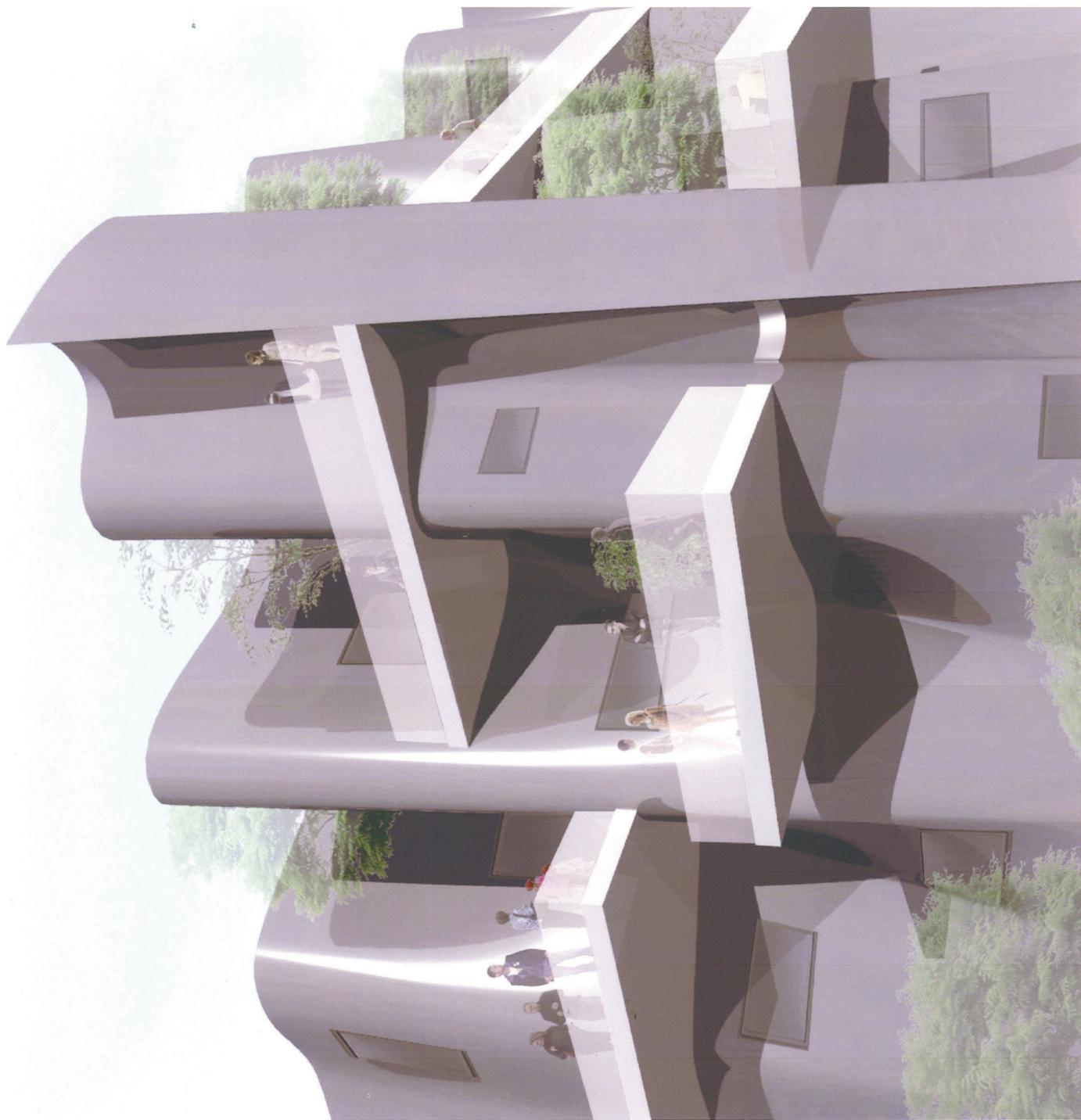


■フラットな壁は太陽の光を直接受け、室内に光や熱を通す。表面積の大きな壁は多くの日影が生まれ、熱量の低下や採光面積の増加をご周辺環境に適した建築が可能となります。

Structural Diagram 形態生成プロセス



■CADツールで用いられている掃引に着目。設計空間上に単純化した2本の直線を重ねる。片方の直線をxyz軸方向に掃引すれば、立体的に多様な空間を構成した大きな表面積を持つ形態が生まれます。



Genetic Algorithms 遺伝的アルゴリズム

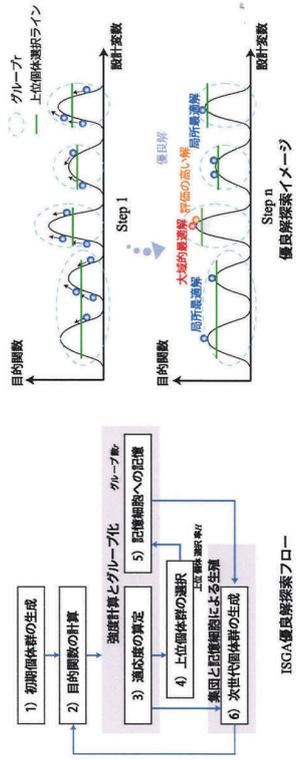
自然界には多くの秩序が存在している。

それらはある一定のルール(アルゴリズム)の基、自然界に働きかけ、生物の進化と変遷を繰り返して、自然環境に適合した多くの生物を生み出してきました。

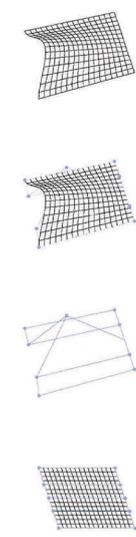
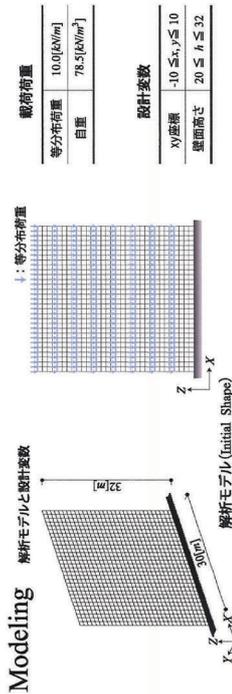
このような生物の進化の過程を工学的に模倣した遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて構造形態の進化を行い、優れた構造形態の獲得を目指します。

ここでは、GA系法の一つであるISGAを用います。ISGAは解の多様性を考慮した優良探索解法であり、一度の試行で多様な構造形態が獲得されます。

ISGAにより多目的最適化問題を解き試設計へと展開します。



Modeling



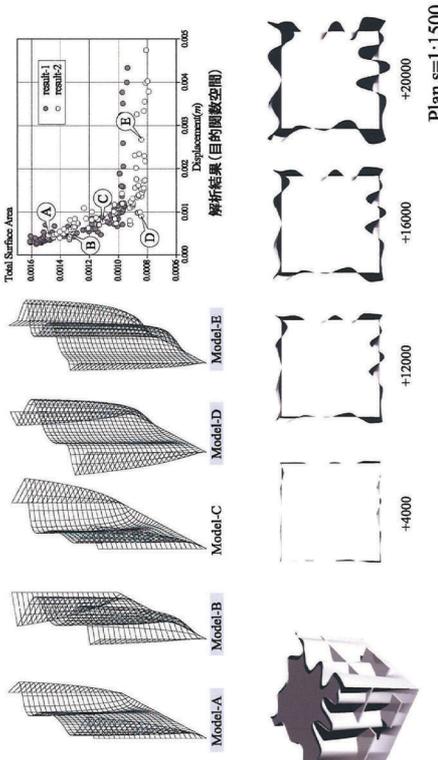
パラメトリック曲面による形状表現

■曲面形状の表現はパラメトリック曲面の一つであるテンソル積ベジエ曲面を用います。パラメトリック曲面はいくつかの制御点と基礎関数で定義され、上部制御点のXYZ座標を設計変数として扱います。

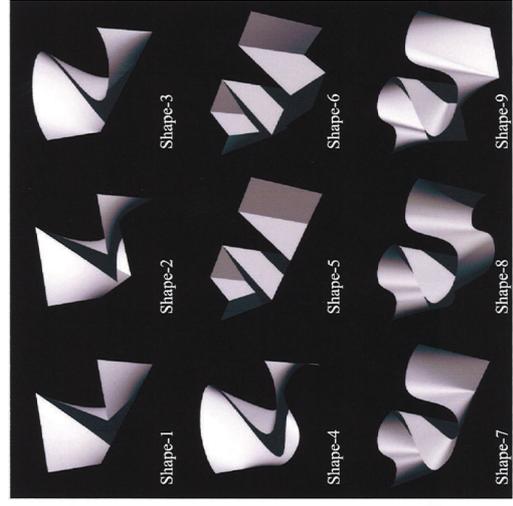
Structural Optimization

■表面積最大化問題を扱うことで環境性能に優れた建築を目指します。目的関数は表面積の逆数と最大節点変位であり、同時最小化を目標とした多目的最適化問題を解きます。

$$\begin{aligned}
 & \text{Object} && f_1(A, R) = 1 / \sum_{i=1}^n S_i(R) && \text{(形状総表面積の逆数)} \\
 & && f_2(A, R) = \max(A, R) && \text{(最大節点変位)} \\
 & \text{Find} && A, R && \\
 & \text{minimize} && \Phi(A, R) = \{f_1(A, R), f_2(A, R)\} && \\
 & \text{subject to} && A^x \leq A \leq A^y, R^x \leq R \leq R^y && \\
 & && A^x, A^y \leq A^u, R^x, R^y \leq R^u && \\
 & && \delta: \text{節点変位}, S_i: \text{構成要素の表面積} &&
 \end{aligned}$$



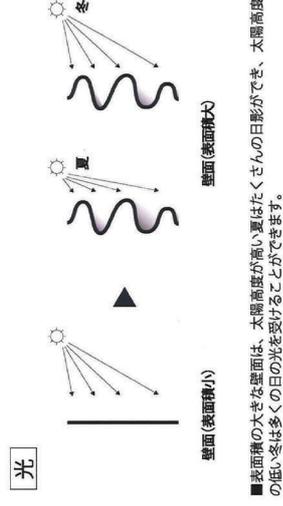
Structural Pattern 形状表現の自由度



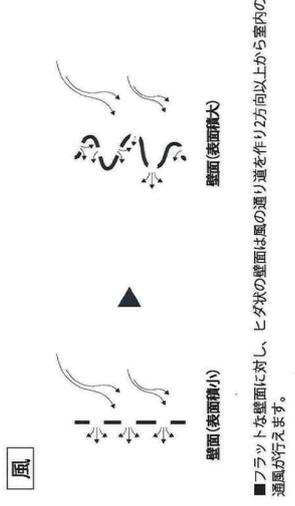
■消しは移動する線や節点の数に応じて様々なヒダ形状が表現が可能です。ここではModel-3, 7のような曲面構造体を基に設計を行います。

Environmental Performance

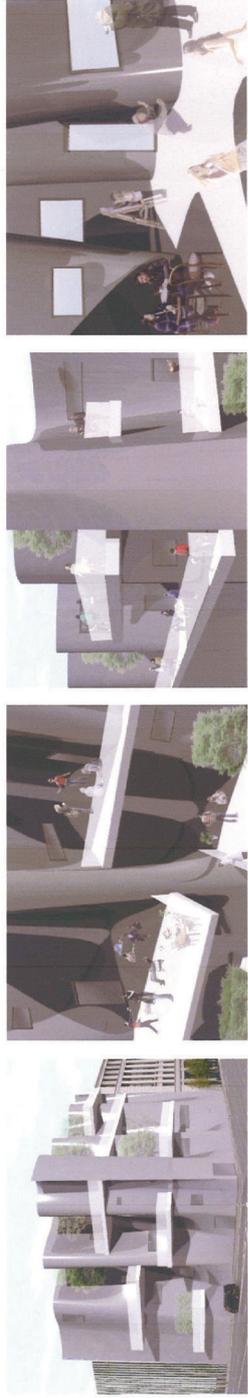
ヒダ形状の環境性能



■表面積の大きな壁面は、太陽高度が高い夏はたくさん日影ができ、太陽高度の低い冬は多くの日の光を受けることができます。



■フラットな壁面に対し、ヒダ状の壁面は風の通り道を作り方々から室内の通風が行えます。



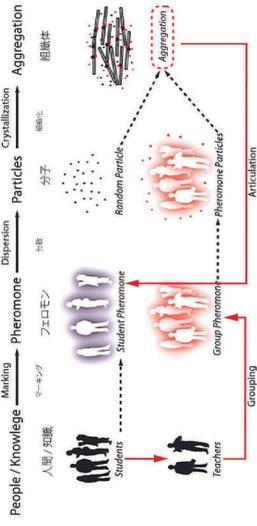
世界の環境は私たちの想像のスピードを超えて変化していきまふ。建築はこの状況の中で準備を続ける一方、自然とは距離を置き私たちの生活環境の維持のための発展を続けさせた。建築を作ること、又はその形態を生む方法論は経済的な合理性によって触れられ消費される。本プロジェクトではその問題に対し、より自然に近いシステムを構築し建築と自然が共動しあう様な環境を作り出すことを目的としている。私たちの生活が建築を介し、自然と迎えるような姿が将来の建築の『かたち』であると考えます。

Lingering Nature

建築を作るプロセスは多くの場合概念的な枠組みによって単純化され細やかな関係性などが排除されている。新しいシステムを構築するには建築の要素や人間の行動を解体し、それらが分子レベルで関係をもちあうこと、自然界に見られるような非線形な複雑システムが生まれるのではないかと考えた。そのシステムの為に本プロジェクトでは様々な個性をもつたエーเจメントを用いて、色々な要素の干渉によって自己生成的に生まれる空間を建築のベースとして抽出している。

このシステムを用いてアメリカ、フィラデルフィアにある大学施設を設計した。この施設では教育によって生徒や教師の間に生まれるコミュニケーションや、プログラムの空間定義に基いたエーเจメント同士が外部の環境とどう干渉しながら建築を生み出していくかを試みている。そのシステムが作り出す干渉は蓄積され徐々に空間へと変換されていく。それを表現するためにここでは集合体を形成する組織を用いて建築の形態を作り出している。その結果、すべての要素が他のすべてに関係した小さな自然の様な建築が生まれた。

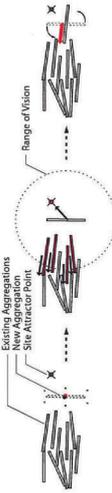
Organisation Rules



学校内で起こるコミュニケーションの種類によって特定の行動が促進され、多くの場合、人はより組織の多い人間関係を形成し、特定のプログラムを発生させる。空間の定数のない場合、グループはそのプログラムの軌跡をその場に残して解散する。これをプログラムのマーキング行為としている。

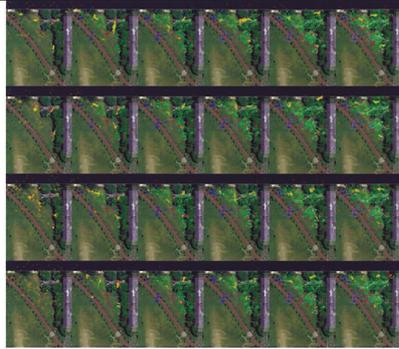
プログラムのマーキング行為によって特定の軌跡はプログラムとなり、同じようなグループを引寄せ、また、プログラムは効力が薄れていく。種々の空間を共有する組織を発生させる。時間の経過により、プログラムのエロメは強く残る部分が残れ、そのプログラムのための空間が構築されていく。

Aggregation Alignment



組織は周りで行われているプログラムの状況を見極め、そのプログラムが必要している空間を作り出すために自身の位置や角度を決める。新たな組織が生まれる時には周りの組織や外部環境をコントロールするポイントとの関係をチェックし、これに合う形で集合体を形成している。このプロセスを色々な組織が同時に繰り返しながら様々な場面で生まれる干渉を処理している。

