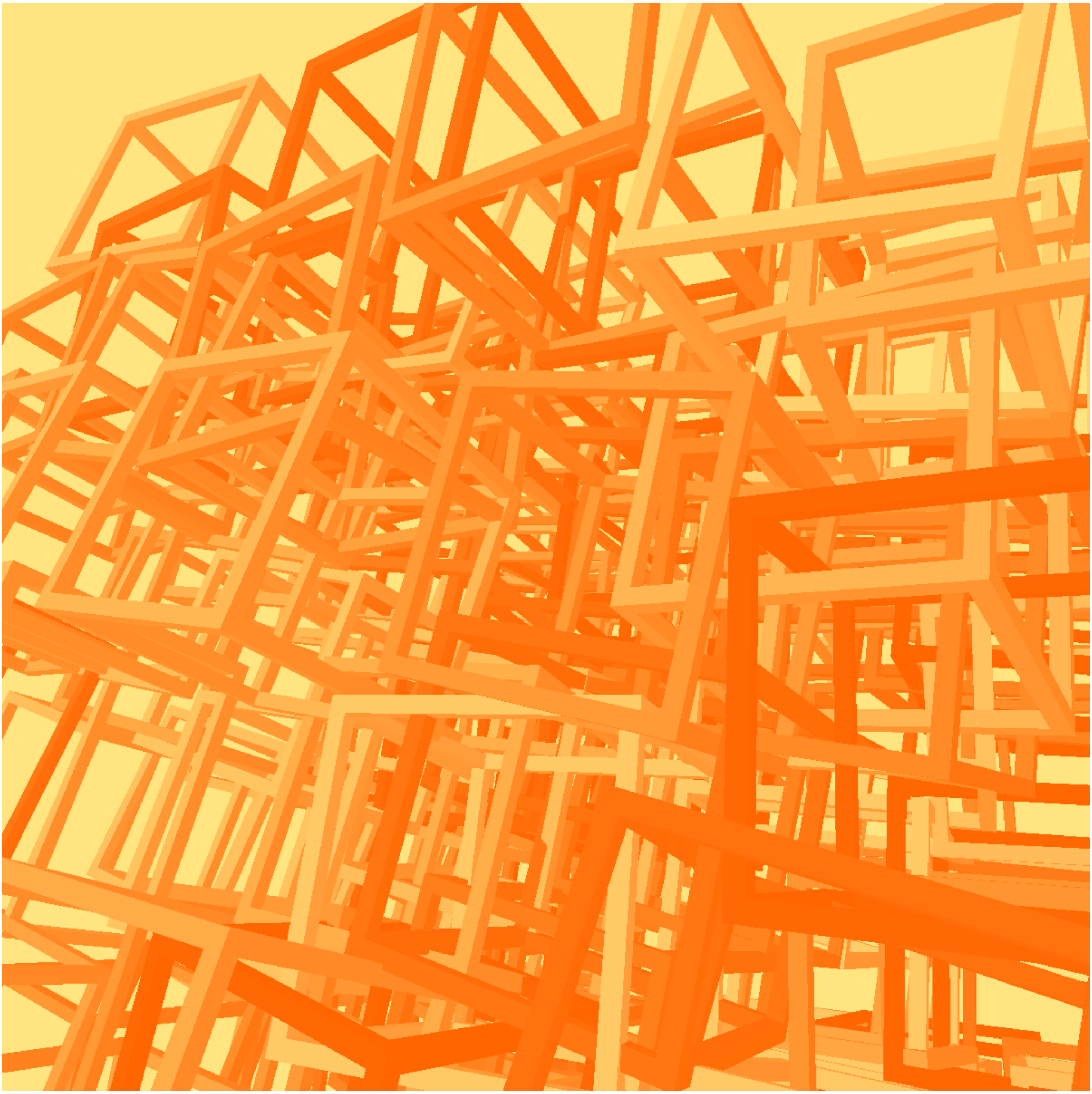
コロキウム

Analysis and Generation of Structural Shapes and Systems 2012

構造形態の解析と創生 2012



開催日：2012 年 10 月 25 日，26 日

日本建築学会

構造委員会　シェル・空間構造運営委員会　構造形態の解析と創生小委員会

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　アルゴリズミック・デザイン小委員会

後援　奈良女子大学

主　旨　説　明

デジタル・ファブリケーション、BIM、アルゴリズミック・デザイン、最適化などといった言葉のまわりで繰り広げられる近年の動きにデザインとコンストラクションの間の垣根が取り払われるのではないかとの期待を感じる人々も少なくないのではないだろうか。さらに三次元プリンターの出現は新たな産業革命をもたらす予感さえもただよわせている。構造デザインの分野においては、構造物の挙動を予測するための数値計算手法が既に花開き、数理計画法に基礎をおく多くの最適化手法や発見的手法が提案された十数年の以前に「構造形態創生」という魅力的な言葉のもと、現在の本コロキウムの魁となる「コロキウム構造形態の解析と創生」が開催され、この分野のその後の発展に大きな影響を与えた。そして今、パラメトリック・デザインの技術や情報システム技術とも相まって、更に多くの分野の人々を巻き込み、デザインに一種の変質をもたらし、まさに「咲く花の薫ふが如く今盛りなり」といったところである。本コロキウムは、建築に関連する構造最適化手法や構造形態創生、アルゴリズミック・デザインやデジタル・ファブリケーションなどに関する最新の研究や設計事例を持ち寄り、研究者と技術者が一堂に会してこれらを発表し議論し情報を交換することによって、そのような期待がただ流行におわることなく、さらに発展し確固とした技術として根付くことを願って天平文化を現前と伝える奈良の地で開催される。

２０１２年１０月

構造形態の解析と創生小委員会主査　三井 和男
構造最適化の理論と応用小委員会主査　高田 豊文
アルゴリズミック・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），塩原等（東京大学）

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）

構造形態の解析と創生小委員会

主査 三井和男（日本大学）

幹事 熊谷 知彦（東京工業大学）， 山本 憲司（東海大学）

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（名古屋市立大学）

陳 沛山（八戸工業大学）， 永井 拓生（滋賀県立大学）， 藤井 大地（近畿大学）

本間 俊雄（鹿児島大学）， 松尾 智恵（川口衞構造設計事務所），水谷 太朗（大成建設）

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 惠三（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（鹿児島大学）， 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（川口衞構造設計事務所）

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）

アルゴリズミック・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）， 小渕 祐介（東京大学）

柄沢 祐輔（柄沢祐輔建築設計事務所）， 瀧澤 重志（京都大学）

竹中 司（豊橋技術科学大学），堀池 秀人（堀池秀人都市建築設計研究所）

前 稔文（大分工業高等専門学校），松川 昌平（000STUDIO），松永 直美（レモン画翠）

三井 和男（日本大学），渡辺 誠（渡辺誠／アーキテクツ オフィス）

「コロキウム 構造形態の解析と創生2012」実施主担当者

コロキウム実施責任者：三井和男（日本大学）

コンテスト担当：立道 郁生（明星大学），松尾 智恵（川口衞構造設計事務所）

熊谷 知彦（東京工業大学），池田靖史（慶應義塾大学）

酒井 康史（日建設計）

講演論文担当：澤田 樹一郎（鹿児島大学）， 山本 憲司（東海大学）

広報担当：本間 俊雄（鹿児島大学）

懇親会担当：小野 聡子（有明工業高等専門学校），永井 拓生（滋賀県立大学）

瀧澤 重志（京都大学），張 景耀（名古屋市立大学）

会計担当：陳 沛山（八戸工業大学）， 堤 和敏（芝浦工業大学）

参加登録：ガン ブンタラ（日本大学）

優秀講演賞担当：高田 豊文（滋賀県立大学）

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）

＊ 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。

コロキウム　構造形態の解析と創生　２０１２

－　目　次　－

■特別講演

■一般講演

＊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

川口　衞（かわぐち　まもる）

特別講演題目

「先達が示した構造形態の発見手法」

プロフィール (2012年5月現在)

(学歴)

１９５５年　　福井大学工学部建築学科卒業
１９５７年　　東京大学大学院数物系研究科修了
１９６６年　　工学博士（東京大学）

(職歴)

１９６０年４月－２００３年３月　法政大学工学部建築学科に勤務
２００３年３月　同上定年退職、現在名誉教授
１９６５年４月より（株）川口衞構造設計事務所を主宰

(専攻分野)

建築構造学、構造開発・設計

(主な研究テーマ)

「立体構造に関する基礎理論の応用」を主眼に、シェル構造、テンション構造、スペース・フレーム、免震構造等の面で、新しい研究分野を開拓して来ている。

(主な設計テーマおよび作品)

「建築構造と造形」、「新しい構造技術の開発」をテーマに構造設計活動を行っている。
主な作品としては、万国博お祭り広場大屋根、バルセロナ・オリンピック・スポーツホール、シンガポール国立屋内競技場、サンドーム福井、なみはやドーム、グルジア国会議事堂、イナコスの橋など。

(学会および社会における活動)

日本建築学会、土木学会、日本鋼構造協会、日本コンクリート工学協会、日本建築構造技術者協会、日本膜構造協会、日本免震構造協会、国際シェル・空間構造学会(IASS)、国際構造工学会(IABSE)、各正会員
１９８１－８２年　日本建築学会監事
１９８７－８８年　同学会学術理事
２０１２年５月　　同学会名誉会員
１９９４－２０００年　学位授与機構（現大学評価・学位授与機構）専門委員
１９９４年－現在　前田記念工学振興財団選考委員
２０００―０６年　国際シェル・空間構造学会(IASS)会長
２００７年１２月　同学会名誉会員

(主な受賞)

１９７０年　４月　科学技術庁長官賞（管圧式空気構造技術の開発）
１９７０年　９月　日本建築学会賞（日本万国博覧会お祭り広場大屋根の構造設計）
１９８３年　５月　日本建築学会賞（大空間構造に関する一連の研究と業績）
１９９０年　９月　QUATERNARIO '90 賞, VENEZIA　(PALAU SANT JORDI)
１９９１年　６月　松井源吾賞（サン・ジョルデイ・パレスの構造設計）
１９９３年　４月　国際シェル・空間構造学会（IASS）TSUBOI 賞（論文賞）
１９９３年　９月　SPECIAL PIONEER'S AWARD (英国 SURREY 大学)
１９９５年　５月　土木学会賞（イナコスの橋）
１９９５年　８月　国際構造工学会（IABSE）賞（世界の大空間構造・設計思想への貢献）
１９９６年　５月　日本建築学会作品選奨（イナコスの橋）
１９９７年　５月　日本建築学会賞（サンドーム福井）
１９９７年１０月　名誉工学博士（ドイツ、シュツットガルト大学）
２００１年１０月　IASS（国際シェル・空間構造学会）TORROJA　MEDAL
２００３年　５月　日本建築構造技術者協会賞（作品賞：セラミックパークＭＩＮＯ）
２００４年　５月　土木学会景観・デザイン賞（イナコスの橋）
２００８年　６月　日本免震構造協会賞（特別賞）（セラミックパークＭＩＮＯ）　　(以上)

コロキウム：構造形態の解析と創生 2012 特別講演

先達が示した

構造形態の発見手法

2012年10月　　川口　衛

1

古代における試みの跡

2

ギリシア神殿の石梁(1)　（J.J.Coulton→ W. Addis)

石梁：引っ張りに弱い→単純梁では中央下端の応力が問題

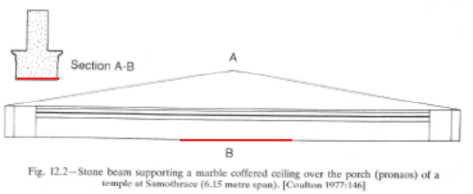


Fig. 12.2—Stone beam supporting a marble coffered ceiling over the porch (pronaos) of a temple at Samothrace (6.15 metre span). [Coulton 1977:146]

William Addis: STRUCTURAL ENGINEERING, Ellis Horwood, 1990

3

ギリシア神殿の石梁(1)　（J.J.Coulton → W. Addis)

石梁：引っ張りに弱い→単純梁では中央下端の応力が問題

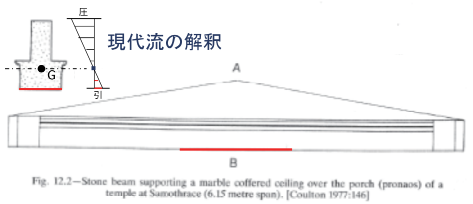
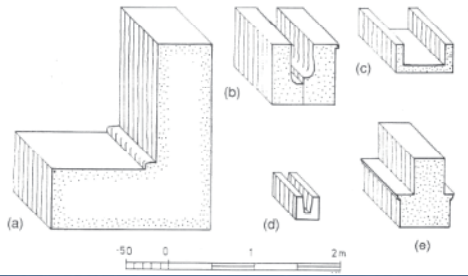


Fig. 12.2—Stone beam supporting a marble coffered ceiling over the porch (pronaos) of a temple at Samothrace (6.15 metre span). [Coulton 1977:146]

William Addis: STRUCTURAL ENGINEERING, Ellis Horwood, 1990

4

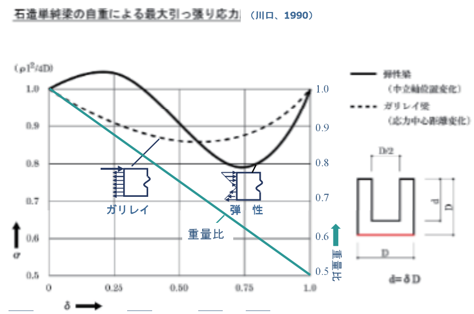
ギリシア神殿の石梁(2)　（BC 4～7世紀）



「石梁は、できるだけ軽くしたい」→ 運搬、揚重、積載能力

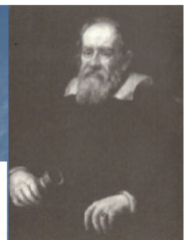
5

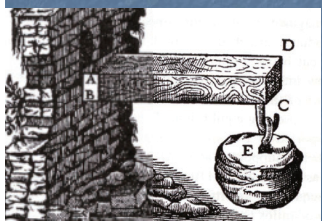
「断面効率を保ち（向上し）つつ、自重を減らす」ことを考えた（？）



6

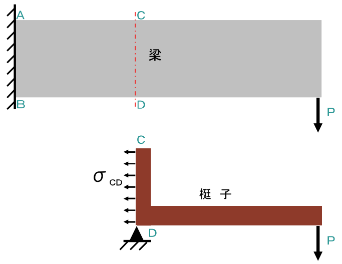
Galileoの最適形態





7

ガリレオは、はじめて、「応力」の概念で物体の強さを考えた。



8

Galileo

$\sigma_o = 2\ M/bD^2$

Mariotte

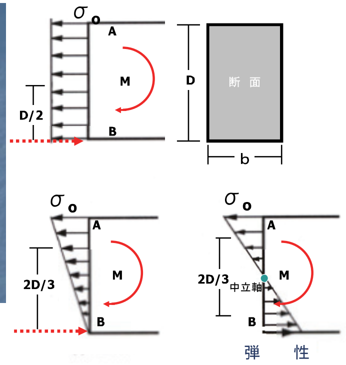
$\sigma_o = 3\ M/bD^2$

弾　性

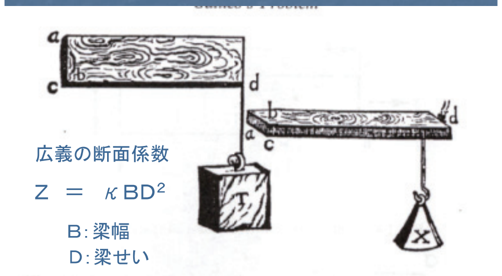
$\sigma_o = 6\ M/bD^2$

一般に

$\sigma_o = \alpha\ M/bD^2$



9



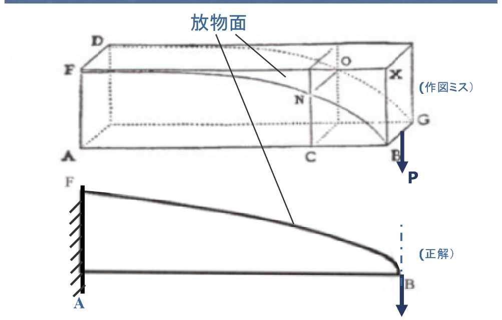
広義の断面係数

$Z = \kappa BD^2$

B：梁幅
D：梁せい

10

片持ち梁の最適形態　（等応力問題）



11

ガリレオの 最適形態

1）等応力形態 ＝ 最適形態
（どの部分も遊んでいない形）
2）材料は？　木（切って形を整える）
無駄では？
3）何のために？　　船の骨組み

「船の構造では自重が小さいことが重要」

“PAY LOAD”の概念

12

アーチ、ヴォールト の 最適形態

13

一様荷重（自重）に対する 最適形態 ＝ カテナリー

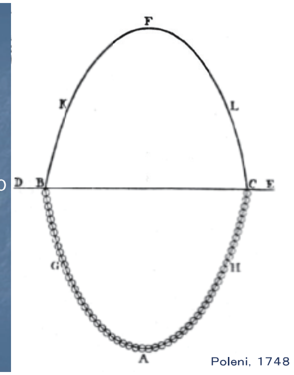
14

カテナリー・アーチ

原理：(anagram)
R. Hooke, 1675

基本式（カテナリー）：
Jakov Bernoulli,1690

解(1691)：
Johann Bernoulli
G. W. Leibniz
C. Huygens

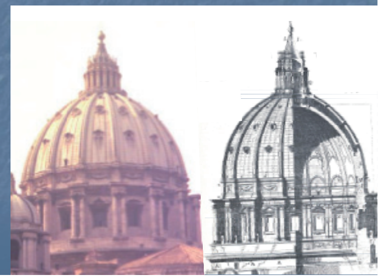


Poleni, 1748

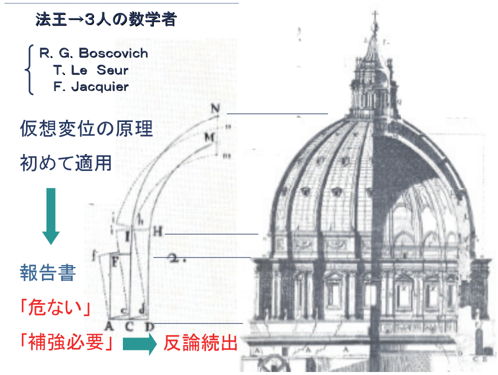
15

サン・ピエトロ寺院(Michelangelo)の危機？

1590年頃　主要部完成。 1631年　亀裂が目立ちはじめる。
1636、1680、1742年：「危機」のうわさ つのる。

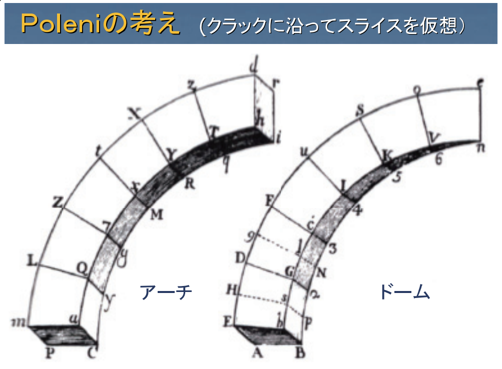


16

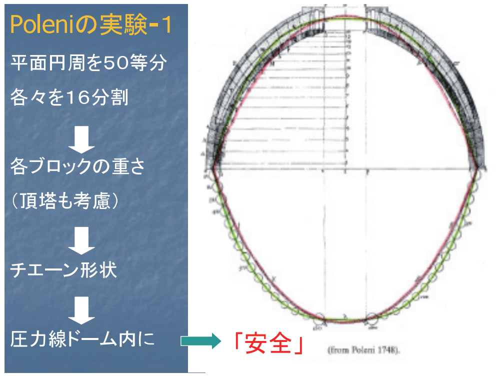


17

18

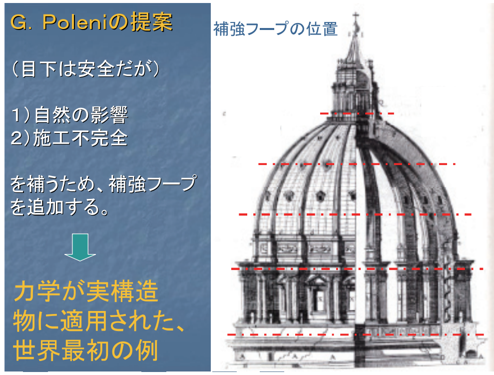


19

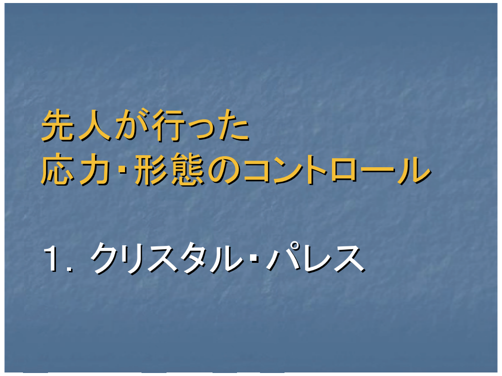


20

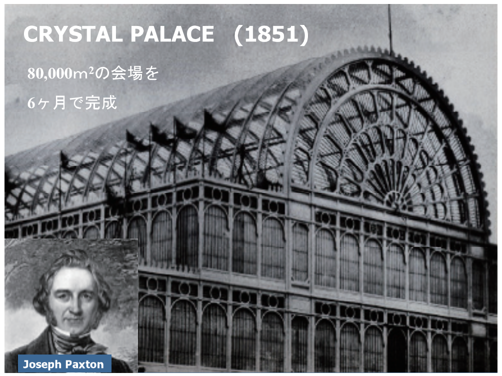
21



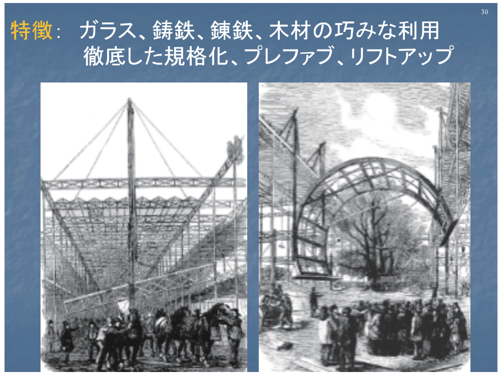
22



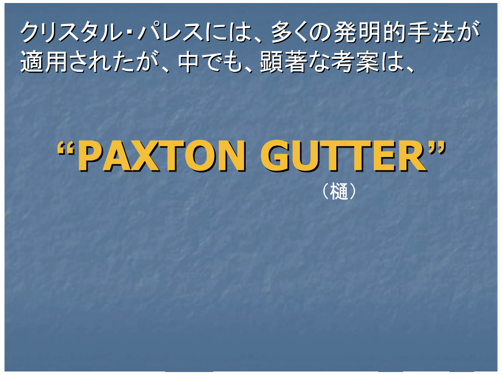
23



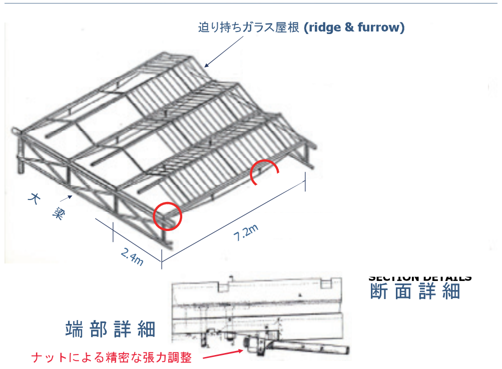
24



25



26



27

28

29

30

31

32

写真は省略できない。

33

PAXTON GUTTER ⇨ PAXTON GIRDER

ニューヨークの市街鉄道　1876年

34

先人が行った
応力コントロールの試み

2. Britannia橋

35

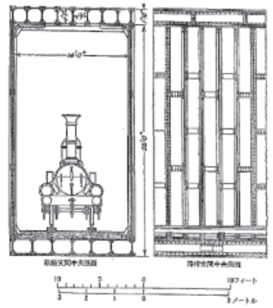
Britannia橋　（1850）　R. Stephenson

中央径間2x140m、側径間2x70m

36

Britannia橋

ボックスガーダー
の構成



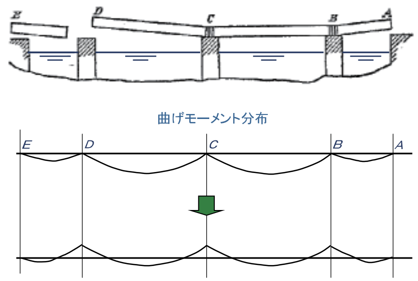
37

架設方法

川岸で造った箱桁をポンツーンで運んでリフトアップ

38

Britannia橋(1850)の応力コントロール



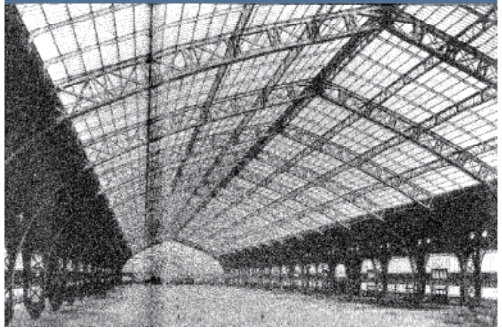
39

先人が行った
応力・形態のコントロール

3. パリ博(1889)機械館
（3-ヒンジ・アーチ）
＝
静定構造

40

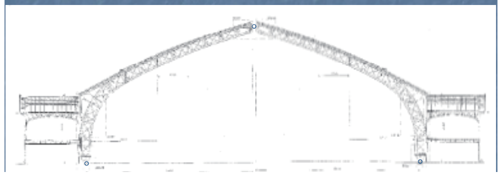
パリ博(1889)機械館　F. Dutert, V. Contamin



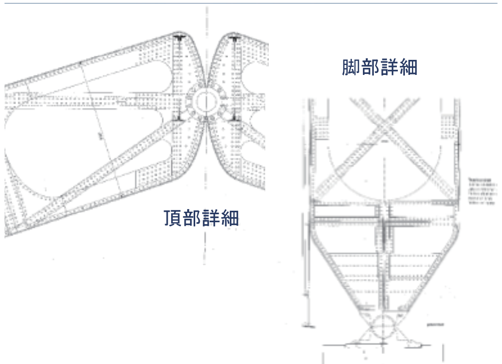
41

構造システム：　3-ヒンジ・アーチ

スパン:111m　長さ:420m

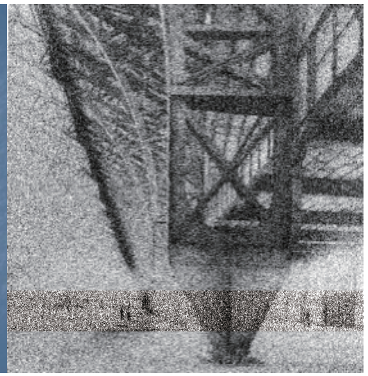


42



43

脚部
写真



44

先人が行った
応力・形態のコントロール

4. Forth鉄道橋　（1890）

45

Forth鉄道橋　（1890）　中央スパン:2 x521 m

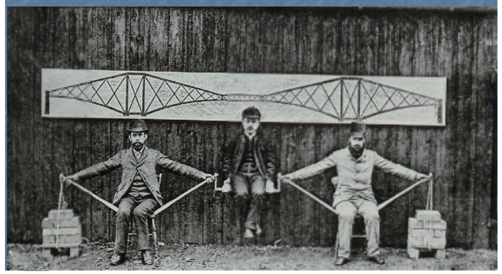
“Cantilever　Bridge”　＝静定構造物

設計:　J. Fowler,　B. Baker

46

説明用デモンストレーション

中央の人物は渡辺嘉一（工部大学校卒、グラスゴー大学卒）



47

48

49

50

静定構造における応力の明確性

51

静定構造における応力の明確性

構造物に生じる応力の原因：

1） 荷重 （解析可）
2） 温度変化 （解析可）
3） 部材寸法の誤差
4） 不等沈下
5） クリープ、経年変形
6） 施工順序・・・・・・

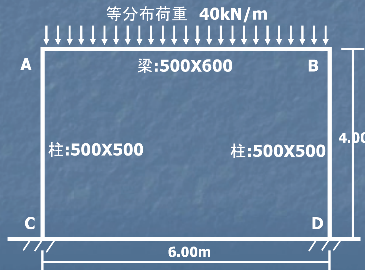
3）〜6）：読めない

2）〜6）：不静定構造で問題

52

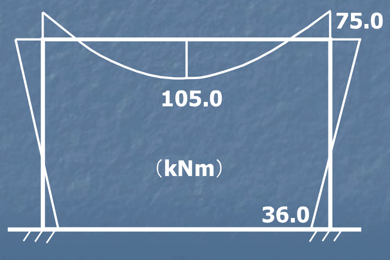
不静定構造の生成応力の不確定性

EXAMPLE : RC コンクリート・ラーメン （不静定構造）



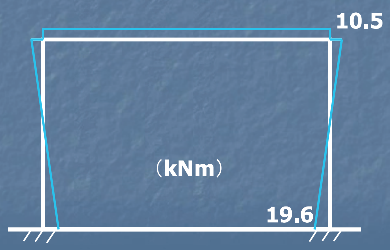
53

曲げモーメント図 （荷重による）



54

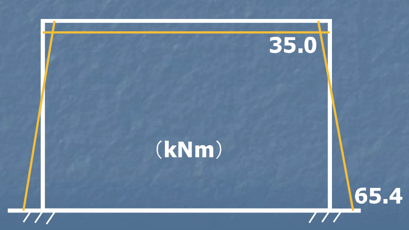
曲げモーメント図 （温度変化＋20℃による）



55

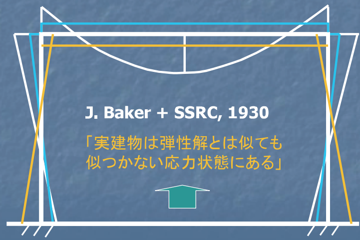
曲げモーメント図 （乾燥収縮[1年]による）

$\varepsilon = 8 \times 10^{-4}$



56

曲げモーメント図 荷重 温度変化 乾燥収縮

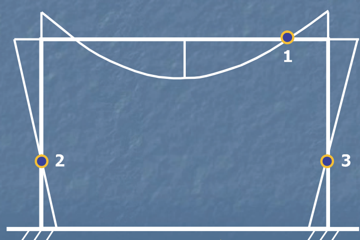


更に、部材誤差、現場誤差、建て方順序等の影響が重なるのが実態

57

不静定構造の「静定化」

モーメントゼロの点(反曲点：inflection points)に不静定次数個のヒンジを設ける。



応力状態を変えずに静定化

58

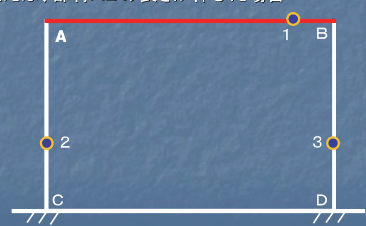
「静定化」された構造は、温度変化、部材の伸縮、不等沈下、製作誤差などの影響を受けない。