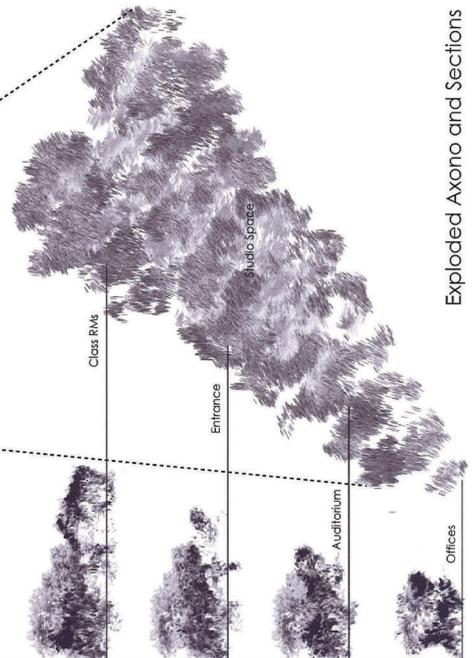
Generation Process



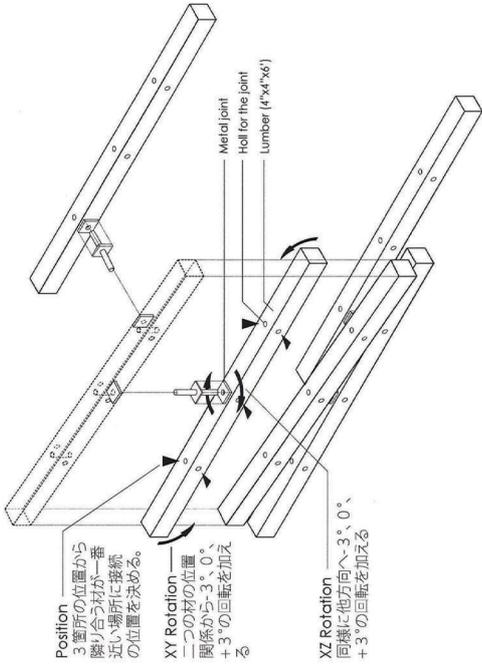
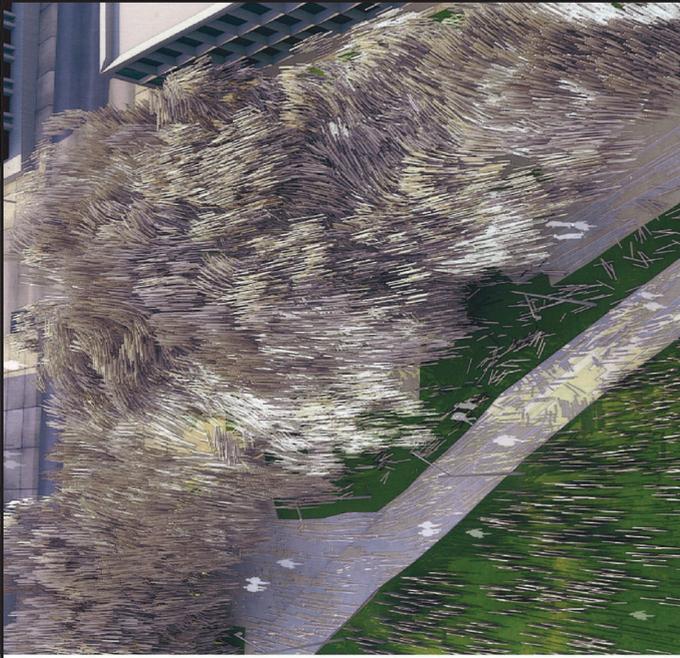
形態創生コンテスト2010 「環境性能に優れた、あるいは資源負荷の少ない建築の『かたち』を創生する」



Site Plan



Exploded Axon and Sections



Construction Detail Diagram

集合体を形成する組織は単純なルールに従ってこの複雑な建築全体を形成している。3箇所のポジション、XY面またXZ面での角度の有無という最小限のルールで、様々な状況に対応する。その結果組織の成長から施工レベルまでを一貫したアルゴリズムで処理しながら全体を築くシステムを生み出すことができた。

このシステムはあらゆるタイプの建築に対応できるものであり、現在同じシステムを用いたパビリオンをニューヨークの公園に製作中である。



Mock-up

そらにえんとつを ならべてみた

現在の都市の風景、それは自動車社会を前提とした都市計画であった。C・アレクサンダー然りコルビュジェ。「車社会」、それはヨーロッパではすでに1930年代には始まり、日本では1964年の東京オリンピックを契機に進められた。そして現在も車を前提とした都市計画が進められているのは、どの国も変わらないように思われる。

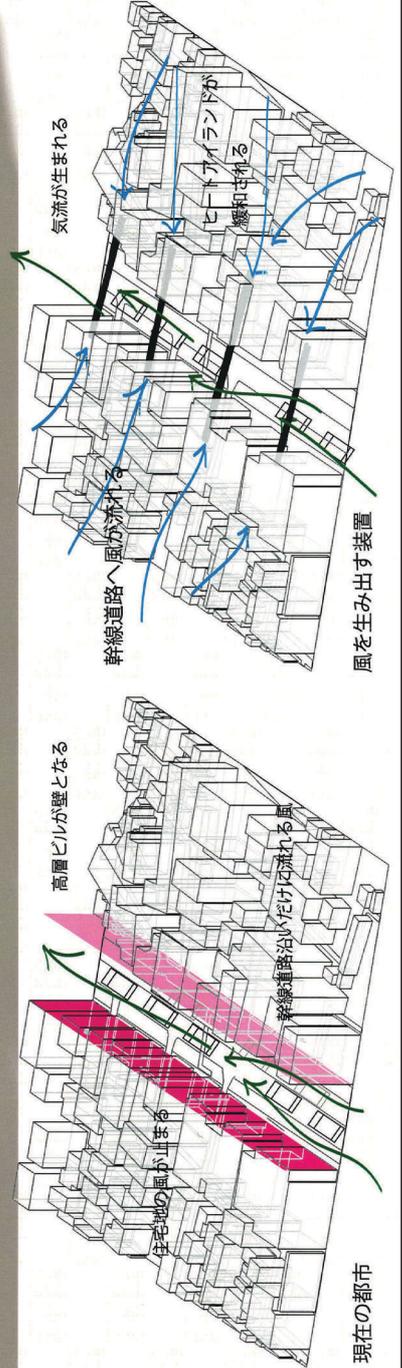
幹線道路が際かれ、その周りには大きな建物、そして毛細血管のように這う地域につながる細い道。

…たぶん、それはこれからも変わらないだろう。
……建築自体の「かたち」が変わろうとも

「環境性能に優れた、あるいは資源負荷の少ない建築の『かたち』を創生する」環境を考えると、建築単体の性能も重要であるが、それ以上に地域として捉えなければいけないと思えた。そこで、「建築」を「都市」と置き換え、「環境性能、資源負荷」に着目した都市のインフラをつくることを試みた。

具体的には、車が生み出すエネルギーを都市に還元する仕組み。ここで車が生み出すエネルギーとは、幹線道路の気流、すなわち「風」。幹線道路沿いに生まれる風を操作し、幹線道路に風の渦を作り出す「えんとつ」を空に並べてみた。

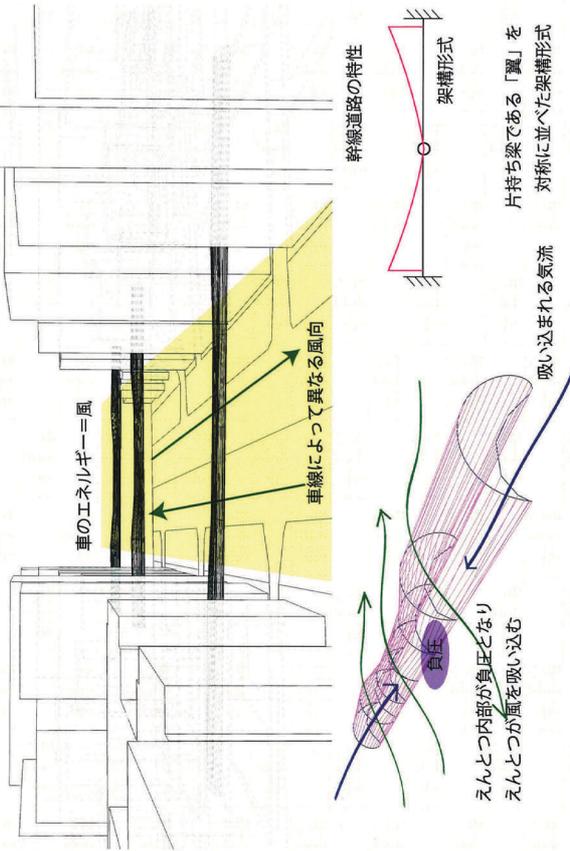
■都市問題
幹線道路沿いには高層ビルが並立し、その裏側に小さな建物が建っている。幹線道路を通る風はビルが壁となり、裏側には風が流れていかなず、車が生むエネルギーが無駄となっている。そこで、「えんとつ」を通し、車の作る風で幹線道路上空を负压にし、気流を都市全体に生み出すことを考える。この「えんとつ」には信号機、看板、街灯、そして歩道橋としても機能する。「えんとつ」が浮かぶパースペクティブは幹線道路の新しい風景となる。



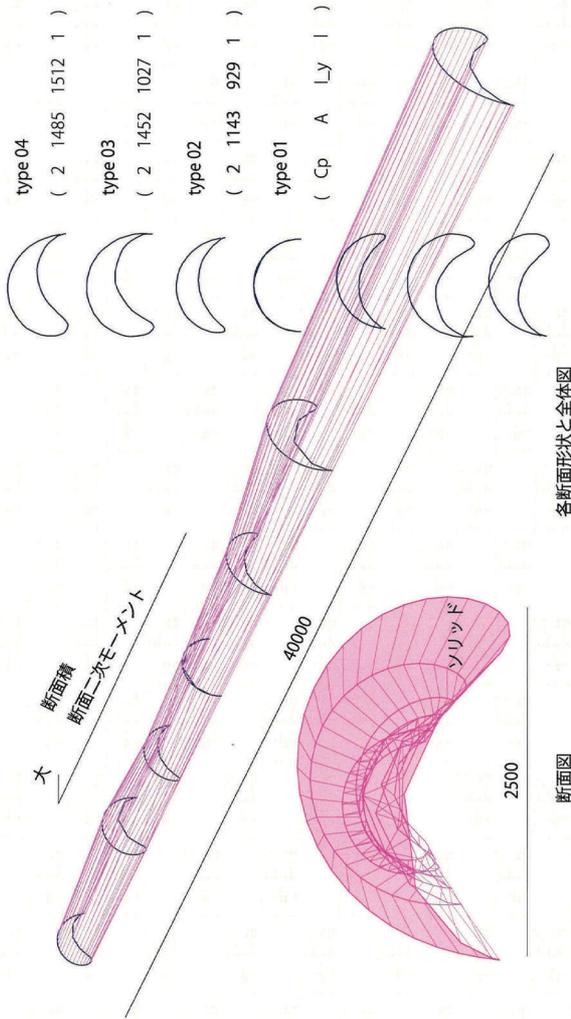
そらにえんとつを ならべてみた

■形状操作

「えんとつ」の形状操作には、風がえんとつに当たるときに生じる圧力差に着目した。風の当たる境界面の形や向きにより正圧と負圧の分布が大きく変わる。この正圧負圧の分布により風の流れを操作できると考えられる。そこで、えんとつの形状を変え、うまく風が流れるようなえんとつの形状操作を試みた。全体としての架橋形式を中央ヒンジ型とし、端部は剛性が高いものを、

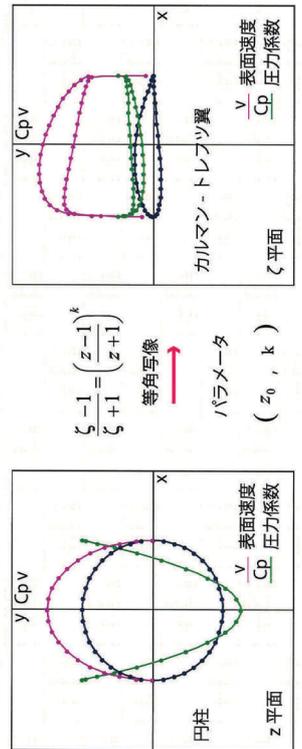


中央部は断面面積が小さいものとしている。また車線による風向きを考慮して、右側と左側を対称とした。パラメータスタディの結果、負圧係数は形状によらずほぼ一定であることから断面性能を優先して形状を決定している。中央断面に対する各断面の性能を（負圧係数、断面積、断面二次モーメント、凹弧長）の順で示している。

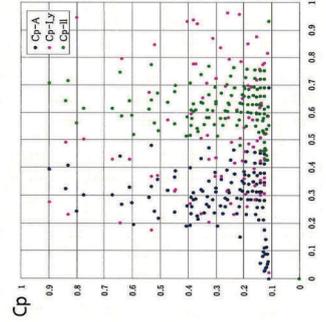


■流体力学

渦なし流れの場合、円柱周りの流れは、「一様な流れ+2重湧出し+渦糸」の重ね合わせで表わされ、その複素ポテンシャルは以下の式で記述できる。これに等角写像を行うと、カルマン-トレフツ翼を行うと、カルマン-トレフツ翼ができる。写像パラメータは中心座標 z_0 および k の2つ



$$f(z) = U(z - z_0)e^{-i\theta} + \frac{Ua^2}{(z - z_0)^2}e^{-i\theta} + i \frac{\Gamma}{2\pi} \log(z - z_0)e^{-i\theta}$$

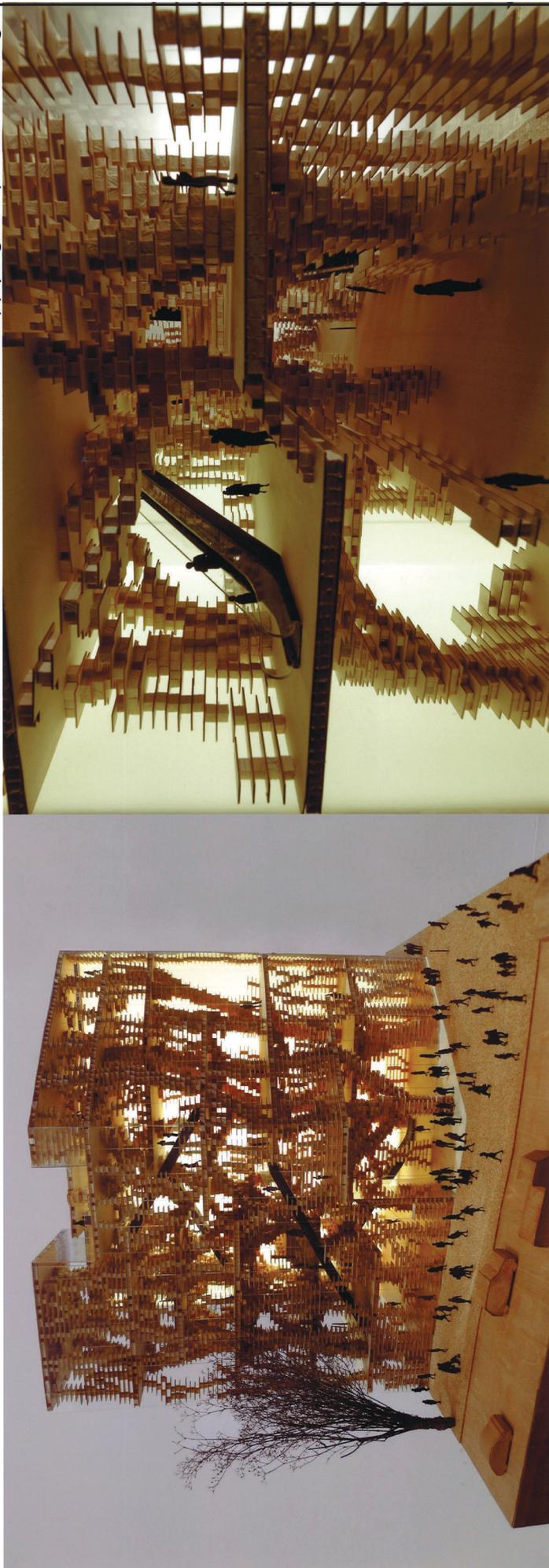


コロキウム構造形態の解析と創生 2008

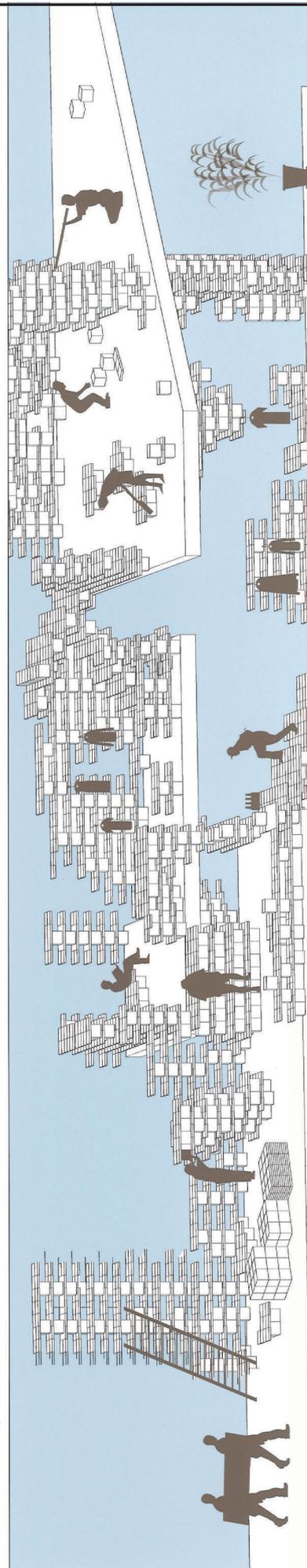
digital woods コンピューターショナルデザインによるサステイナブルな木造構法