たとえば、部材ABの長さが伸びた場合・・・

59

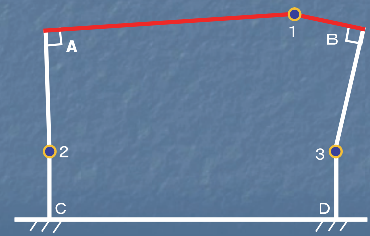
「静定化」された構造は、温度変化、部材の伸縮、不等沈下、製作誤差などの影響を受けない。

たとえば、部材ABの長さが伸びた場合・・・



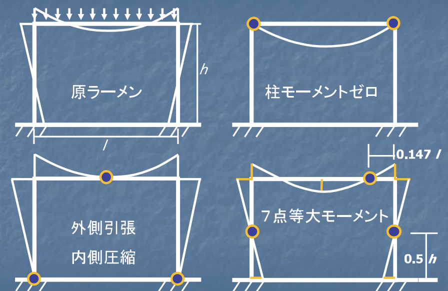
60

2A1および1B3が
それぞれ剛体回転をし、応力は発生しない。



61

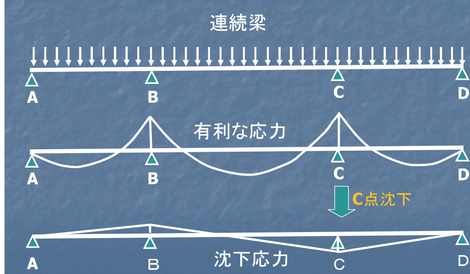
より積極的な応力コントロール



62

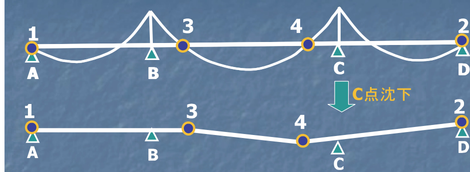
ゲルバー梁 J. Gerber (1832-1912), Pat. 1866

連続梁の静定化



63

連続梁の反曲点にヒンジを追加（3, 4点）



部材3−4、4−2 が無応力剛体変位

Hassfurt橋 （独） 1867 中央スパン 130m

64

空間構造の最適形状探索の例
連力図(Funicular　Curve)の利用

実験的手法が多い

(糸と錘があれば、正確に実験できる。
原理が単純で、信頼性が高い。)

結果を逆転→糸の引っ張りを圧縮と読む。

組積、コンクリート構造に適。

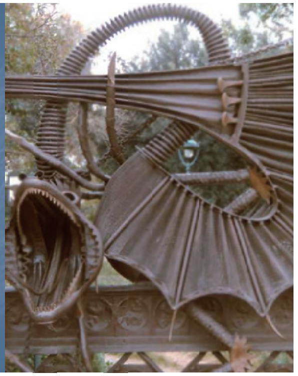
65

空間構造の最適形状探索の例

連力図(Funicular　Curve)の利用
実験的手法が多い
(糸と錘があれば、正確に実験できる。 原理が単純で、信頼性が高い)

66

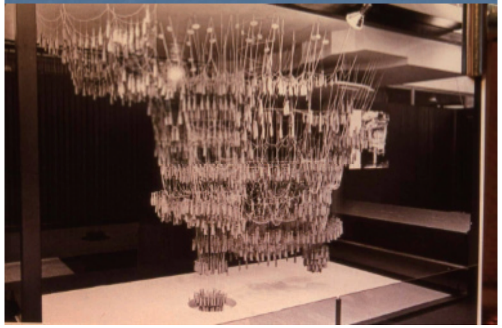
A. Gaudi



67

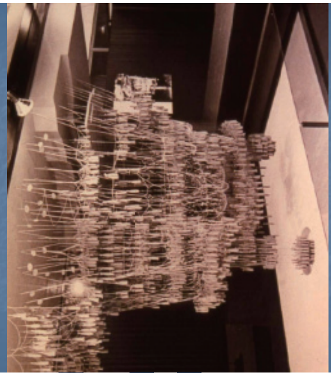
Colonia Güell, Chapel

68

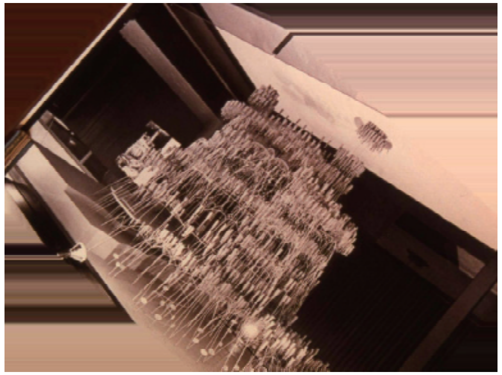


69

70



71



72

73

74

75

76

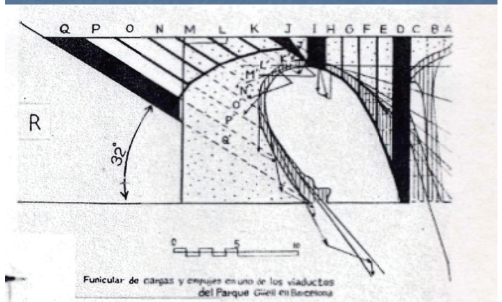
Güell公園テラス

77

Güell公園テラス擁壁

78

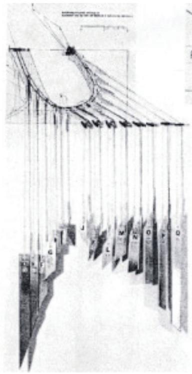
土圧連力図(Rubioの作図)　―　まちがい?



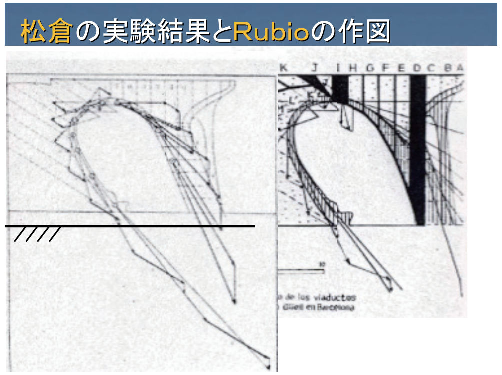
79

松倉の実験

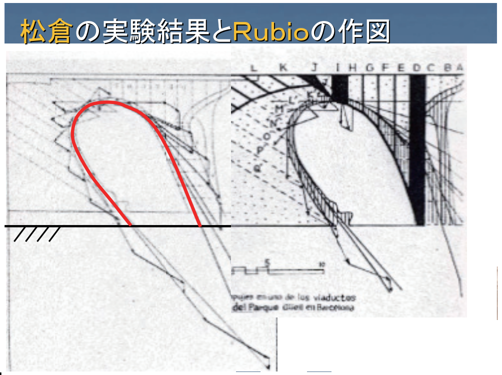
松倉保夫
「ガウディニスモ」
九州大学出版会
1983



80

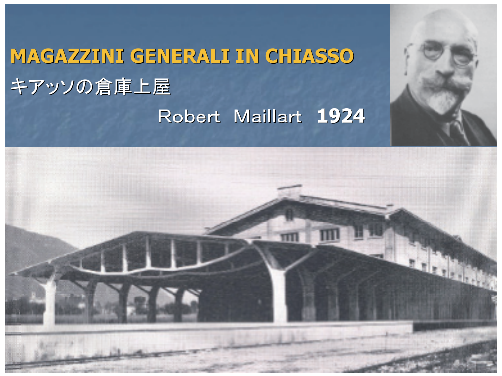


81

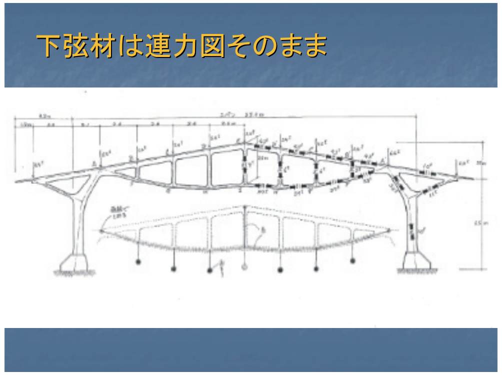


82

83

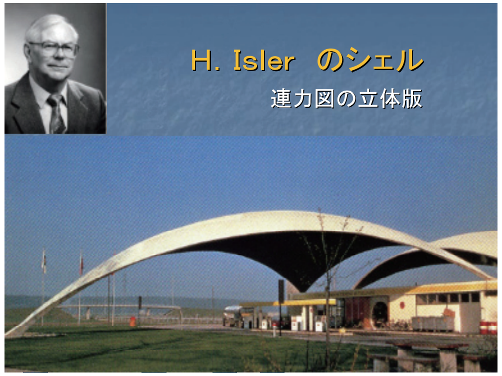


84



85

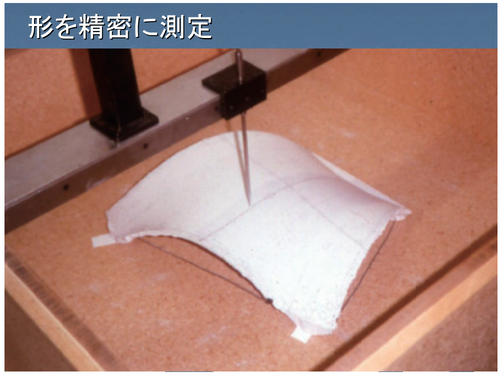
86



87

88

89

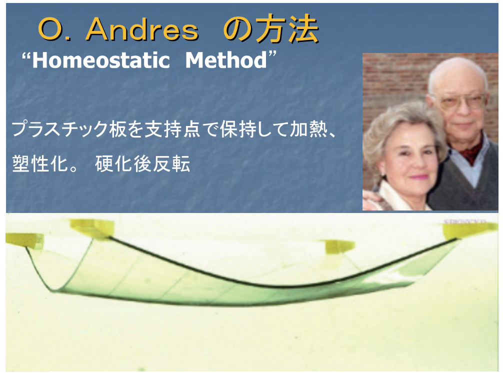


90

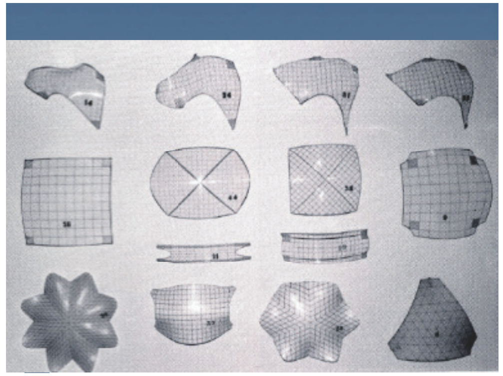
91

92

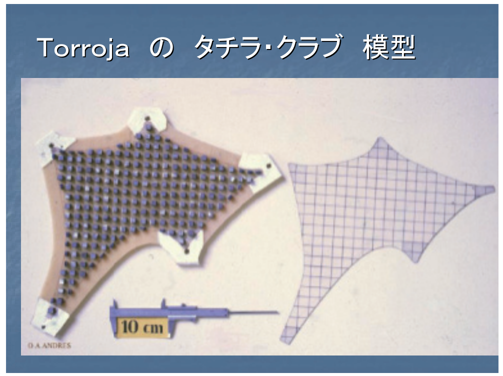
93



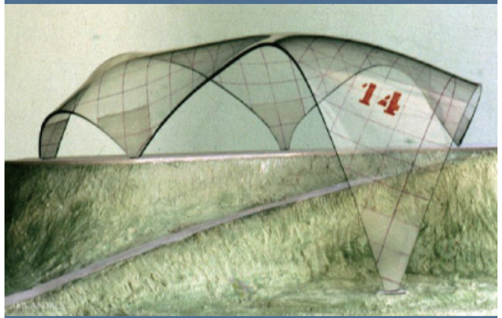
94



95

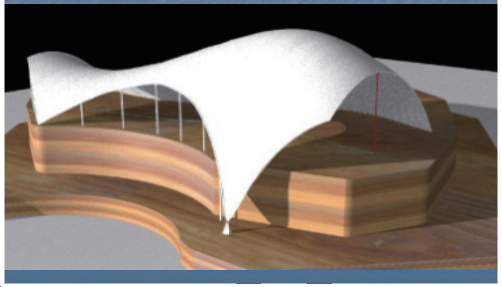


96



97

Tachila Club 模型（トロハ）

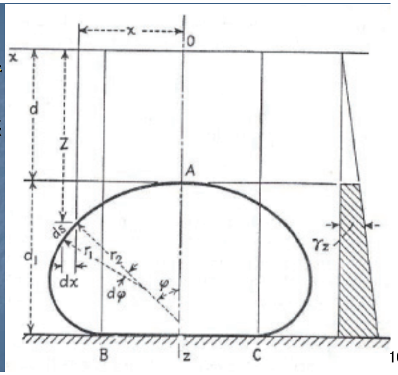


98

流体容器の最適形態

99

液体容器の最適形態 || 液滴形



100

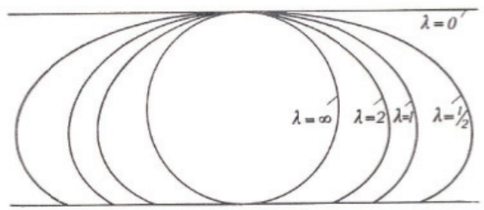
圧力分布と最適形状

断面カ一定： T_0

p_0：頂部圧

$\lambda = p_0 / \sqrt{T_0 \rho}$

λ が大きいほど上下差圧が少なく、球に近づく



Novozhilov、1970

101

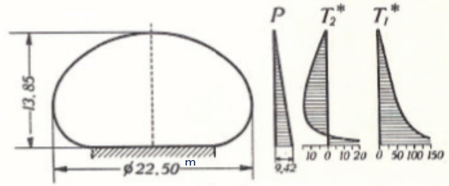
液滴形タンクの実例 Chicago Bridge & Iron Works

102

条件が変わると・・・・

$\lambda = 1.1$ の曲面に $p_0 = 0$ の液圧が作用すると,

底部で $T_1 \to \infty$, $T_2 \to -\infty$,　しわ、曲げ応力発生



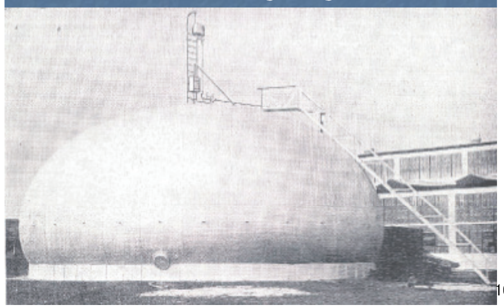
Novozhilov、1970

→ 現実のタンク設計への適用は困難

103

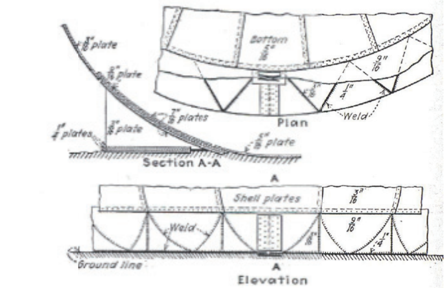
オイルタンク（直径17m）の建設報告 1929

Chicago Bridge & Iron works



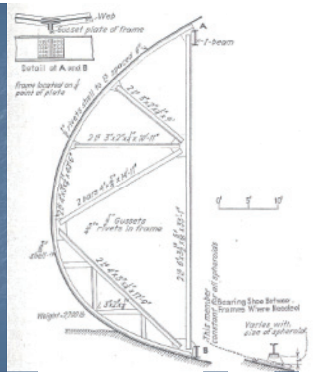
104

裾の補剛、補強



105

側壁部の補剛、補強



106

最偏平空気膜曲面

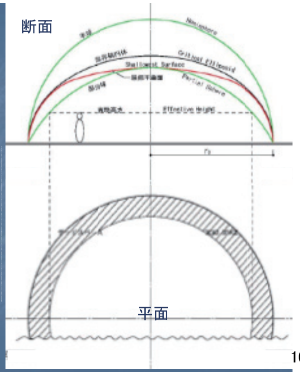
107

最偏平空気膜曲面とは

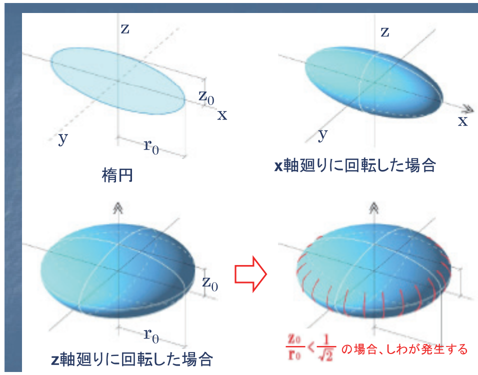
1）空気内圧（内外差圧）によって、しわを生じない。

2）周辺で鉛直

3）最偏平



108



109

しわなし最偏平曲面の求め方

内圧pによる応力：

$$\begin{cases} N_\phi = pr_2/2 \\ N_\theta = pr_2(1 - r_2/2r_1) \end{cases}$$

しわなしの条件：

$N_\phi \geq 0$ and $N_\theta \geq 0$

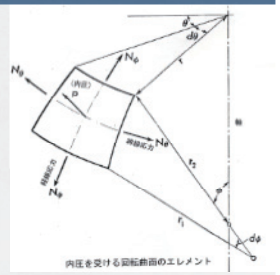
または,

$$\begin{cases} r_2 \geq 0 \\ r_1 \geq r_2/2 \end{cases}$$

最偏平の条件：

λ＝［曲面の高さ］／［底面の半径］

$$= \frac{\int_0^{\pi/2} r_1 \sin\phi \, d\phi}{\int_0^{\pi/2} r_1 \cos\phi \, d\phi} \to \min.$$

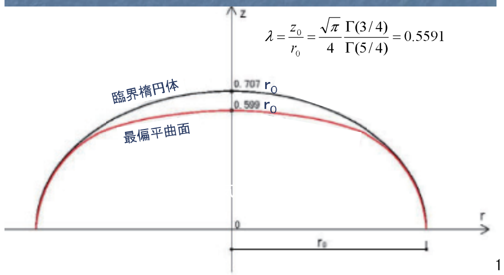


$$\lambda_0 = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{\Gamma(3/4)}{\Gamma(5/4)} = 0.5991$$

110

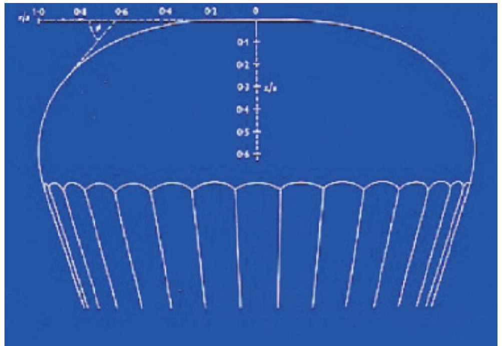
最偏平空気膜曲面 (M.Kawaguchi, 1977)

$$\lambda = \frac{z_0}{r_0} = \frac{\sqrt{\pi}}{4} \frac{\Gamma(3/4)}{\Gamma(5/4)} = 0.5591$$



111

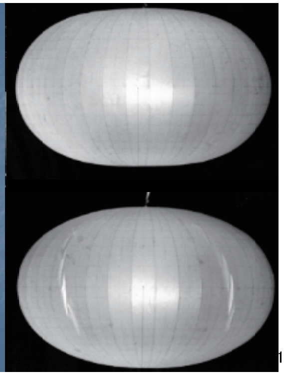
パラシュートの最適形状（G. I. Taylor, 1919）



112

実験：
最偏平曲面と
回転楕円体

上：最偏平空気膜曲面
下：回転楕円体
共に
直径：1000mm
タテヨコ比：0. 599
ポリエステル・フィルム
(厚さ：0. 075mm)



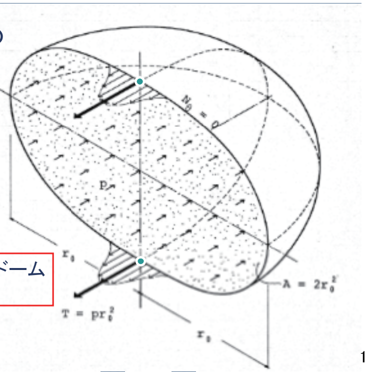
113

最偏平曲面の
特異な性質

フープ応力が
生じない！

⇩

金属膜エアードーム
の可能性

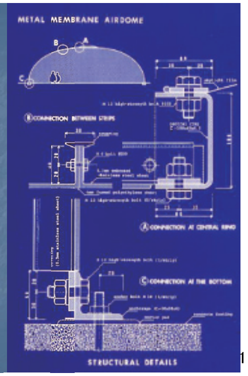


114

金属膜エアードーム

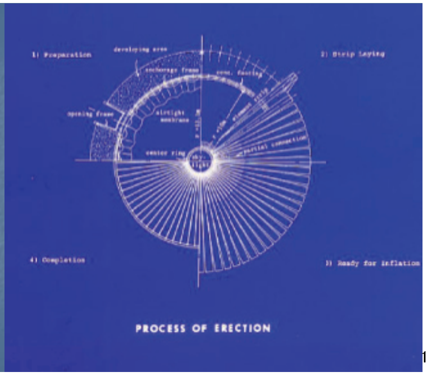
平面直径：20m、
高さ：5. 99m、
ステンレス・シート：0. 3mm厚、
スカイライト直径：3m、
ポリエステルフィルム200μ厚
内面吸音：4mm発泡ポリエチレン、

ディテール
1)スカイライト取り付け
2)瓦棒
3)脚部



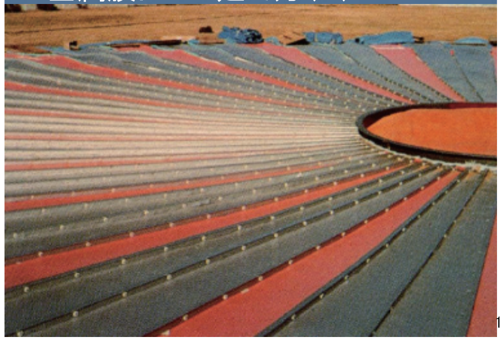
115

金属膜建て方計画



116

金属膜ドーム建て方（1）



117

金属膜ドーム建て方（2）

118

金属膜ドーム建て方（3）

119

金属膜ドーム建て方（4）

120

金属膜ドーム建て方（5）

121

金属膜ドーム建て方（6）

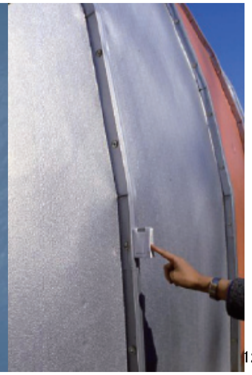
122

金属膜ドーム建て方完了

平面直径：20m、高さ：5. 99m、ステンレス・シート：0. 3厚、内面吸音マット：4mm発泡ポリエチレン、スカイライト直径：3m、ポリエステルフィルム200μ厚

123

瓦棒詳細



124

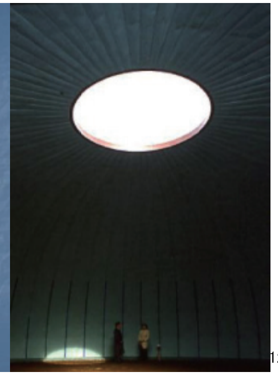
金属膜ドーム頂部付近

125

金属膜ドーム　スカイライト

126

金属膜ドーム
内部



127

構造設計の目的：

「構造物の機能と安全を効率的に保証する」

効率：　材料効率（小自重）

→ 実効荷重、省資源、省エネルギー、放散、汚染

生産効率

→ コスト、工数、工期、再利用

最適化 ⇨ 形態、構造システム、コントロール機構・・・・

128

特別講演講師

上野 邦一（うえの くにかず）

特別講演題目

「奈良女子大学記念館の建物概要と修理工事」

略　歴

1944年生まれ

現在、奈良女子大学名誉教授、古代学学術研究センター特任教授

工学博士

日本建築史、東南アジア建築史を専門とする

1967年 3月　名古屋大学工学部建築学科卒業

1972年 ４月　奈良国立文化財研究所に入所

1992年10月　奈良女子大学家政学部教授

2007年 3月　同大学定年退職

2009年11月　カンボジア王国よりサハメトリ勲章を授与される

奈良女子大学記念館の建物概要と修理工事

上野邦一
奈良女子大学名誉教授

まえがき

奈良女子大学記念館は、大学の前身である奈良女子高等師範学校の開校にともなって、明治 42 年(1909)に竣工した旧本館の建物である。キャンパスの中核に位置し、正門の軸線上にある。昭和 50 年代後半ころまで使用していたが、手狭になったことや老朽化したことから、本部管理棟、講堂が新築され、旧本館はしばらく閉鎖していた。

大学のシンボルとして再生活用しようと、平成２年(1990)に記念館として保存することになり、１階は開校以来の教材・史料などを展示し、２階講堂を講堂として利用することになった。平成 6 年(1994)に修理工事を行い、同年に重要文化財の指定を受けた。なお、守衛室も併せて重要文化財となり、正門も附指定(つけたりしてい)を受けた。ちなみに構内には、登録文化財となった大学同窓会の佐保会館、未指定だが奉安殿がある。

奈良は、第二次大戦時に空襲を受けていない都市として良く知られている。そのおかげで、奈良女子大学には明治後期以来の女子高等教育の教材・教科書などがよく残っている。空襲を受けた都市に所在した多くの大学は、所蔵していた開校してからの教材・教科書などを失っているので、奈良女子大学が所蔵する教材・教科書などは旧本館建物そのものとあいまって貴重である。明治時代に開校した現在の大学クラスの本館で、現存して残っているのは、奈良女子大学記念館のほか旧山形師範学校本館、旧東京医学校本館の３棟であろう。

旧本館の明治時代当初の施工は、地元の尾田組が行っていて、奇しくも修理工事も尾田組が行った。数代前に施工した建物を、自ら修理したことになる。設計当時の図面・書類が本学に残っていて、図面の捺印から、設計を担当したのは、当時京都帝国大学建築部長であった山本治兵衛である。

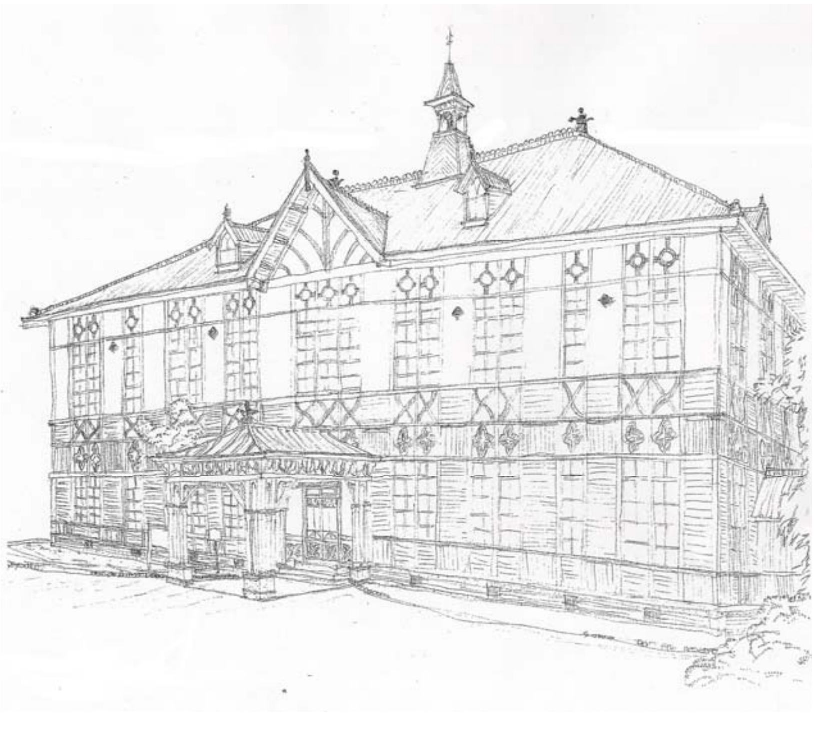


図１　記念館スケッチ

１　建物概要

記念館は東を正面とし、南北 96 尺(約 30 m)、東西 54 尺(約 16,4m)、総二階建、寄棟造、瓦葺の建物である。１階正面中央に正面 12 尺(約 3.6m)、奥行 18 尺(約 5,5m)の車寄を張り出し、車寄は寄棟屋根風とし鉄板葺きとする。

平　面

１階では中廊下が南北に通り西側に２室、東側南に３室、東側北に２室があり、当初の部屋数･大きさは現在も変わっていない。西側の二室は、かつては会計係室、食堂兼会議室で、また東側に南から応接室、宿直室、受付、庶務係室、校長室であった。２階は講堂で、講堂の南北に前室があった。現在は、１階の旧会計係室を展示室(１)に、旧食堂兼会議室を生涯学習研究室に、旧応接室を展示室(２)に、旧宿直室を会議室に、旧受付を事務室に､旧庶務係室を展示室(３)のように主として展示室などに、旧校長室を空調機械室に充てて改装した。そして２階の講堂と前後の小ホールは旧状のままとしている。

旧応接室は、カテーンボックスや天井などを見ると他の部屋より幾分上質に造作されている。

外　観

正面からみて正面性・中軸性を強調した左右対称の意匠である。1 階正面に玄関ポーチ、２階正面軒に切妻破風を立上げ、また棟中央に鐘楼を置いて中軸性を強調する。棟中央の鐘楼は、いわば飾りで、実際に鐘を吊ったことはない、と思われる。鐘楼は方形で袴腰を付け、屋根は尖塔型とし鉄板で葺く。棟中央に鐘楼・望楼を置くのは、明治時代の学校建築の現存事例があり、当時の一般形なのであろう。[注1]

屋根には正背面に２ケ所、側面に各１ケ所、計６ケ所に切妻屋根を持つ明かり取り窓がある。これらは飾り窓ではなく、実用的な窓で２階講堂に明かりをもたらしている。

棟両端には通常の和風建築では鬼瓦を置く位置に、花をあしらった飾り瓦を置き、棟にも回の字に似た飾り瓦を並べている。

構　造

全体は壁構造である。ハーフティンバーと呼ばれるヨーロッパに見られる工法を採用している。壁部分を木造で枠を造って木の間を真壁とし、全体で壁を立ち上げる構造である。真壁なので木の部分が表に現れる。

図２　小屋組のトラス

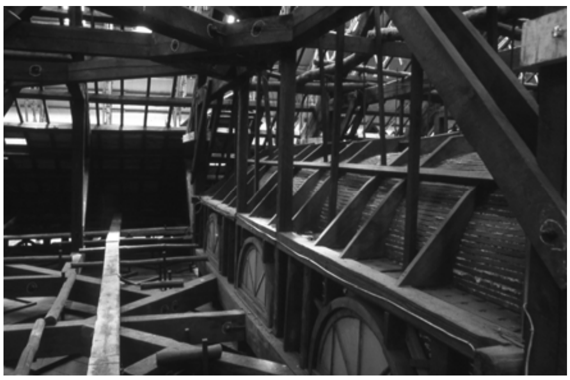


図３　小屋組

２階講堂は、広い空間を確保するために、１６メートルに渡るトラスを組んでいる。

修理着手前の様相

旧本館は南北と西に校舎があり、渡り廊下でつながっていた。旧本館の南北で旧校舎を現在のようにＲＣ校舎に建て替える際に、旧校舎と旧本館とをつないでいた渡り廊下を撤去したが、南北で記念館に取り付く部分は残した。背面でも、現中庭を造成した際に取り付部文を残している。外観の一部がやや不体裁であるが、渡り廊下撤去に伴って記念館側に損傷が生じる危惧があったからである。

記念館南側には、突出して平屋が建っていて事務長室などに充てて利用していた。

全体には大きい損傷はなく、健全な状態であった。

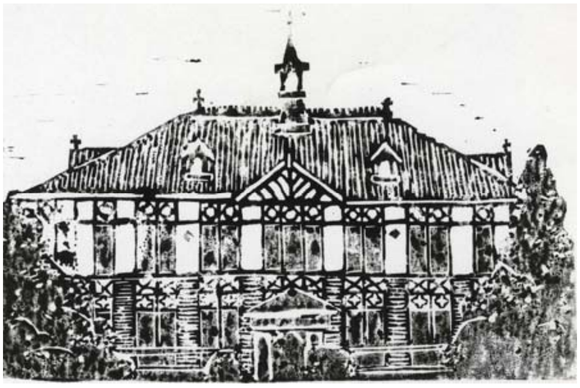


図４　記念館正面

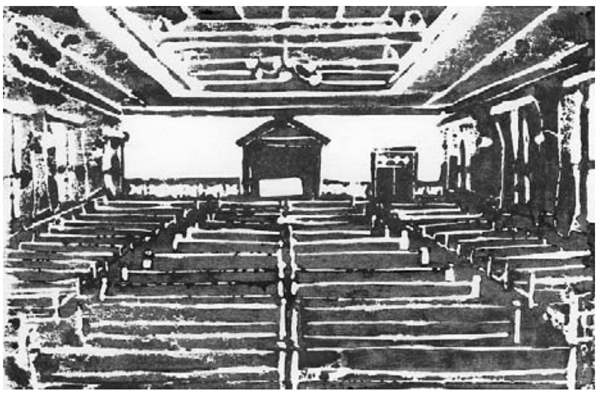


図５　記念館内部

記念館の見所

記念館の建物の見所は、外観と講堂だと、私は思っている。

広い講堂が、天井が一面的だとのっぺりした感じになると思われるが、それを避けるため中央部を折り上げて、懐を大きくし空間を広くしている。実際の平面上の広さよりも大きい空間として体感する。ただ、梁は省くことができないので化粧を施し全体に目立たぬようにしている

外観の工夫は、中軸性を強調してデザインを引き締めていることである。棟中央に実用ではない鐘楼を置いたこと、2階の軒、正面中央で切妻の破風を立ち上げていること、１階車寄せを置いたことなど、山本治兵衛の力量がなみなみなものである、と私は評価している。

２　建設時の資料、設計者山本治兵衛

建設時の各種資料が本学に残っている。設計図面・見積書・仕様書・作業員の出面書などである。図面は青焼図面で、書類は罫線紙に書いてある。設計図面には、旧本館はもちろん校舎、校門、寄宿舎、雑舎など建設した建物のほぼすべてがのこっている。これらの各種資料から、本館(現記念館)造営後、あるいは平行して、校舎・校門・倉庫などの付属建物、さらに寮などを順次造営していったことが分かる。開校後しばらく、学生は全寮制自炊であったので、寮の建設も校舎建設と平行して進んだ。寮の建設の完成は本館・校舎よりすこし遅れ、校舎の一部を寮として利用していた。

旧本館の設計者山本治兵衛は、経歴から見て大学で建築を学んでいないし、また、外国への留学経験はない、と思われる。け

れども、洋風建築を手堅く設計し、かつ奈良女子大学記念館のように、随所にデザイン力を発揮している。当時の文部省管轄の諸部署で働き官営の建築活動に関わるなかで実務的に能力を獲得していき、とくに文部省にいた山口半六と久留正道の薫陶を受けた、と私は考えている。

彼は、奈良女子高等師範学校の建物ばかりでなく、京都帝国大学内の諸建築や西日本・北陸の各地で大学・高等師範学校など、当時の文部省管轄の建物の造営を多く手がけていた。山本治兵衛が設計した建物は、京都大学に３棟ほど現存している。注2 現存している建物は校舎などであるため、全体としてデザインは温和しく、その意味で奈良ン力を発揮できた建物であったであろう。女子大学記念館は、彼にとってもデザイン力を発揮できた建物であったであろう。

図６　昭和２０年頃　(創立当初の様相を残す)

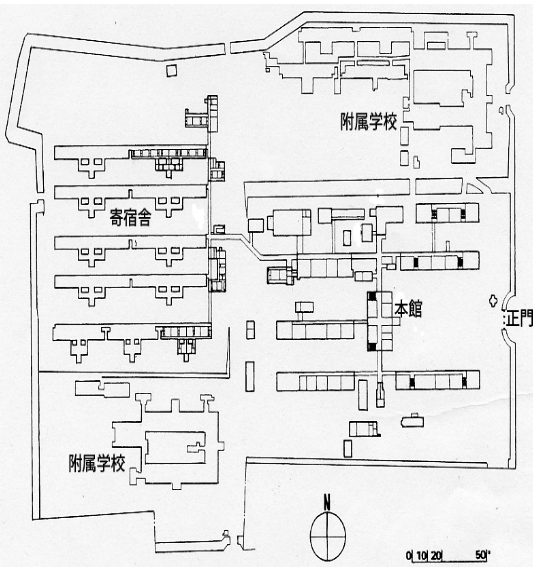


図７　大正初めころの構内(図面出典：宮本雅明『日本の大学キャンパス成立史』の掲載図に加筆)

３　修理工事

修理方針

修理は、以下のような原則を決め進めた。

「国の重要文化財になる可能性があるので、建物の価値を損なわないようにする。」

「文化財建造物であっても、利用されてこそ、価値を発揮する。修理後、多くの方々が利用できるようにする。」

「平面は変更せず、1 階各室は展示室、２階に講堂はそのまま活用する。」

修理着手当時は、旧本館は文化財としては未指定の状態であった。しかし、修理後には、重要文化財にする方針だったので、重要文化財の修理基準に準じて修理を行ったのである。

文化財建造物としての修理と建物を利用することを念頭において、構造補強、ユカ暖房の設置、ユカ暖房の設置に伴ってユカ高さの調整、アルミサッシ窓の取り付け照明の取り付け、トイレの設置などを実施した。最初の修理時には、空調冷房を設置しなかったが、修理第二段階で空調冷房を設置する。

構造補強

構造補強は、筋交のやり直し、床組に大引を加える、二階の講堂前後室に梁を新規挿入する、などを行った。筋交のやり直しとは、垂直方向に縦長の方形に入っていた筋交を、上下に二分して、それぞれに筋交いを入れた。床組の大引は、60ｃｍ(二尺)

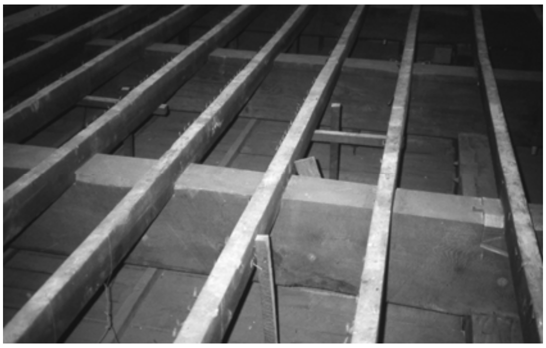


図８　２階　修理前のユカ組み

ごとに入っていたが、その中間にほぼ同断面の大引を入れた。結果、30ｃｍ(一尺)ごとに大引が入ったことになる。

ユカ暖房とユカ高さの調整

２階講堂にユカ暖房を設置した。室内の密閉性を確保するため、窓の内側にアルミサッシ窓を取り付けた。

ユカ高さの調整とは、講堂全体にユカ暖房を入れたことにより、前室との段差が大きくなったので、前室のユカ高さを上げた。すると、ユカ部分と階段部分との取り付部分で段差が大きくなるので、階段側で踏面をあげ、すると、階段の最下段と１階のユカ高さとの高低差が大きくなるので、1 階でもユカを上げた。このように、２階のユカ暖房にともなって講堂のユカが高くなることによって、順次全体のユカ高さを調整

図８　２階中央　折上げ部分(修理前)

したことになる。この結果、内部を歩いても違和感がないようになった。

照明の設置

二階の照明は、旧状は、中央にシャンデリア、両側壁に　個の電球があった。暗いので、天井に蛍光灯照明を入れ、折上げ風の中央部に架かる梁上にも、蛍光灯をいれた。照明器具に位置は、室内の雰囲気を損なわないようにしている。

南旧事務長室は当初にはなかった増築部であり、重要文化財の指定範囲からはずれていたので、この部分をトイレに改造した。

壁の塗り直し

外壁の木部色調を当初に復した。上塗りしていた塗料を削り落として当初の塗料の色を確認し、当初の色で塗装した。その結果、修理前のくすんだ緑色から彩度の高い明るいコバルト色になった。

むすび

奈良女子大学のキャンパスは、江戸時代の奈良奉行所の跡地である。また、校内での発掘調査では、奈良時代の遺構を検出している。中世ころから奈良の社寺の造営・修理に関わっていた造営集団である尾田組が本館の建設・修理を担当した。古代以来の歴史が積み重なってこんにちに至っていることが実感できることが、本大学の特徴でもある。

修理後、２階講堂では、まず大学院の入学式・学位授与式を行うようになった。公開直後は近隣の市民が多数見学に訪れた。近隣の方々に聞くと、大学内へ入ることは遠慮すべきことだったので入ったことが無い、敷居が高かった、という感想を述べている。

さらに、2003年になって、のちに１００年ピアノと呼ぶようになったグランドピアノが発見され、このピアノを修理後、講堂に置き、飾るだけでなく使用するようにした。このピアノは開校当時に購入したことが書類から分かっている。脚の部分に彫り物が施され調度品としても見応えがある。誰でも弾くことが出来、しばしば演奏会が開催されている。

いろいろな学会講演会、教官の退職記念講義をはじめ、各種展示、催し会場として利用されている。また学生の卒業論文・作品の発表、大学祭をはじめ学生サークルの発表の場として多彩に利用している。

図９　講演会の様子

図１０　展示会の様子

この記念館は、本学のキャンパスが手狭なことから、建物を撤去しキャンパスを広げようと構想した時期が一時期はあったのである。諸先生方や卒業生の配慮が無ければ、消え去った建物であったかもしれない。現在は大学のシンボルとして学内外から愛され、親しまれる建物になっている。さらに、古代が強調される奈良において、近代を知らしめる貴重な建物ともなっているのである。

参考文献

『重要文化財　１７　建造物Ⅵ』（毎日新聞社、1975）

宮本雅明『日本の大学キャンパス成立史』（九州大学出版会、1989）

『奈良女子大学百年史』（奈良女子大学、2010）

注

１　旧中込学校校舎、旧睦沢学校校舎、旧開智学校校舎は望楼とでも呼ぶ建物、旧東京医学校本館では鐘楼とでも呼ぶ建物が、いずれも棟中央に建っている。

２　旧工科大学土木工学教室本館の全体、旧文科大学陳列館の一部、旧医科大学解剖学教室の一部が現存している。

■一般講演

優良解探索 PSO による非対称自由曲面シェル構造の形態

永田洸大 [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，k-nagata@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，教授，工博，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

無柱空間を構成する自由曲面シェル構造は、建設技術の高度化により、建築形態が多様・複雑化してきている。特に、意匠性を重視した曲面構造は力学挙動が複雑であり、経験や直観による形態決定が困難である。ここに、構造最適化による構造形態創生が一つの設計法として注目されている[1)-3)]。しかし、既往研究における構造最適化は、いずれも力学指標の評価のみに重点を置くものである。一方、大域的最適解（パレート最適解）だけでなく、局所最適解（局所パレート解）や比較的評価の高い解（優良解：decent solutions）の積極的な利用は、設計プロセスの効率化・発想支援システムの構築に繋がると考えている。

優良解探索解法には、遺伝的アルゴリズム系解法 ISGA（GA with immune system）[4)]が既に提案され、自由曲面シェル構造の形態創生に適用されている[5),6)]。しかし、GA 系解法は解探索に離散値を利用し、複雑なアルゴリズムを持つ。これに対し、単純なアルゴリズムで構成される発見的多点探索手法の群知能（swarm intelligence：SI）が提案されている。SI 系解法は、実数値を直接設計変数として扱うことができる点に特徴がある。ただし、優良解探索は考えられていない。

本研究は SI 系解法の粒子群最適化（particle swarm optimization：PSO）[7)]に着目し、ISGA のスキームを応用した優良解探索アルゴリズムを提案する。提案手法は ISGA に習い ISPSO（PSO with immune system）と名付け、ISGA と同様に単一・多目的最適化に区別なく適用できる[8)]。ただし、ISPSO は基本的に探索点を修正しながら解探索を行うため、ISGA とは異なる特性を持つ[9)]。

文献 8) では、対称曲面シェルに対する ISPSO の適用例が示された。本論文は、形状の非対称性を考慮した自由曲面シェル構造の単一・多目的最適化に適用する。

2 優良解探索粒子群最適化（ISPSO）

2.1　優良解探索の基本スキーム

優良解探索の機能として適応度計算・クラスタ化・端切り法を説明する。ISPSO はこれらの ISGA の基本スキームを PSO に導入している。

1) 強度と適応度の算定：各個体 i が集団の中で支配される個体数を計算し、強度 $S(i)$とする。強度は目的関数値に応じた絶対評価であり、パレート・ランキング方式を用いる。反復回数 t 回目の集団 $\mathbf{P}_t$ の個体 i（設計変数 $\mathbf{x}_i$）に対し、集合 $\mathbf{P}_t$ と後述する記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_t$ に含まれる全ての個体 j（設計変数 $\mathbf{x}_j$）を用いた集合 $\mathbf{Q}(i)$を次式で定義する。

$$\mathbf{Q}(i) = \left\{ j \middle| \left(f_k(\mathbf{x}_j) \le f_k(\mathbf{x}_i), k = 1, 2, \cdots, l \right), i \in \mathbf{P}_t, j \in \mathbf{P}_t \cup \overline{\mathbf{P}}_t \right\} \tag{1}$$

強度 $S(i)$は次式で与えられる。

$$S(i) = \left| \mathbf{Q}(i) \right| \tag{2}$$

次に集団を後述する手順でクラスタ C_s（s=1, 2, 3…, r）に分ける。このクラスタに対し、各個体が同一クラスタ内で支配される個体の強度を次式のように計算し、適応度 $F(i)$とする。

$$F(i) = \sum_{\bigwedge_{k=1}^{l} f_k(\mathbf{x}_i) \ge f_k(\mathbf{x}_j)} S(j) - \sum_{\bigwedge_{k=1}^{l} f_k(\mathbf{x}_i) = f_k(\mathbf{x}_m)} S(m) \tag{3}$$

$$\left(i \in \mathbf{P}_t; i, j, m (i \ne m) \in_{C_s} \mathbf{P}_t (\equiv \mathbf{g}_s) \subset (\mathbf{P}_t \cup \overline{\mathbf{P}}_t) \right)$$

ここで、$\mathbf{g}_s$ はクラスタ内の全個体集合である。この強度概念を用いた適応度は、クラスタ内だけで算出した相対評価値であり、値が小さいほど高評価となる。クラスタは設計変数空間で構成する。

2) クラスタ化：次の操作を実施し、クラスタ化を行う。

① 集合の定義：クラスタ C_l の各個体β_k（k=1, 2, 3…, k_l）を要素とする集合 $\mathbf{g}_l$ とその個体数 k_l を次のように定義する。

$$\mathbf{g}_l = \left\{ \beta_1, \beta_2, \beta_3, \cdots, \beta_{k_l} \right\}, \quad k_l = \left| \mathbf{g}_l \right| \tag{4}$$

② 集合間距離の計算：設計変数空間において集合 $\mathbf{g}_m$ と集合 $\mathbf{g}_n$ との集合間距離 $d^*(\mathbf{g}_m,\mathbf{g}_n)$を次式で計算する。

$$d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_m) = \frac{1}{k_m \cdot k_n} \sum_{i \in \mathbf{g}_m, j \in \mathbf{g}_n} d(i, j) \tag{5}$$

ここで、$d(i, j)$は個体 i と個体 j 間における設計変数空間上の無次元化したユークリッド距離である。

③ 集合の統合：設計変数空間上の最短距離を持つ二つの集合（クラスタ）を同一集合に統合し、②に戻す。以上の操作を指定されたクラスタ数 r に達するまで繰り返す。

3) 端切り法：記憶細胞候補と記憶細胞の和が設定された個体数を超える場合、以下の操作により個体を削除する。

① 最短距離にある個体の選択：設計変数空間上で、無次

元化したユークリッド距離を用いて、最も隣接する2個体を探す。

② 個体の削除：選択した2個体の内、各々もう一つの隣接する個体との設計変数空間上の無次元化したユークリッド距離を比較し、近い方の個体を削除する。削除操作は指定された個体数M(記憶細胞数)になるまで繰り返す。

2.2　ISPSOのアルゴリズム

ISPSOの計算手順は図1に示す計算フローに沿って、以下に示す。ここでは、目的関数の最小化問題に対応させて説明する。

1) 初期探索位置決定：各探索点個体i(=1, 2, 3…, n)の初期位置$\mathbf{X}_i^0$と初期速度$\mathbf{V}_i^0$を設計変数空間でランダム(初期集団$\mathbf{P}_0$)に配置する。

2) 速度･位置の更新：反復回数t-1回目($t \geq 1$)の探索における i 番目の個体位置 $\mathbf{X}_i^{t-1}$ とその速度 $\mathbf{V}_i^{t-1}$ 及び *p-best* ${}_p\mathbf{X}_i^{t-1}$(探索点 i の今まで訪れた最善の解)と *g-best* ${}_g\mathbf{X}_i^{t-1}$(t回目の群れにおける最善の解)と定義すると、t回目の位置$\mathbf{X}_i^t$と速度$\mathbf{V}_i^t$は次式で与えられる。

$$\mathbf{V}_i^t = w\mathbf{V}_i^{t-1} + r_1c_1({}_p\mathbf{X}_i^{t-1} - \mathbf{X}_i^{t-1}) + r_2c_2({}_g\mathbf{X}_i^{t-1} - \mathbf{X}_i^{t-1}) \quad (6)$$

$$\mathbf{X}_i^t = \mathbf{X}_i^{t-1} + \mathbf{V}_i^t \quad (7)$$

ここで、c_1, c_2は重みパラメータ($c_1+c_2 \leq 4$)であり、通常、$c_1=c_2=2$を用いる。r_1, r_2は$[0,1]$の乱数である。wは慣性項パラメータで、反復過程で次式により変化させる。

$$w = w_{\max} - (w_{\max} - w_{\min})t / t_{\max} \quad (8)$$

ここで、$t_{\max}$は最大反復回数である。通常、$w_{\max}$, $w_{\min}$を各々0.9, 0.4と設定する。

3) 各目的関数値の計算：$\mathbf{P}_t$内にある個体の目的関数値を計算する。

4) *p-best*(自己認識)の更新：$\mathbf{P}_t$と${}_p\mathbf{X}_i^{t-1}$の集団に含まれる全ての個体に対して、強度計算を用いて次の操作を行う。

①*p-best* ${}_p\mathbf{X}_i^{t-1}$の強度$S(i)$を算出する。

②個体位置$\mathbf{X}_i^t$の強度$S'(i)$を算出する。

③$S'(i) \leq S(i)$ならば、${}_p\mathbf{X}_i^t \leftarrow \mathbf{X}_i^t$と更新する。

$S'(i) > S(i)$ならば、${}_p\mathbf{X}_i^t \leftarrow {}_p\mathbf{X}_i^{t-1}$と更新しない。

5) 適応度$F(i)$の計算：$\mathbf{X}_i^t$に対し、適応度計算を実施する。

6) 上位個体群の選択：集団 $\mathbf{P}_t$ 内の適応度上位 H(上位個体選択率)の個体を記憶細胞候補$\tilde{\mathbf{P}}_t$とする。

7) 記憶細胞への記憶：記憶細胞候補$\tilde{\mathbf{P}}_t$と記憶細胞$\overline{\mathbf{P}}_{t-1}$(暫定解集合)を統合し、新たな記憶細胞$\overline{\mathbf{P}}_t$とする。その際、強度を基準に定率 q で記憶細胞から個体を削除する(記憶細胞除去率)。qの範囲は記憶細胞の個体に対し、比率$0.0 \leq q \leq 0.3$を指定する。さらに、記憶細胞の個体が設定

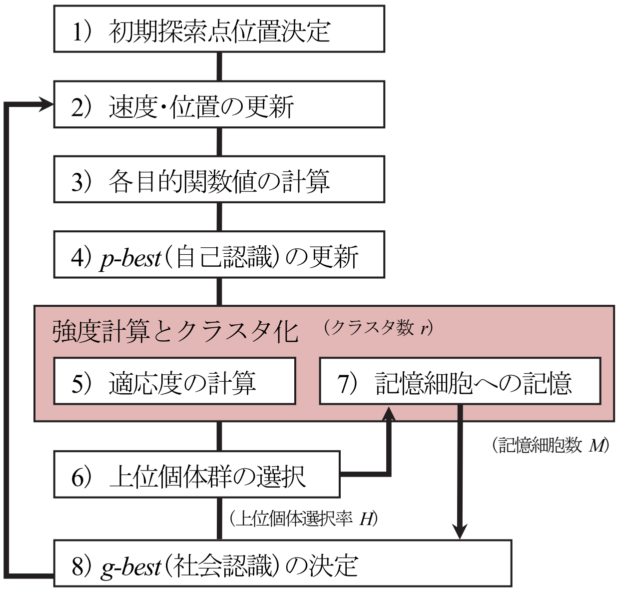
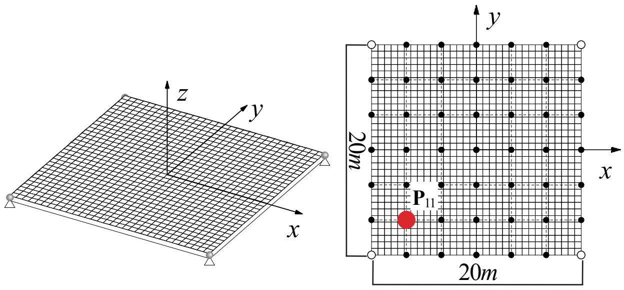


図1　ISPSOの計算フロー



a. 鳥瞰図　　　b. 制御点配置

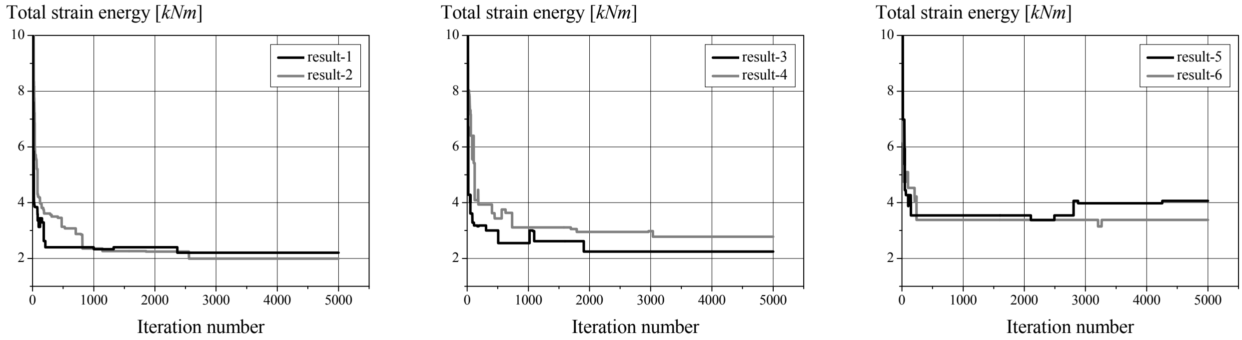
図2　自由曲面シェルモデルの基準形状

した数Mを超えている場合、端切り法により個体を削除し、記憶細胞の個体数をMに調整する。なお、$\overline{\mathbf{P}}_0 = \phi$(空集合)である。

8) *g-best*(社会認識)の決定：$\mathbf{X}_i^t$と記憶細胞$\overline{\mathbf{P}}_t$の個体に対し、それぞれ設計変数空間上の無次元化したユークリッド距離を算出する。その中で最短距離となる記憶細胞内の個体を *g-best* ${}_g\mathbf{X}_i^t$とする。ただし、集団$\mathbf{P}_t$と記憶細胞$\overline{\mathbf{P}}_t$に対する個体位置$\mathbf{X}_i^t$の強度が1のときは、最長距離となる記憶細胞内の個体を *g-best* ${}_g\mathbf{X}_i^t$とする。

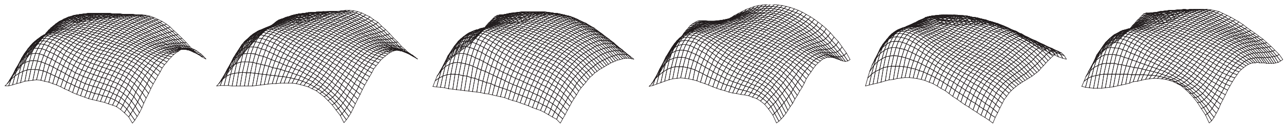
以上の2)-8)を指定反復回数まで繰り返し計算する。なお、初期の *p-best* ${}_p\mathbf{X}_i^0$と *g-best* ${}_g\mathbf{X}_i^0$は従来のPSOと同じ決め方とする。

ISPSOは従来のPSOパラメータのほかにクラスタ数r, 上位個体選択率H, 記憶細胞数Mの3つのパラメータの設定が必要である。r は局所的に優れた解の選択に関係し、Hにより記憶細胞候補数が決定され、Mは優良解集合の大きさを決定する。これらのパラメータにより多様な解探索を可能とする。



$r = 10, H = 0.01$ $r = 10, H = 0.05$ $r = 10, H = 0.1$

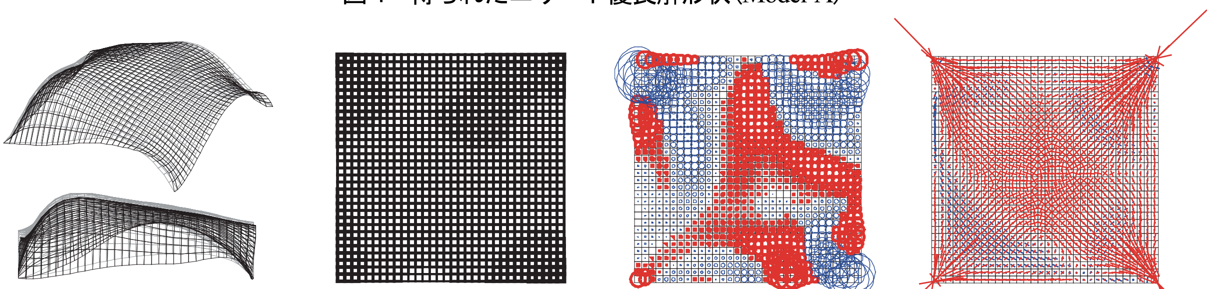
図 3　記憶細胞エリート解の目的関数値推移（Model-A）



$f_t = 2.205$ [*kNm*]	$f_t = 1.993$ [*kNm*]	$f_t = 2.248$ [*kNm*]	$f_t = 2.778$ [*kNm*]	$f_t = 4.066$ [*kNm*]	$f_t = 3.383$ [*kNm*]
$E_b = 0.288$ [*kNm*]	$E_b = 0.248$ [*kNm*]	$E_b = 0.407$ [*kNm*]	$E_b = 0.820$ [*kNm*]	$E_b = 1.398$ [*kNm*]	$E_b = 1.065$ [*kNm*]
form-A1（result-1）	form-A2（result-2）	form-A3（result-3）	form-A4（result-4）	form-A5（result-5）	form-A6（result-6）

$r = 10, H = 0.01$ $r = 10, H = 0.05$ $r = 10, H = 0.1$

図 4　得られたエリート優良解形状（Model-A）



変位図
${}_z\delta_{max} = -0.42 \times 10^{-2}$ [*m*]
$Thrust_{max} = 710.0$ [*kN*]

板厚分布
$t_{max} = 0.192$ [*m*]
$t_{min} = 0.144$ [*m*]

曲げモーメント分布
$M_{max} = 16.28$ [*kNm*]
○：下に凸，○：上に凸

主応力図
$\sigma_{max} = 0.739 \times 10^3$ [*kN/m*^{2}]
$\sigma_{min} = -8.404 \times 10^3$ [*kN/m*^{2}]