環境性能に優れた、あるいは資源負荷の少ない建築の「かたち」を創生する

Sustainable timber technics applying computational design

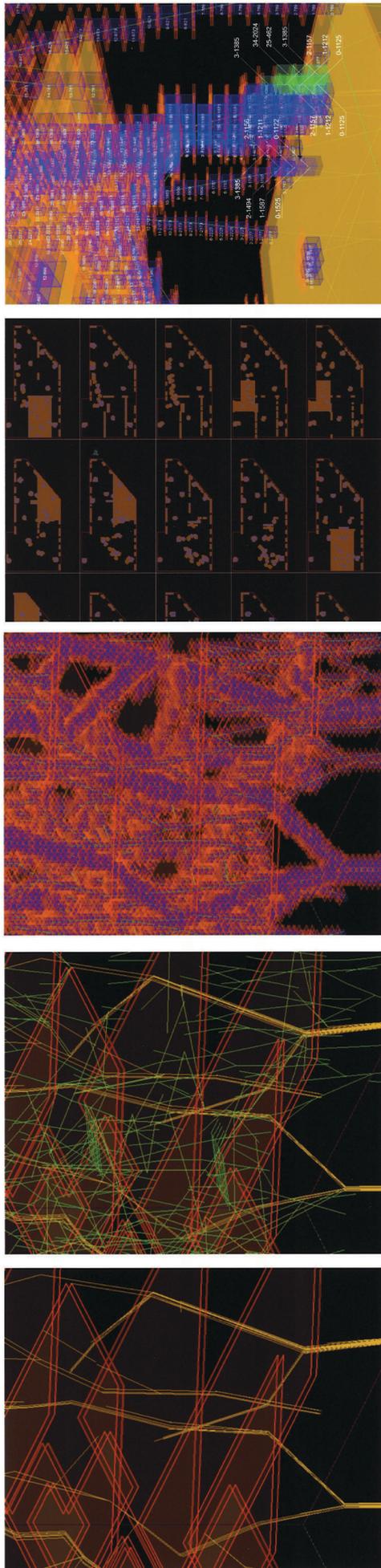


いくら部材を最小限にしても利用実態に合わなくなればその建築は使われなくなり、部材も捨てられてしまう。変化し続ける人間の活動に適応できる仕組みを持つ「かたち」こそが材料を長期的に使い続ける建築構法としてのサステイナビリティなのではないだろうか。軽量で加工しやすい自然素材としての木は、伝統的に組み替えて再使用できる構法を可能にしてきたが、工業製品としては不均一な性質が欠点とされてきた。膨大な数のユニットを全て把握できる情報技術の力が木材を新たな構法として甦らせようとしている。コンピュータによる分散的な計算が、移り行く空間に適応し続ける構法と「かたち」を創生するサステイナブルな建築をつくる。



computational design

木材ユニットを簡単に扱える重量や大きさにすることで、構成するユニットの数を膨大にしてしまうが、それこそがコンピュータの能力を最大限に発揮できる分野である。どんなに数が多くなっても、それぞれのユニットが一定のアールリズムに従っていれば計算可能であることに変わりはない。人間の求める空間的な要求を構造的なユニットの配置に置き換える事で、コンピュータと人間が協力的に空間を決定する計算が継続的に行われるための独自のソフトウェアプログラムを開発した。それぞれの時点では冗長性を保ったまま適応する計算方法は部材を最小限化するのではなく部材の継続的な利用を最適化する。



空間的な要求に合わせて木の置きや配置を決め、大まかな構造体が配置可能な基準線(幹の筋)を設定する。

所々に一定の強度で木の塊が伸びるように幹との間をつなぐ基準線を算出する。枝の集合状態が幹線の本数を決定する。

基準線に基づいて網目型ユニットとブロック型ユニットの配置を、コンピュータが高速に求める。

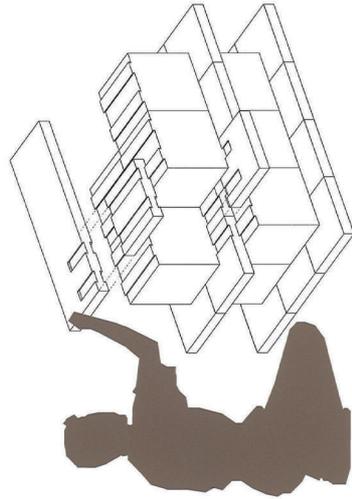
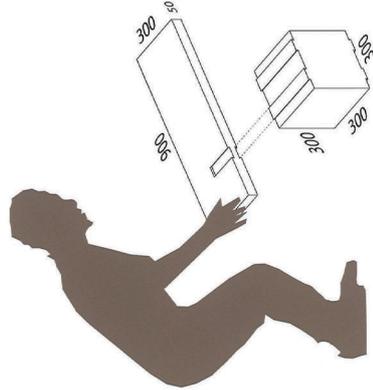
自動生成された部材データを基にユニットを生産し、部品IDを使って組み立てを管理する。IDによって整理されることで部品自体がレイアウトを指示し、複雑な形態を簡単に組み立てることができる。

全てのユニットには組み立て、レイアウトや形状の履歴がデータ化され管理される。建物ほ利用されながらユニットが組み替えられるとき、その状態がフィードバックされることで、構造、補強のための部材移動や追加などをコンピュータが指示する。

出来上がった空間を確認し、再度幹の線を調整する。

material system

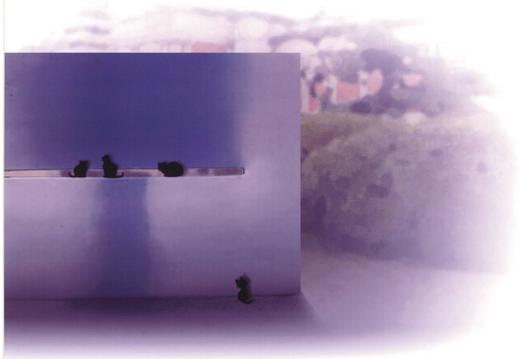
特殊な技術や道具を必要とせず空間の組み立てや更新を可能とするために、柱梁という概念を覆して、2種類の小さな部材を集合させ積み重ねながら空間を構成していくシステムを考案した。耐火性能を確保するために、燃え代材と不燃材が一体化されたブロックを組み合わせて大断面でありながら多様な形状の耐火構造ユニットをつくる。このユニットは300mm角のブロックの層と厚み500mmの板材の層によって構成されており、それらが構造柱になるとも、棚や間仕切りのような装飾的な部分と一体となって建築全体を構成することが可能となる。



ねじや釘を使わずに状態で加工されたスライドのブロックの方式で構成する

板状ユニットとブロックユニット平面的に交互にすらしながら配置されることお互いをつなぎ合わせる

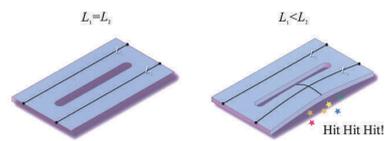
身体的なスケールに合わせてやすい350mmのピッチの層にすることで多様な空間をつくり出す



オリジナリティを表現するために
膨大なコストをかけて
有機的な曲面が乱造されている
ために金属板をトンカチでたたき続けると
いつのまにか曲面になった
平面に適合しない歪が
曲率を生んだ、ということか
トンカチだけで見つけた自然なカタチ
味があってなんだか心地良い

原始的な道具による曲面の発見

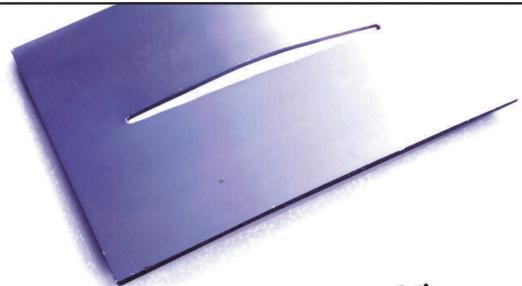
Entry# 21 ■



たたき出した曲面は
見る角度によって
様々に表情を変える

Entry# 21 ■

ホッと一息



どこ吹く風

閉口

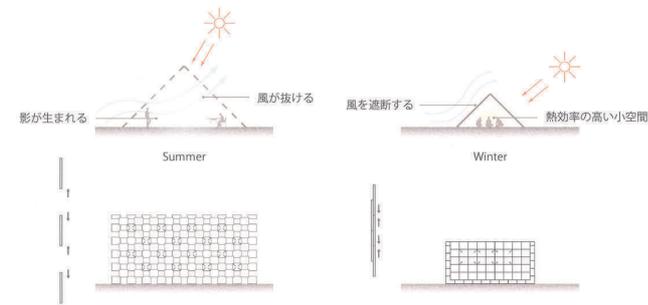




こもれびのさんかく 一呼吸する外皮

□ Concept

重なり合う外皮は、それぞれが可動する仕組みをもち、面積、厚みをフレキシブルに変化させることができる。さらに支え合う2つの外皮の角度を調節することで、内部の体積、環境性能は多様に変化する。それにより、季節の変化や使われ方に応じた空間を人々に提供する。



□ Diagram

1. 発想の原点

ゴム風船は空気を入れると体積が大きくなり、被膜の密度が小さくなる。逆に空気を抜くと、体積が小さくなり、被膜の密度が大きくなる。そうした空間の膨張と皮膜の密度の変化の関係から形態のヒントを得た。

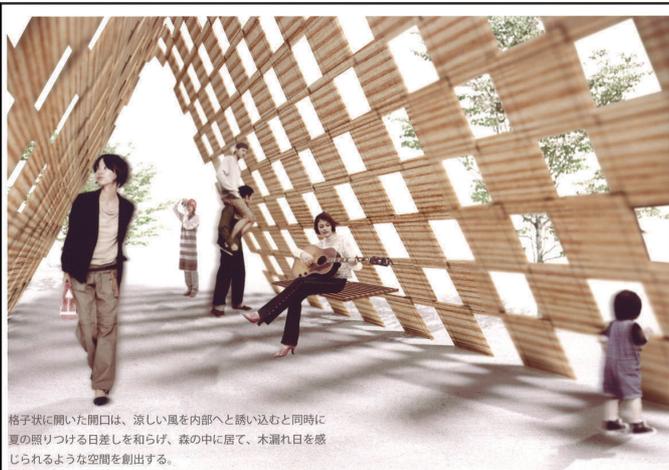


2. 可変性・多様性

・外皮の変化



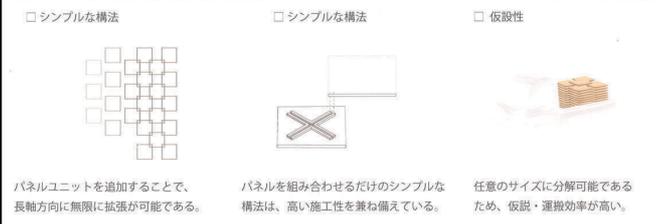
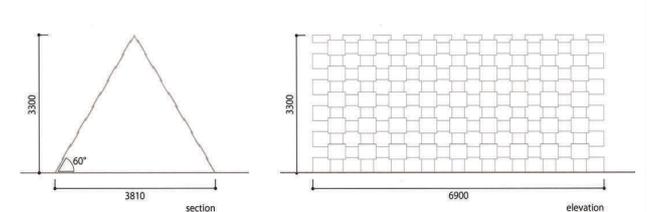
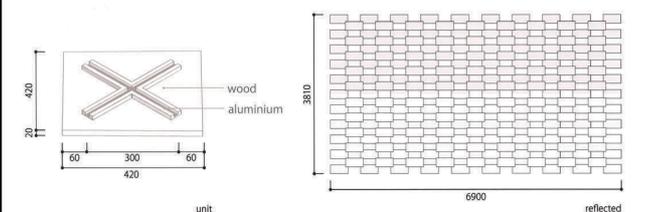
・全体の変化



格子状に開いた開口は、涼しい風を内部へと誘い込むと同時に夏の照りつける日差しを和らげ、森の中に居て、木漏れ日を感じられるような空間を創出する。



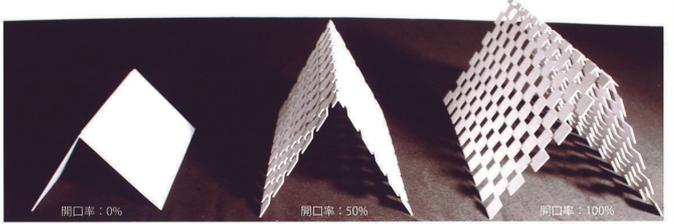
厚い外皮は、高い断熱性能を持ち内部の熱の放出を抑え、さらに空間が収縮することによって高い熱効率を得られる。人は小さな空間を共有し、互いに寄り添うことで暖をとる。

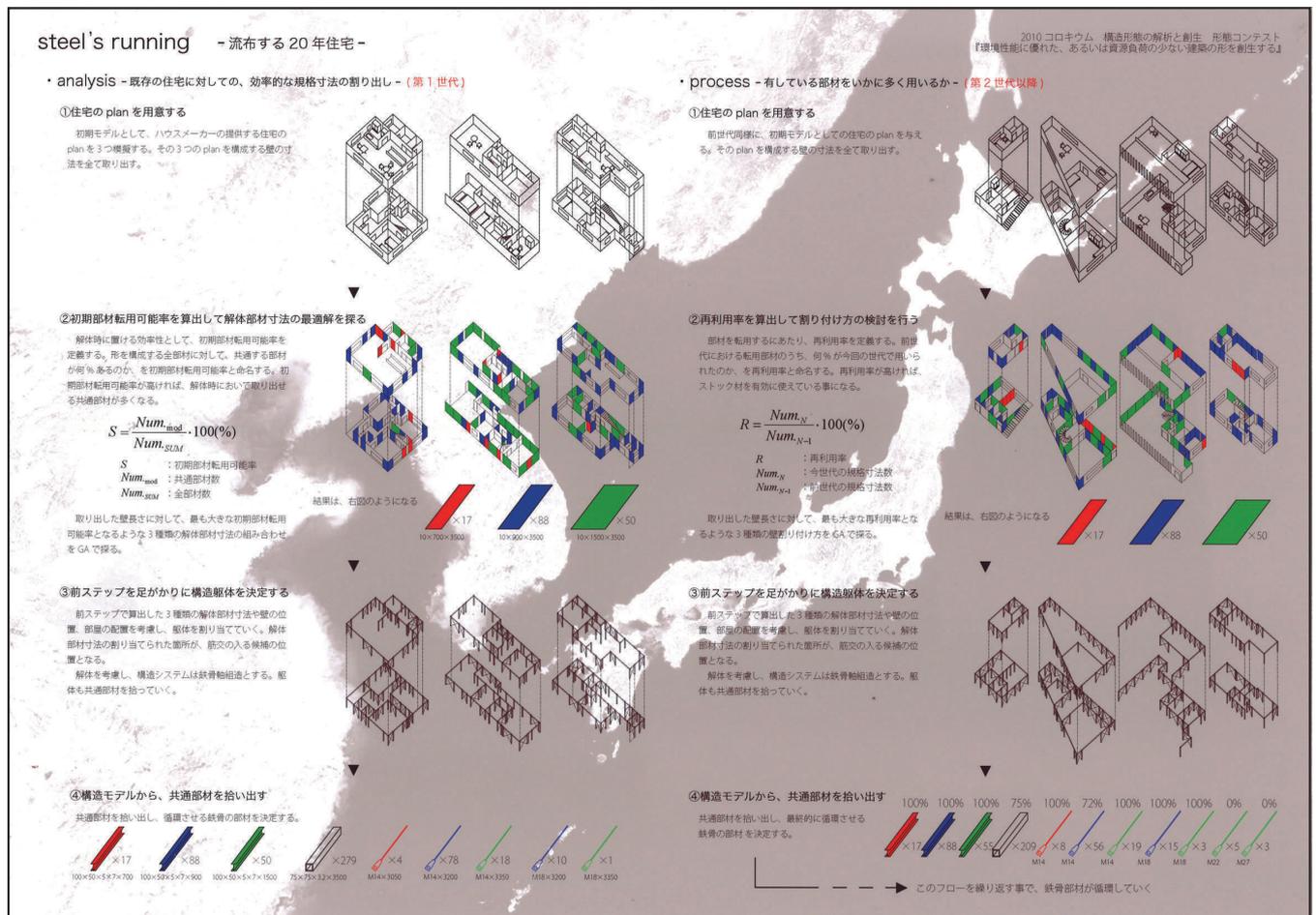
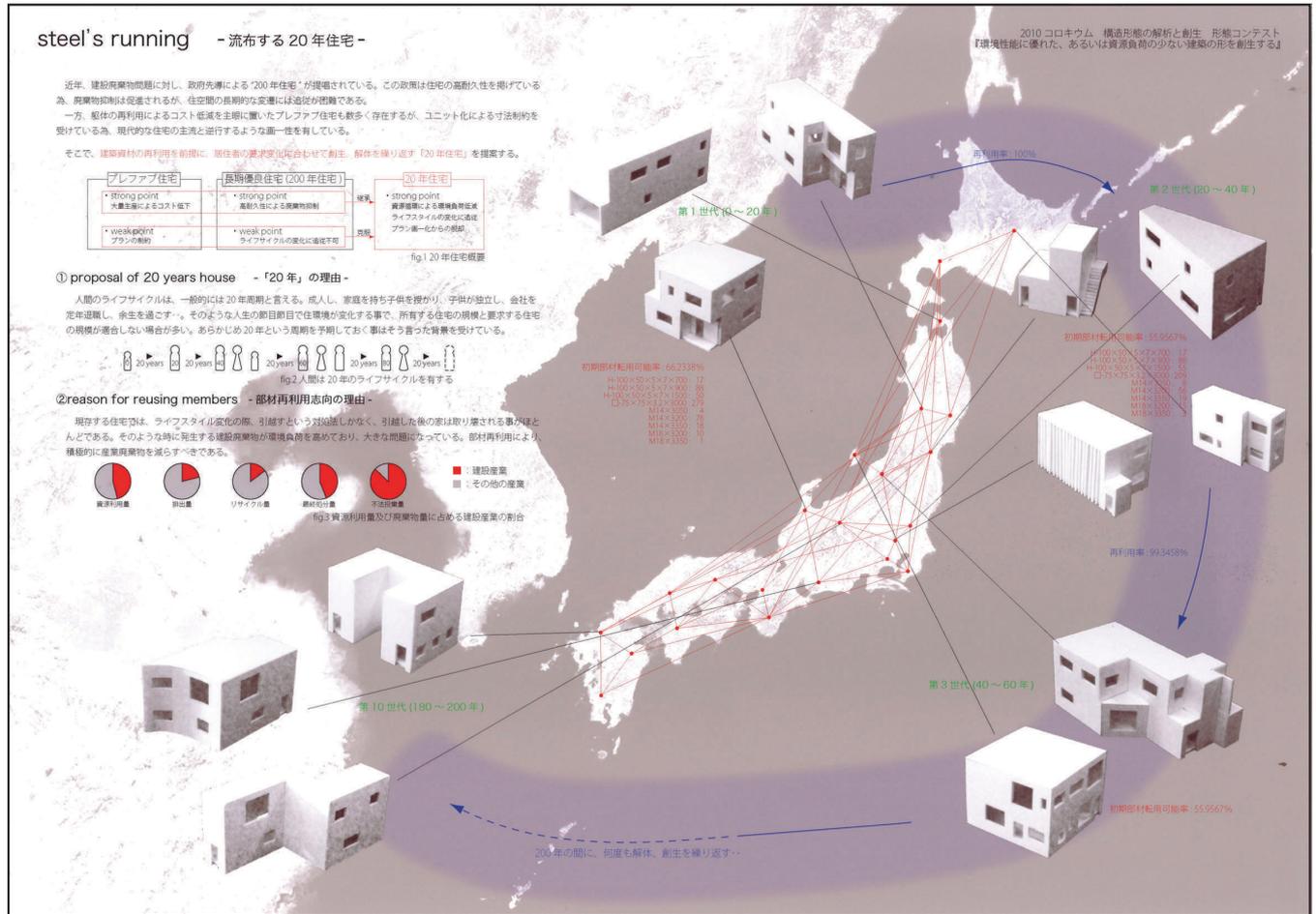


パネルユニットを追加することで、長軸方向に無限に拡張が可能である。

パネルを組み合わせるだけのシンプルな構法は、高い施工性を兼ね備えている。

任意のサイズに分解可能であるため、仮設・運搬効率が高い。





形態創生コンテスト 2006-2010 『これまでの形態創生コンテストの歩み』

立道郁生¹⁾

1) 明星大学理工学部総合理工学科，教授，博士(工学)，tatemichi@ar.meisei-u.ac.jp

1 はじめに

形態創生コンテストは2006年に第1回が開催され、今回、早いもので5回目を数える。まずは、表1に示す各年度の応募数の推移を見ていただきたい。

表 1 各年度の応募数の推移

年度	エントリー数	作品提出数	入選作品数
2006	12 件	6 作品	4 作品
2007	19 件	10 作品	5 作品
2008	39 件	18 作品	5 作品
2009	40 件	21 作品	6 作品
2010	57 件	20 作品	5 作品

どこかの国の景気とは裏腹に、エントリー数に関してはここまで順調に増加の一途をたどっている。「コロキウム構造形態の解析と創生」の盛況と相まって、この分野への興味が高まっていることは、大変喜ばしい。

著者は、縁あってこの間、本コンテストに携わらせていただいた関係から、担当グループを代表してコンテストの歩みについて概説する。

2 「形態創生コンテスト」はどのように始まったか

2.1 形態創生アルゴリズムを用いた橋梁デザイン

2001年から2002年にかけて、日本建築学会、応用力学運営委員会の形態創生の理論と応用小委員会（主査；日本大学三井和男，当時）では、種々の形態創生アルゴ

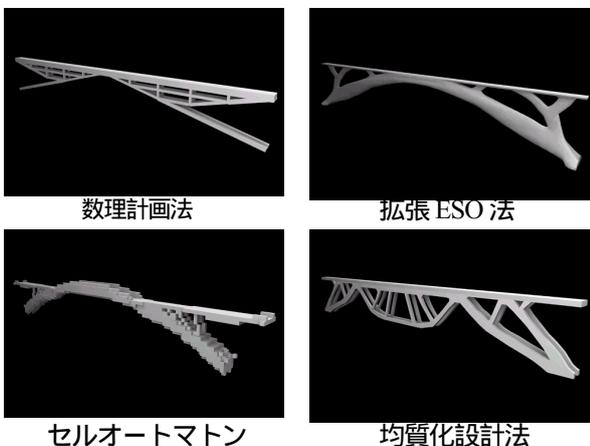


図1 形態創生アルゴリズムを用いた橋梁デザイン

リズムのベンチマークテストの一つとして、橋梁をテーマとし、共通のスパン（260m）と幅員（7m）および概ねの荷重条件を制約とした、いくつかの構造形態が提案されていた（図1）。

これらは、それぞれ数理計画法、拡張 ESO 法、セルオートマトン、均質化設計法を用いたものであるが、形態そのものも、並べてみるとまた魅力的である。そこで、当該小委員会の協力でこれらを横並びにして感性評価を行い、2005年1月に行われた「構造形態の創生と最適化セミナー」で紹介した¹⁾。

どうやら、このあたりが関係者の間で「これは面白いのでは」という共通認識が生まれたのではないかと思っている。

2.2 「コロキウム構造形態の解析と創生」の開催

1995年に行われた「コロキウム構造形態の解析と創生」から10年、2006年に再度、同タイトルのコロキウムを開催することが2005年には決まっていた。ただし、この段階では、毎年開催となることを前提としていたわけではなかった。

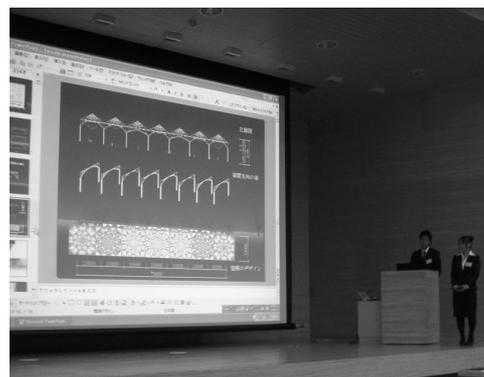


写真1 第1回の形態創生コンテスト（2006）²⁾

1995年のコロキウムは、特別講演1題と26編の研究発表という形で行われていた。今回は新たな試みの一つとして、なにかコンテストのようなもの（これまでになような新しいアイデアやかたちを見つけるコンテスト）を企画できないだろうかという相談が、コロキウム実施責任者の本間俊雄先生（鹿児島大学）から、筆者にあった。

そこで 2006 年の年初には、形態創生コンテストの実施要領に関するたたき台を作成し、第一回目の審査委員をお願いした大森博司先生、川口衛先生、斎藤公男先生を交えたさまざまな議論を経て、毎年用いられている要領の原形が完成した次第である。

3 「形態創生コンテスト」の特徴

3.1 テーマ設定の普遍化

前述のいきさつから、当初は共通の設計領域、設計条件（荷重や支持条件）を提示した構造物、例えばアーケードや歩道橋などのテーマに対し、形態創生アルゴリズムを用いて得られた形態を提案してもらうということが発想された。しかし、ほどなくこのやり方には修正が加えられ第一回目の要領にも反映される事になる。

それは、形態創生の可能性やおもしろさを、できるだけ多くの人に知ってもらうためには、アルゴリズムの使用のみに限定すべきではないという共通した思いからである。そこで、自作のアルゴリズムを持っていない人のためにも形態創生の思想や手法などの提案ができる様式としている。

一方、テーマ構造物も具体的な例示をせず、例えば第一回のテーマの一つである「都市機能を活性化する『構造のかたち』を考える」といった応募者にとって自由度の高いものを用意している。今回 2010 年のテーマは、この方向性を一歩進め、これまでの「構造のかたち」に限定せず、「建築のかたち」を求めるテーマ設定としたことにも注目していただきたい。

これらの工夫が応募者の間口を広げ、年々増加していることの一理由の一つであろう。



写真 2 2008 年度の入選作より (2009)²⁾

3.2 審査における評価軸について

一方、作品を審査するための評価軸についても、議論された。「形態創生のプロセス」と「成果としての形態そのもの」の二つをどのように取り扱うかである。結果、創生された形態の独創性、合理性、美しさ
形態創生プロセスのアイデア性、独創性

を総合的に評価することとなった。

特に の評価軸は、本コンテストが「形態創生」をテーマとしており、「構造デザインコンテスト」や「設計競技」など「成果」のみ審査するコンテストとは違いユニークな点である。

審査する側にとって、これは実はやっかいな問題で、常に意識する必要がある。なぜなら、最近の提出作品は極めて高度なコンピュータグラフィックスを駆使して、魅せる作品が多く、「眼が眩まされる」からである。一方、応募者の側でも、 の形態そのもののユニークさやおもしろさを強調するあまり、 の形態創生プロセスの説明が不足していたり、よく分からない作品もあり、残念な場合もある。 および のどちらかに特化した提案もありうるが、両者のバランス良い提案が入賞へのカギだと思う。



写真 3 1 次審査会の様子 (2009)

3.3 構造と意匠の垣根を取り払う

現在、数多くの設計コンペが行われているが、その応募の主体は、意匠系の学生や実務家である。もちろん構造作品の賞には、日本建築構造技術者協会の JSCA 賞や、日本構造家倶楽部の日本構造デザイン賞があるが、これは応募するという観点からは学生にはほとんど関係ない。

かつて行われていた日本建築学会主催の学生・サマー・セミナーは、構造系の学生が参加でき受賞も可能な良い機会であった。しかし、現在構造系の学生が何らかのプライズを得ようとするならば、学术论文に対してか、あるいはその発表に対してだけである。例えば、「日本建築学会大会シェル・空間構造部門優秀発表賞」などがそのひとつである。

こう考えると、本コンテストは、構造系の学生や若手技術者にとって、プライズを目指せる数少ない機会であるといえる。

本コンテストが持っている特徴はそれだけではない

という指摘を、筆者は過去に参加者から受けたことがある。それは、構造系の学生と建築系の学生が協働可能な唯一のコンペであるという指摘であった。コロキウム実施責任者の本間俊雄先生(前掲)は、第1回2006年のコンテストの総括³⁾で「コロキウム参加者は、いつしか分離してしまった意匠と構造の垣根を取り払い、構造学の視点を取り入れた魅力的な建築の可能性を再認識させられたことと思う」と記述している。考えてみるとその通りで、「形態創生」ではそれぞれの得意分野をコラボレーションすることが全く理にかなっているし、良いことだと思ふ。事実、これまでの応募者の中でもそのようなチームの入選例はかなりある。



写真4 2009年度入選者(写真の2人は建築系、残りは構造系)

3.4 明記していないが入選するといふことがある

毎年、4~6組の入選者がコロキウムでプレゼンテーションを行う。これはこれで当人にとって大変なことだと思ふが、それさえ済めば、とにかく全グループ、表彰状がもらえる。



写真5 2009年の審査の様子

さて、その表彰式である。第2回の2007年から、表彰式はあえて会場を別にした懇親会の席で行うことにしている。これは、何より懇親会が盛り上がるからであるが、入選者の方たちとコロキウム参加者が、フランクな雰囲気

気で直接コミュニケーションする機会ともなっている。

逆に言うと、若い学生、技術者が多い入選者にとって、コンテスト審査員の先生方をはじめとする著名な構造設計者や建築設計者、研究者などと直接話ができるめったにない機会となるということである。これは、すごくうらやましいことである。

入選者の皆様、このことで心配したり緊張したりする必要はありません。あなたが、話しかけることが出来なくても、先生方は笑顔でやさしくあなたに話しかけてくれますから。



写真6 2009年の懇親会にて入賞者と歓談(右端は斎藤公男先生、右から二人目は川口衛先生)

4 これからの「形態創生コンテスト」

4.1 コンテストなのに賞ではない

さらに若干述べたいことがある。審査委員長より入選者に授与されるのは、「最優秀作品」、「優秀作品」、「入選作品」と書かれた表彰状である。応募要領を注意深く読むと、どこにも「賞」という言葉が使われていないことに気がつく。

審査委員会やコロキウム実行委員会の人たちは、表彰式の際、皆これは作品をたたえる「賞」だと考えて祝福しているので、良いのだが、私自身はちょっと釈然としていない。表彰がコロキウム実行委員会名で行われているにも関わらず「賞」ではないのは、日本建築学会の表彰制度で定められているもの以外は「賞」を呼称することが出来ないからだそうである。一方で、種々の「発表賞」が授与されていることを考えると、このあたりを整理して本コンテストのあり方を考える必要がある。

なお、このことが「形態創生コンテスト」入選の榮譽をいかほども損なうものではないことを付言しておきたい。

4.2 コンテスト担当委員の苦労と喜び

内輪の話なので恐縮ではあるが、長くコンテスト担当をお願いしているのは松尾智恵(川口衛構造設計事務所)、水谷太郎(大成建設)、三井和男(日本大学)の各委員である(付録に記すが年度により多くの委員に参加、協力いただいています)。

小委員会活動と同様、特に事務組織を持たないので、課題テーマの提案、審査委員会の立ち上げ、作品の受け入れ、整理、応募者へのお知らせなど本業の傍ら、かなり大変なワークが発生する。本年度2010年は、エントリー数の急増もあり、また主催の小委員会が増えていたことから、コンテスト担当委員数を増強していただいている。さらに日本建築学会事務局との共同作業化も模索しているが、後者については必ずしもうまくいっているとは言えない。応募者数が今後も現在のレベルを維持していくのであれば、この点も今後の課題である。

しかし、担当者は苦労ばかりではない。実は一般には非公開で行われる1次審査会に参加できることが一番おもしろい。写真3や7にあるように、1次審査会はずべての作品を並べ、審査委員がひとつの作品ずつ、コメントや疑問点を述べあっていく。コンテスト担当も混ざり、審査委員の先生方同士の意見交換で初めて分かる作品の意図もある。また、審査員の先生方の深い洞察に驚かされることもある。なにより、1次審査であるのでかなり率直な感想が聞けるのが実は大変おもしろい。

こんな面白いことを 独り占めしては申し訳ない。コンテスト担当を是非やってみたいという方は歓迎します。



写真7 2009年の1次審査会で記録をとる担当(右端)

4.3 「形態創生コンテスト」は今後も続くのか

まず、5年間続いていて、特に「やめよう」という意見も聞かない理由は、何よりおもしろいからだと思う。応募者のみなさんも、審査委員の先生方も、コロキウム

に参加してコンテストプレゼンテーションを聞いている人達も、そして私たちも楽しんでいる。

作品のアイデア性、独創性に驚き、工夫されたプレゼンテーションに魅入り、時には会場が笑いに包まれる。

一方、社会的認知度も上がっている。コンテスト応募要領は様々な媒体に掲載されているが、形態創生コンテストの写真入り報告レポートもいくつかの媒体に掲載されるようになってきた。日本建築学会の建築雑誌はもちろんであるが、(株)建築技術の「建築技術」、(株)鋼構造出版の「月刊鉄構技術」などである。特に後者は、コンテスト当日の取材もある自社記事となっている(2009年)。メディア露出が増えることは、入選者にとっても付加価値となろう。

コロキウム2011の開催は既に決まっている。「形態創生コンテスト」のおもしろさ、使命はまだまだ継続する。

5 おわりに

2010年で5回目を迎える「形態創生コンテスト」のこれまでの歩みといくつかの雑感を述べた。本稿は単著であり、勝手なことを書いている。コロキウム主催小委員会やコンテスト担当組織のコンセンサスを得た記述ではないことをお断りしたい。

必ずしも形態創生分野の専門ではない著者が、機会を得て本コンテストに関わらせていただいたことは幸いである。今後も微力ながら本コンテストの盛況に向け尽力したい。

謝辞

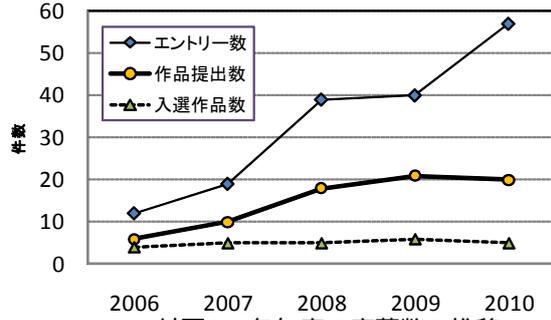
「形態創生コンテスト」の審査委員の先生方には審査のみならず、コンテストの実施に関する様々な有益なご意見を都度頂きました。謝意を表します。全員のお名前を挙げませんでした。各年度のコンテスト担当委員には多大なご苦勞をかけています。ありがとうございます。コロキウム実施責任者の本間俊雄先生をはじめとする実行委員会委員のご理解とご助力に感謝します。

各年度の応募者の皆様に感謝します。おしくも入選とはならなかった作品も、審査委員の先生をはじめとして何か考えさせられたり、啓示を受けたりします。なにより、私たちはどの作品も楽しく見させていただき、皆様の作品を作り上げるモチベーションに驚きます。本コンテストの続く限り、これからもめげずに応募のほどよろしくお願ひいたします。