図 5　form-A2 の力学性状（Model-A）

3　非対称自由曲面シェル構造の形態創生

ISPSO を非対称自由曲面シェル構造の形態創生に適用する。解析モデルは、図 2a に示す一辺が 20*m* の正方形平面を有する自由曲面シェル（節点数：1089，要素数：1024）である。シェル要素の有限要素分割数は文献 10）に基づいて決定した。隅角部はピン支持とし、基準形状は平板とする。通常、自由曲面シェルの構造最適化では滑らかな曲面表現と計算効率の向上を図るため、パラメトリック曲面により曲面記述を行う。ここではパラメトリック曲面の一つであり、制御点とバーンスタイン基底関数により定義される有理テンソル積ベジエ曲面 [11)] を採用する。制御点は平面形状に沿い、均等に 7×7 配置とした（図 2b）。なお、形状の非対称制約はベジエ曲面の制御点高さを条件として設定する [5)]。高さ制約条件は図 2b の●でプロットした点（$\mathbf{P}_{11}$）に一定値を与える。

3.1　総ひずみエネルギ最小化（Model-A）

総ひずみエネルギ最小化を目的とした単一目的最適化の定式化は、次式で与える。

$$\textit{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \tag{9}$$

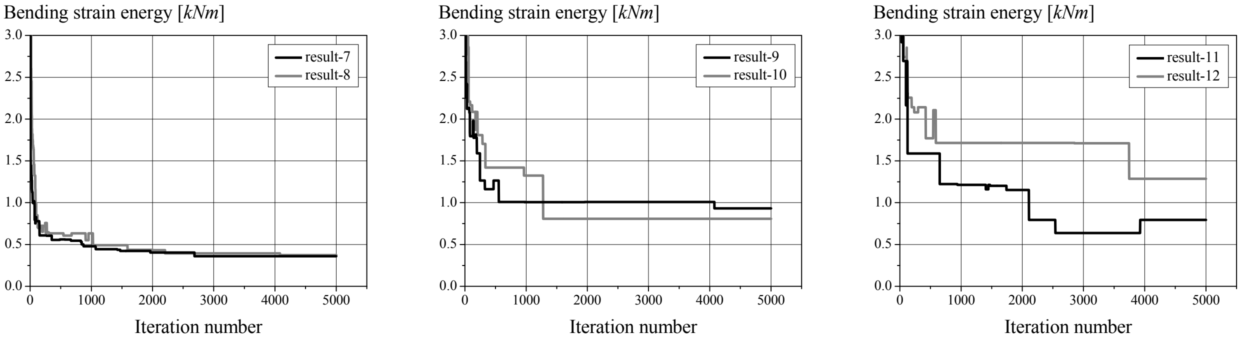
$$\textit{to minimize} \quad f_t(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d} \tag{10}$$

$$\textit{subject to} \quad \sigma^L \leq \sigma_j$$

$${}_zP_{11} = 25.0\ [m] \tag{11a, b}$$

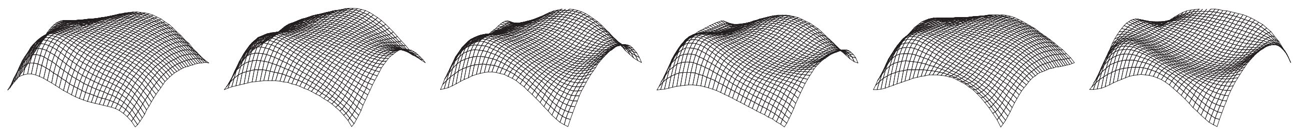
$$\mathbf{A}^L \leq \mathbf{A} \leq \mathbf{A}^U, \quad \mathbf{R}^L \leq \mathbf{R} \leq \mathbf{R}^U \tag{12a, b}$$

ここで、$\mathbf{A}$（$=[A_i]$）：断面積ベクトル，$\mathbf{R}$（$=[R_i]$）：節点座標ベクトル，$\mathbf{d}$：節点変位ベクトル，$\mathbf{K}$：全体剛性マトリクス，σ^L：許容圧縮応力度である。設計変数 $\mathbf{A}, \mathbf{R}$ は有理テンソル積ベジエ曲面の制御点 z 軸座標値である。材料は普通コンクリートを想定し、弾性定数 $E = 2.1862 \times 10^7$ *kN/m*^{2}，ポアソン比 $\nu = 0.2$ とする。応力制約として圧縮応力に対して長期許容応力度 $\sigma^L = -1.0 \times 10^4$ *kN/m*^{2} と設定する。側面



$r = 10, H = 0.01$　　$r = 10, H = 0.05$　　$r = 10, H = 0.1$

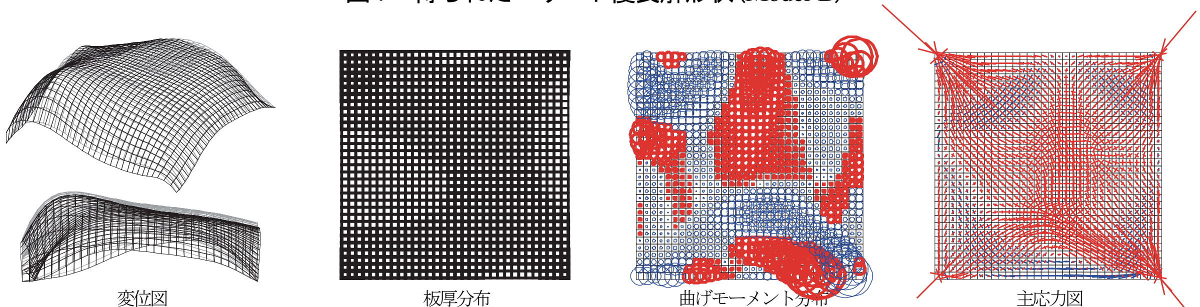
図 6　記憶細胞エリート解の目的関数値推移（Model-B）



$f_b = 0.361$ [kNm]	$f_b = 0.371$ [kNm]	$f_b = 0.931$ [kNm]	$f_b = 0.806$ [kNm]	$f_b = 0.795$ [kNm]	$f_b = 1.287$ [kNm]
$E_t = 2.307$ [kNm]	$E_t = 2.353$ [kNm]	$E_t = 4.439$ [kNm]	$E_t = 3.587$ [kNm]	$E_t = 3.161$ [kNm]	$E_t = 5.633$ [kNm]
form-B1（result-7）	form-B2（result-8）	form-B3（result-9）	form-B4（result-10）	form-B5（result-11）	form-B6（result-12）

$r = 10, H = 0.01$　　$r = 10, H = 0.05$　　$r = 10, H = 0.1$

図 7　得られたエリート優良解形状（Model-B）



変位図
${}_z\delta_{max} = -0.96\times10^{-2}$ [m]
$Thrust_{max} = 762.7$ [kN]

板厚分布
$t_{max} = 0.198$ [m]
$t_{min} = 0.142$ [m]

曲げモーメント分布
$M_{max} = 15.80$ [kNm]
○：下に凸，○：上に凸

主応力図
$\sigma_{max} = 1.500\times10^3$ [kN/m^2]
$\sigma_{min} = -9.161\times10^3$ [kN/m^2]

図 8　form-B1 の力学性状（Model-B）

制約条件は $A_i^L = 0.1\ m, A_i^U = 0.2\ m, R_i^L = 0.0\ m, R_i^U = 7.0\ m$ である。載荷荷重は自重 24.0 kN/m^3 と等分布荷重 $w = 1.0$ kN/m^2 を与える。PSO パラメータは探索点数：200, 最大反復回数：5000 と設定する。

数値結果を図 3-5 に示す。図 3 は ISPSO（クラスタ数 $r =$ 10, 上位個体選択率 H = 0.01, 0.05, 0.1, 記憶細胞数 M = 100, 記憶細胞除去率 q = 0.0）により得られた記憶細胞内エリート解の推移を示したものである。図 4 は得られた優良解形状であり、総ひずみエネルギに加えて曲げひずみエネルギ E_b の値も示す。なお、得られた記憶細胞内の個体は全て優良解であり、ここでは記憶細胞エリート解のみの形状例を示している。図 5 は form-A2 の力学性状であり、変位図は細線が解形状・実太線が変形後の形状、板厚分布の線の太さは板厚の比率、曲げモーメント分布の円の大きさは曲げモーメントの比率（太○が下に凸，細○が上に凸）、主応力の実線長さは主応力の比率を示す。数値情報は、最大鉛直変位 ${}_z\delta_{max}$, 最大スラスト値 $Thrust_{max}$, 最大・最小板厚 t_{max}, t_{min}, 最大曲げモーメント M_{max}, 最大・最小主応力 σ_{max}, σ_{min} である。

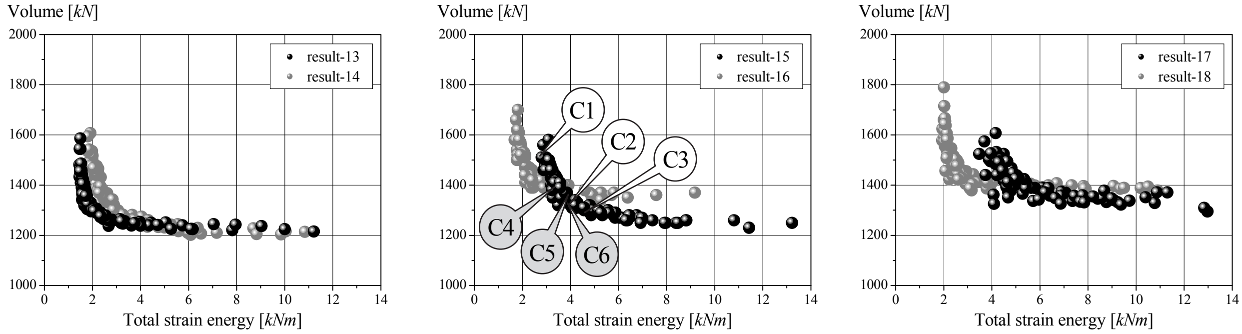
3. 2　曲げひずみエネルギ最小化（Model-B）

曲げひずみエネルギ最小化の単一目的最適化は、Model-A の式（10）と次式を入れ替えて行う。

$$f_b(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{w}^T\mathbf{K}_b\mathbf{w} \tag{13}$$

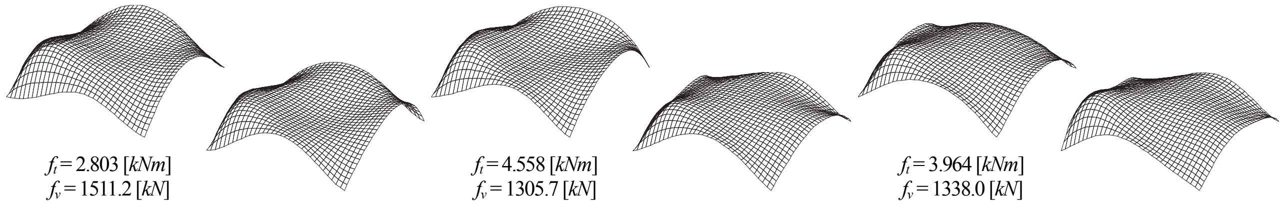
ここで、$\mathbf{w}$：面外節点変位ベクトル, $\mathbf{K}_b$：曲げ剛性マトリクスを表す。パラメータや解析条件は Model-A と同様に設定する。

数値結果を図 6-8 に Model-A と同様に示す。図 8 は form-B1 の力学性状であり、総ひずみエネルギ E_t の値も示している。



$r=10, H=0.1$　　$r=10, H=0.2$　　$r=10, H=0.3$

図 9　目的関数空間上の優良解（Model-C）



$f_t = 2.803$ [kNm]
$f_v = 1511.2$ [kN]
$E_b = 0.549$ [kNm]
form-C1（result-15）

$f_t = 3.956$ [kNm]
$f_v = 1338.9$ [kN]
$E_b = 0.952$ [kNm]
form-C2（result-15）

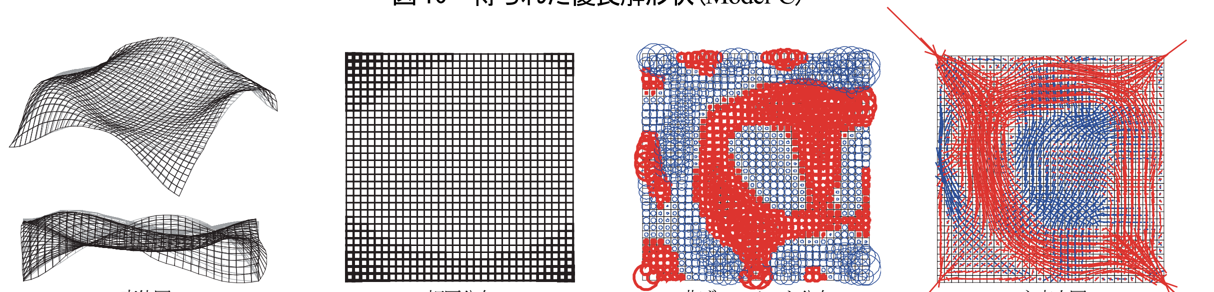
$f_t = 4.558$ [kNm]
$f_v = 1305.7$ [kN]
$E_b = 0.917$ [kNm]
form-C3（result-15）

$f_t = 3.609$ [kNm]
$f_v = 1366.1$ [kN]
$E_b = 1.118$ [kNm]
form-C4（result-16）

$f_t = 3.964$ [kNm]
$f_v = 1338.0$ [kN]
$E_b = 1.466$ [kNm]
form-C5（result-16）

$f_t = 4.043$ [kNm]
$f_v = 1324.2$ [kN]
$E_b = 1.428$ [kNm]
form-C6（result-16）

図 10　得られた優良解形状（Model-C）



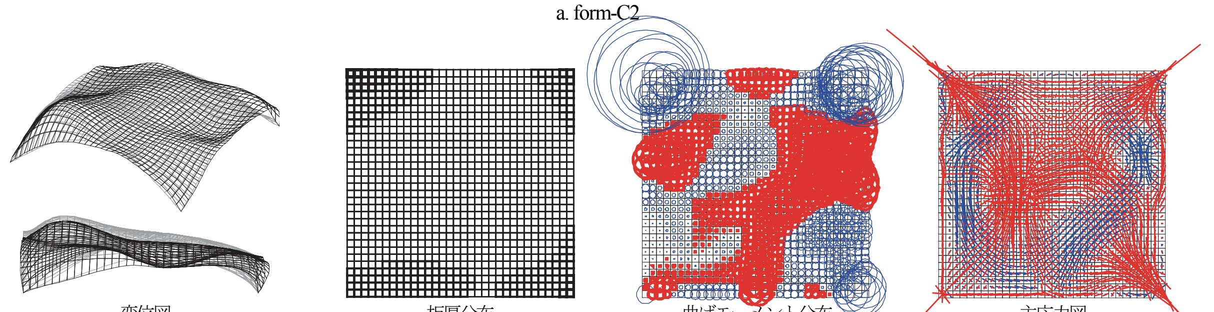
変位図
${}_z\delta_{max} = -1.58\times10^{-2}$ [m]
$Thrust_{max} = 780.1$ [kN]

板厚分布
$t_{max} = 0.183$ [m]
$t_{min} = 0.111$ [m]

曲げモーメント分布
$M_{max} = 11.20$ [kNm]
○：下に凸, ○：上に凸

主応力図
$\sigma_{max} = 2.324\times10^3$ [kN/m^2]
$\sigma_{min} = -8.518\times10^3$ [kN/m^2]

a. form-C2



変位図
${}_z\delta_{max} = -2.16\times10^{-2}$ [m]
$Thrust_{max} = 776.8$ [kN]

板厚分布
$t_{max} = 0.172$ [m]
$t_{min} = 0.112$ [m]

曲げモーメント分布
$M_{max} = 34.56$ [kNm]
○：下に凸, ○：上に凸

主応力図
$\sigma_{max} = 1.415\times10^3$ [kN/m^2]
$\sigma_{min} = -8.606\times10^3$ [kN/m^2]

b. form-C5

図 11　力学性状（Model-C）

3.3　多目的最適化（Model-C）

総ひずみエネルギと部材総体積の多目的最適化の定式化は、Model-A の目的関数を次式に入れ替えて与える。ただし、部材総体積は単位重量 24.0 kN/m^3 を乗じ、部材総重量として扱う。

$$\text{to minimize}\quad f_t(\mathbf{A},\mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d}$$
$$f_v(\mathbf{A},\mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})^T\mathbf{A} \qquad (14a, b)$$

ここで、$\mathbf{S}(\mathbf{R})$：表面積ベクトルを表す。パラメータは最大

反復回数：3000、記憶細胞除去率 $q = 0.1$ と設定し、他の解析条件は Model-A と同様とする。

数値結果を図 9-11 に示す。図 9 は ISPSO（$r = 10, H = 0.1, 0.2, 0.3, M = 100, q = 0.1$）により得られた解を目的関数空間上にプロットしている。図 10 は得られた構造形状であり、form-C2 と form-C5 に対する力学性状を図 11 に示す。

4 考察

Model-A, -B では、ISPSO により得られる解は試行毎に異なる。得られた記憶細胞内の優良解は全て高さ制約を満足する解である。特に、form-A1 と form-A3（図 4）や form-B1 と form-B2（図 7）のように、目的関数値が殆ど同値で形状の異なる解が獲得できた。このような解は従来の目的関数値に重点を置く解法では獲得できず、ISPSO が設計変数空間の多様性を維持した解探索を行った結果である。なお、優良解の探索範囲は上位個体選択率 H の値により調節が可能である。Model-A で得られる解形態は主応力の引張力が小さい、圧縮抵抗型の構造形式を示す。一方、Model-B ではモデル中央部分で下に凸となる形状が得られた。これは曲げ応力に沿い形状を最適化しているためであり、面内方向引張力の増加に繋がっている。しかし、曲げひずみエネルギのオーダは総ひずみエネルギに比べて小さく、制約条件を満たす解が多く存在していると考えている。つまり、曲げひずみエネルギを目的関数にすると多くの解が得られる可能性がある。

Model-C では、ISPSO により得られたパレートフロント上の解は殆ど同一の構造形式を示す。$H \leq 0.1$ のとき、得られる解はパレート最適解や局所パレート解を積極的に探索し、H の増加により近傍の比較的評価の高い解まで探索範囲を広げる。注目すべきは、form-C2 と form-C5 のように目的関数空間上の一点において異なる形状が得られた点である。これらの解形態の総ひずみエネルギ・力学性状は、Model-A で得られた解と同じオーダである。ただし、Model-C では解の収束性の問題から記憶細胞除去率 q を導入している。q の設定は低評価の解を削除する一方、解の多様性が失われる可能性がある。

非対称曲面シェルは、文献 8) で示された対称曲面シェルに比べ、1 回の試行で得られる優良解の多様性が低い。これは力学に対する制約が大きく影響し、複雑な解空間を構成するためである。従って、本モデルは力学制約を満たす複数の局所最適解（局所パレート解）が存在していると考える。ISPSO は局所最適解に陥りやすい PSO 系解法の解探索特性を利用し、優良解を探索する。結果として、試行毎に異なる解が獲得できる。

クラスタ化による設計変数空間の細分化と記憶細胞除去操作は、優良解探索の機能であるにも関わらず、大域的最適解探索性能の向上に繋がる。Model-A, -B において、記憶細胞除去率を設定した ISPSO の解は、PSO による最適解と一致することを確認している。また、多目的最適化の適用に計算アルゴリズムの変更・応用が必要となる PSO 系解法において、ISPSO は強度計算を用いた個体評価の導入により単一・多目的最適化に区別なく適用できる。以上より、ISPSO は非対称曲面シェルの単一・多目的最適化に対し、多様な解の獲得が可能である。

5 まとめ

本論文では、優良解探索 PSO による非対称自由曲面シェル構造の単一・多目的最適化を行った。本手法は設計変数が多く解空間が複雑な問題に対して、大域的最適解やパレート最適解だけでなく、比較的評価の高い解の獲得ができた。さらに、優良解探索機能導入は従来の PSO が持つ収束性の問題を改善することを示した。以上より、優良解探索手法として本解法が有効であることを示した。今後は、開口部・空間の容積等、非力学特性を考慮した自由曲面シェル構造の単一・多目的最適化に本手法を適用し、多様な形態獲得の可能性を示していきたい。

参考文献

1) 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, **496**, 67-73, 1997.6
2) 藤田慎之輔, 大崎純：ひずみエネルギ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
3) 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法の提案（その 1）―, 日本建築学会構造系論文集, **640**, 1091-1098, 2009.6
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：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, 日本建築学会, コロキウム構造形態の解析と創生 2010, 35-40, 2010.10
6) 和田大典, 本間俊雄：自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性, 日本建築学会, 構造工学論文集, **58B**, 453-460, 2012.3
7) J.Kennedy and R.eberhart : Particle Swarm Optimization, Proc. of IEEE International Conference on Neural Network (ICNN), IV, 1942-1948, 1995
8) 永田洸大, 本間俊雄：優良解探索機能を導入した粒子群最適化（PSO）の解特性と構造形態の創生, 日本建築学会, コロキウム構造形態の解析と創生 2011, 81-86, 2011.10
9) 本間俊雄, 和田大典, 永田洸大, 沖田裕介：優良解探索機能を導入した GA 系解法および SI 系解法の特性と構造形態創生, 日本建築学会, 日本建築学会シンポジウム「ソフトコンピューティングの最前線」講演論文集, 21-32, 2011.6
10) 永田洸大, 本間俊雄：構造最適化における自由曲面シェルの要素分割とベジエ曲面の制御点に関する考察, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 構造系, **51**, 285-288, 2012.3
11) 杉原厚吉：*グラフィックスの数理*, 共立出版, 1995

構造体としたファサードデザインの発想支援システムに関する研究
その３．ライフゲームを用いた開口の生成と力学的評価

武田侑也[1)]，堤和敏[2)]
1) 芝浦工業大学大学院建設工学専攻
2) 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)

1　はじめに

コンピュータ性能の向上により高度な解析が可能になり、建築物においても従来の柱梁のフレーム構造に限らない自由な構造デザインが求められている[1) 2)]。

建築分野をはじめ様々なものづくりの分野において形態はデザイナーの手によって考案されている。しかしながらその発想範囲は自身固有の教育・環境等の背景に依存しているためデザインを重ねていくうちに発想のマンネリ化が生じる可能性が考えられる。そのような弊害に対して進化計算を用いた発想支援システムが自動車分野やグラフィックス分野等の様々なものづくりの分野で研究されている[3) 4)]。

本報の目的は、建築物のファサードそのものを構造体とした新たなデザインを提案する発想支援システムの開発である。既報[5)]では、不規則で多様な開口を有するデザインを生成するためにライフゲームを用いていたが、現実的ではなかった。本報ではライフゲームにより生成された開口を位置や大きさは変えずに整形化する手法を提案し、さらにコンター図で応力状態を表示することで力学的性能を勘案しながら対話型進化計算系手法である IDES[6)]を用いてデザインの一対評価を行い、より魅力的なデザインを創生する発想支援システムを開発した。

2　ライフゲーム

ライフゲーム[7)]は 1970 年にイギリスの数学者ジョン・ホートン・コンウェイ（John Horton Conway）が考案した生命の誕生、進化、淘汰などのプロセスを簡易的なモデルで再現したシミュレーションゲームである[8) 9)]。セル・オートマトンのもっともよく知られた例であり、初期状態と設定されたルールに応じてその後の状態が決定される。対象領域は格子状に分割され、一つの格子はセル（細胞）と呼ばれ、各セルには８つの近傍(ムーア近傍)のセルがある 。各セルには「生」と「死」の２つの状態があり、あるセルの次のステップ（世代）の状態は、周囲の８つのセルの今の世代における状態と、設定された生死のルールにより決定される。本報では、「生」のセルを開口、「死」のセルを壁と設定し、セルの生死は表１に示すルールに従うこととする。初期状態をランダムに生成し、ライフゲームを実行した例を図１に示す。

しかし、このアルゴリズムでは、建築的な開口とするには小さすぎる開口を有するデザインとなる場合がある。そのような開口をふさぐための後処理機能をシステムに設ける。その手法を以下に示す（図２)。

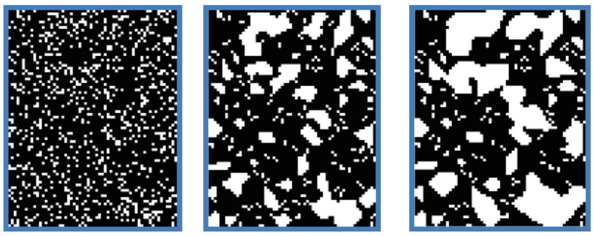
(a)それぞれの開口領域ごとにラベルを付け､領域の面積（セルの数）を数える。

(b)面積が閾値以下の領域は壁に変更する。

閾値を指定することにより図３に示すような開口を有するデザインが得られる。

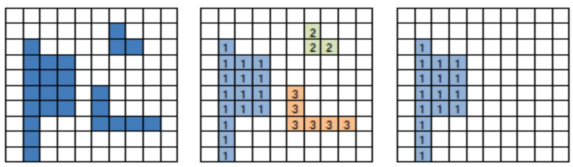
表 1. 壁開口ルール

現在の状態	状態が開口である周辺の個体数	次の状態
開口	4以上	開口
	1～3	開口
	0	壁
壁	4以上	開口
	1～3	壁
	0	壁



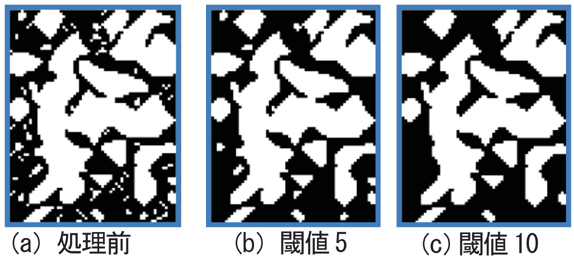
(a) 初期状態　(b) 5 世代目　(c) 10 世代目

図 1. ライフゲーム実行例



処理前　(a) ラベル付与　(b) 閾値以下削除

図 2. 開口処理手順



(a) 処理前　(b) 閾値 5　(c) 閾値 10

図 3. 開口処理実行

3　IDES

本研究室では、IDE(Interactive differential Evolution)の問題点である個体の多様性や評価方法を改善するために、現存個体数を2倍とし、さらに個体の優劣を考慮したIDESを提案している[6]（図4）。IDESでは一対比較の際に被験者の嗜好に応じた得点を付与する必要があるため表2に示す評価項目を設定し、評価者の嗜好に応じた得点を各個体に付与し、次世代の親個体の選定に反映させている。

表 2.　個体評価項目

選択項目	概要	得点：選ばれた方	得点：選ばれなかった方	得点：両方
(1)どちらかを選ぶ(とても良い)	片方はとても好みだが、もう片方は好みではない	2	0	
(2)どちらかを選ぶ(それなりに良い)	片方はそれなりに好みだが、もう片方は好みではない	1	0	
(3)両方選ぶ(とても良い)	両方ともとても好みである(2つとも同評価)			2
(4)両方選ぶ(それなりに良い)	両方ともそれなりに好みである(2つとも同評価)			1
(5)片方も良いがもう片方も良い	両方とも好みであるがもう片方の方が好みである	2	1	
(6)両方選ばない	両方とも好みではない			0

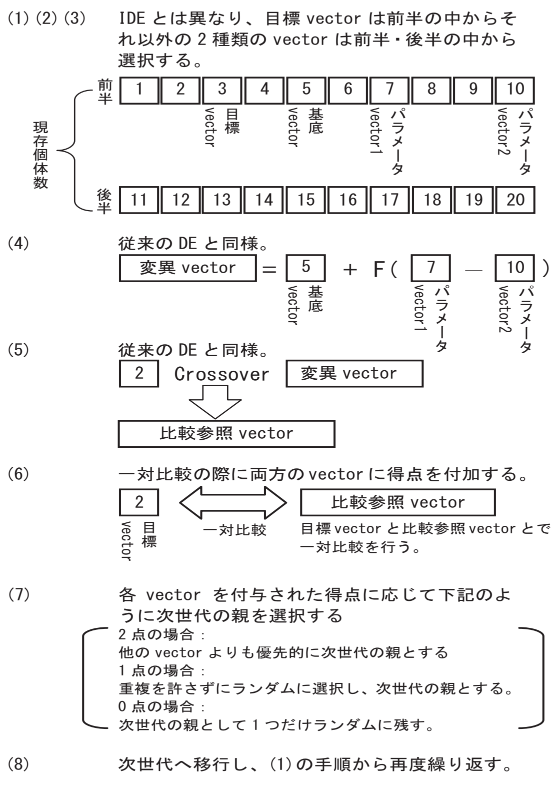


図 4.　IDES アルゴリズム図

4　開口整形化

ライフゲームを用いて生成された開口デザインは不整形であり、建築物の開口としては現実的ではない。従来の方法で生成された開口を活かしながら、整形な開口(正方形、円形、三角形）を生成する手法を示す。「生成された開口を活かす」を、以下のように定義する。

生成された開口と整形化された開口が、

1）中心位置が同じであること。

2）ほぼ等価な面積であること。

また、開口の中心位置の求め方については、部材断面の図心位置を算出する公式を使用する（図 5）。

4.1　正方形

生成された開口の形状を正方形へと整形化する手順を示す。

STEP1: 各開口の面積（セルの個数）を把握する。

STEP2: 各開口の中心座標（X_0, Y_0）を算出する。

STEP3: 各開口の辺長 L を、STEP1 で得た開口面積の平方根から算定し、STEP2 で算出した（X_0, Y_0）を中心に辺長 L の正方形を描写する（図 6）。

4.2　円形

開口の形状を円形へと整形化する手順を示す。

STEP1、STEP2: 正方形整形化と同じ。

STEP3: 開口半径 R を STEP1 で得た開口面積と円周率を用いて、R=（開口面積 /π）$^{0.5}$ から算定する。

STEP4: STEP2 で算出した（X_0, Y_0）と近傍セルの座標（X_i, Y_i）との距離 D_i を計算し、D_i ≦ 半径 R ならば、そのセルは開口となる（図 7）。