付録 形態創生コンテスト 2006-2010 データ

形態創生コンテスト 2006-2010 の各諸相を年度順に並べて示すことは、これまでやったことがない。良い機会なのでここではいくつか示してみたい。

なお、これらのデータの多くは日本建築学会、シェル・空間構造形態創生小委員会のHP²⁾から容易に引用することが出来た。大変ありがたいことである。



付表1 形態創生コンテストテーマ一覧

年	テーマ
2006	テーマA; アーケードの構造形態を創生する テーマB; 都市機能を活性化する『構造のかたち』を考える
2007	地震ないしは風と、うまく付き合う『かたち』を創生する
2008	自然界に着想を得て、構造のかたちを創生する
2009	楽しいつくり方、楽なつくり方ができる建築空間や構造物の『かたち』の創生
2010	環境性能に優れた、あるいは資源負荷の少ない建築の『かたち』を創生する

付表4 最優秀作品一覧

年	タイトル	提案者
2006	ハニカムエアクッション壁の形態創生について	平高雄[横浜国立大学]、櫻井佑美[同]
2007	Pendulum Structure	佐藤慶太[早稲田大学]
2008	AN/DI03-Dorch-	岩田正輝, 西郷正浩, 深町有紀, 山本直樹, 上原早紀子, 戸島澄歌 [崇城大学]
2009	m.m.m...	牟田隆一 [竹中工務店] 宮本恵美[同]
2010	未定	未定

付表2 審査委員会委員一覧

; 審査委員長, ○; 審査委員, ; 特別審査委員
出現順, 敬称略

委員	2006	2007	2008	2009	2010
大森博司 ¹⁾				○	
川口 衛 ²⁾	○	○	○		
斎藤公男 ³⁾	○	○	○	○	○
元結正次郎 ⁴⁾	○				
藤井大地 ⁵⁾		○			
本間俊雄 ⁶⁾		○			
坂口紀代美 ⁷⁾			○	○	○
小河利行 ⁸⁾					
新谷真人 ⁹⁾				○	○
小嶋一浩 ¹⁰⁾					
弓削康平 ¹¹⁾					

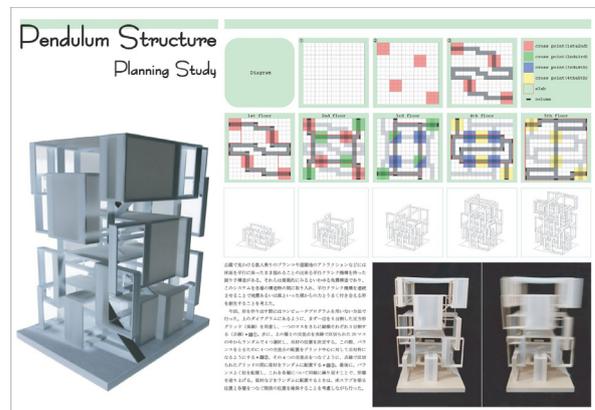
1)名古屋大学, 2) 川口衛構造設計事務所, 3) 日本大学, 4) 東京工業大学, 5) 近畿大学, 6) 鹿児島大学, 7) 日本美術家連名会員 / 彫刻家, 8) 東京工業大学, 9) 早稲田大学 / オーク構造設計, 10) 東京理科大学 / CAI, 11) 成蹊大学



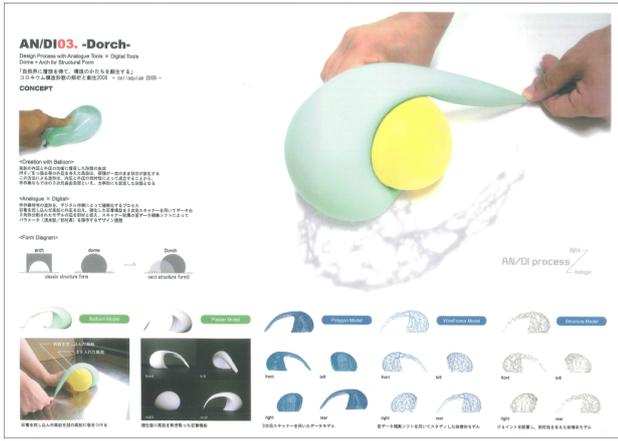
付図2 第1回2006年の最優秀作品

付表3 各年度の応募数の推移 (再掲)

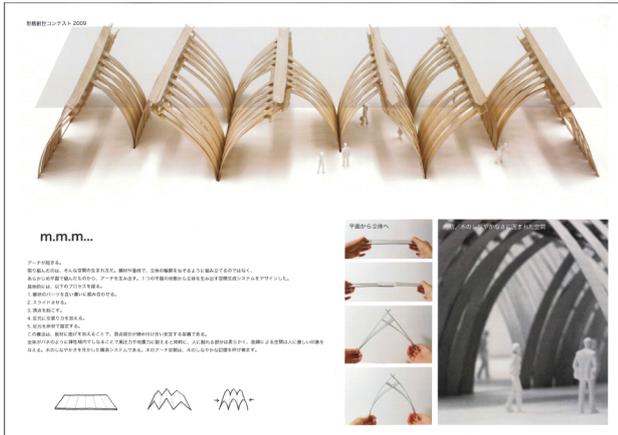
年度	エントリー数	作品提出数	入選作品数
2006	12件	6作品	4作品
2007	19件	10作品	5作品
2008	39件	18作品	5作品
2009	40件	21作品	6作品
2010	57件	20作品	5作品



付図3 第2回2007年の最優秀作品



付図4 第3回2008年の最優秀作品



付図5 第4回2009年の最優秀作品

付表5 入選者の所属

；最優秀作品， ；優秀作品，○；入選作品， ；佳作代表者のみ。2010年度はコンテスト前のため入選作品，佳作として表示

年度	大学生・大学院生	技術者・研究者
2006	○	○
2007	○○	○
2008	○○○	
2009	○○○	
2010	○○	○○○

<入選作品一覧> ○印は応募代表者

2006年

最優秀作品；八ニカムエアクション壁の形態創生について， 平高雄[横浜国立大学]、櫻井佑美[同]
 優秀作品；「創」～進化による可能性～， 坂中玲子[鹿児島大学]、堀切秀作[同]、工藤玲[同]、ガ・レ・ビック・フ・ウ[同]
 入選作品；ポロノイ分割を用いた形態創生， 中村吉秀[大林組]、渡辺哲巳[同]、森洋一[同]、山中昌之[同]
 入選作品；カテナリーを基にした水平力に対抗しうる形態の模索。古田寛生[大同工業大学]、増田卓朗[同]

2007年

最優秀作品；Pendulum Structure， 佐藤慶太[早稲田大学]
 優秀作品；斜材のみで形成される柱の形態創生， 古田寛生[大同工業大学]、羽根健介[同]、松本雄大[同]

入選作品；《経験》による《成長》， 大和史明[日本大学]
 入選作品；形状最適化を用いた橋の創生， 川田将士[近畿大学] 柳川雄太[同]， 山本恭平[同]
 入選作品；記憶する塔， 村田龍馬[川口衛川口衛構造設計事務所]

2008年

最優秀作品；AN/DI03.-Dorch-， 岩田正輝，西郷正浩，深町有紀，山本直樹，上原早紀子，戸島澄歌[崇城大学工学部建築学科]
 優秀作品；可変多面体による曲面構造， 横須賀洋平[昭和女子大学生活環境学科助手]
 優秀作品；Windy Passage， 井戸川達哉[早稲田大学創造理工学研究科]
 入選作品；Living Tree， 植田大貴[近畿大学工学部建築学科]、鈴木聖明[同大学大学院]
 入選作品；ボルボックス：球の集合による空間， 前島彩子[東京大学大学院]

2009年

最優秀作品；m.m.m...， 牟田隆一[竹中工務店] 宮本恵美[同]
 優秀作品；Snap-through Structure， 重松瑞樹[慶應義塾大学] 加留部秀岳[同] 黒川巧[同] 藤田祐介[同]
 優秀作品；space-triangle， 後藤将希[明星大学] 叶内佑樹[同] 橋田陵[同] 久嶋麻衣[同] 山本真紀[同] 福田哲史[同] 吉井和樹[同] 上島翔吾[同] 清水由香[同]
 入選作品；Honeycomb Dome かたちの最小単位， 井戸川達哉[早稲田大学] 柳瀬紀昭[同]
 入選作品；Seamless 粘性が創出する形態， 松本高武[明星大学] 吉良貴之[同]
 入選作品；make it developable， 藤田慎之輔[京都大学]

2010年

優秀作品は未定である。また、今回佳作3点を選定した。
 入選作品；Adaptable Wave， 蔵野昌浩[株]大林組] 小縣恭子[同] 勝部千絵[同] 北村有希子[同] 齋藤元嗣[同]
 入選作品；ヒダ ヒダ， 和田大典[鹿児島大学大学院]
 入選作品；Lingering Nature， 杉田宗[]
 入選作品；そらにえんとつをならべてみた， 井戸川達哉[株]梓設計] 増田彩乃 佐川真美 大澤元嗣 石井衣利子 墓田京平 松竹祐介
 入選作品；digital woods， 谷垣内晶彦[慶應義塾大学大学院] 青山みのり[同] キムジョンソプ[同] 阿部祐一[同]
 佳作；原始的な道具による曲面の発見， 三木優彰[東京大学大学院]
 佳作；こもれびのさんかく， 首藤徹郎[山口大学大学院理工学研究科] 寺本晃浩[同]
 佳作；steel's running， 堀駿[早稲田大学創造理工学部建築学科] 林将利[同大学大学院]

<コンテスト担当委員> (敬称略、五十音順)

- 2006年 立道郁生，松尾智恵，水谷太郎
- 2007年 大森博司，坂敏秀，立道郁生，松尾智恵，水谷太郎，三井和男
- 2008年 立道郁生，堤和敏，松尾智恵，水谷太郎，三井和男，渡辺誠
- 2009年 立道郁生，松尾智恵，水谷太郎，三井和男
- 2010年 大崎純，立道郁生，永井拓生，藤原 淳，松尾智恵，水谷太郎，三井和男

参考文献

- 1) 立道郁生：形態創生された橋梁を感性工学手法により評価する，日本建築学会，構造形態の創生と最適化セミナー資料，pp.55-62，2005年1月
- 2) シェル・空間構造形態創生小委員会のホームページ，<http://news-sv.ajj.or.jp/kouzou/s17/htm/colloquium.htm>
- 3) 本間俊雄：コロキウム構造形態の解析と創生「形態創生コンテスト」レポート，建築技術，p.192，JAN.2007

文献・Web 情報・建物 リスト

建築構造形態創生関係文献リスト (2006年～2010年)

コロキウム「構造形態の解析と創生 2006 資料」に掲載された「建築構造形態創生関係文献リスト」に引き続き、建築構造形態創生と比較的関連の深い研究分野の主要著書・論文・梗概等を紹介する。リストアップの方針は以下のとおりである。

- ・ 2006年以降の文献のみ。
- ・ 論文については「形態創生」に直接関係する研究のみとし、その他の分野の文献は、著書、レビュー、特集のみとする。
- ・ 読者が容易に入手できる著書や論文を対象とし、日本語の会議論文や梗概は日本建築学会主催のものに限定する。

構造形態創生に関する研究は、数学から生物科学まで多岐にわたっているため、それらの文献を網羅することは極めて困難である。したがって、以下では、「最適化一般」、「構造最適化」、「形態創生」、「その他」に分類し、さらに「形態創生」については、全般的なもの、トラス・骨組構造の形態創生、固体や平面等の連続体構造の形態創生、シェル構造の形態創生、メカニズムの形態創生、発見的手法の応用等に分類し、これらに関連する文献をリストアップしている。また、「形態創生」に関しては、大会梗概集についても、まだ他の論文等で発表されていない萌芽的な研究をリストアップしている。ただし、その1、その2等の連載は、その1のみを挙げている。

1. 最適化一般

1. 矢部 博：工学基礎 最適化とその応用 (新・工科系の数学), 数理工学社, 2006.4
2. Jorge Nocedal and Stephen Wright : Numerical Optimization (Springer Series in Operations Research and Financial Engineering), 2nd edition, Springer, 2006.7
3. 室田一雄：離散凸解析の考えかた—最適化における離散と連続の数理, 共立出版, 2007.12
4. 中山 弘隆, 岡部 達哉, 荒川 雅生, 尹 禮分: 多目的最適化と工学設計—しなやかシステム工学アプローチ, 現代図書, 2008.1

5. 天谷賢治：工学のための最適化手法入門 (工学のための数学), 数理工学社, 2008.5
6. Baldick Ross : Applied Optimization: Formulation and Algorithms for Engineering Systems, Cambridge University Press, 2009.1
7. Singiresu S. Rao : Engineering Optimization: Theory and Practice, 4th edition, Wiley, 2009.7

2. 構造最適化

1. Seung-Kyum Choi and Robert A. Canfield : Reliability-based Structural Design, Springer, 2006.10
2. Pei-Shan Chen and M. Kawaguchi : Optimization for Maximum Buckling Load of a Lattice Space Frame with Nonlinear Sensitivity Analysis, International Journal of Space Structures, Vol.21, No.2, pp.111-118, 2006
3. Makoto Ohsaki and Kiyohiro Ikeda : Stability and Optimization of Structures: Generalized Sensitivity Analysis (Mechanical Engineering Series), Springer, 2007.7
4. Jasbir S. Arora (Editor) : Optimization of Structural and Mechanical Systems, World Scientific Pub Co Inc, 2007.9
5. Jiang, X. and Adeli, H. : Neuro-Genetic Algorithm for Nonlinear Active Control of High-rise Buildings, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 75, No. 8, pp.770-786, 2008
6. Peter W. Christensen and A. Klarbring : An Introduction to Structural Optimization (Solid Mechanics and Its Applications), Springer, 2008.11
7. William R. Spillers and Keith M. MacBain : Structural Optimization, Springer, 2009.6
8. N.V. Banichuk and Pekka Neittaanmäki : Structural Optimization with Uncertainties (Solid Mechanics and Its Applications), Springer, 2009.12
9. Isaac Elishakoff and Makoto Ohsaki : Optimization and Anti-Optimization of Structures Under Uncertainty, Imperial College Press, 2010.4
10. Makoto Ohsaki : Optimization of Finite Dimensional Structures, Crc Pr I Llc, 2010.7
11. Pei-Shan Chen : Overall stiffness evaluation and shape optimization of a tensegric structure, Int. J. Structural Engineering, Vol. 1, Nos. 3/4, pp241-254, 2010

3. 形態創生

3.1 全般

1. S. J. Russell and P. Norvig : エージェントアプローチ人工知能 第 2 版, 古川康一監訳, 共立出版, 2008.7
2. 藤井大地: 建築デザインと最適構造, 丸善, 2008.10
3. 日本建築学会編 : アルゴリズムック・デザインー建築・都市の新しい設計手法, 鹿島出版会, 2009.3
4. Xiaodong Huang and Mike Xie : Evolutionary Topology Optimization of Continuum Structures: Methods and Applications, Wiley, 2010.6
5. G.I.N. Rozvany (Editor) : Topology Optimization in Structural Mechanics (CISM International Centre for Mechanical Sciences), Springer, 2010.6
6. Hiroshi Ohmori : Computational Morphogenesis: Its Current State and Possibility for the Future, International Journal of Space Structures, 25(2), pp. 75-82, 2010.6

3.2 トラス・骨組形状・トポロジー

1. 本間俊雄, 野瑞憲太 : 解の多様性を考慮した遺伝的アルゴリズムによる構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 614 号, pp.35-43, 2007.4
2. Mathakari, S., Gardoni, P., Agarwal, P., Raich, A. and Haukaas, T. : Reliabilitybased Optimal Design of Electrical Transmission Towers Using Multi-objective Genetic Algorithms, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 22, pp. 282-292, 2007
3. P. Kripakaran, A. Gupta and John W. Baugh Jr. : A novel optimization approach for minimum cost design of trusses, Computers and Structures, Volume 85, Issues 23-24, pp.1782-1794, 2007.11
4. Wolfgang Achtziger and Mathias Stolpe : Truss topology optimization with discrete design variables—Guaranteed global optimality and benchmark examples, Structural and Multidisciplinary Optimization, 34(1), pp. 1-20, 2007.7
5. 陳 沛山, 大川原恵美, 原田恵美子, 細川美穂 : 中国宋代虹橋の構造原理についての研究, 構造工学論文集, Vol.54B, pp259-265, 2008.3
6. M.H. Rasmussen and M. Stolpe : Global optimization of discrete truss topology design problems using a parallel cut-and-branch method, Computers & Structures, 86(13-14), pp. 1527-1538, 2008.7
7. H. Rahami, A. Kaveh and Y. Gholipour : Sizing, geometry and topology optimization of trusses via

- force method and genetic algorithm, Engineering Structures, Volume 30, Issue 9, pp. 2360-2369, 2008.9
8. 萩下敬雄, 大崎 純 : 発見的手法と非線形計画法の統合による離散構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 73 巻, 第 633 号, pp.1959-1965, 2008.11
9. 藤井大地, 真鍋匡利, 高田豊文 : グランドストラクチャ法による建築構造の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, 第 633 号, pp.1967-1973, 2008.11
10. 盆子原康博, 近藤孝広, 坂尾大輔, 崔 銘秀, 黒木宏之, 坂本裕一郎 : 一般化伝達剛性係数法を利用した骨組構造物の位相最適化, 日本機械学会論文集 (C編), 74 巻 741 号, pp.93-100, 2008.5
11. T. Hagishita and M. Ohsaki : Topology optimization of trusses by growing ground structure method, Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(4), pp. 377-393, 2009.1
12. 小木曾 望, 平野佑享, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 関 勝載 : 複数の性能に関する信頼性を考慮したフレーム構造のトポロジー最適設計への SLSV 法の適用と収束特性の改善, 日本機械学会論文集 C 編, 75(751), pp.719-726, 2009.3
13. A. Kaveh and S. Talatahari : Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures, Computers & Structures, Volume 87, Issues 5-6, pp. 267-283, 2009.3
14. 和多田 遼, 大崎 純 : 典型的部材配置の組合せによるトラスのトポロジー最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 639 号, P.841-, 2009.5
15. Yanqin Bai, Etienne de Klerk, Dmitrii Pasechnik and Renata Sotirov : Exploiting group symmetry in truss topology optimization, Optimization and Engineering, 10(3), pp. 331-349, 2009.9
16. A. Kaveh and S. Talatahari : Size optimization of space trusses using Big Bang–Big Crunch algorithm, Computers & Structures, Volume 87, Issues 17-18, pp. 1129-1140, 2009.9
17. A. Kaveh and S. Talatahari : A particle swarm ant colony optimization for truss structures with discrete variables, Journal of Constructional Steel Research, Volume 65, Issues 8-9, pp. 1558-1568, 2009
18. Behrooz Farshi and Ali Alimia-ziazi : Sizing optimization of truss structures by method of centers and force formulation, International Journal of Solids and Structures, Volume 47, Issues 18-19, pp.

3.3 連続体の形状・トポロジー

1. 野々川 舞, 笹岡 竜, 竹内謙善, 畔上秀幸: 連続体の位相最適化問題に関する平滑化解法, 第56回理論応用力学講演会講演論文集, 日本学会議, pp. 295-296, 2007.3
2. 古屋耕平, 竹内謙善: H^1 勾配法に基づく位相最適化の振動問題への適用, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2008 CD-ROM 論文集, 2008.9
3. G. I. N. Rozvany: A critical review of established methods of structural topology optimization, Structural and Multidisciplinary Optimization, 37(3), pp. 217-237, 2009.1
4. Mariano Victoria, Pascual Martí and Osvaldo M. Querin: Topology design of two-dimensional continuum structures using isolines, Computers & Structures, 87(1-2), pp. 101-109, 2009.1
5. 瀧圭 佑, 曾我部博之, 三井和男: 改良型ホップフィールドネットワークを用いた連続体の形状最適化, 構造工学論文集, 55B, pp.599-604, 2009.3
6. 山田崇恭, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 竹澤晃弘: レベルセット法による形状表現を用いたフェーズフィールド法の考え方に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集. A 編 75(753), pp.550-558, 2009.5
7. 平野佑享, 山田崇恭, 小木曾 望, 西脇眞二: レベルセット法による形状表現を用いた信頼性に基づくトポロジー最適化, 日本機械学会論文集. C 編, 75(758), pp.2633-2641, 2009.10
8. 竹澤晃弘, 西脇眞二, 北村 充: フェーズフィールド法と感度解析に基づく構造最適化, 日本機械学会論文集. A 編, 76(761), pp.1-9, 2010.1

3.4 シェルの形状・トポロジー

1. M. Kegla and B. Brank: Shape optimization of truss-stiffened shell structures with variable thickness, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 195(19-22), pp. 2611-2634, 2006.4
2. 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案—その1—多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法, 日本建築学会構造系論文集, 第609号, pp.105-111, 2006.11
3. 佐々木啓介, 堤 和敏, 大倉典子: VR を利用し

た浮遊感のある屋根の形態創生に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp.231-237, 2007.2

4. 浜田英明, 大森博司: 設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案—その2—最適性条件による理論的解法, 日本建築学会構造系論文集, 第618号, pp.143-150, 2007.8
5. 山本憲司, 皆川洋一, 大森博司: RS 座屈荷重係数を目的関数とした単層ラチスドームの形状最適化, 構造工学論文集, 54B, pp. 345-352, 2008.3
6. Kang-Soo Park and Sung-Kie Youn: Topology optimization of shell structures using adaptive inner-front (AIF) level set method, Structural and Multidisciplinary Optimization, 36(1), pp. 43-58, 2008.7
7. 山下拓三, 熊谷知彦, 小河利行, 宮村倫司, 大崎純: マルチグリッド法と可変複合モデルを用いた強風を受けるシェル構造物の屋根形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第636号, pp.297-304, 2009.2
8. 藤田慎之輔, 大崎 純: ひずみエネルギーとパラメトリック曲面の代数不変量を考慮したシェルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第639号, pp.857-863, 2009.5
9. 木村俊明, 大森博司: 形状と厚さの同時最適化法の定式化とその応用—自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案(その1)—, 日本建築学会構造系論文集, 第640号, pp.1091-1098, 2009.6
10. 木村俊明, 大森博司: 形状と厚さの同時最適化法の構造位相決定問題への応用—自由曲面シェル構造の構造形態創生手法の提案(その2)—, 日本建築学会構造系論文集, 第648号, pp.367-376, 2010.2
11. Antonio Tomás and Pascual Martí: Shape and size optimisation of concrete shells, Engineering Structures, 32(6), pp. 1650-1658, 2010.6

3.5 メカニズム・コンプライアントメカニズム

1. 大崎 純, 西脇眞二: 幾何学的非線形性を考慮したトラスの形状・トポロジー最適化によるリンク機構の生成, 日本機械学会論文集. A 編, 73(729), pp.659-665, 2007.5
2. 日本機械学会 編, 機構学: 機械の仕組みと運動, JSME テキストシリーズ, 丸善, 2007.11
3. 木下拓也, 大崎 純: 柔な構造による免震デバ

スモデルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集 第 647 号, pp.113-, 2010.1

3.6 発見的手法の応用

1. 奥 俊信: 主に空地を介した土地利用移転によって形成される土地利用パターンの特徴, 日本建築学会環境系論文集, 617 号, pp.87-94, 2007.7
2. 相吉英太郎, 安田恵一郎, メタヒューリスティクスと応用, オーム社, 2007.10

3.7 形態創生に関する口頭発表文献

1. 高橋智也, 佐々木睦朗: 半剛接合部を有する自由曲面の形態デザインに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.707-708, 2006
2. 尾鷲淳也, 堤 和敏: 感性を考慮した形態創生における学習付対話型 GA の有効性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.457-458, 2007.8
3. 永野康行, 漆崎西仁: 乱数を用いて形態創生した鋼構造アーケード骨組 その 1 アーケードの屋根梁創生アルゴリズム, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.337-338, 2007.8
4. 足立徹郎, 楠朝 光, 佐々木睦朗: NURBS 立体を用いた 3D 拡張 ESO 法による構造形態創生, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.823-824, 2007.8
5. 安藤顕祐, 新谷真人, 佐藤慶太, 永井拓生: 建築計画を考慮した形態創生に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.837-838, 2007.8
6. 朝山秀一, 小林竜一, 田中規之: 台地の侵食アルゴリズムを用いた不定形空間構造の最適形態, 第 30 回情報・システム・利用・技術シンポジウム, pp.137-140, 2007.12
7. 河本新太郎, 永野康行: 乱数を用いて斜柱の配置を決定した鋼構造建築物, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.423-424, 2008.9
8. 高橋智也, 佐々木睦朗: 制約条件付き変断面自由曲面シェルの形態デザインに関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.763-764, 2008.9
9. 三木優彰, 川口健一, 柯宛 伶: 付帯条件付極小曲面の解曲面と石鹼膜実験に関する基礎的考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.767-768, 2008.9
10. 陳 毅哲, 川口健一: 応力密度法の逆懸垂による

構造形態創生の基礎的検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.775-776, 2008.9

11. 佐藤慶太, 安藤顕祐, 新谷真人, 梅澤由香利: 構造最適化手法をパヴィリオン設計に用いた実用例, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.779-780, 2008.9
12. 松野哲也, 小野聡子: ピクセルクラスターオートマトンによる建築構造物の形態創生 (その 1) シミュレーション方法, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.787-788, 2008.9
13. 藤井晴行: 建築と科学的探究の共通性と差異, 日本建築学会大会学術講演梗概集 E-1, pp.601-602, 2008.9
14. 山田直希, 高島英幸: ブレース状柱を有するビルファサードの形態創生に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.317-318, 2009.8
15. 真鍋匡利, 藤井大地: 粒子法を用いた発見的手法に基づく有限変形を伴う弾性体のトポロジー最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1 構造 I, pp.349-350, 2009.8
16. 藤田慎之輔, 大崎 純: 三角形パッチベジエ曲面による区分的可展シェルの形態創生, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.831-832, 2009.8
17. 豊島裕樹, 山田俊亮, 佐藤慶太, 永井拓生, 新谷真人: フーリエ級数を用いた環状構造物への構造最適化手法の適用例, 日本建築学会大会学術講演梗概集. B-1, 構造 I, pp.835-836, 2009.8

4. その他

1. 今野紀雄: 図解雑学 複雑系, ナツメ社, 2006.3
2. カスパー・シュワーベ, 石黒敦彦, ジオメトリック・アート: 幾何学の宇宙教室, 神戸芸術工科大学レクチャーシリーズ, 工作舎, 2006.5
3. 杉原厚吉, 形と動きの数理: 工学の道具としての幾何学, 東京大学出版会, 2006.9
4. 溝口理一郎 他 8 名: 環境のオントロジー, 春秋社, 2008.7
5. 堀池秀人: まちの遺伝子-「まちづくり」を叱る, 鹿島出版会, 2008.9

建築構造形態創生関係 WEB 情報リスト

建築構造形態創生に関係した WEB 情報サイトを紹介する。リストアップの方針などは下記のとおりである。

- 2010 年 8 月 5 日までに実行委員会メンバーより提供された情報を掲載する。
- 情報を提供する際、各メンバー（情報提供者）は下記の項目を調査・記載する。
 - ・ URL
 - ・ サイトタイトル or ページタイトル
 - ・ 作成者 or 作成機関
 - ・ 細分類（「コロキウム構造形態の解析と創生 2006」の資料集に付属している「文献・ソフトウェアリスト」の細分類にしたがう）
 - ※細分類は下記のとおりである。
 - 1. 最適化一般
 - 11 数理計画法
 - 12 その他
 - 2. 発見的手法
 - 21 全般
 - 22 GA
 - 23 GA 以外
 - 3. 構造最適化全般
 - 4. 形態創生全般
 - 5. 形状・トポロジー
 - 51 全般
 - 52 骨組
 - 53 トラス
 - 54 張力構造（空間構造）
 - 55 シェル（空間構造）
 - 56 連続体
 - 6. メカニズム・コンプライアントメカニズム・リンク機構
 - 7. 幾何学・群論
 - 8. 形状モデリング
 - 9. その他
 - ・ そのほか（作成日 or 最終更新日・WEB サイト作成者からの許可）
 - ※「WEB サイト作成者からの許可」について、作成者や作成機関が大学などの研究機関の場合は、特に許可を得ずに掲載している。
 - ・ WEB サイトの内容（150 文字程度）
- 提供された情報は精査せず、基本的には提供された情報をそのまま掲載する。ただし、「WEB サイトの内容」について、フォーマットや共通用語の統一などは WEB 情報 WG のメンバーで加筆・修正する。

実行委員会メンバーより提供された「建築構造形態創生関係 WEB 情報サイト」は、以下のとおりである。なお、2010 年 8 月 5 日までに提供された情報であるため、アクセス不可能な場合はご容赦いただきたい。

(1) URL : <http://www.columbia.edu/cu/gsap/BT/DOMES/domes.html>

- ・ サイトタイトル or ページタイトル : HOUSING THE SPECTACLE
- ・ 作成者 or 作成機関 : コロンビア大学
- ・ 細分類 : 54 , 55
- ・ そのほか : —
- ・ WEB サイトの内容

1965 ~ 1992 年に造られたドーム構造（（Houston Astrodome, 1995）,（U.S. Pavilion at Expo 70, Osaka, 1970）,（Hubert H. Humphrey Metrodome, Minneapolis, 1981）,（Olympic Fencing and Gymnastics Arenas, Seoul, 1988）,（Georgia Dome, Atlanta, 1992））を紹介している。直接、形態解析とは関係しないが、構造特性やディテール、種々のフォルムやアニメーションが示されている。

(2) URL : <http://mf.erciyes.edu.tr/abc/index.htm>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm Homepage
- ・作成者 or 作成機関 : Researchers working in the Intelligent Systems Research Group
- ・細分類 : 23
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
群知能アルゴリズム PSO , ACO , SDS に類する ABC のサイトであり, 開発者が作成している. 形態創生にはまだほとんど利用されていないが, 今後注目される発見的手法 (?) である. JAVA や C のコードがダウンロードできる.

(3) URL : <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO/ACO.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Ant Colony Optimization (ACO)
- ・作成者 or 作成機関 : People working in Ant Colony Optimization
- ・細分類 : 23
- ・その他 : [更新日] March 09, 2009 (2009 年 3 月 9 日)
- ・WEB サイトの内容
群知能アルゴリズム ACO のサイトである.

(4) URL : <http://www.engr.iupui.edu/~shi/ps0.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Particle Swarm Optimizer
- ・作成者 or 作成機関 : Yuhui Shi
- ・細分類 : 23
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
群知能アルゴリズム PSO のサイトである. PSO の情報を掲載した個人サイトである.

(5) URL : <http://www.georgehart.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : George W. Hart
- ・作成者 or 作成機関 : George W. Hart
- ・細分類 : 7 , 8
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
Stony Brook University の George W. Hart 教授の個人サイトである. George W. Hart 教授はコンピュータサイエンスを専門としており, 様々な材料を使用して幾何学的なオブジェを製作されている. いつ見ても楽しいサイトである.

(6) URL : <http://www.taomc.com/home.htm>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : The Art Of Motion Control
- ・作成者 or 作成機関 : Bruce Shapiro
- ・細分類 : 6 , 7 , 8 , 9
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
Director of exhibit design や Artist-in-residence を経験し, “ motion control is also an emerging medium for artistic expression ” を提唱している. このサイトでは, デジタル制御される運動機構が創出した素晴らしいデザインを掲載している.

(7) URL : <http://delta.cs.cinvestav.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : List of References on Evolutionary Multiobjective Optimization
- ・作成者 or 作成機関 : Carlos A. Coello Coello
- ・細分類 : 21
- ・そのほか : [更新日] June 3rd, 2010 (2010 年 6 月 3 日)
- ・WEB サイトの内容
発見的手法に関する文献リストを掲載している。

(8) URL : <http://homepage2.nifty.com/TOMOMI/opt-code.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : 最適化ソフトウェアとテスト問題集
- ・作成者 or 作成機関 : 松井知己
- ・細分類 : 11
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
数値計画法に関するサイトのリンク集である。

(9) URL : <http://www.topopt.dtu.dk/?q=node/7>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : TopOpt
- ・作成者 or 作成機関 : Ole Sigmund
- ・細分類 : 56
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
Web で実行できるトポロジー最適化プログラムを掲載している。

(10) URL : <http://www.gams.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : General Algebraic Modeling System
- ・細分類 : 11
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
数値計画法のプログラムの試用版を集めたものである。

(11) URL : <http://www.sawapan.eu/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : www.sawapan.eu
- ・作成者 or 作成機関 : Panagiotis Michalatos and Sawako Kaijima
- ・細分類 : 4
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
位相最適化のソフトウェアがダウンロードできるほか、Flash によってインタラクティブに幾何学模様を生成するものなど、視覚的に楽しめるコンテンツが数多く掲載されている。

(12) URL : <http://www.anc-d.fukui-u.ac.jp/~ishikawa/Aloss.htm>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : ALOSS
- ・作成者 or 作成機関 : Ishikawa Lab, University of Fukui
- ・細分類 : 51
- ・そのほか : [更新日] 2010 年 2 月 22 日
- ・WEB サイトの内容
世界各地の空間構造物のデータベースを掲載している

(13) URL : <http://www.isg.rmit.edu.au/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Innovative Structures Group
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 4
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容

ESO 法を提案した Y. M. Xie 教授らにより構成される Innovative Structures Group のホームページである。ESO 法のプログラムがダウンロードできる。

(14) URL : <http://www.illigal.uiuc.edu/web/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Illinois Genetic Algorithms Laboratory
- ・作成者 or 作成機関 : Illinois Genetic Algorithms Laboratory
- ・細分類 : 22
- ・その他 : [更新日] 2010 年 6 月 8 日
- ・WEB サイトの内容

イリノイ大学 D. E. Goldberg 先生の遺伝的アルゴリズム研究室のサイトである。遺伝的アルゴリズムのソースコードなどがダウンロードできる。

(15) URL : <http://www.smartgeometry.org/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : smartgeometry
- ・作成者 or 作成機関 : smartgeometry group
- ・細分類 : 4
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容

建築における新しいデジタルデザイナーの出現を促進しようと企てる smartgeometry group の活動を紹介するサイトである。シンポジウムやワークショップの企画が面白い。

(16) URL : <http://springie.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Springie
- ・作成者 or 作成機関 : Tim Tyler
- ・細分類 : 6 , 8
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容

Web で生成できるテンセグリティ構造シミュレーターを掲載している。

(17) URL : http://math.berkeley.edu/%7Esethian/2006/level_set.html

- ・サイトタイトル or ページタイトル : LEVEL SET METHODS and FAST MARCHING METHODS
- ・作成者 or 作成機関 : J. A. SETHIAN
(Dept. of Mathematics, Univ. of California, Berkeley)
- ・細分類 : 51
- ・その他 : [更新日] 2006 年
- ・WEB サイトの内容

Univ. Of California, Berkeley の研究者 J. A. Sethian による level Set Methods and Fast Marching Methods に関するサイトである。

(18) URL : <http://www.kennethsnelson.net/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 54
- ・その他 : WEB サイト作成者から掲載許可あり
- ・WEB サイトの内容
Kenneth Snelson の作品を紹介している.