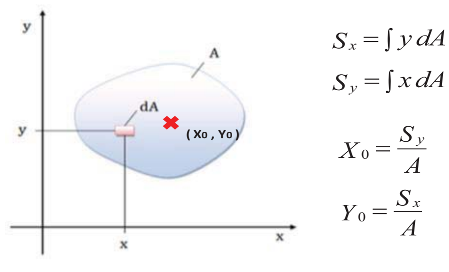


図 5.　図心位置公式

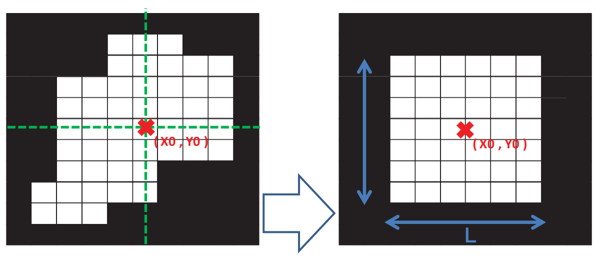


図 6.　正方形整形化手順

4.3　三角形

生成された開口の形状を三角形へと整形化する手順を示す。なお、用いる三角形はピラミッド型としている。

STEP1、STEP2: 正方形、円形整形化と同じ。

STEP3: STEP1 で得た開口面積から、三角形の段数を算定する。図 8 に示すように三角形を構成するセル総和の平方根で、段数を求めることができる。

STEP4: STEP2 で算出した (X_0, Y_0) を重心として、STEP3 で得た段数、「三角形の重心は中線を 2：1 に分ける」という性質より、三角形の頂点となるセルを算定する。

STEP5: STEP4 で算定された頂点セルと、STEP3 で得られた段数から三角形を描写する（図 9）。

ライフゲームで得られた開口を、正方形、円形、三角形に整形化した例を図 10 に示す。

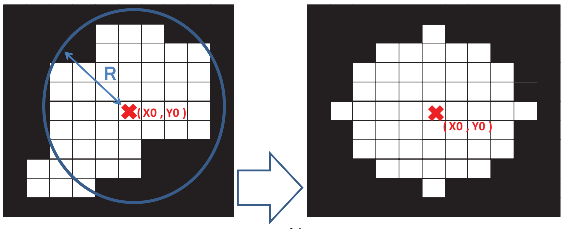


図 7.　円形整形化手順

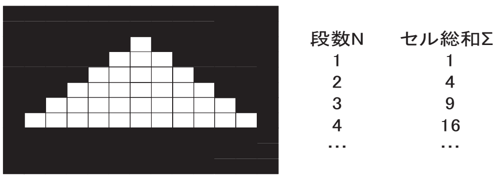


図 8.　三角形段数算定

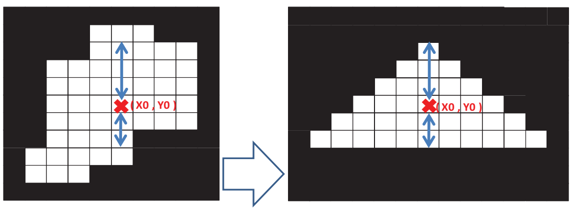


図 9.　三角形整形化手順

5　実行例

システムの実行例について示す。本システムのフローチャートを図 11 に示す。対象とする建物は図 12 に示す高さ 8 m、スパン 6 m の RC 壁構造 2 層建物である。各層床の節点位置に鉛直荷重が作用するものとする。IDES パラメータ、部材パラメータを表 2 に示す。なお、ライフゲームの世代数、いずれの形状に整形化するかに関しては、ユーザーが入力することとする。

システム実行画面を図 13 に示し、実行の過程課程で得られたファサードデザインの一部を図 14 に示す。

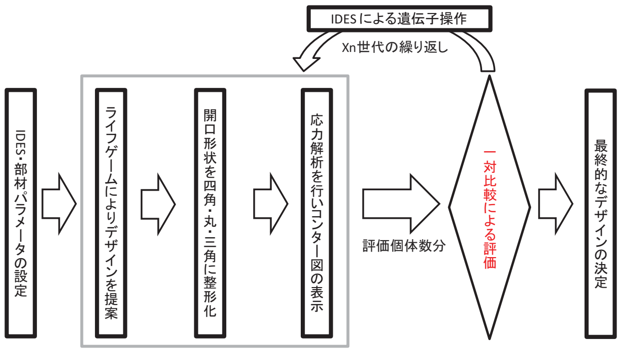


図 11.　システムフロー

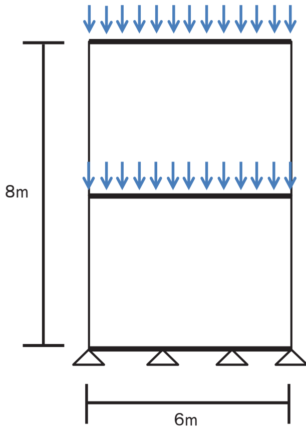


図 12.　対象建物概要

表 2.　IDES、部材パラメータ

IDESパラメータ	
個体数	20
親選択数	10
交叉率	0.05
最終世代	10
部材パラメータ	
ヤング率 (N/mm^2)	20600
ポアソン比	0.17
厚さ (cm)	10
節点荷重 (KN)	5

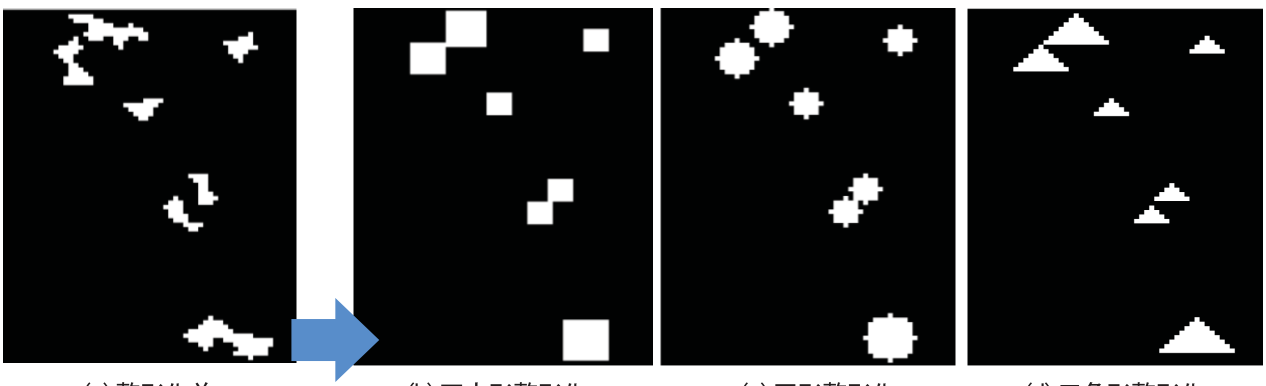

(a) 整形化前　(b) 正方形整形化　(c) 円形整形化　(d) 三角形整形化

図 10.　整形化実行例

6　結論

ライフゲームで得られた開口の中心位置、面積を変えずに整形化する手法を提案し、さらにFEM解析を行い、その応力結果をコンター図で表示することにより、力学的性能を勘案しながらデザインの一対評価を行う発想支援システムの開発を行なった。

得られた結論を以下に述べる。

1）ライフゲームのアルゴリズムと開口整形化を組み合わせることで、種々の配置、大きさ、形状の開口を有し、建築物としても現実的なファサードデザインを提案するシステムを構築することができた。

2）IDES は得られたデザインを得点付一対比較することで、発想を打破する、また好みのファサードデザインを得る手法として有効である。

3）コンター図で応力状態を同時に示すことにより、力学的性能を考慮した一対比較が可能になった。

今後の課題

発想支援システムとしての有効性の検証や、力学的評価をシステムにどう組み込むかが今後の課題である。

参考文献

1）GA JAPAN　5-6／2006　No.80, A.D.A. EDITA Tokyo Co

2）日経アーキテクチュア,魅せる開口のディテール, A.D.A. EDITA Tokyo Co, 日経BP社

3）杉本 雅則,堀 浩一,大須賀節雄, 設計問題への発想支援システムの応用と発想過程のモデル化の試み, 人工知能学会誌 vol8 no5, 575-582, 1993年9月

4）寺岡 照彦, 対話的なイメージ入力インタフェースに基づくデザイン発想支援, 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピューティング 98(128), 63-70, 1998年6月

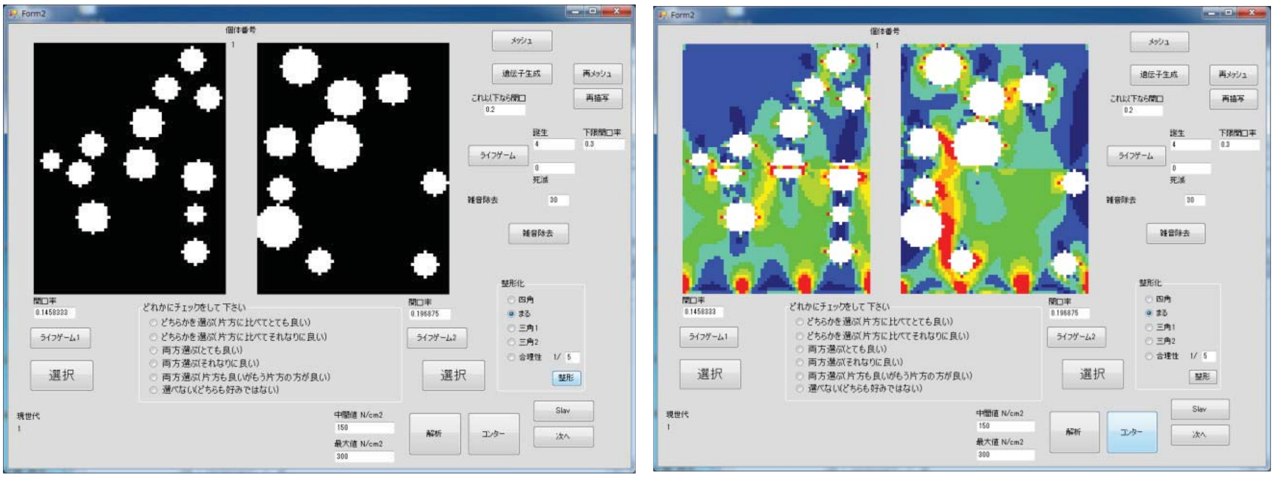
5）武田侑也,堤 和敏, 構造体としたファサードデザインの発想支援システムに関する研究　その2. ライフゲームを用いた開口デザインの生成,日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)pp91-92,2012.9

6）河野 高英,堤 和敏, オフィスビルのファサードを対象として デザイン発想支援システムの開発 IDES(Interactive Differential Evolution with Score)の提案, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.23, pp.380-389, 2011年8月

7）Garden Martin," Mathematical Games." 'The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'life'. Scientific American, Octorber 1970

8）赤間世紀, 人工生命, 工学社出版

9）服部桂, 人工生命の世界, オーム社



(a) デザイン一対比較　　(b) 応力解析結果表示

図 13.　システム実行例

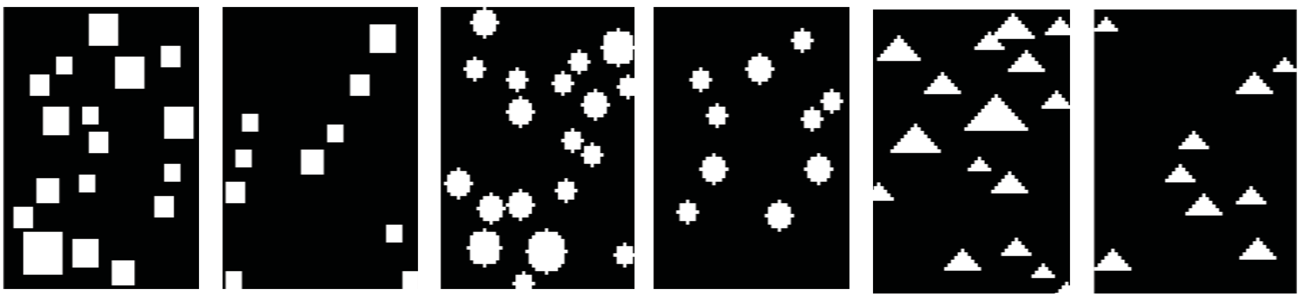


図 14.　獲得されたデザイン（一部）

膜構造の補強ケーブル及び溶着部を考慮した形状･裁断図同時解析

土持挙[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，tsuchimochi@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，工学･教授，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

膜構造は、軽量かつ透光性と張力のみを伝達する構造特性より、多くの空間構造に利用されている。このような構造を構成する膜や補強ケーブル等の張力材は、無応力の初期状態において形状不確定な自然状態で存在し、予め張力を導入させた構造剛性の確保が重要である。従って､通常の応力･変形解析を行う前に初期形状解析や裁断図解析等、膜構造特有の解析が必要となる[1)]。

膜構造の形態形成手法において、形状と裁断図を同時に獲得する､形状･裁断図同時解析が種々研究されている。文献2)では、平面上の張力材ピースを基準に、裁断図解析後､構造形態や静的･動的解析可能な座標を直接未知量とした座標仮定有限要素法が提案され、解析例を通して有効性が示されている[3)]。しかし、補強ケーブルや膜の溶着部を考慮したモデルに対する形状･裁断図同時解析は扱っていない。

本論文では、HP 曲面型サスペンション膜構造をモデルに補強ケーブルと膜の溶着部を考慮した形状･裁断図同時解析を実施する。まず、補強ケーブルによる裁断図の違いを示し、次に、溶着部を考慮したモデルを扱う。

2 構造モデルの支配方程式と離散化定式化

2.1 平衡方程式

仮想仕事の原理より、ひずみ$\boldsymbol{\gamma}$を移動後の座標ベクトル$\mathbf{X}$で表記すると構造モデルの非線形平衡方程式と接線剛性行列$\mathbf{K}_T$は次のように与えられる。

$$\mathbf{F}(\mathbf{X},\lambda,\mathbf{f})=\int_\Omega \mathbf{B}^*(\mathbf{X})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\tau}(\mathbf{X})d\Omega-\lambda\mathbf{f}=\mathbf{0} \tag{1}$$

$$\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}}=\mathbf{K}_T(\mathbf{X})=\mathbf{K}_G(\mathbf{X})+\mathbf{K}_S(\mathbf{X}) \tag{2}$$

ここで、$\boldsymbol{\tau}$：応力，$\mathbf{f}$：荷重ベクトル，$\mathbf{0}$：零ベクトル，λ：荷重パラメータ，Ω：解析領域とする。ひずみは Green ひずみを採用する。$\mathbf{K}_{\mathrm{G}}$：幾何剛性行列，$\mathbf{K}_{\mathrm{S}}$：線形＋第変位剛性行列である。ひずみ$\boldsymbol{\gamma}$と座標 $\mathbf{X}$，ひずみ増分$\delta\boldsymbol{\gamma}$と座標増分$\delta\mathbf{X}$ の関係は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\gamma}=\mathbf{B}(\mathbf{X})\mathbf{X}\ ,\quad \delta\boldsymbol{\gamma}=\mathbf{B}^*(\mathbf{X})\delta\mathbf{X} \tag{3}$$

2.2 離散化定式化

ケーブル要素：座標に関して一次仮定を与えると、代表要素 e における平衡方程式は次式を得る。

$$\frac{E_eA_e}{L_e}\left(\mathbf{G}^T\mathbf{X}_e\right)\left\{\frac{1}{2L_e}\left(\mathbf{X}_e{}^T\mathbf{G}\mathbf{X}_e\right)+C_e\right\}-\lambda\mathbf{f}_e=\mathbf{0} \tag{4}$$

ここで、A_eはケーブル要素の断面積，L_eは自然状態におけるケーブル要素長さ，E_eは要素のヤング係数，$\mathbf{X}_e$は安定形態における節点座標である。他の記号は以下の通りである。

$$\mathbf{G}=\begin{bmatrix}\mathbf{H}&\mathbf{0}&\mathbf{0}\\\mathbf{0}&\mathbf{H}&\mathbf{0}\\\mathbf{0}&\mathbf{0}&\mathbf{H}\end{bmatrix}\qquad \mathbf{H}=\begin{bmatrix}1&-1\\-1&1\end{bmatrix}\qquad C_e=-\frac{1}{2} \tag{5a-d}$$

ケーブル要素の接線剛性行列$\mathbf{K}_{eT}$は次式を得る。

$$\mathbf{K}_{eT}(\mathbf{X})=\frac{A_e}{L_e}\mathbf{G}^T\tau_e+\frac{A_eE_e}{L_e^3}\mathbf{G}^T\mathbf{X}_e\mathbf{X}_e{}^T\mathbf{G} \tag{6}$$

膜要素：4 節点アイソパラメトリック膜要素は座標に関して双一次仮定を与えると、代表要素 e の平衡方程式は次式を得る。

$$\int_\Omega\left(\mathbf{Q}^T\mathbf{X}_e\right)\mathbf{D}_e\left(\frac{1}{2}\left[\mathbf{X}_e{}^T\mathbf{Q}\mathbf{X}_e\right]-\mathbf{C}_e\right)d\Omega-\lambda\mathbf{f}_e=\mathbf{0} \tag{7}$$

ここで$\mathbf{D}_e$：構成関係行列である。$\mathbf{Q}$，$\mathbf{C}_e$の各行列成分は以下の通りである。

$$\mathbf{Q}=\left[\sum_{k=1}^{3}\mathbf{Q}_{1k}^T\mathbf{Q}_{1k}\quad \sum_{k=1}^{3}\mathbf{Q}_{2k}^T\mathbf{Q}_{2k}\quad \sum_{k=1}^{3}\left(\mathbf{Q}_{1k}^T\mathbf{Q}_{2k}+\mathbf{Q}_{2k}^T\mathbf{Q}_{1k}\right)\right]^T$$

$$\mathbf{S}_1=\frac{1}{|\mathbf{J}|}\left(\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{y}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}-\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{y}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\right)\qquad \mathbf{C}_e=\frac{1}{2}\begin{bmatrix}1&1&0\end{bmatrix}^T \tag{8a-e}$$

$$\mathbf{S}_2=\frac{1}{|\mathbf{J}|}\left(\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{x}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}-\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{x}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\right)\qquad \mathbf{Q}_{jk}=\left[\mathbf{S}_j\delta_{1k}\quad \mathbf{S}_j\delta_{2k}\quad \mathbf{S}_j\delta_{3k}\right]$$

ただし、$\mathbf{x},\mathbf{y}$：自然状態の座標パラメータ，$\mathbf{X}_e$：$\mathbf{x},\mathbf{y}$ を基準とした安定形態の節点座標，$\mathbf{N}$：形状関数，δ：Kronecker のデルタ，$\mathbf{J}$：ヤコビ行列である。膜要素の接線剛性行列$\mathbf{K}_{eT}$は次式を得る。

$$\mathbf{K}_{eT}(\mathbf{X})=\int_\Omega\mathbf{Q}^T\mathbf{X}_e d\Omega+\int_\Omega\left(\mathbf{Q}^T\mathbf{X}_e\right)\mathbf{D}_e\left(\mathbf{Q}^T\mathbf{X}_e\right)^Td\Omega \tag{9}$$

なお、数値積分ではガウスの 2 点積分を用いる。

3 裁断線決定問題の定式化

膜応力を指定した釣合曲面における裁断図決定は、次の最適化問題として定式化される。

$$\textit{Find} \qquad \mathbf{x}^*, \mathbf{L} \tag{10}$$

$$\textit{to minimize} \qquad f\left(\mathbf{x}^*, \mathbf{L}\right) = \sum_{i=1}^{m} \frac{1}{2}\left(\boldsymbol{\sigma}_i - \boldsymbol{\sigma}_{i0}\right)^T \left(\boldsymbol{\sigma}_i - \boldsymbol{\sigma}_{i0}\right) \tag{11}$$

$$\textit{subject to} \qquad t \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \le t \cdot \boldsymbol{\sigma}_e \le t \cdot \boldsymbol{\sigma}^U \quad (e = 1, 2, ..., m) \tag{12}$$

$$\mathrm{N}^L \le N_i \le \mathrm{N}^U \quad (i = 1, 2, ..., k) \tag{13}$$

ここで、$\mathbf{x}^*$：張力材の自然状態における裁断線に係わる節点座標，$\mathbf{L}$：ケーブル材の自然状態における長さ，m：膜要素数，t：膜材厚さ，$\boldsymbol{\sigma}_i$：釣合形状における要素応力，$\boldsymbol{\sigma}_{i0}$：想定形状における要素応力，$\boldsymbol{\sigma}_e$：釣合形状における膜主応力，$\boldsymbol{\sigma}^L$：膜応力下限値，$\boldsymbol{\sigma}^U$ 膜応力上限値，k：ケーブルの本数，N^L：ケーブル張力下限値，N^U：ケーブル張力上限値 である。設計変数は自然状態における膜ピース境界部節点とし、内部節点は固定とする。なお、設計変数の低減と裁断線の連続性の確保を図るため、裁断線に 3 次スプライン曲線を利用する。解探索法には SQP 法を採用する。

4 補強ケーブルを考慮した計算

解析モデルは図 1 に示す、HP 型サスペンション膜構造(Model-A ,節点数 321,要素数 288)である。同図 a)はモデルの鳥瞰図である。ここではライズスパン比 0.7(h = 8400mm)のモデルを対象とする。本モデルは形状の対称性より同図 b)に示すように、解析対象領域をモデル全体の 1/4 のハッチング部(節点数 97，要素数 72)とした。補強ケーブルの配置(k =2)は同図 c)の通りであり、膜とケーブルの接合位置は、図中の丸印で示す。解析領域の初期裁断図及び要素分割図は同図 d)とする。図中記号は節点の種類を意味し、●位置を固定節点、○位置を自由節点、□位置を 3 次スプライン曲線の利用による座標である。表 1, 2 は解析に用いる膜・ケーブル材の材料定数とする。目標応力は膜全要素 $t \cdot \sigma_e$ = 3.0 N/mm，制約条件は $t \cdot \sigma^L$=2.0 N/mm，$t \cdot \sigma^U$= 4.0 N/mm とした。補強ケーブルの軸力は表3に示す3つのケース(Case -I,-II,-III)で計算する。Case-Iは補強ケーブルを含まないモデルである。ここで、N_Xを X 軸方向ケーブル張力値，N_Yを Y 軸方向ケーブル張力である。

解析結果を図 2 – 4 に示す。図 2 は、Case-I, -II, -III の釣合形状，裁断図，主応力図である。Case-II, -III の釣合形状図上の太線部は補強ケーブルを表し、裁断図上の点線は補強ケーブルを含まない膜単一の Case-1 による裁断線である。図中記号μ, νは、各々、Case-I を基準とした自然状態における膜ピース節点座標パラメータの差の平均と分散であり、次式の通りである。

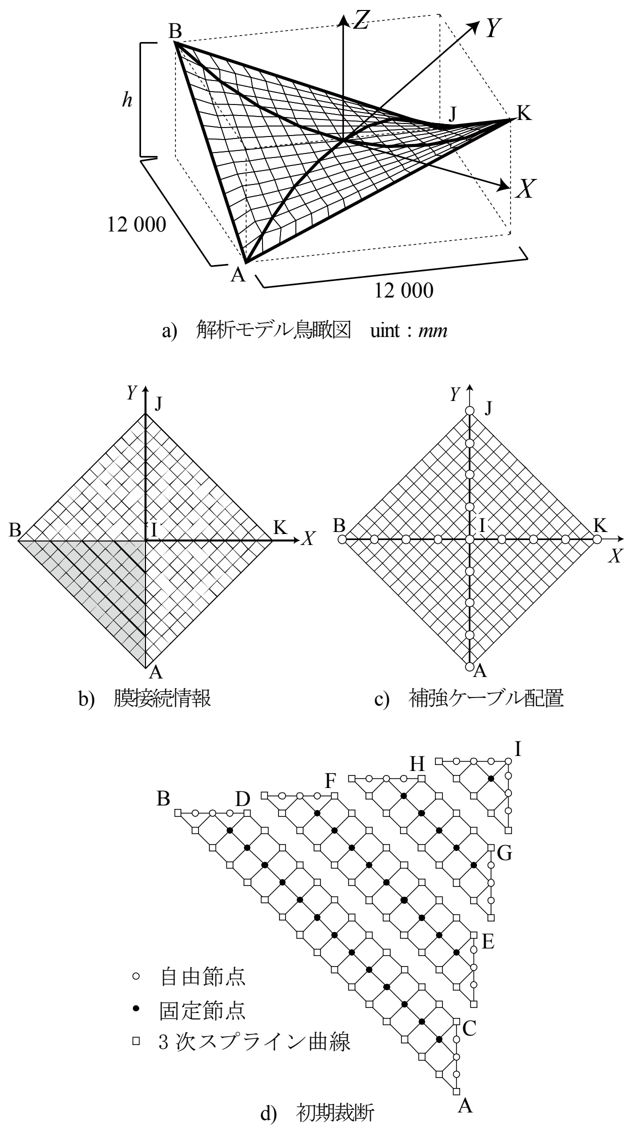


図 1 解析モデル (Model-A)

表 1 膜材料定数 (Model-A, Model-B)

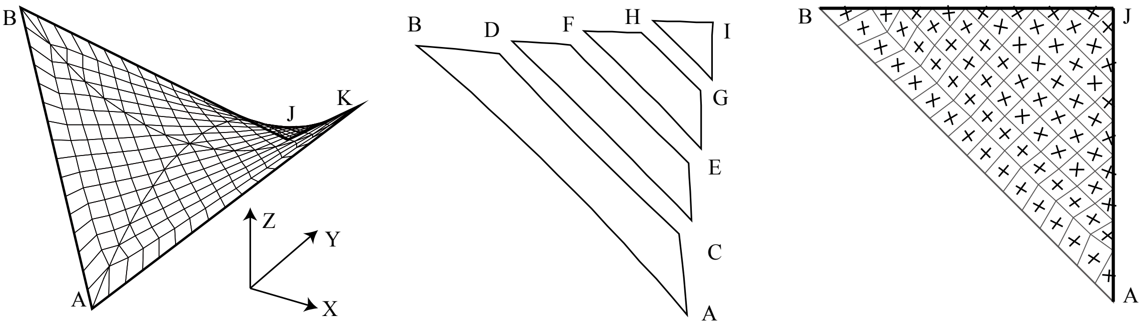
膜厚	t = 0.8 mm
引張剛性	tE_x = 243.0 , tE_y = 227.0 N/mm
ポアソン比	ν_x = 0.550 ν_y = 0.513
せん断剛性	$G_{xy}t$ = 24.19 N/mm
単位質量	ρ = 0.785×10^{-6} Kg/mm^2
膜目標応力	3.0 N/mm

表 2 ケーブル材料定数 (Model-A)

弾性係数	E = 1.373×10^5 N/mm^2
断面積	A=61.1 mm^2
単位質量	ρ = 0.785×10^{-6} Kg/mm^3

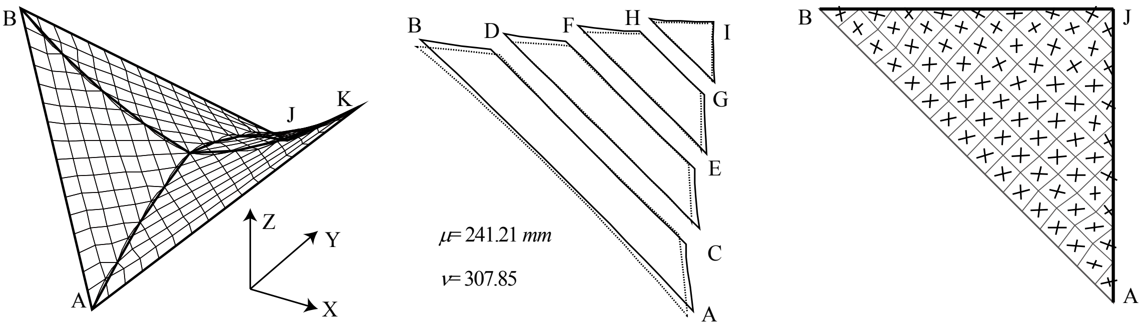
表 3 ケーブル設定張力 (Model-A)

Case-I	なし	なし
Case-II	N_X=10 kN	N_Y=15 kN
Case-III	N_X=20 kN	N_Y=35 kN



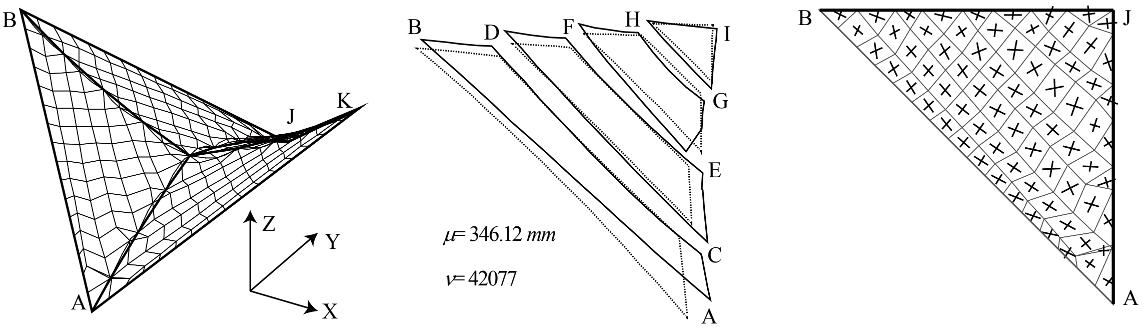
a-1　釣合形状　　a-2　裁断図　　a-3　主応力図

a)　Case-I



b-1　釣合形状　　b-2　裁断図　　b-3　主応力図

b)　Case -II



c-1　釣合形状　　c-2　裁断図　　c-3　主応力図

c)　Case -III

図 2　解析結果　(Model-A)

表 4　Case-I,-II,-III の主応力　(Model-A)

		平均 *N/mm*	最大 *N/mm*	最小 *N/mm*	標準偏差
Case –I	最大主応力	3.097	3.374	2.872	0.097
	最小主応力	2.896	3.095	2.670	0.088
Case –II	最大主応力	3.584	4.000	2.883	0.322
	最小主応力	2.748	3.387	2.000	0.429
Case –III	最大主応力	3.725	4.007	2.172	0.369
	最小主応力	2.564	3.988	1.996	0.506

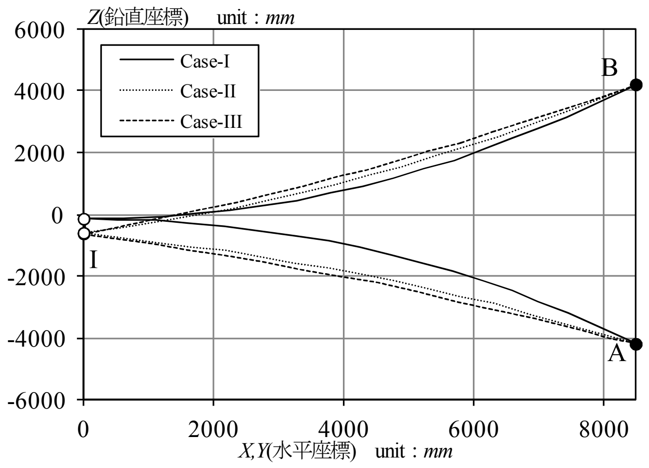


図 3　補強ケーブルの座標　(Model-A)

$$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i') \ , \quad \nu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_i')^2 \tag{14}$$

ここで、n：膜ピース境界部節点数, x_i：該当モデルの膜ピース境界節点座標, x_i'：補強ケーブルを導入しないモデルの膜ピース境界節点座標である。同図 c)は主応力図である。Case-I, -II, -III の主応力の詳細な情報は表 4 に示す。補強ケーブルの位置座標は図 3 の通りである。

5 溶着部を考慮した計算

5.1 溶着部の処理手順

通常、溶着部考慮の解析では、ケーブル材を配置することで対応している。ここでは、溶着部を適正に評価することを試みる。

溶着部を考慮した計算は、初期裁断図に予め要素分割によって溶着部要素を作成する。一般に、溶着幅の寸法の関係で、膜材の要素分割においてアスペクト比などのアンバランスが生じ、形状･裁断図同時解析を行う際、解析途中で要素の潰れが発生するなど、解析困難になる。ここでは、これらの状況に対応する手順を示す。

図 4 に示すように、最適化計算の各ステップで溶着幅の更新を以下のように逐次実行する。同図 a) (1)溶着部考慮の裁断図形状と要素分割情報の設定、(2)最適化計算の 1 ステップによる裁断図計算、(3)溶着幅を一定に保つように、要素分割情報の更新。この手続きによる裁断図を用いて、次ステップの最適化計算を進める（同図 b)。以上の操作を解が収束するまで繰り返す。

5.2 数値計算例

解析モデルは図 5 に示す HP 型サスペンション膜構造（Model-B ,節点数 269, 要素数 248）とする。同図 a)はモデルの複合構造の鳥瞰図である。同図 b) b -1 に示す膜部のライズは h = 3036mm とする。補強ケーブルの配置は同図 b) b -2 に示すように吊りケーブルと、2 種類の抑えケ

表 5　ケーブル材料定数　(Model-B)

弾性係数		E=2.9375×10^2　N/mm^2
断面積	吊り	A_1=1018.0　mm^2
	抑え	A_2=1385.0　mm^2
	ヴァレー	A_3=380.1　mm^2
単位質量		ρ=0.981×10^{-6}　Kg/mm^3

表 6　ケーブル設定張力　(Model-B)

	吊り	抑え 1	抑え 2
Case-I	なし	なし	なし
Case-II	N_1=100 kN	N_2=40 kN	N_3=60 kN
Case-III	N_1=100 kN	N_2=40 kN	なし

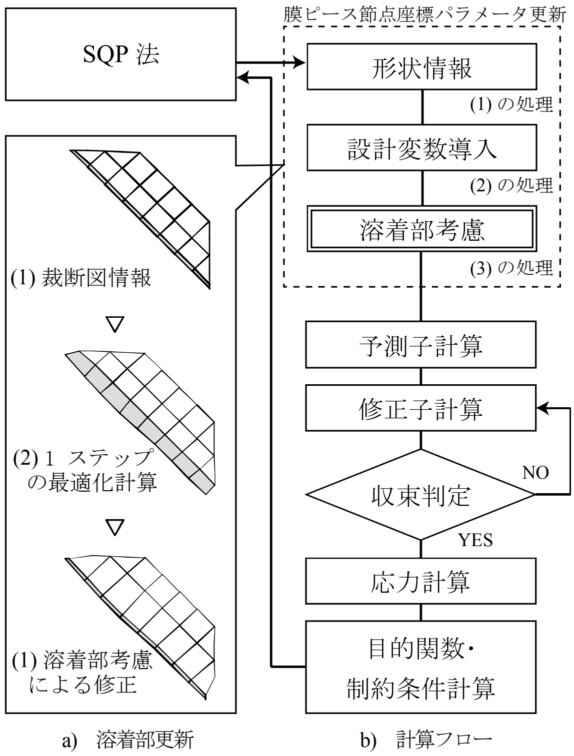


図 4　計算の流れと溶着更新イメージ

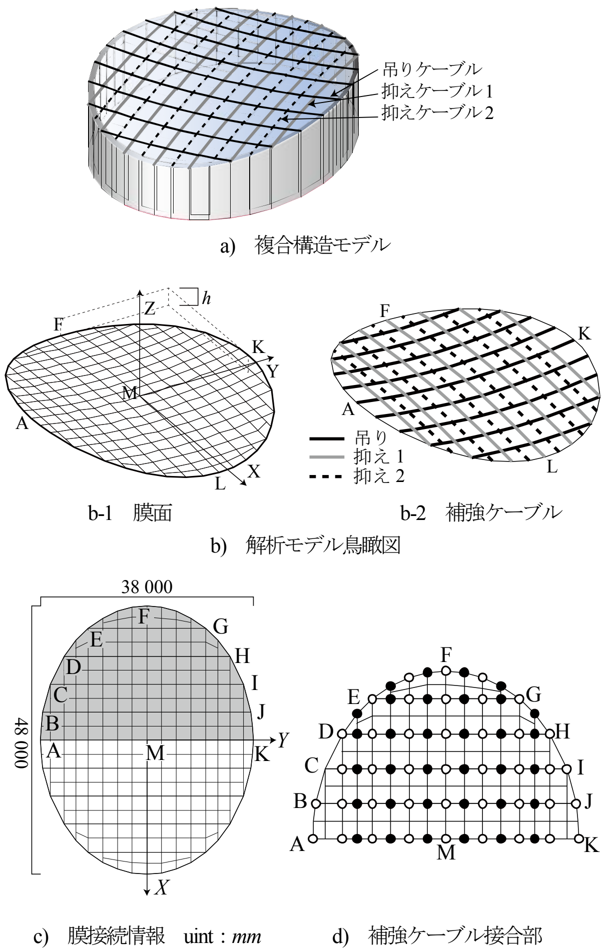


図 5　解析モデル　(Model-B)

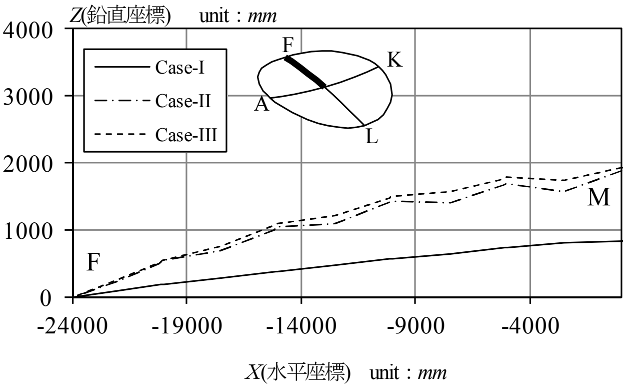


図 6　膜面の X 軸上の Z 軸座標値　(Model-B)

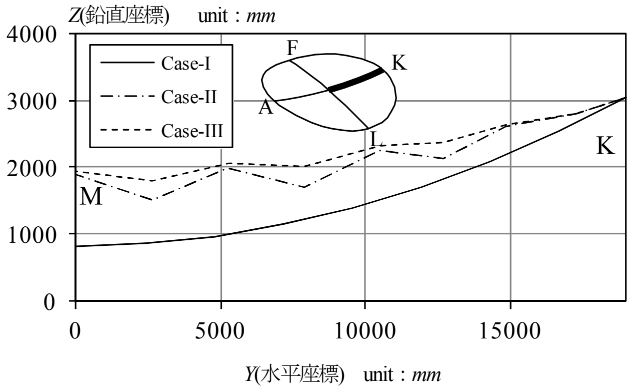


図 7　膜面の Y 軸上の Z 軸座標値　(Model-B)

ーブル(抑えケーブル 1, 2)を設定する。解析領域はモデル形状の対称性より同図 c)に示すように、全体の 1/2 ハッチング部(節点数 143, 要素数 124)とする。膜とケーブルの接合部は同図 d)に示すように、吊りケーブルと抑えケーブル 1 を図中○位置で、抑えケーブル 2 を●位置で接合する。解析領域の初期裁断図及び溶着部を考慮した要素分割図は図 8 に示す。図中記号は Model-A と同様に、●位置を固定節点，○位置を自由節点，□位置を 3 次スプライン曲線の利用による座標である。ここでは、溶着幅を 120 *mm* とした。Model-B の解析に用いるケーブルの材料定数は表 5 に示す通りである。膜材の材料定数は Model-A と同様とする。目標応力・制約条件は溶着部を考慮する要素も含め、Model -A と同じ条件を設定する。補強ケーブルの軸力は表 6 に示す 3 つのケース(Case -I, -II, -III)で計算した。Case -I, -II, -III は各々、補強ケーブルを含めないモデル，全補強ケーブルを考慮するモデル、抑えケーブル 2 を含まないモデル　であり、N_1, N_2, N_3 は、各々、吊りケーブル，抑えケーブル 1，抑えケーブル 2 の張力値である。

Model-B の解析結果を表 7 と図 6 − 9 に示す。Case -I, -II, -III の主応力の詳細情報は表 7 にまとめている。Case - 0 は補強ケーブルを含まない膜単一の溶着部を考慮しないモデルの主応力である。釣合形状，裁断図，応力図は図 9 に示している。裁断図上の点線は Case -0 の解析による裁断線である。図 6, 7 に膜面の X 軸，Y 軸上の Z 軸方向座標を示す。

6 考察

補強ケーブルの導入と溶着部の考慮による解析結果から、いずれも等張力状態に近い安定形態が得られた。

Model-A：ケーブル張力の設定により異なる裁断図を得(図 2 裁断図)、補強ケーブル配置付近の膜張力はケーブルの影響を受けた主応力分布になっている(表 4 及び図 2 主応力図)。また、ケーブル張力の増加により安定形態が直線的な形状となる(図 3)。

Model-B：低ライズの解析モデルに対し溶着部を考慮した数値計算を行った解析例であり、溶着部を考慮しない膜単一の数値結果と裁断線に関して差がみられない(図 9 裁断図)。しかし、主応力の分布には差異が確認できる(表 7)。なお、収束計算回数は溶着部を考慮しない計算と比べると約 2 倍に増加する。ただし、本計算手順により溶着部を考慮した解析は可能であることを確認した。

7 まとめ

本研究では、座標仮定有限要素を利用し、補強ケーブルと膜の溶着部を考慮した形状・裁断図同時解析を行った。補強ケーブルを考慮した計算では、裁断図と主応力図により、ケーブル張力による影響を確認した。溶着部を考慮した計算では、溶着部を考慮しない解析と比較して差がみられない。

今後、基準で指定された溶着幅の設定、あるいは、高ライズモデルによる溶着部の有無に対する解析必要性の確認、ケーブル置換との比較を含め、総合的な張力膜構造の形態・裁断図同時解析の確立を目指したい。

参考文献

1) 日本建築学会：*空間構造の数値解析ガイドライン*，丸善，2001
2) 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，**602**, 161- 169, 2006
3) 本間俊雄，福留正樹：膜構造のおける形状・応力指定の裁断図解析に関する考察及び試験体模型を用いた形態の定性的確認，日本膜構造協会，膜構造研究論文集，**24**, 9- 16, 2011, 3

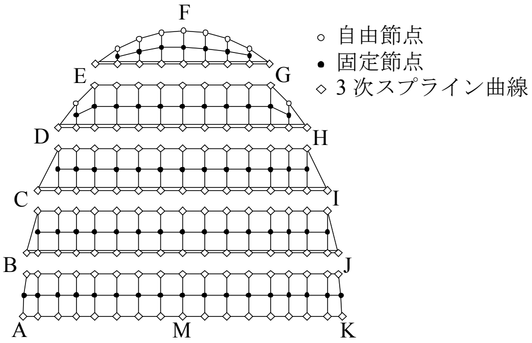
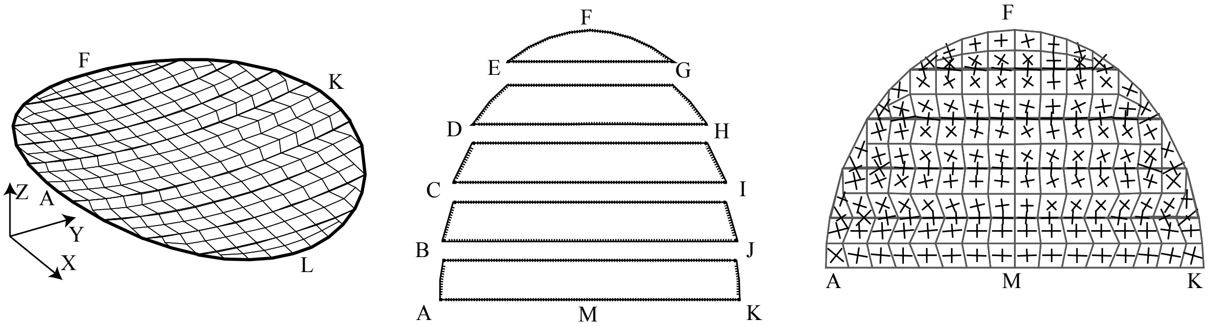


図 8　初期裁断図　(Model-B)

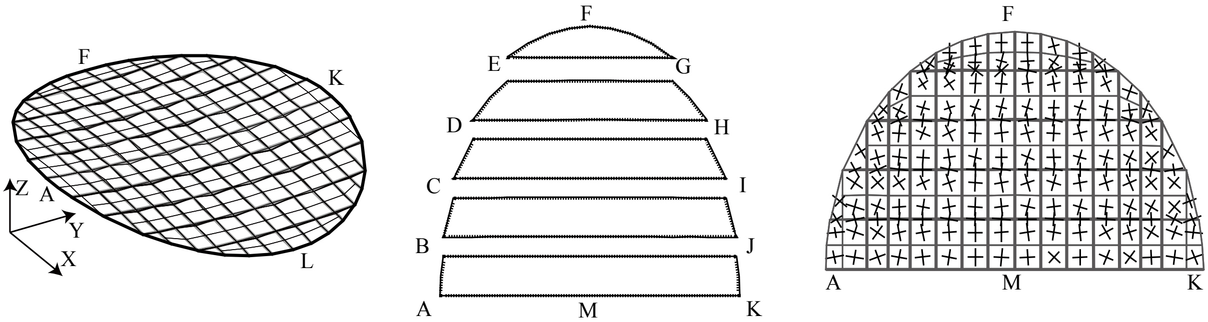
表 7　Case-0, -I, -II, -III の主応力　(Model-B)

		平均 N/mm	最大 N/mm	最小 N/mm	標準偏差
Case –0	最大主応力	3.034	3.266	2.958	0.049
	最小主応力	2.980	3.103	2.882	0.025
Case –I	最大主応力	3.086	4.000	2.205	0.584
	最小主応力	2.366	3.845	2.000	0.355
Case –II	最大主応力	3.413	4.201	1.927	0.464
	最小主応力	2.452	3.830	1.744	0.327
Case –III	最大主応力	3.216	4.021	2.343	0.323
	最小主応力	2.418	3.576	1.594	0.309



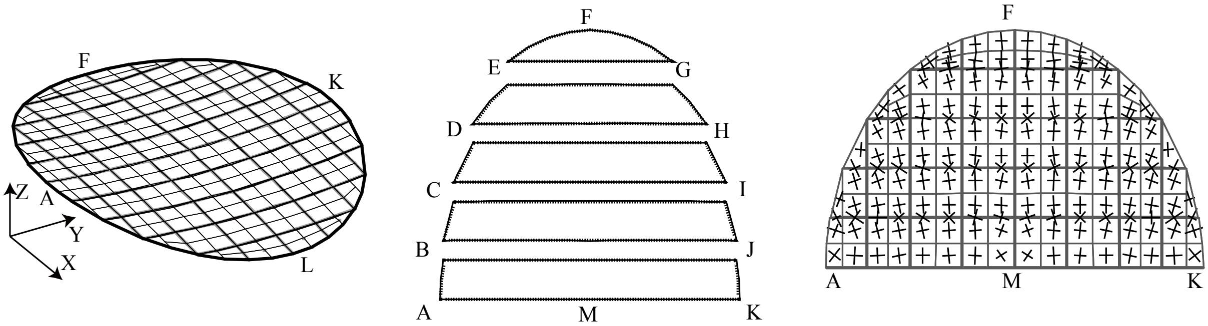
a.1　釣合形状　a.2　裁断図　a.3　主応力図

a)　Case-I



b.1　釣合形状　b.2　裁断図　b.3　主応力図

b)　Case -II



c.1　釣合形状　c.2　裁断図　c.3　主応力図

c)　Case -III

図 9　解析結果　(Model-B)

定積条件を仮定した可変構造の形態解析

横須賀洋平 1)
1)昭和女子大学環境デザイン学科，助教，yokosuka@swu.ac.jp

1 はじめに

本報では，多軸自在継手の可変構造の概要と可変構造の挙動について一般逆行列を用いた形態解析手法を基に，コンセプチュアルな解析事例を紹介する．

可変構造を剛体モデルと軸部直動モデルに大別し，剛体モデルは不安定構造の剛体変位を求める形態解析手法を適用し，軸部直動モデルには定積条件の仮定 (面積一定と全長一定の拘束) を与え，剛体モデルと同様の形態解析手法を定式化する．ひずみを用いた定式化を行い，形状関数により近似したモデルを提案する．

2 隔軸自在継手・多軸自在継手

多軸自在継手とは，隔軸自在継手を基に構成された自在継手である．いずれも可変構造を実現可能とするために筆者らにより考案されたものである．

隔軸自在継手とは，一節点に対し、複数の軸部材が接続される接合部において，任意の軸部材が隣接する軸（＝隣軸）にある部材の軸方向まわりに回転可能であり，隣軸と同角度を保ちつつ，ひとつ飛ばした軸（＝隔軸）にある部材となす角度を自由に変化できるジョイント機構である．変形過程において、節点と材軸が常に一致するため，節点に曲げモーメントが発生しない特徴を持つ．これにより，従来の継手による節点オフセットの問題が解消される[1]と考えられ，一節点に対する多軸の軸部材要素によるピン接合の接合部が可能となる．

多軸自在継手とは，隔軸自在継手の原理を応用したもので，軸数を増やし隔軸を隣軸と見立て，実際には隣軸である軸は最小化することにより，見立ての隣軸とのなす角を自在に変化することができる自在継手である．Fig.2 に示される各構成部材があり，シャフトとパイプの間に配設されたウィングがシャフトまわりにおいて，相互に回転しあうことでジョイント機構をなす．なお、ジョイント機構の既往の研究については，宇宙構造物の建設において船外作業に使用されることを想定した VGT(Variable Geometry Truss)の開発研究などで行われている[2].

Fig.1 隔軸自在継手(左)と多軸自在継手(右)

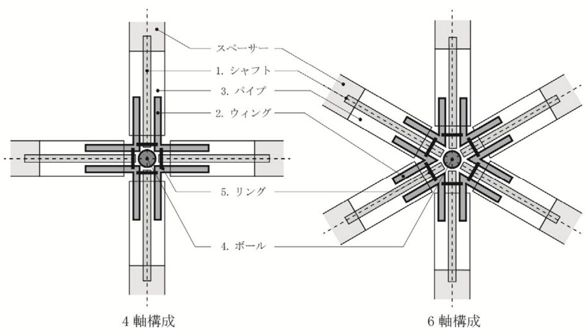


Fig.2 隔軸自在継手軸部材構成

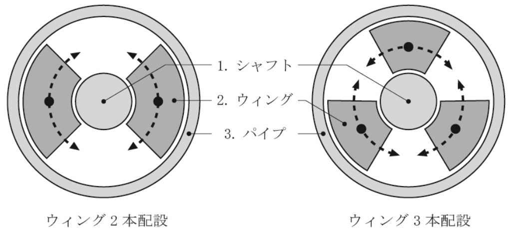


Fig.3 軸部材断面図

3 可変構造Ⅰ－ 剛体モデル

可変構造の剛体モデルについて説明する．剛体モデルと呼ぶ所以は，後述する軸部直動モデルと比較して，変形過程において，軸部の強制的な伸縮を伴わないことが理由である．

可変構造の剛体モデルは，軸部材や面材で構成された多面体の集合が接点や接辺を起点とした部材の回転変形により変形する構造体である．多面体をひとつのユニットとして基準面の 2 方向に連結することで，変形可能な板ができ，曲面を構成することが可能となる．

曲面が構成できる仕組みは，上下構面は四辺形や六角形で構成され，剛構面ではない不安定性を生み出している点にある．ここでは，変形過程を経て，目的の形状が形づくられた後にケーブルを導入し，上下構面を固定し構造物として安定状態を得ることを想定している．

剛体モデルは Fig.8 に見られるような複雑な任意曲面構造を同サイズの軸部材で構成することが可能となり，施工性や効率性の向上が期待され，柔軟で適応性・汎用性が高い構造物が構築できると考えられる．

なお，この可変構造を実現するに適した回転ジョイント機構が必要となる．これに隔軸自在継手を用いることを想定する．従来技術のジョイント機構を用いると Fig.6 に見られるような節点中心位置と軸部材と軸線のずれによる曲げやねじれが節点に生じ，大規模な構造物であれば，それらが累積し無視できないものとなる．このようなずれは節点オフセットと呼ばれる[1]．また，ユニバーサルジョイントやボールジョイントは軸部材数の増加により可動域が極端に低減する(Fig.7)．本報で提案する隔軸自在継手はそれらの問題を解消した剛体モデルに適したジョイント機構といえる．そして，このような剛体モデルは必ずしも隣接する軸同士のなす角が自由である必要はない．したがって，隔軸自在継手を用いる．

また，剛体モデルは面で構成することも可能である．三角形トラス部を三角平面とし，点ではなく辺を基点とした回転機構，つまりヒンジジョイントで置換することも可能である．すなわち，隔軸自在継手はヒンジジョイントに置換できる．

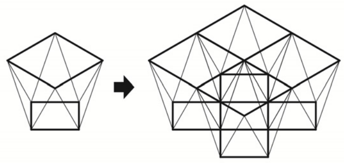


Fig.4 多面体の連結

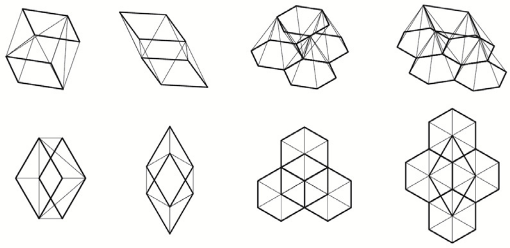


Fig.5 多面体パターンバリエーション

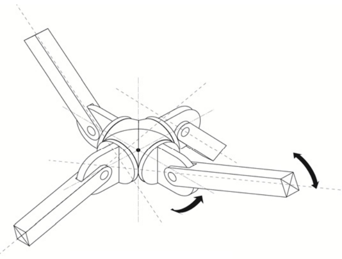


Fig.6 ピン接合で構成された多軸継手

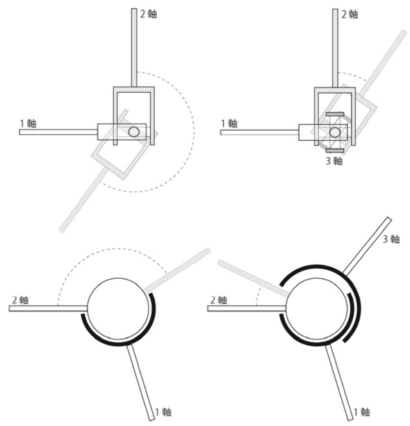


Fig.7 ユニバーサルジョイント(上)とボールジョイント(下)

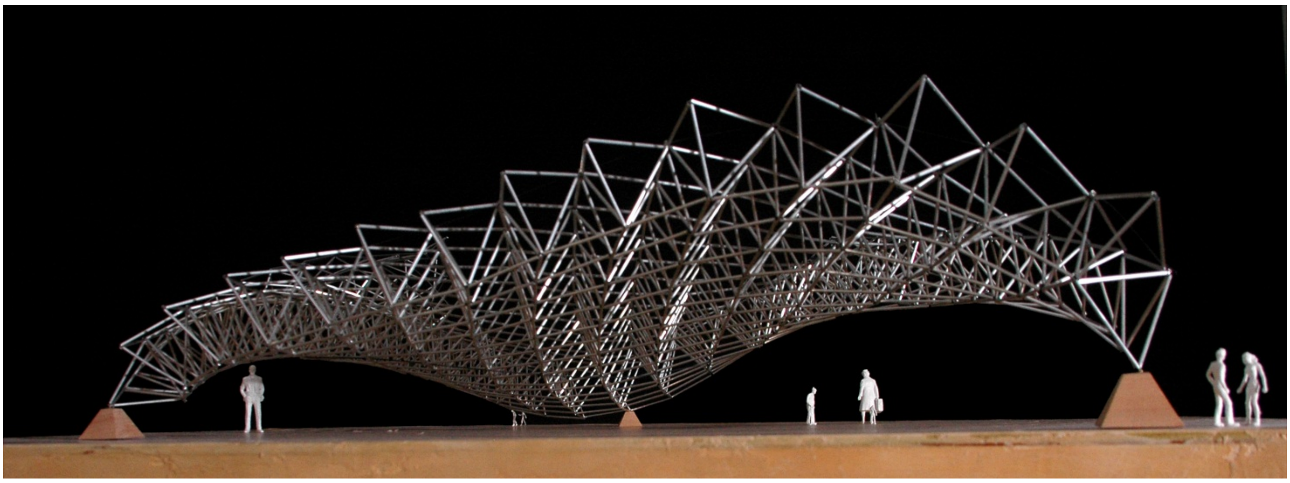


Fig.8 剛体モデルの模型

4 可変構造Ⅱ－ 軸部直動モデル

剛体モデルの変形は，不安定で，かつ節点が回転自由であることに起因している．必ずしも隣接する軸同士のなす角が自由である必要がないため，隔軸自在継手を用いた構成で挙動を実現できる．

一方，直動するアクチュエータの導入により，軸部材の伸縮が伴う場合，任意の軸部材の隣軸となす角が自由となる必要がある．このような構造体は，VGT やパラレルリンク機構などに見られ，より複雑な挙動を生み出しうるが，アクチュエータの確かな制御シミュレーションが必要となる．従来技術では節点オフセットを考慮した解析が必要となり，複雑な計算を要する[1]．しかし，節点オフセットを解消することができれば，理想的なトラスとして解析を実行できる．すなわち，多軸自在継手を導入すれば，このような可変構造の軸部直動モデルの運動解析に有効であると考えられる．

本報では，アメリカ航空宇宙局 NASA のゴダード宇宙飛行センターにある研究チーム ANTS (Autonomus Nano Technology Swarm) で主に開発されている Tetrahedral Walker (Fig.9,10) に焦点をあてる．これらのロボット技術は ART (Addressable Reconfigurable Technology—アドレサブル再構成技術)として知られている [3]．

ART は，多自由度系にセンサーやアクチュエータなどの可変制御機構を導入し，状況に応じてアクティブに構造体形状を変化させ，様々なタスクの要求に応える技術を指す．一事例である Tetrahedral Walker は，無人探査ロボットとして宇宙，軍事分野での応用が期待されている．

Fig.9 Tetrahedral Walker [War Fighter] — http://ants.gsfc.nasa.gov/より抜粋

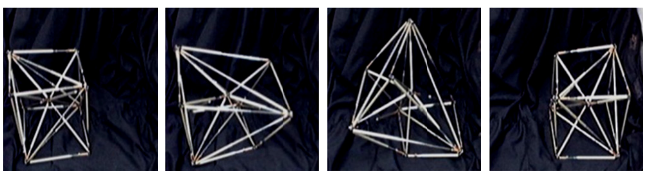


Fig.10 変形過程—*Mining Amorphous Transporter Exploration(MATE) for Far North Mining Operations*（http://ants.gsfc.nasa.gov/publications.html）より抜粋

Tetrahedral Walker は構造体形状が変化することで，重心位置を進行方向へ移動させ，ころがりながら駆動する仕組みを持つ．この Tetrahedral Walker は軸部材の伸縮が伴うため，軸部直動モデルといえる．

これらの技術はまだ実用には至らず研究段階と思われるが，紹介されているコンセプチュアルモデルを見るとピン接合で構成されていることがわかる．理想的なトラスを再現するには多軸自在継手の応用が考えられる．

5 形態解析

上記の可変構造の 2 モデルに適当と思われる解析手法を提案する．いずれも隔軸または多軸自在継手により，理想的なトラスが構成できることを前提とする．

剛体モデルには，不安定構造の剛体変位により形態解析を行う．一方，軸部直動モデルは，離散化された二次元要素境界をトラスと見立て，定積の条件 (面積一定や全長一定の仮定) を用いて，準静的な運動解析を示す．

5.1 剛体モデル

不安定構造の剛体変位には，様々な手法が提案されている．ここでは，一般逆行列を用いた解析手法に準ずる[4, 5]．本報では，変位—ひずみ関係式を用いて定式化を行うため，有限要素法に用いられる形状関数を補間関数として変位を離散近似する．

支配方程式の離散化方程式として，変位—ひずみ関係式と釣合方程式を与える．

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{d} = \boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{f} \tag{2}$$

$\boldsymbol{B}$：変位—ひずみ行列，$\boldsymbol{d}$：変位ベクトル，$\boldsymbol{\varepsilon}$：ひずみベクトル

$\boldsymbol{A}$：釣合行列，$\boldsymbol{\sigma}$：応力ベクトル，$\boldsymbol{f}$：外力ベクトル

以下のように一次要素(トラス要素)の形状関数$\boldsymbol{N_e}$を用いて，変位関数 $u(\theta)$を近似する．

$$u(\theta) \approx \boldsymbol{N_e}\boldsymbol{d_e} \tag{3}$$

$$\varepsilon = \frac{d}{d\theta}(\boldsymbol{N_e}\boldsymbol{d_e}) = \frac{d\boldsymbol{N_e}}{d\theta}\boldsymbol{d_e} = \boldsymbol{B_e}\boldsymbol{d_e} \tag{4}$$