(19) URL : <http://mathlab.cit.cornell.edu/visualization/tenseg/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : Allen Back and Bob Connelly
- ・細分類 : 54 , 7
- ・その他 : WEB サイト作成者から掲載許可あり
- ・WEB サイトの内容
群論に基づいたテンセグリティー構造を紹介している.

(20) URL : http://www.mukogawa-u.ac.jp/~arch/education/education2010/ArchitecturalDesignStudio_10M01_1.html

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : 武庫川女子大学大学院 建築学専攻
- ・細分類 : 53
- ・その他 : [更新日] 2010 年 6 月 28 日
- ・WEB サイトの内容
大学院での空間構造の製作実習を掲載している.

(21) URL : <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : List of References on Evolutionary Multiobjective Optimization
- ・作成者 or 作成機関 : Carlos A. Coello Coello
- ・細分類 : 21
- ・その他 : [更新日] February 23rd, 2010 (2010 年 1 月 23 日)
- ・WEB サイトの内容
発見的手法に関する文献リストである (前述 (7) と同じものがあるが, その URL にアクセスできなかったため, 別 URL を記載した.) .

(22) URL : <http://www.vrand.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Vanderplaats Research and Development, Inc.
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 11 , 12 , 51 , 56
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
トポロジー／形状最適化商用ソフトウェアのページである. Vanderplaats 先生ของบริษัทである.

(23) URL : <http://www.fe-design.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 51 , 56
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
トポロジー／形状最適化商用ソフトウェア : TOSCA のサイトである.

(24) URL : <http://www.quint.co.jp/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 51 , 56
- ・その他 : WEB サイト作成者から掲載許可あり
- ・WEB サイトの内容
トポロジー／形状最適化商用ソフトウェア : OPTISHAPE-TS のサイトである。

(25) URL : http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/members/overview_nishiwaki.html

- ・サイトタイトル or ページタイトル : —
- ・作成者 or 作成機関 : —
- ・細分類 : 3 , 4 , 51 , 56 , 6
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
西脇先生 (京都大学大学院) の研究成果が掲載されている。

(26) URL : http://www.cmap.polytechnique.fr/~optopo/homog_en.html

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Shape Optimization by the Homogenization Method
- ・作成者 or 作成機関 : Shape Optimization Group at CMAP
(フランスのエコールポリテクニクの Allaire 教授のグループ)
- ・細分類 : 56
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
数学が専門の Allaire 先生は、均質化法による位相最適化、最近ではレベルセット法による位相最適化を研究されている。

(27) URL : <http://www.math.kth.se/~krille/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Krister Svanberg, professor, studierektor
- ・作成者 or 作成機関 : Prof. Krister Svanberg, KTH Royal Institute of Technology
- ・細分類 : 11
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
Krister Svanberg 先生のホームページである。MMA (Method of Moving Asymptotes) 関連の主要文献をダウンロード可能である。教育・研究目的に限り、Fortran コードもしくは MATLAB コードを提供してもらうことができる。

(28) URL : <http://www.cmap.polytechnique.fr/~optopo/index.php?lang=en>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Shape Optimization Group at CMAP
- ・作成者 or 作成機関 : Prof. Grégoire Allaire, Ecole Polytechnique
- ・細分類 : 56 , 6
- ・その他 : —
- ・WEB サイトの内容
Grégoire Allaire 先生を中心とする形状最適化 (トポロジー最適化を含む) グループによるホームページである。均質化法に基づくトポロジー最適化、レベルセット法に基づく形状最適化などのサンプルムービーを見ることができる。Allaire 先生のホームページからレベルセット法に基づく形状最適化の Scilab コードをダウンロード可能である。

(29) URL : <http://www2.acae.cuhk.edu.hk/~cmdl/index.htm>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Computational Modelling and Design Laboratory
- ・作成者 or 作成機関 : Prof. Michael Yu Wang, Chinese University of Hong Kong
- ・細分類 : 56, 6
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
Michael Yu Wang 先生のホームページである。レベルセット法に基づくトポロジー最適化などの MATLAB コードをダウンロード可能である。

(30) URL : <http://www.mathematik.uni-trier.de/~schmidt/index.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Stephan Schmidt
- ・作成者 or 作成機関 : Prof. Stephan Schmidt, University of Trier
- ・細分類 : 56
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
Stephan Schmidt 先生のホームページである。GPU^{Top} では、GPU 上で SIMP を実装して、剛性最大化問題に適用した例を見ることができる。CUDA コードをダウンロード可能である。

(31) URL : <http://www.studiolynn.at/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Studio Lynn
- ・作成者 or 作成機関 : Studio Lynn
- ・細分類 : 8
- ・そのほか : —
- ・WEB サイトの内容
グレッグ・リンはこれまでイェールや UCLA で教鞭をとってきたが、現在はウィーン芸術大学でもスタジオを持っている。グレッグ・リンは、90 年代以降の CG によるデザイン・コンセプトにおいてアメリカで代表的な人物である。サイトには多くのプロジェクトの CG , 模型, 動画が見られる。“Greg Lynn” で検索するだけでもウェブ上の無数の作品や講演が見ることができる。

(32) URL : <http://www.orsj.or.jp/~wiki/wiki/index.php/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : OR 事典 Wiki
- ・作成者 or 作成機関 : 日本オペレーションズ・リサーチ学会
- ・細分類 : 11 , 12
- ・そのほか : [作成日] 2007 年 9 月 1 日
- ・WEB サイトの内容
日本オペレーションズ・リサーチ学会の OR 事典編集委員会が運営している。オペレーションズ・リサーチや最適化手法に関する総合的な事典のサイトである。本サイトは、基礎編、用語編、事例編、資料編の 4 部から構成されている。専門用語の解説だけでなく、幅広い分野から収集した数多くの適用例が紹介されている。

(33) URL : <http://www.is.titech.ac.jp/~kojima/index-j.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : 小島政和
- ・作成者 or 作成機関 : 東京工業大学情報理工学研究科 小島政和
- ・細分類 : 11
- ・そのほか : [更新日] 2010 年 7 月
- ・WEB サイトの内容
数学的見地から数理計画法全般について紹介している。

- (34) URL : <http://nishimulabo.edhs.ynu.ac.jp/~povray/3.1jp/POVUSER.HTM>
- ・サイトタイトル or ページタイトル : POV-Ray 3.1g ドキュメンテーション
 - ・作成者 or 作成機関 : Copyright 1999 POV-Team TM
 - ・細分類 : 8
 - ・そのほか : [更新日] 1999 年 5 月
 - ・WEB サイトの内容
3DCG 作成プログラム POV-Ray のマニュアル・文法に関するサイトである。POV-Ray 公式サイトは英語版のみであり、日本語での説明はありがたい。
- (35) URL : http://web1.kcg.edu/~t_ibaraki/
- ・サイトタイトル or ページタイトル : 京都情報大学院大学 Ibaraki Laboratory (茨木研究室)
 - ・作成者 or 作成機関 : 茨木俊秀
 - ・細分類 : 1
 - ・そのほか : [更新日] 2010 年 4 月
 - ・WEB サイトの内容
離散最適化問題について研究されている方のホームページである。建築分野の方ではないため、違った視点から最適化について考えられるのではないかな。
- (36) URL : http://www.cmap.polytechnique.fr/~optopo/homog_en.html
- ・サイトタイトル or ページタイトル : Shape Optimization Group at CMAP
 - ・作成者 or 作成機関 : Gregoire Allaire,Jonathan Chetboun,Alex Kelly,Dimitri Nicolas,Olivier Pantz,Karim Trabelsi
 - ・細分類 : 4
 - ・そのほか : —
 - ・WEB サイトの内容
形状最適化を行っている CMAP という団体が作成しているホームページである。
- (37) URL : <http://scriptinarnasco.blogspot.com/>
- ・サイトタイトル or ページタイトル : SCRIPTINARNASCO
 - ・作成者 or 作成機関 : PAOLO BASSO
 - ・細分類 : 22
 - ・そのほか : [更新日] 2009 年 3 月 5 日
 - ・WEB サイトの内容
GA や自由形態などに関連する情報を掲載しているブログである。
- (38) URL : <http://www.emergentarchitecture.com/projects.php?id=13>
- ・サイトタイトル or ページタイトル : Emergent Architecture (DRAGONFLY)
 - ・作成者 or 作成機関 : Tom WISCOMBE
 - ・細分類 : 52
 - ・そのほか : [更新日] 2010 年 6 月 23 日
 - ・WEB サイトの内容
このサイトでは、EMERGENT というグループのプロジェクトを見ることができる。DRAGONFLY は唯一実現したプロジェクトと思われる。トンボの羽のような片持ち梁のインスタレーションでセルと呼ばれる梁で囲まれた部分構造の集積として全体構造が構成され、梁せいとセルの形状をパラメータとして進化計算により形態を創生している。

(39) URL : <http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/laboratory/SAL/index.html>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : 近畿大学工学部建築学科 構造解析研究室
- ・作成者 or 作成機関 : 藤井大地
- ・細分類 : 4
- ・その他 : [更新日] 2010 年
- ・WEB サイトの内容
コンピュータを利用した構造デザイン技術や構造設計をサポートする構造計算ソフトを研究開発している。

(40) URL : <http://www.tutu.se.shibaura-it.ac.jp/index.shtml>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : TUTUMI LAB
- ・作成者 or 作成機関 : 堤 和敏
- ・細分類 : 4
- ・その他 : [更新日] 2008 年
- ・WEB サイトの内容
大スパン屋根などの形態創生を研究対象として含んでいる芝浦工業大学の堤研究室紹介ホームページである。

(41) URL : <http://www.az.cs.is.nagoya-u.ac.jp/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : 名古屋大学大学院 畔上研究室
- ・作成者 or 作成機関 : ー
- ・細分類 : 4
- ・その他 : [更新日] 2010 年
- ・WEB サイトの内容
現在、関数解析の応用、数値計算、最適設計、逆問題、バイオメカニクスなどを研究対象にしている名古屋大学大学院の研究室紹介ホームページである。

(42) URL : <http://www.araya.arch.waseda.ac.jp/about.htm>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Ayara Lab
- ・作成者 or 作成機関 : 早稲田大学 新谷研究室
- ・細分類 : 9
- ・その他 : [更新日] 2010 年 7 月 28 日
- ・WEB サイトの内容
吹抜を有する建物の偏心や地震時応答推定など、構造に関する様々な研究を行っている新谷研究室のホームページである。

(43) URL : <http://www.big.dk/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : BIG - Bjarke Ingels Group
- ・作成者 or 作成機関 : Sheela Maini Sogaard
- ・細分類 : 9
- ・その他 : [更新日] 2010 年 6 月 23 日
- ・WEB サイトの内容
建築家集団のサイトであり、コンセプトに面白い案が多いので刺激を受けるのではないかとと思う。

(44) URL : <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/otc/InteriorPoint/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Interior - Point Methods Online
- ・作成者 or 作成機関 : Nathan Brixius and Steve Wright
- ・細分類 : 12
- ・その他 : [作成日] 2010 年 7 月 30 日
- ・WEB サイトの内容

内点法のホームページである。論文やソフトウェア、研究者のリンク集も掲載されている。

(45) URL : <http://www.kicinger.com/>

- ・サイトタイトル or ページタイトル : Rafal Kicinger bio-inspired Engineering
- ・作成者 or 作成機関 : Rafal Kicinger
- ・細分類 : 23
- ・その他 : [更新日] 2009 年 12 月 9 日
- ・WEB サイトの内容

風と自重を受ける超高層建築物の耐震ブレースの最適配置を、CA（セルオートマトン）を用いて決定している。サイトには、同様な CA を用いた交通システムの最適化問題もある。

下記の論文にも WEB サイトに関する情報が多数記載されているので、ご参照いただきたい。

池田靖史：建築のアルゴリズムックデザイン教育，日本建築学会第 30 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集，pp.245 ～ 248 ， 2007 年 12 月

構造形態の解析と創生による建築物の情報と写真掲載

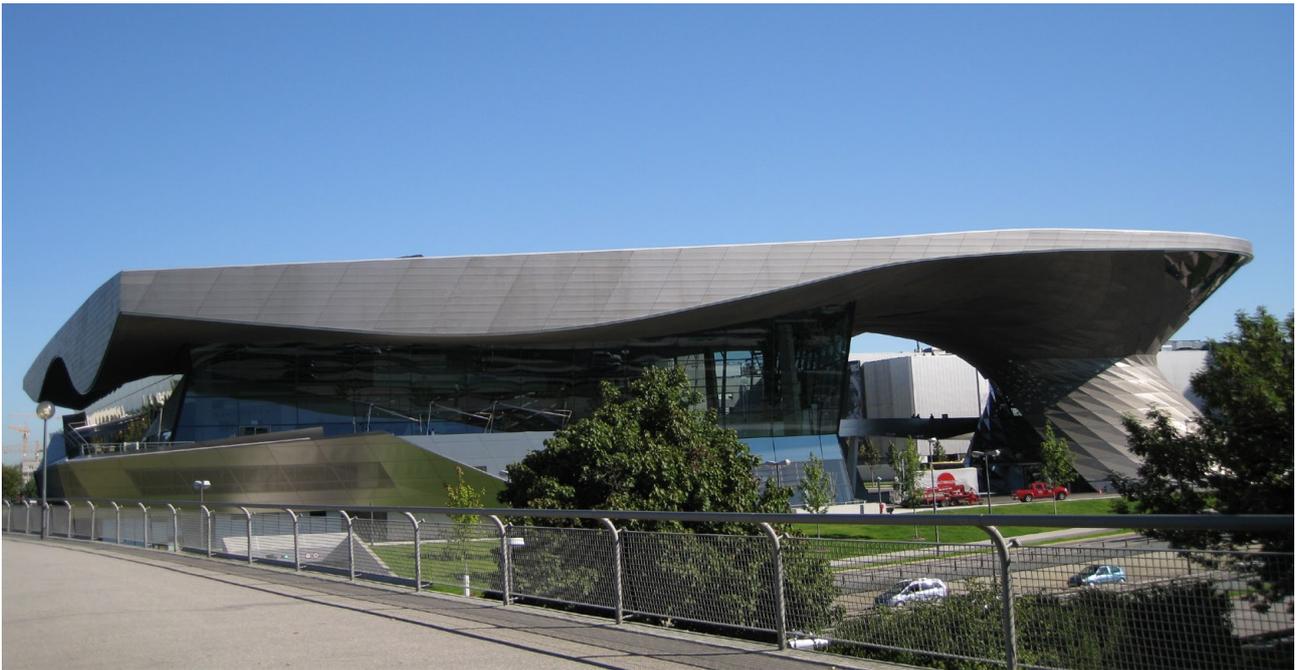
BMW ワールド

竣工：2007 年

設計：Coop Himmelb(l)au

構造設計：B+G Ingenieure

ミュンヘンの BMW ワールドは、BMW 社の新しいディストリビューションセンターであり、スチールとガラスで構成された印象深いフォルムが特徴である。空に浮かぶ雲と天に届くルーフをイメージしたという。この広大な面積を覆う巨大な屋根構造を、たった 11 本の柱と平行な円形リングの間に張ったシャボン玉曲面を思わせる二重の円錐体で支えている。最新の計算能力とソフトウェアが設計の初期段階からディテールの決定や施工にいたるまであらゆることに利用されているという。

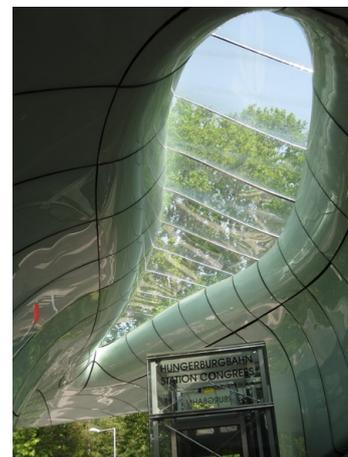


フンガーブルク鉄道駅舎

竣工：2007年

設計：Zaha Hadid Architects

構造設計：B+G Ingenieure



インスブルックの新しいケーブル鉄道の4つの駅舎は極めてユニークなその形状と質感によって、市の中心部の歴史的雰囲気とさらにノルトケッテ連峰の自然とに調和しつつ個性を放っている。自由なフォルムのガラス製ルーフと、階段とホームを含む打ち放しコンクリート製のプラットフォームに特徴がある。その複雑な3次元のフォルムは、設計から施工までの作業工程をデジタルツールの使用によって実現したものであるという。設計の段階において三次元CGが多用されたことや、そのディテールにいたるまで綿密な最適化技術が適用されたことがうかがえる。特に、同一のデータを設計から施工にいたる全ての工程において統一的に利用していることが新しい挑戦にとって如何に重要であったかに改めて愕かされる。