$\boldsymbol{d_e}$は要素座標で表されている．変位を全体座標で表すために，以下のような操作を行う．

$$\varepsilon = \boldsymbol{B_e}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{d_e^g} = \boldsymbol{B_e^g}\boldsymbol{d_e^g} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{c} & \boldsymbol{0}_{1\times3} \\ \boldsymbol{0}_{1\times3} & \boldsymbol{c} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{c} = [\ \cos\alpha \quad \cos\beta \quad \cos\gamma\ ] \tag{7}$$

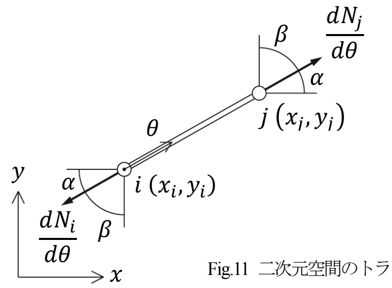


Fig.11 二次元空間のトラス

d_e^gは全体座標の変位ベクトルで，Qは座標変換ではなく，形状関数の微分値を方向余弦により全体座標へ分解していることになる．Fig.11 は二次元空間を表している．この分解手法は，二次元の要素を三次元空間に配する場合は応用できない点に注意を要する．

構造体全体の変位ベクトルdに一致するように，すなわち変位の適合条件を満足するように，要素毎に方程式を作成し，全要素を連立して全体行列を作成することで，式(1) が得られる．Bマトリクスは要素数m，自由度数nにより$m \times n\ (m < n)$の長方形行列で表される．また，$B^T = A$の関係がある．

変位ベクトルの求解については，要素が剛体であることから無ひずみとなり，

$$Bd = 0 \tag{8}$$

を仮定し，dが零空間ベクトルに解があることを利用し，ムーア・ペンローズ一般逆行列を用いて剛体変位モードを算出する．ここで，

$$d = [I_n - B^+B]\alpha = H\alpha \tag{9}$$

I_n：$n \times n$単位行列，B^+：一般逆行列，H：剛体変位モード行列

αは任意の列ベクトルであり，αの決定に安定化移行解析を用いる．ポテンシャルエネルギー曲面の勾配ベクトルを用いてαを算定し，dを求める．停留するまで形状更新を繰り返す．詳細は，参考文献[4,5]に詳しい．

5.2　軸部直動モデル

軸部直動モデルは，多自由度で冗長な系であるため，なんらかの拘束を与える必要がある．本報では，Tetrahedral Walker を水風船が坂を転がるような物理現象に似ていることから，以下のような解析モデルの近似化を行う．領域内部では体積が一定で，領域境界部では表面積が一定とする拘束を与える．これにより，形状が破たんすることなく釣合状態を追跡できると考える．簡略化のため，解析空間を二次元平面と想定し，領域内部の面積が一定，領域境界部の全長が一定とする．

上記の近似化を基に Fig.12 に実モデルを想定した概要図を示す．

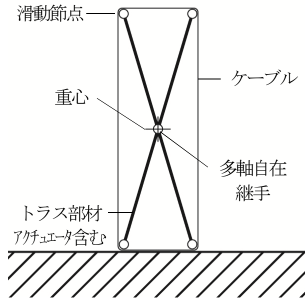


Fig.12 軸部直動モデル

4 本のトラス部材と外周に 1 本のケーブルが配される．トラス部材には直動アクチュエータが含まれる．トラスとケーブルが接する点は滑動節点とする．多軸自在継手により，回転機構を持つ．

ここで，領域内部とは，トラスとケーブルで形作られる 4 つの三角領域にあたり，それぞれの三角形の面積を一定とした拘束を与える．したがって，解析上は，領域内部は三角形定ひずみ要素を用い，要素境界をトラスと見立てている．領域境界部はケーブルに相当し，全長一定の拘束を与える．

軸部直動モデルはアクチュエータによる強制変位で運動を行うことになるが，解析上では各節点に外力を与えることで三角形要素が変形し，運動がはじまる．本報では，進行方向の斜め下向きに外力を与える．また，足元と地面の境界条件は，前脚はピン支持，後脚はローラー支持とし，重心位置が前脚より前方に移動した際，後脚のローラー支持を解放し，ころがりが開始される．次に地面に接する点 (遊脚) が地面に接すると，前脚，後脚の関係が切り替わり，境界条件も同様に切り替わる．

初期形状が縦長の長方形状をしている理由は，正方形のような安定形状を与えた場合，内部領域に変形する余地がないため，釣合が保たれる．また，境界条件を変化させるフェーズに移行する前に，すなわち重心が前脚より前方に移動する前に, 釣合状態になると運動は止まる．初期形状で不安定性を備えておく必要がある．

次に, 面積一定, 全長一定の拘束を与える方法を示す．

5.3　面積一定の拘束

前節で，剛体変位において一次元要素を用い，各要素の無ひずみを仮定した．面積が一定の仮定は，二次元要素(本報では定ひずみ要素)を用いる．その場合，ひずみの独立な成分は一要素につき 3 つ現れる．直ひずみとせん断ひずみに分かれ，直ひずみの成分をそれぞれ足し合わせた値を 0 と仮定し，面積一定の拘束を与える．これは変位場の発散，つまり体積ひずみが 0 であることと一致し，非圧縮の条件と同様である．ひずみテンソルの縮約が 0 ともいえる．

これを成分で表現すると以下のようになる.

$$\varepsilon_{ii} = \frac{\partial u_i}{\partial X_i} = 0 \tag{10}$$

形状関数を用いて行列で表現すると,以下のようになる.

$$\frac{\partial u_i}{\partial X_i} \approx \begin{bmatrix} \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_1^e & 0 & N_2^e & 0 & N_3^e & 0 \\ 0 & N_1^e & 0 & N_2^e & 0 & N_3^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1x}^e \\ u_{1y}^e \\ u_{2x}^e \\ u_{2y}^e \\ u_{3x}^e \\ u_{3y}^e \end{bmatrix} = \boldsymbol{B_v d_e^g} \tag{11}$$

二次元平面で解析を行う場合,要素座標と全体座標は一致するため,剛体変位で行ったような分解の操作は行わない.全体行列を作成し,変位ベクトルを求める手順は,剛体変位と同様で,安定化移行解析を行う.

この拘束のみでは,領域内部の面積が一定のまま,どこまでも変形してしまうため,領域境界部に節点の滑動を許容した全長が一定の仮定を与える.

5.4 全長一定の拘束

全長一定で節点の滑動を与える解析手法は,以下のように考える.一本の要素を小領域に分割して,分割点に自由度を与える.一本の要素の変形量は,次式となる.

$$\Delta L = \sum_{i=1}^{k} \Delta L_i^* \tag{12}$$

ΔL:一本の要素の伸び,ΔL_i^*:各小領域の要素の伸び,k:小領域数

形状関数を用いて,小領域の変形量を近似する.

$$\Delta L^* \approx \frac{du^*}{d\theta^*} d\theta^* \approx \frac{d\boldsymbol{N}^*}{d\theta^*} d\theta^* \boldsymbol{d}^* = \boldsymbol{B}^* \boldsymbol{d}^* \tag{13}$$

要素座標を全体座標へ分解する.ここでは,$\boldsymbol{Q}$は二次元空間で評価された行列を用いる.

$$\boldsymbol{B}^* \boldsymbol{d}^* = \boldsymbol{B}^* \boldsymbol{Q} \boldsymbol{d}^{*\boldsymbol{g}} = \boldsymbol{B}^{*\boldsymbol{g}} \boldsymbol{d}^{*\boldsymbol{g}} \tag{14}$$

全体行列を作成し,以下のように一本の方程式がたつ.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{B}_{1i}^{*g} & \boldsymbol{B}_{1j}^{*g} + \boldsymbol{B}_{2i}^{*g} \cdots \boldsymbol{B}_{k-1j}^{*g} + \boldsymbol{B}_{ki}^{*g} & \boldsymbol{B}_{kj}^{*g} \end{bmatrix} \boldsymbol{d}_{\boldsymbol{e}}^{*\boldsymbol{g}} = 0 \tag{15}$$

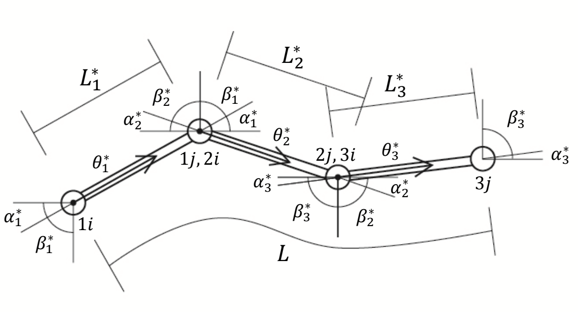


Fig.13 一本の要素

上式は,一本の要素の変形量が0となる条件を与えている.全体の長さが一定となる条件を与えているだけで,小領域の分割点は自由に動いてよいことになる.したがって,小領域の長さが0にならないように注意を要する.ひずみを用いる場合は,変形量を全体の長さ$\boldsymbol{L}$で割ればよい.

6 数値解析例

前節の定式化を基に,剛体モデル,軸部直動モデルの数値解析事例を紹介する.

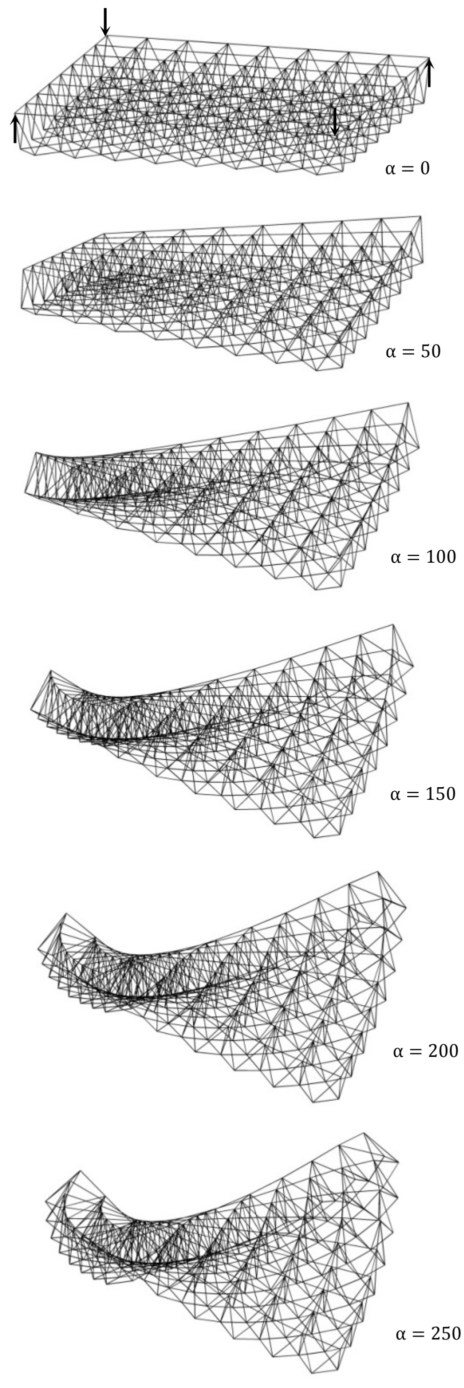


Fig.14 剛体モデルの形態解析

Fig.14 は剛体モデルの数値解析例である．構造体の四隅に上下の節点外力を与えている．これにより HP 曲面の曲面形状を構成することがわかる．αは増分パラメータである．なお，この規模のモデルでは，$\boldsymbol{B}$マトリクスの条件数が悪くなり，一般逆行列演算がうまくいかない．近似計算手法である下式を用いて，求めている．

$$\boldsymbol{B}^{+}=\lim_{\delta\to 0}(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}+\delta\boldsymbol{I})^{-1}\,\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}} \tag{16}$$

δ：任意の正の微小な定数

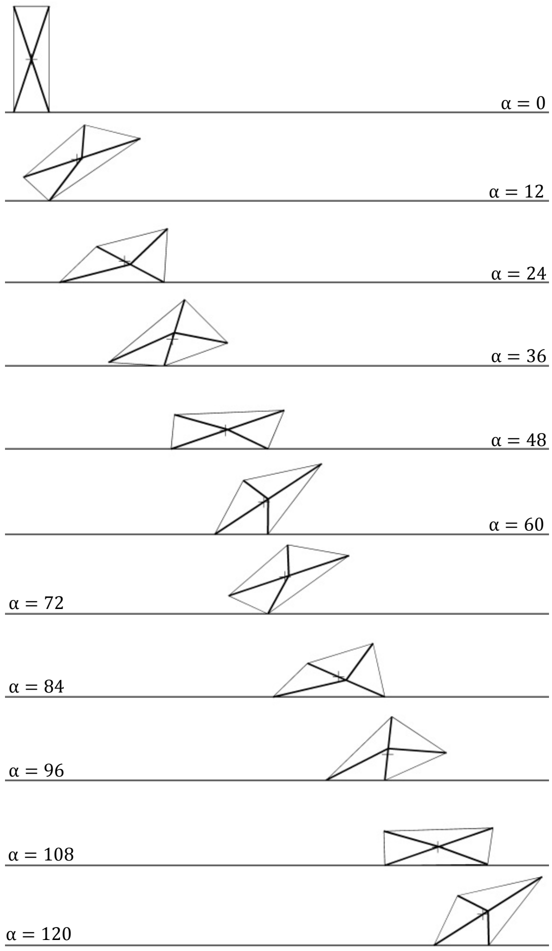


Fig.15 軸部直動モデルの形態解析

Fig.15 は軸部直動モデルの Tetrahedral Walker を模した解析モデルの事例である．面積一定の拘束と全長一定の拘束を連立して解いている．準静的な運動である．Tetrahedral Walker はすべての軸部材が可変となっている．この解析モデルは，外周はケーブルで覆われているため，運動は近似されているが，ころがり駆動する挙動は再現できる．

実際には，運動エネルギーの影響を考慮する必要がある．解析値の軸部の長さをアクチュエータの入力値として制御することで，同様の運動が可能と考えられる．

7 おわりに

本報では，隔軸自在継手や多軸自在継手を用いた可変構造の形態解析手法として，一般逆行列を用いた解析手法をとりあげ，数値解析を行い，そのパフォーマンスを示した．

現状，隔軸自在継手や多軸自在継手はコンセプチュアルな段階で，工学的問題は多数残っているが，従来の節点オフセットを解消する継手となりうることを示した．

可変構造を剛体モデルと軸部直動モデルに大別し，各特徴を生かした形態解析手法を提案した．剛体モデルにおいては，要素座標の次元数と全体座標の次元数が異なるため，それらを結びつける必要があり，本報では直観的に理解しやすい分解手法を提示したが，一般性はなく，検討を要する．軸部直動モデルは，面積一定と全長一定の拘束を与えて，運動の近似化を行っている．本報では，解析空間を二次元平面としているが，三次元空間に拡張するには，体積一定と表面積一定の拘束を与えることになるため，表面積一定の拘束には，前述の座標の次元数が異なる問題を解消する必要がある．

一方で，ひずみを基に定式化を進めていた点は，有限要素法との接点を模索するためでもあり，実際は変形量で記述することも可能である．

可変構造に限らず，これらの定式化を基に，展開構造，ケーブル構造や膜構造，あるいは非圧縮性を有する流体の問題に応用できると考えられる．

参考文献

1) 花原和之：可変形状トラス(VGT)の多彩な動作，システム/制御/情報, Vol.45, No.2, pp.82-89, 2001
2) Paul BOSSCHER, etc. : A Novel Mechanism for Implementing Multiple Collocated Spherical Joints Proceeding of the 2003 IEEE ICRA, pp.14-19 ,2003
3) Steven CURTIS, etc. : Tetrahedral Robotics for Space Exploration, IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE, JUNE 2007 ,pp.22－30
4) 半谷裕彦, 川口健一：形態解析,培風館,1991
5) 川口健一：一般逆行列と構造工学への応用, コロナ社,2011
6) 山村智則, 安藤正英, 服部真子, 大森博司：節点の滑動を許すケーブルネットの構造解析に関する研究 その1，日本建築学会学術講演梗概集, 2005

部材破断に対して冗長性を有するトラス構造の最小体積設計に関する研究

西坂達哉 [1)]，高田豊文 [2)]
1) 滋賀県立大学大学院環境科学研究科，大学院生
2) 滋賀県立大学環境科学部，准教授・博士（工学）

1. はじめに

近年，建築構造設計におけるロバスト性や冗長性について議論される機会が増えてきた[1,2)]．また，偶発的な事象により一部の部材が破断・消失した場合の，構造物の荷重支持能力を評価する方法もいくつか提案されている．Feng, Moses[3)] や Frangopol ら[4)] は, 剛接骨組を対象として，部材消失前後の骨組耐力を用いて冗長性の評価関数を定義している．伊藤ら[5)] は，柱消失に対する冗長性の指標を, 極限解析での崩壊荷重倍数を利用して定義している．福田ら[6)] は，柱の消失に対して，斜材による効果的な補強計画法を提示している．トラス構造物を対象としたものとしては，部材破断を考慮した冗長性評価法[7,8)] や最適設計法[9)] に関する研究が報告されている．

さて，グランドストラクチャ法に基づくトラス・トポロジー最適化問題は，応力・変位制約条件下の最小重量設計問題や，体積制約下のコンプライアンス最小化問題として定式化されることが多い[9,10)]．一般に，この種の問題から得られる最適解は静定トラス（解析対象によっては不安定トラス）となる[11)]ため，1 本でも部材が消失すれば荷重支持能力がなくなり，冗長性は低い（ない）と言える．そこで本研究では，トラス構造物を対象として，部材破断（消失）に対する冗長性を評価する指標を提案し，さらにその指標を用いて，冗長性を考慮した最小体積設計法について考察する．

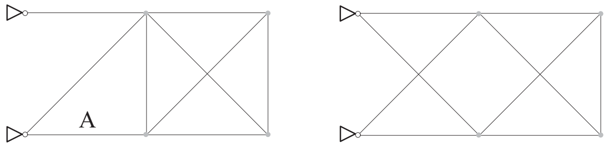
2. 部材破断に対する冗長性の評価関数

トラス構造物における外力と軸方向力との釣り合いは次式で表される．

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{n} \qquad (1)$$

ここに，$\boldsymbol{p}$, $\boldsymbol{n}$ はそれぞれ節点荷重ベクトル，軸力ベクトル，$\boldsymbol{B}$ は釣合行列を表す．トラスの節点変位自由度数を d とし，釣合行列の階数を rank $\boldsymbol{B}$ と表記すると，rank $\boldsymbol{B} < d$ のときに不安定構造となる．

トラス部材が 1 本破断（消失）することは，釣合行列 $\boldsymbol{B}$ から対応する列ベクトルを１列消去することに相当するので, 列ベクトル消去後の釣合行列の階数を調べれば, 部材破断後のトラスの安定・不安定を判別することができる．



(a) 冗長性指標 $R = 0.667$　　(b) 冗長性指標 $R = 1.0$

図 1　冗長性指標の異なる 1 次不静定トラス

部材が 1 本だけ破断する事象は部材数 m だけ存在し，その内, 1 部材破断後も安定トラスとなる数を N_{st} とする．本研究では，トラスの冗長性を評価する指標として，次式を定義する．

$$R = N_{st} / m \qquad (2)$$

以降，本稿ではこの指標を冗長性指標と呼ぶ．冗長性指標は 0～1 の値をとり，$R = 1$ のときはどの部材が破断しても安定なトラス, $R = 0$ のときはどの部材が破断しても不安定なトラス（静定トラス）である．

図 1 に冗長性指標の異なる 2 つの 1 次不静定トラスを示す．(a)では，例えば部材 A が破断すると不安定となるが，(b)ではどの部材が破断しても不安定とならない．このように，不静定次数では部材破断に対する冗長性が評価できないこと，本研究で提案する冗長性指標によってトラスの冗長性の優劣が判断できることが分かる．

3. 冗長性を制約条件とした最小体積設計

グランドストラクチャ法に基づくトラス・トポロジー最適化として，前節で定義した冗長性指標を用いた最小重量設計問題を考える．グランドストラクチャの全ての部材の断面積，ヤング係数が等しいとすると，この問題は次の最小体積設計問題と等価である．

$$\min_{\boldsymbol{x}} \boldsymbol{l}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \quad \text{subject to } R(\boldsymbol{x}) \ge R_a,\ x_j \in \{0,1\};\ j = 1,\ldots,m \qquad (3)$$

ここに，$\boldsymbol{x} = \{x_1, ..., x_m\}^{\mathrm{T}}$ は部材の存否を表す決定変数ベクトル，$\boldsymbol{l}$ は部材長ベクトル，$R(\boldsymbol{x})$は冗長性指標，R_aは冗長性指標の許容値（下限値），T は行列・ベクトルの転置記号を表す．なお，本設計問題では部材破断後の応力再分配については考慮せず，部材の座屈も考えない．

(3)式は典型的な離散的最適化問題であり，離散的最適化手法や遺伝的アルゴリズムなどを用いて解くことができるが，本稿では総列挙法を用いて解を探索する．(3)式における部材存否（トポロジー）の単純な組合せ数は 2^m–1 個であるが，$R_a = 1$ の場合，どの部材が破断しても不安定とならないためには，トポロジー内の節点と部材との関係について，以下の条件を全て満たす必要がある．

1. トポロジーには 3 部材以上含まれること．
2. 支点の除く節点には3本以上の部材が接続すること．
3. トポロジーには全ての荷重点が含まれていること．
4. トポロジーは 2 つ以上の支点を含むこと．

最小体積解の探索は部材数の少ないトポロジーから行い，探索途中で「制約条件を満たしているか」,「最小体積解か」のチェックを行う．探索途中で得られている最小体積の暫定値を z とすると，検討中のトポロジーが最小体積解となるためには，少なくとも次の条件を満たす必要がある．

5. 検討中のトポロジーの体積が z 以下であること．

本手法では，探索効率向上のために，条件 1～5 により探索領域を縮小し，冗長性指標の計算回数を減らしている．

4. 解析例と考察

4.1 部材の重複を許容しない場合

図 2 に示す 12 部材グランドストラクチャを解析対象とする．部材は全ての節点をつないでいるが，重複する部材は除いている．本手法によって得られた最小体積のトラス・トポロジーを図 3 に示す．図 3(a)は安定トラスの内の最小体積解を，(b)は部材破断後も安定となるトラスの内の最小体積解である．(a)のトラスは，部材総体積は小さいがどの部材が破断しても不安定となり，冗長性は低いと言える．一方，(b)のトラスは，部材総体積は大きいもののどの部材が破断しても安定となり，目標とする性能を持つトラスが得られていることが確認できる．この例の単純な部材存否の組合せ数は 2^{12}–1 = 4095 個であるが，本手法によって(b)の解を得るのに必要な冗長性指標の計算回数は 3 回だけであった．

次に，図 4 に示す 21 部材グランドストラクチャ（重複部材除く）を解析対象とし，得られた最適トラス・トポロジーを図 5 に示す．図 5(a)は安定トラスの内の最小体積解を，(b)は部材破断後も安定となるトラスの内の最小体積解である．解析例 1 と同様に，本手法によって部材破断後も安定となる最小体積のトラス・トポロジーが得られていることが確認される．部材存否の組合せ数は

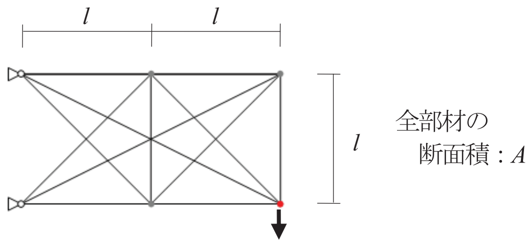
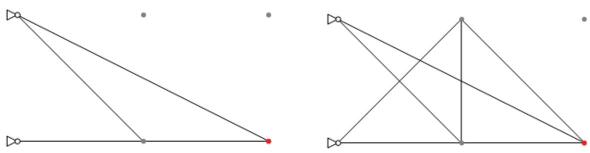


図 2　解析例 1－12 部材グランドストラクチャ



部材総体積= 5.65Al　　部材総体積= 9.48Al

(a) 部材破断考慮せず　　(b) 部材破断考慮

図 3　解析例 1 の最小体積トラス・トポロジー

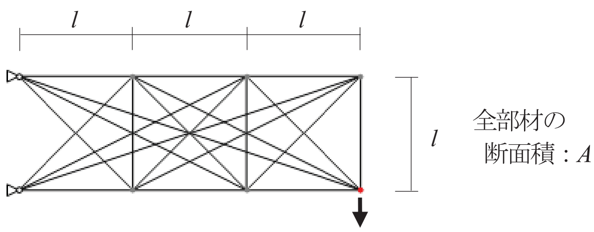
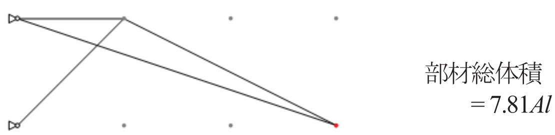
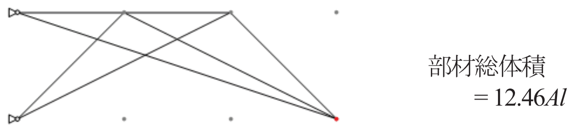


図 4　解析例 2－21 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断を考慮しない場合



(b) 部材破断を考慮した場合

図 5　解析例 2 の最小体積トラス・トポロジー

$2^{21}-1 \fallingdotseq 2.1\times10^6$ 個であるが，本手法では(b)の解を得るまでに冗長性指標の計算回数は 2 回だけであった．

いずれの解析例においても，部材破断を考慮した解は部材破断を考慮しない解を含んだ部材配置となっている．

4.2 部材の重複を許容する場合

解析例 1，2（図 2，図 4）のグランドストラクチャには，図 6(b)のように節点を超えるような重複する部材は含まれていない．しかし，荷重点と支点以外の節点は形状決定のために仮に設定されたものであり，解に節点を超えるような部材が存在しても問題ない．そこで重複する部材を許容した場合について解析を行う．

図 7 に示す 14 部材グランドストラクチャを解析対象とする．対象となるグランドストラクチャは設計領域に関しては図 2 のグランドストラクチャと同一であるが，重複する部材を許容している．解析により得られたトラス・トポロジーを図 8 に示す．重複するような部材も含めて最適化を行ったことにより，解析例 1 に比べて，部材総体積の小さい最適解が得られた．

同様に，図 4 のグランドストラクチャにおいて重複部材を考慮したものを図 9 に示す．解析により得られたトラス・トポロジーを図 10 に示す．解析例 3 と同様重複部材を含まない場合とは部材配置が異なり，部材総体積の小さい最適解を得ることができた．

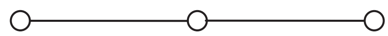
重複する部材も許容したことによって，部材破断を考慮しない場合，部材破断を考慮した場合ともに，それぞれ解析例 1，2 と比べて部材総体積が減少している．

4.3 荷重点を変化させた場合

図 11，13，15 に示すように，複数の荷重点を有するグランドストラクチャを解析対象とする．本手法で得られたトラス・トポロジーをそれぞれ図 12，14，16 に示す．どの解析例においても荷重点の変化にともない，それに対応するような部材数の増加が見られた．

荷重点が 2 点の場合，最適トラス・トポロジーにおける部材数の違いは見られないものの，荷重点の違いに応じて部材総体積が異なっている．

荷重点が 3 点の場合，荷重点 2 点の時と同様に荷重点付近の部材が増え，部材総体積も増加している．しかし，これまでの解析例では，部材破断を考慮しない最適解が，部材破断を考慮した最適解に含まれていたのに対して，3 点荷重作用時の最適トラス・トポロジーにおいては，部材破断を考慮しない場合と部材破断を考慮した場合で，全く異なる解が得られた．



(a) 重複を許容しない場合

(b) 重複を許容する場合

図 6 グランドストラクチャの部材認定

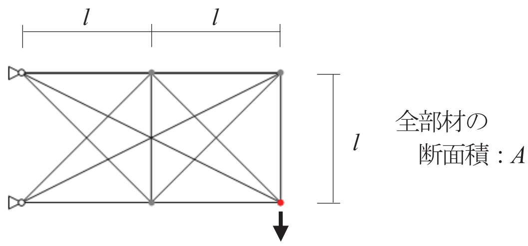
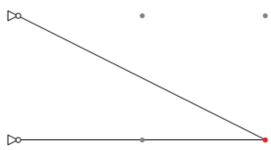
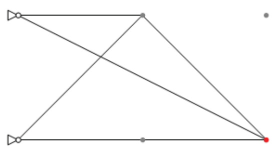


図 7　解析例 3－14 部材グランドストラクチャ



部材総体積= $4.24Al$

(a) 部材破断考慮せず



部材総体積= $8.06Al$

(b) 部材破断考慮

図 8　解析例 3 の最小体積トラス・トポロジー

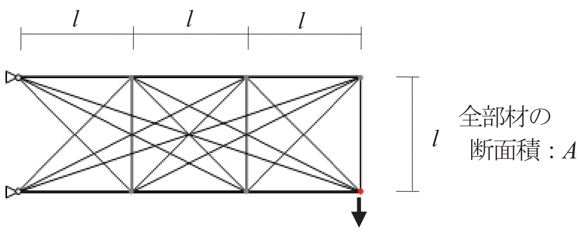
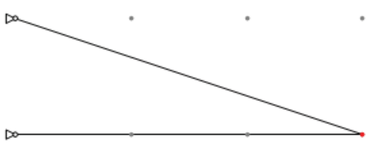
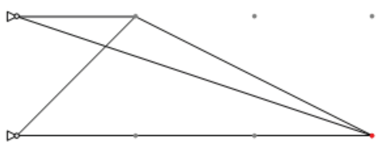


図 9　解析例 4－27 部材グランドストラクチャ



部材総体積
$= 6.16Al$

(a) 部材破断を考慮しない場合



部材総体積
$= 10.81Al$

(b) 部材破断を考慮した場合

図 10　解析例 4 の最小体積トラス・トポロジー

冗長性指標の計算回数は，2 点荷重時がそれぞれ 77 回，33 回，3 点荷重時は 992 回となり，1 点荷重の場合と比べると計算回数は増加した．特に 3 点荷重時では大幅に冗長性指標の計算回数が増加している．