芥川プロジェクト

竣工：2004年

設計：風袋宏幸／フータイアーキテクト

構造設計：長谷川泰稔＋金子慶一飯島建築事務所＋武藤 厚／名城大学武藤研究室

プログラム設計：大森博司／名古屋大学



この建築は、拡張 ESO 法と呼ばれる方法で構造形態が創られている。具体的には、開口部の位置と大きさを設計者が初期値として指定し、自重と地震荷重に対して構造体の各部に生じる応力（ミーゼスの相当応力）を有限要素法で求め、指定した値より小さい場合その要素を取り除く。次に、等応力線を描き応力が大きくなると予測される部分に要素が加えられ、これを繰り返して構造形態を進化させ、最終的な形態を得ている。設計者の意匠的条件を満たしながら、古典的な構造形式に捉われず、新しい構造形態を創生した作品である。



提供：フータイアーキテクト

積層アーチの家

竣工：2007年

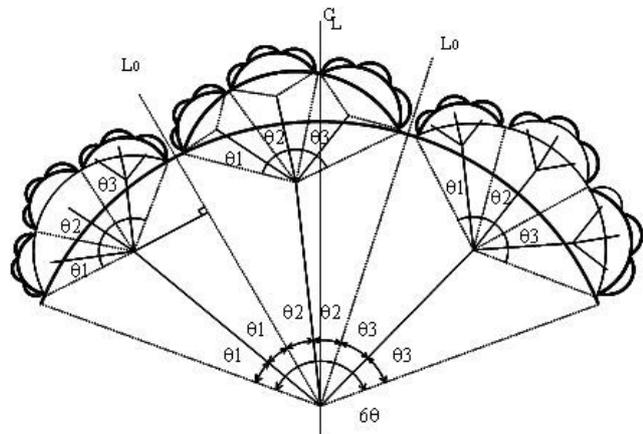
設計：朝山秀一／東京電機大学，前稔文／大分高等専門学校，協力：杉山 聡／SOU 建築設計

構造設計：村山 実／ミノル設計+朝山秀一

プログラム設計：朝山秀一，前稔文



この住宅の屋根架構は、フラクタル幾何学に基づく樹形と同じ形態システムを持っている。積層状に分岐するアーチは、適度な屋根面の凹凸を形成し、風の抗力と揚力をバランスさせて風に強い構造を実現している。構造最適化の計算は行わず、形態の変化と風圧分布係数の関係を風洞実験により求めて、構造設計に利用している。フラクタルを用いた新しい構造形態とその力学的意味を明らかにした作品である。



提供：朝山秀一・前 稔文

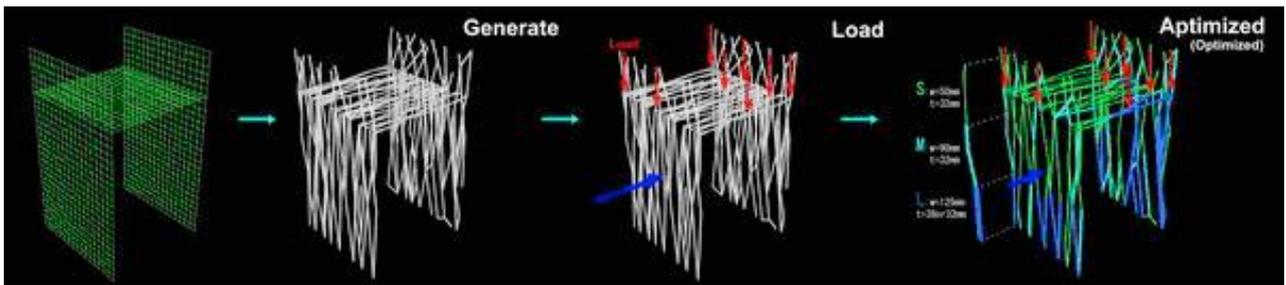
新水俣門

竣工：2004年

設計：渡辺 誠/アーキテクト オフィス

構造設計：第一構造

プログラム設計：渡辺 誠+大崎 純+千葉貴史



提供：渡辺 誠/アーキテクト オフィス

九州新幹線の「新水俣駅」前の広場に設計・製作されたモニュメントで、発生させた初期の形態を、自重と風に対して構造最適化して最終的な形態を求めている。その形は、みかけ上、木に似ているが「かたち」の模倣とは一線を画している。同じような条件で同じような目的に向かうとき、同じような解答にたどり着く現象で、生物学で言う収斂進化に近いものと設計者は説明している。樹形のような生物学的かたちを構造最適化の論理と結びつけた作品である。

レ・アール国際設計競技案

竣工：2007年設計競技応募案

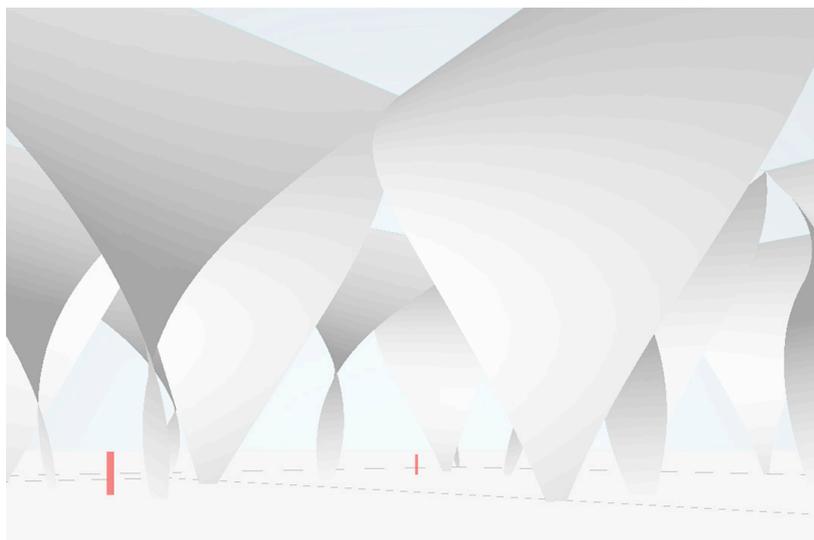
設計：伊東豊雄建築設計事務所

構造設計：Cecil Balmond / Ove Arup & Partners

プログラム設計：伊東豊雄建築設計事務所



提供：kuramochi + oguma



この建築では、形態生成の幾何学的規則から空間と構造が生成され、建築の条件（配置、動線、光環境等）が検証され、それを繰り返して形態が決定されている。幾何学の規則は、以下の通りである。1. 平面グリッドの交点の中から複数の点を選択する。2. それらの点に高さを与えた点を得る。3. 2の点から回転角（ 30° と 60° に制限）の方向に水平線を延長して各線の交点を求める。1.3. で得た3点を結ぶHPシェルの曲面をつくる。この方法により直交グリッド上の限られた点から、予期せぬ多様な構造形態を生成している。

台中メトロポリタンオペラハウス

竣工：2013年設計競技応募案

設計：伊東豊雄建築設計事務所

構造設計：Cecil Balmond / Ove Arup & Partners

プログラム設計：伊東豊雄建築設計事務所

この建築では、エマージンググリッドと呼ぶ幾何学概念によって自由曲面シェルを生成させながら、得られた空間を建築の条件(空間ヴォリューム、機能、配置、動線、光環境等)から検証して、フィードバックをしながら、設計者が空間の形態とその境界面を構成する構造体を選択している。こうして決定した構造体には、構造最適化プログラムにより各部に最適な断面が与えられている。インタラクティブなプログラムの直感的操作により、3次元曲面で構成される空間の相互的關係を建築の条件に対して検討する過程から生まれた構造形態である。



note : The Taichung Metropolitan Opera House is built by the Taichung City Government, Republic of China(Taiwan).



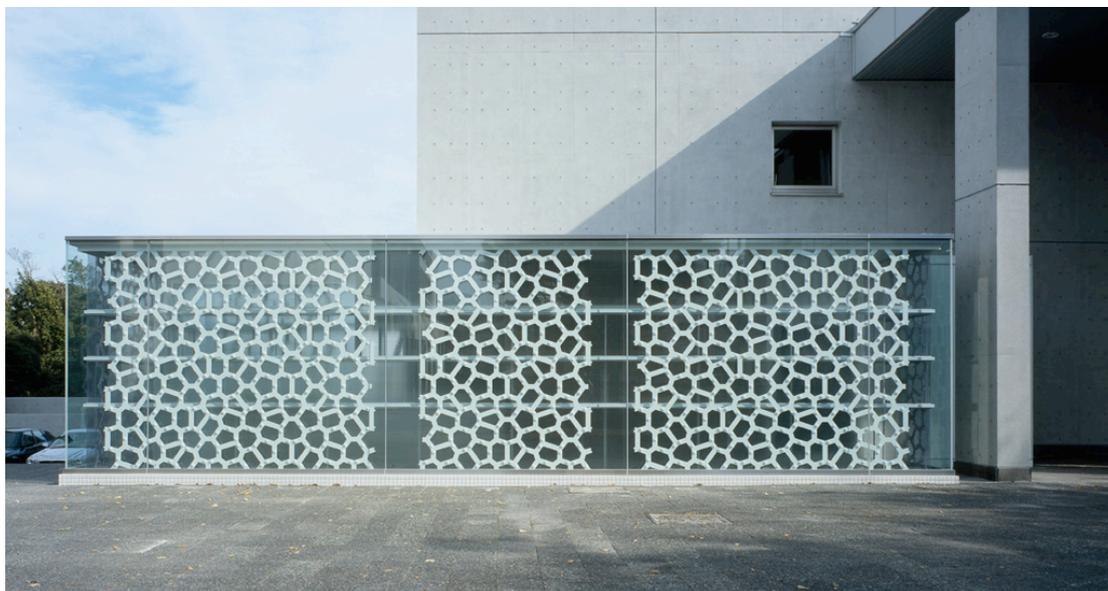
提供：kuramochi + oguma

慶応義塾大学 SFC 本館納品検収所

竣工：2007年

設計：池田靖史 / IKDS

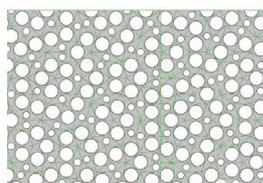
構造設計：長谷川一美 / 構造空間設計室



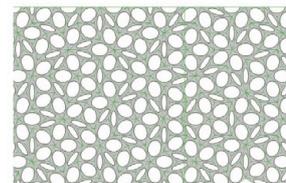
撮影 / 鈴木研一

提供：池田靖史 / IKDS

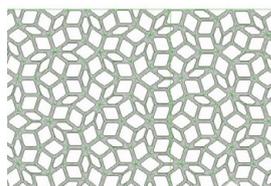
この作品は、宇宙物理学者ロジャー・ペンローズが考案したペンローズ・パターンを応用し、その中点を結び得られる幾何学パターンから構造体を創生している。構造体には、ペンローズ・パターンの性質が反映されており、僅か2種類の部材ユニットから工業的に構造体全体を構成しているにも拘らず、非周期的で多様な形態を生み出すことに成功している。同時に、平行四辺形のように均一な構造体をもつ特異点的脆弱性を回避する構造になっている。



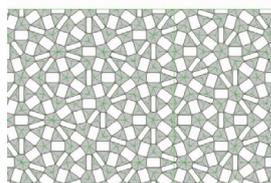
A-1 正円 穴開けタイプ



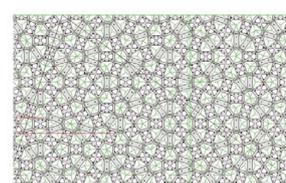
A-2 楕円 穴開けタイプ



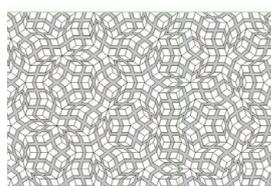
B-1 菱形 穴開けタイプ



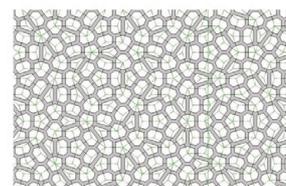
C-1 長方形 穴開けタイプ
(菱形の辺の中点を結んだ長方形)



C-2 長方形 中点接合タイプ
(C-1の反転)



C-1 角度優先 中点接合タイプ



D-2 幅優先 中点接合タイプ

多摩美術大学アルゴリズムック・ウォール

竣工：2007年

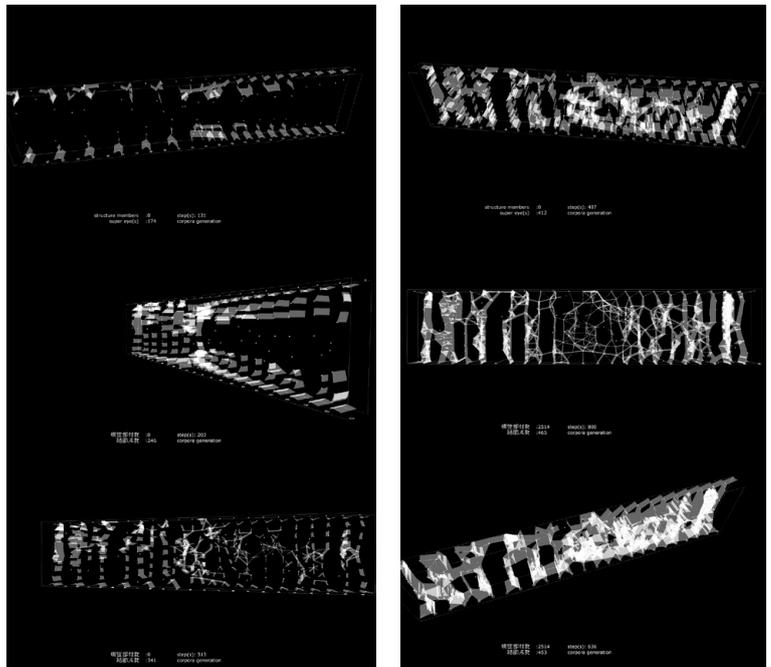
設計：ダブルネガティブス・アーキテクチャー

構造設計：NAL

プログラム設計：市川創太+マックス・ライナー+アコシュ・マーロイ



この壁面家具は、工法・構造上の条件を満たす変化のある形態になっている。初期値として節点（ノード）の開始位置と密度（最大・最小節点数）、節点間距離、接続角度の許容値を定め、節点が決められた許容範囲内で新しい位置に移動・増殖する。構造上の制約は、部材長と厚さで与えられている。各節点は与えられた条件に対して変化し、形態は入力条件により収斂、振動、消失する。この計算は、極座標の空間表記方法で行われており、設計者は「Super eye」と呼んでいる。



提供：市川創太／ダブルネガティブス・アーキテクチャー

ベイ・ステージ下田

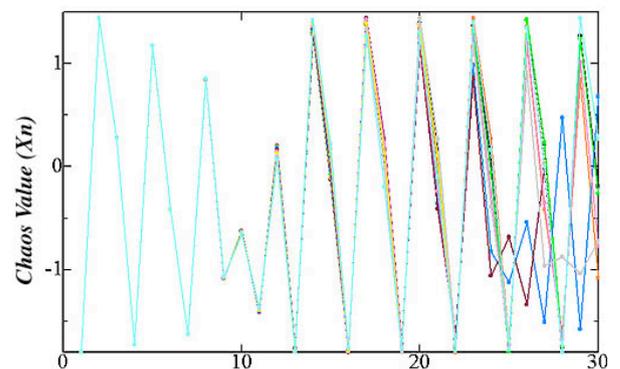
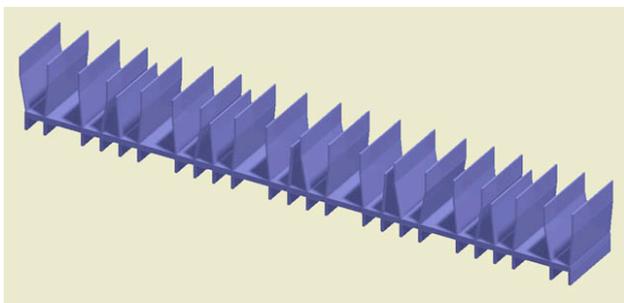
竣工：2000年

設計：堀場 弘+工藤和美/シーラカンス K&H

構造設計：新谷真人/オーク構造設計

プログラム設計：濱野慶彦/エーエーラボ

この建築では、構造体から自然なリズムを感じるように、構造の設計条件（柱スパンの最大・最小値、柱の傾斜角度、種類、本数、左傾斜・右傾斜の柱本数の許容比率）を満たした上で、カオス振動を用いて適度なバラツキを構造体に発生させている。構造最適化は行っていないが、構造の基本ジオメトリーに自然なリズムと構造設計の条件を満たす形態を与え、建築空間にもそれが感じられる作品となっている。



提供：濱野慶彦/エーエーラボ