4.4 複数の最適解が存在する場合

図 17 に示す 12 部材グランドストラクチャを解析対象とし，得られた最適トラス・トポロジーを図 18 に示す．本解析例では部材破断を考慮しない場合において，複数の最適解を得た．このように対象とする問題によっては複数の最適解が存在することがある．部材破断を考慮した場合の解はそれらの解を合わせたものとなっている．次に図 19 および図 21 のグランドストラクチャを対象とする．これらの解析例は，水平力が作用する 1 層建物の効果的なブレース配置を求める問題とみなすこともできる．解析により得られたトラス・トポロジーをそれぞれ図 20，22 に示す．どちらの解析例においても，部材破断を考慮するか否かにかかわらず複数の最適解が得られていること，部材破断を考慮しない場合は 1 本のブレースのみで水平力に抵抗しているが，部材破断に対して冗長性を有する解では複数本のブレースが設置されていることなどが確認される．なお，解析例 10 で，2 つの独立したトラス構造が最適解として得られている．3 以上の奇数スパンの場合はこのような解が最適解となることが予想される．

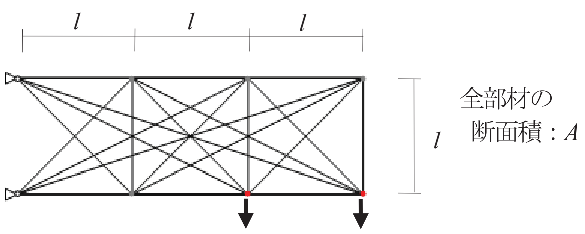
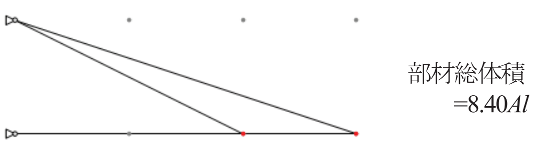
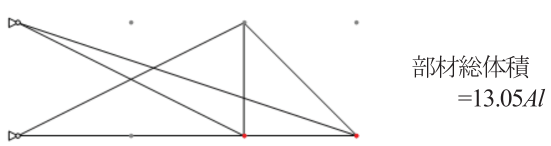


図 11　解析例 5―27 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断を考慮しない場合



(b) 部材破断を考慮した場合

図 12　解析例 5 の最小体積トラス・トポロジー

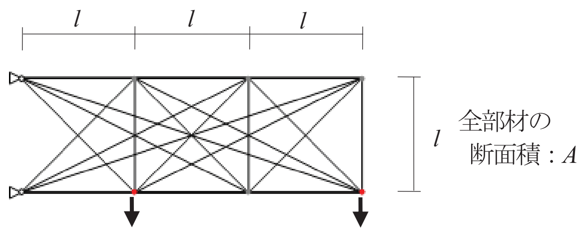
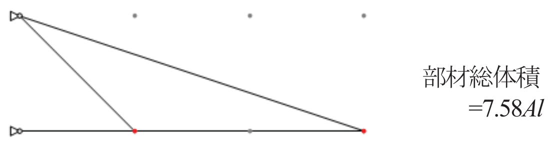
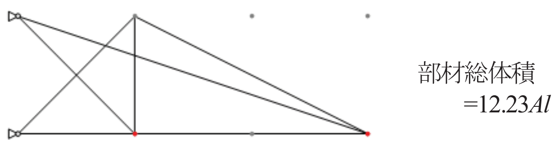


図 13　解析例 6―27 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断を考慮しない場合



(b) 部材破断を考慮した場合

図 14　解析例 6 の最小体積トラス・トポロジー

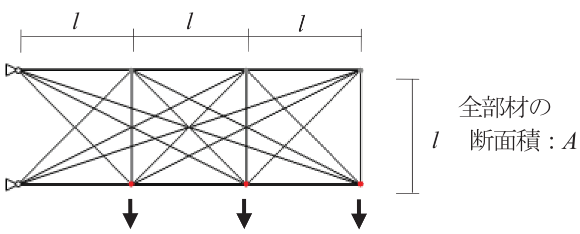
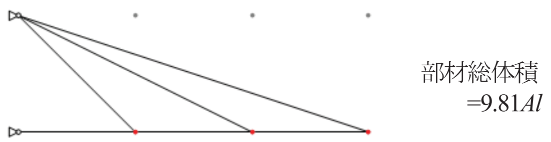
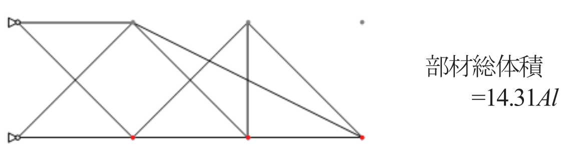


図 15　解析例 8―27 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断を考慮しない場合



(b) 部材破断を考慮した場合

図 16　解析例 8 の最小体積トラス・トポロジー

5. まとめ

本研究では，トラス構造物を対象として，部材破断（消失）に対する冗長性を評価する指標（冗長性指標）を提案し，さらに冗長性指標を制約条件とした最小体積設計法について示した．解析例として，重複する部材を許容した場合や荷重条件を変化させた場合，複数の最適解が存在する場合について本手法を適用し，それぞれで得られる最適トラス・トポロジーの特徴について考察した．本稿では，比較的小さな解析例を対象とし，効率的に解探索できることを確認したが，本手法は総列挙法に基づいているため設計領域の増加により解探索に要する時間が大幅に増加する．大規模な問題に対して，効率的に解探索するための手法の開発が今後の課題である．

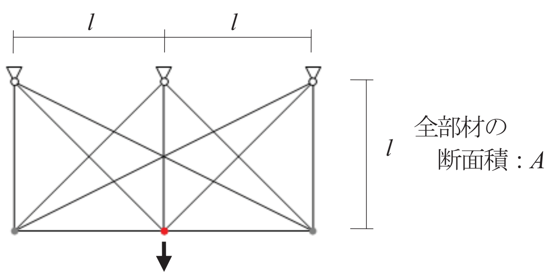
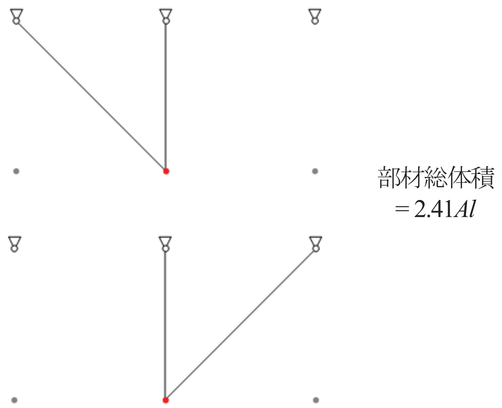
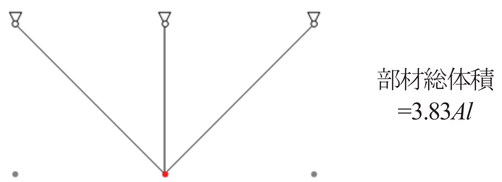


図 17　解析例 8－12 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断考慮せず



(b) 部材破断考慮

図 18　解析例 8 の最小体積トラス・トポロジー

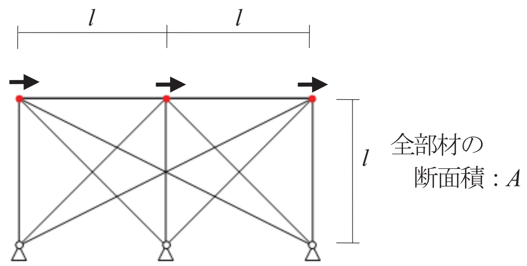
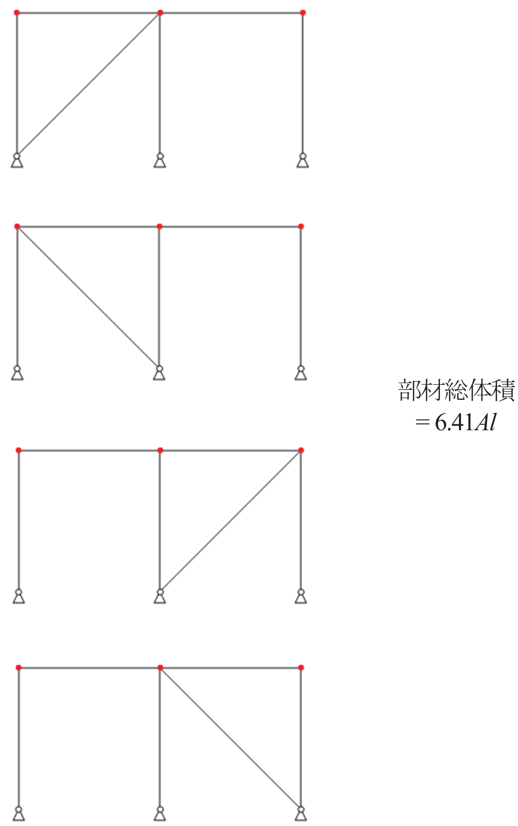
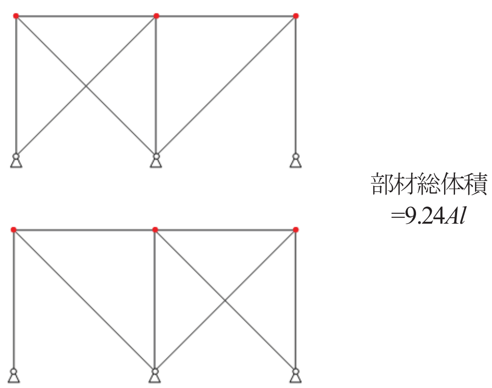


図 19　解析例 9－12 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断考慮せず



(b) 部材破断考慮

図 20　解析例 9 の最小体積トラス・トポロジー

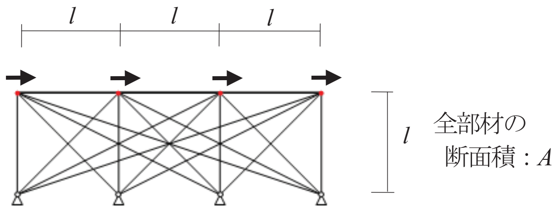
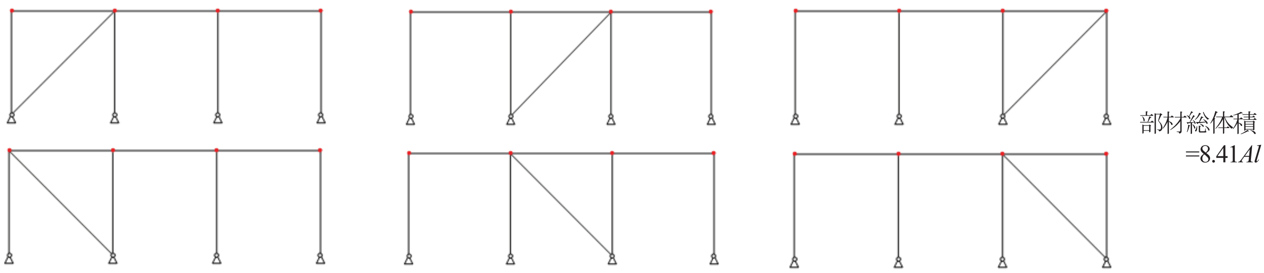
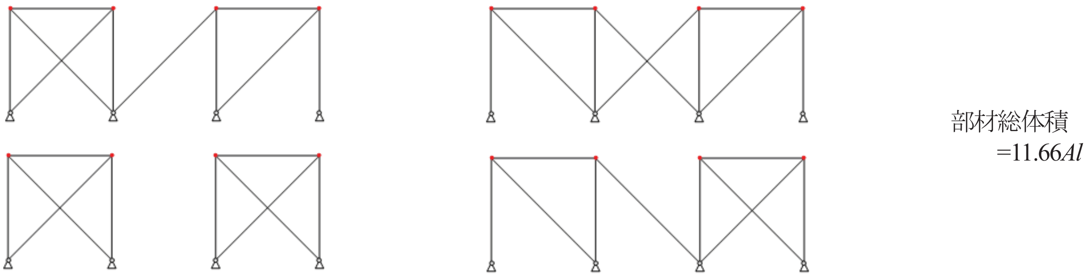


図 21　解析例 10－22 部材グランドストラクチャ



(a) 部材破断を考慮しない場合



(b) 部材破断を考慮した場合

図 22　解析例 10 の最小体積トラス・トポロジー

参考文献

1) 建築構造設計における冗長性と頑強性の役割ーリダンダンシーとロバスト性とは，日本建築学会大会構造部門 PD 資料，2008
2) ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザイン，日本建築学会大会構造部門 PD 資料，2011
3) Y.S. Feng and F. Moses：Optimum design, redundancy and reliability of structural systems, Computers and Structures, 24, pp.239-251, 1986
4) D.M. Frangopol and J.P. Curley：Effects of Damage and Redundancy on Structural Reliability, Journal of Structural Engineering, Vol.113, No.7, pp.1533-1549, 1987
5) 伊藤，大井，李：鉛直荷重を受ける骨組構造物の冗長性に関わる感度解析，日本建築学会構造系論文集，593，pp.145-151，2005
6) 福田，坂：局部損傷に対して構造的冗長性の高い既存建物の補強法，日本建築学会大会学術講演梗概集，B1，pp.347-348，2007
7) 永谷，明石他：我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討，土木学会論文集 A，65(2)，pp.410-425，2009
8) M.P. Bendsoe：Optimization of structural topology, shape, and material, Springer-Verlag, 1995
9) 北川，家永，荒木，上谷：部材破断の不確定性を考慮したトラス構造物のロバスト最適設計法ーその 2. ロバスト性向上設計法，日本建築学会大会学術講演梗概集，B1，pp.845-846，2010
10) M. Ohsaki and N. Katoh：Topology optimization of trusses with stress and local constraints on nodal stability and member intersection, Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol.29, No.3, pp.190-197, 2005
11) 高田，松岡：体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジー最適化問題への線形計画法の適用，日本建築学会構造系論文集，598，pp.87-91，2005
12) Y. Kanno and Y. Ben-Haim：Redundancy and robustness, or, when is redundancy redundant?, Journal of Structural Engineering, Vol.137, pp.935?945, 2011

ベーシスベクトル法を用いた優良解探索 GA によるグリッドシェル構造の形態創生

川添勝介 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, kawazoe@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，教授，工博, honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

グリッドシェル構造は軽量･高剛性の特性を持つことで空間構造に採用される例が多く、従来の定形幾何形状ではない自由曲面形態の要求が高まっている。空間構造は意匠性と力学的合理性が形態に依存するため、構造最適化による構造形態創生が注目され、種々の研究例がある[1]。本研究では優良解(decent solutions)を積極的に活用した､多様な形態の獲得による構造形態の創生を目指す。優良解とは許容解の内、大域的最適解や局所最適解を含む比較的評価の高い解であり、これらの多様な解は設計者への形態発想へと繋がる。優良解の探索には遺伝的アルゴリズム系解法 ISGA(GA with immune system)が提案され[2]、有効性が確認されている[3),4)]。

一方、構造最適化における形状表現法の一つにベーシスベクトル法がある[5]。この方法は、複数の基本形状を設定し、これらの線形結合和により形態を表現する手順である。想定する任意の形状を基本形状に選択することで、設計者の形態イメージが反映させられる可能性を持つ。しかし、機械分野における形状最適化への適用例や汎用コードへの採用例[6]があるものの、空間構造への応用例は少ない。

文献 7)では固有振動モードを基にした基本形状の構成により、グリッドシェル構造の形状最適化に対するベーシスベクトル法の適用可能性が示された。本論では、優良解の獲得を目的としたグリッドシェル構造の形態創生に、ベーシスベクトル法を適用させ、総ひずみ及び曲げひずみエネルギ最小化を行い、得られる優良解形態の構造特性を調べる。

2 最適化問題の定式化

構造形態創生問題は構造最適化として扱われ、総ひずみエネルギ最小化[Model-A]は次式で与える。

$$\textit{Find} \quad \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{A} \tag{1}$$

$$\textit{to minimize} \quad f_t\left(\mathbf{A}, \mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha})\right) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d} \tag{2}$$

$$\textit{subject to} \quad \sigma_i\left(\mathbf{A}, \mathbf{R}\right) \le \sigma_a \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\alpha}^L \le \boldsymbol{\alpha} \le \boldsymbol{\alpha}^U, \mathbf{A}^L \le \mathbf{A} \le \mathbf{A}^U, \mathbf{R}^L \le \mathbf{R} \le \mathbf{R}^U$$

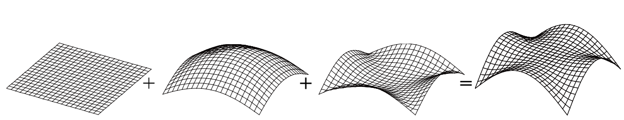


図 1　ベーシスベクトル法概念図

ここで、$\boldsymbol{\alpha}$ (=[α_i]): 重み係数ベクトル, $\mathbf{A}$(=[A_i]): 部材特性ベクトル, $\mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha})$ (=[R_i]): 節点情報ベクトル, $f_t(\mathbf{A},\mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha}))$: 総ひずみエネルギ, $\mathbf{d}$: 節点変位ベクトル, $\mathbf{K}$: 剛性マトリクス, $\sigma_i(\mathbf{A},\mathbf{R})$: i 部材の部材応力度, σ_a: 許容応力度, α_i^L= -10, α_i^U=10, A_i^L=1, A_i^U=20, R_i^L= 0.0 m, R_i^U=7.0 m である。制約条件式 (3)は許容応力度計算による応力制約条件(基準強度: 235N/mm^2)[8]を用いる。曲げひずみエネルギ最小化[Model-B]に対しては、式 (2)を次式と入れ換える。

$$f_b\left(\mathbf{A}, \mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha})\right) = \frac{1}{2}\mathbf{w}^T\mathbf{K}_b\mathbf{w} \tag{4}$$

ここで $f_b(\mathbf{A},\mathbf{R}(\boldsymbol{\alpha}))$: 曲げひずみエネルギ, $\mathbf{w}$: 面外節点変位ベクトル, $\mathbf{K}_b$: 面外剛性マトリクスである。その他の条件は総ひずみエネルギ最小化と同一とする。

2.1　ベーシスベクトル法

ベーシスベクトル法は基本形状の組み合わせによる形態形成スキームである。最適化計算では基本形状に対する重み係数α_iを設計変数に設定する。図 1 の概念図を用いると解形態 $\mathbf{R}$ は、基準形状ベクトル $\mathbf{R}_0$ と基本形状ベクトル $\mathbf{R}_i$ の線形結合和により形成させる。従って、求める形態 $\mathbf{R}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_0 + \sum_{i=1}^{n} \alpha_i\left(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_0\right) \tag{5}$$

なお、$\mathbf{R}_0$, $\mathbf{R}_i$ に関する形状の制約はない。

2.2　有理テンソル積ベジエ曲面

設計変数 $\mathbf{A}$ は有理テンソル積ベジエ曲面(ベジエ曲面)[9]の制御点 z 軸座標とする。部材選択とベジエ曲面の関係は図 2 に示す。これより、設計変数の削減と部材の滑らかな分布を得る。ベジエ曲面は、制御点とバーンスタイン基底関数で定義され、曲面上の任意の位置ベクトル $\mathbf{r}_{kl}$ は次式で与える。

$$\mathbf{r}_{kl}(x,y)=\left[r_x(u_k,v_l),r_y(u_k,v_l),r_z(u_k,v_l)\right]^T \tag{6}$$

$$\left(u_k,v_l:[0.0,1.0]\,k=1,2,...,m,l=1,2,...,n\right)$$

この位置ベクトルは曲面形状を決定する制御点を網目状に$(m'+1)\times(n'+1)$配置された各制御点$\mathbf{P}_{ij}=[{}_x\mathbf{P}_{ij},{}_y\mathbf{P}_{ij},{}_z\mathbf{P}_{ij}]$より次式で表される。

$$\mathbf{r}^{m',n'}(u_k,v_l)=\frac{\sum_{i=0}^{m'}\sum_{j=0}^{n'}w_{i,j}\mathbf{P}_{i,j}B_i^{m'}(u_k)B_j^{n'}(v_l)}{\sum_{i=0}^{m'}\sum_{j=0}^{n'}w_{i,j}B_i^{m'}(u_k)B_j^{n'}(v_l)} \tag{7}$$

$$B_i^{m'}(u)=\frac{m'!}{i!(m'-i)!}u^i(1-u)^{m'-i} \quad \text{(バーンスタイン基底関数)} \tag{8}$$

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。

2.3 解探索法

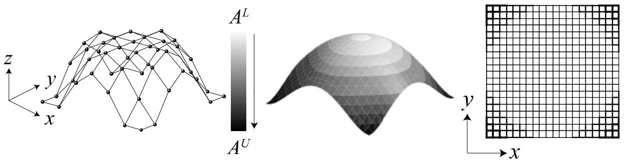
解探索法には SGA と ISGA を採用する。ISGA は SGA における計算パラメータの他に、クラスタ数 r、上位個体選択率 H、記憶細胞数 M を設定する。これらのパラメータの与え方により、形態決定に重要な設計変数空間の多様性を維持した優良解の探索が可能となる。詳細なアルゴリズムは文献 2)を参照されたい。

2.4 解析モデル

解析モデルの基準形状 $\mathbf{R}_0$ は図 3 に示す 1 辺が 20 m、隅角部ピン支持の格子状平板モデル(節点数: 441, 要素数: 840)である。ベジエ曲面の制御点は 7×7 の 49 点を設定し、配置を図 3b に示す。形成曲面の構成部材は一般構造用炭素鋼管(STK400)20 種の部材リスト(表 1)に対応させる [8)]。荷重条件は各節点に長期: 自重 78.5 kN/m^3, 等分布荷重 1.0 kN/m^2 を設定する。各部材の材料定数は弾性定数 E=2.1×10^8 kN/m^2、せん断弾性定数 G=7.8×10^7 kN/m^2 である。構造解析は線形弾性範囲で計算し、座屈の安全性確認のために線形座屈解析結果を示す。

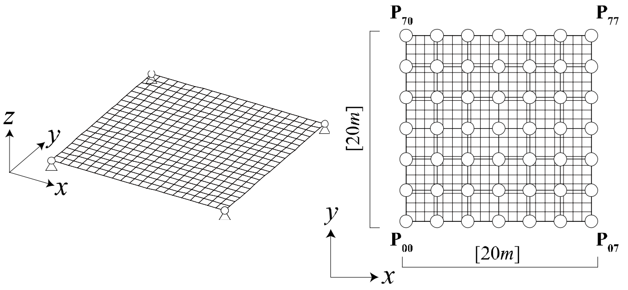
基本形状 $\mathbf{R}_i$ には文献 7),10)を参考に、9 次の固有振動モードを構造抵抗機構が確保出来るように変更した形状の内、回転対称性を持つ 5 つを採用する(図 4)。

SGA･ISGA の基本計算パラメータは表 2 に示す。なお、設計変数の割合が 形状：断面=5：49 と大きく異なることから、突然変異は形状と断面の設計変数に対して遺伝子上で別々に発生させる。形状と断面に対する突然変異率は設計変数に遺伝子長を乗じた数の逆数とし、各々 1/(5×16), 1/(49×16) で与える。ISGA はクラスタ数 r=10、上位個体選択率 H＝0.05, 0.1、記憶細胞数 M=100 に設定



a. 制御点配置　b. 曲面形状　c. 部材分布

図 2 制御点と部材選択の関係



a. 鳥瞰図　b.制御点配置

図 3 解析モデル($\mathbf{R}_0$)

表 1 部材リスト

リスト番号	外径 [mm]	厚さ [mm]	断面積 [cm^2]	断面二次モーメント [cm^4]
1	101.6	3.2	0.989×10^1	0.120×10^3
2	114.3	3.2	0.112×10^2	0.173×10^3
3	114.3	3.6	0.125×10^2	0.192×10^3
4	139.8	3.6	0.154×10^2	0.357×10^3
5	139.8	4.0	0.171×10^2	0.394×10^3
6	139.8	4.5	0.191×10^2	0.438×10^3
7	165.2	4.5	0.227×10^2	0.734×10^3
8	165.2	5.0	0.252×10^2	0.808×10^3
9	190.7	5.0	0.292×10^2	0.126×10^4
10	190.7	6.0	0.348×10^2	0.149×10^4
11	216.3	6.0	0.396×10^2	0.219×10^4
12	216.3	7.0	0.460×10^2	0.252×10^4
13	267.4	7.0	0.573×10^2	0.486×10^4
14	267.4	8.0	0.652×10^2	0.549×10^4
15	318.5	8.0	0.780×10^2	0.941×10^4
16	318.5	9.0	0.875×10^2	0.105×10^5
17	355.6	9.0	0.980×10^2	0.147×10^5
18	355.6	12.0	0.130×10^3	0.191×10^5
19	406.4	12.0	0.149×10^3	0.289×10^5
20	406.4	16.0	0.196×10^3	0.374×10^5

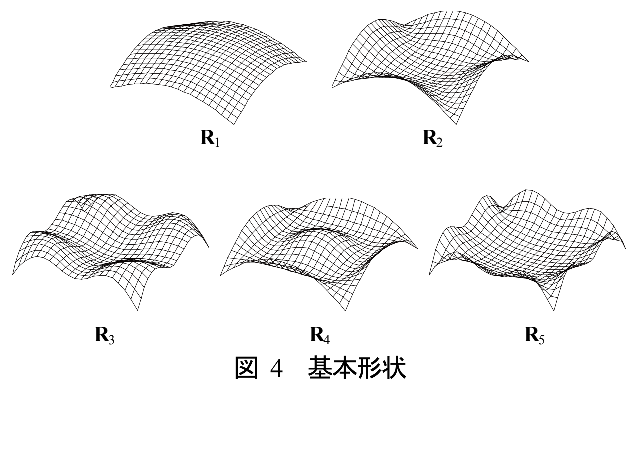


図 4 基本形状

する。記憶細胞内における多様性維持の操作は、形状の多様性を獲得することを目標とし **R** にのみ実施する。SGA･ISGA 共に数値計算は 3 回試行し、結果から特徴的な解形態を示す。

3 解析結果

解析結果は図 5–10 に示す。各図中の記号は以下の通りである。f_t, f_b: 式 (2), (4)に対応, E_t, E_b: 総ひずみ･曲げひずみエネルギ, ${}_z\delta_{max}$: 最大節点鉛直変位, *Thrust*: 最大スラスト値, λ: 線形座屈荷重係数, A_{max}･A_{min}: 最大･最小断面積, N_{max}･N_{min}: 最大･最小軸力（正値: 引張力, 負値: 圧縮力）, ${}_yM_{max}$･${}_zM_{max}$: 面外･面内最大曲げモーメント。

3.1 総ひずみエネルギ最小化(Model-A)

Model-A の結果を図 5–7 に示す。SGA による解は form-A1, -A2、ISGA の解は form-A3－-A10 である。図 5a は総ひずみエネルギの遷移、図 5b は情報エントロピ E_p [4] の遷移を示す。ここで、情報エントロピ E_p は形状の設計変数空間における、解形態の多様性に対する指標である。E_p の値が大きいとき多様性が高い。図 6a,c は各基本形状に対する設計変数の分布、b,d は形態例を示す。力学性状は form-A1, -A7, -A8 を例に図 7 に示している。線形座屈解析の座屈モードは細線が形態、太線がモード形状を表す。各部材の断面と軸力の大きさは線の太さと対応する。

3.2 曲げひずみエネルギ最小化(Model-B)

Model-B の結果を図 8–10 に示す。form-B1, -B2 は SGA、form-B3－-B5 は ISGA により得られた解形態である。図 8a は曲げずみエネルギの遷移である。form-B1 の力学性状を図 10 に示している。その他の結果情報は前節と同様である。

3.3 考察

Model-A: SGA の結果は form-A1, -A2 で異なる解形態となり、form-A2 を局所最適解であると判断している。

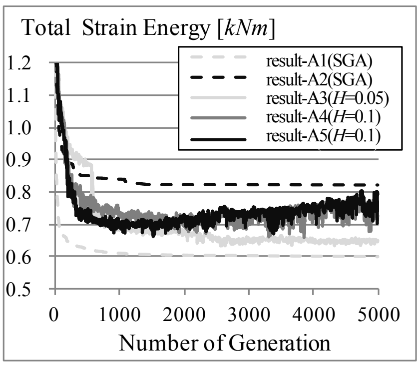
表 2 SGA･ISGA の計算パラメータ

個体数	200	設計変数の遺伝子長	16bit
世代数	5000	コーディング	gray 表現
世代交代率	0.9	選択方法	トーナメント
交叉率	0.7	交叉方法	二点交叉

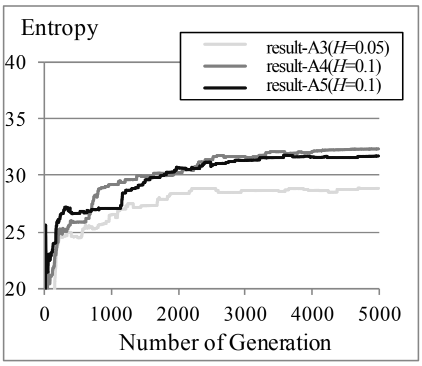
ISGA による解 form-A3（上位個体選択率 H=0.05）は、form-A1 の形態に近い。ここで、form-A1, -A3 のように構造抵抗機構を有する $\mathbf{R}_1$ が卓越する結果は大域的最適解近傍の解であると判断する。H=0.1 で得られた form-A4, -A5, -A7, -A8, -A10 に注目すると、form-A4 は SGA で得られた局所最適解（form-A2）に近い解形態である。form-A5 はα_2 及びα_4 が高い結果、境界の縁が持ち上がる形状となる。form-A7, -A8 は目的関数が殆ど同値で形状が異なり、優良解の獲得が出来ている例である。力学性状を比較すると、form-A7 では軸力が卓越し、form-A8 では面外･面内曲げモーメントが卓越する。form-A10 はα_5 が高く、$\mathbf{R}_5$ の波打つ形状の特徴が現れている。このように、H=0.1 において $\mathbf{R}_1$ 以外の基本形状が適用され、局所最適解近傍の形態や SGA で得られない多様な形態が獲得できた。

Model-B: SGA･ISGA（H=0.05）で得られた form-B1, -B2, -B3 はα_2 が負となり、境界部のライズが低く、H=0.1 でも類似した解形態となる（form-B4, -B5）。Model-B は全ての解で設計変数分布（図 9a）が類似しており、形状の多様性が低い。これは、曲げひずみエネルギ最小化に適した基本形状が少ないためと判断する。

SGA の力学性状（図 7: form-A1, 図 10: form-B1）は構造全体として、面内圧縮力が卓越した応力性状を示し、部材の選択は応力に即した分布となっている。Model-B においては、Model-A に比べ面外曲げモーメントが小さく、軸力及びスラスト値は大きい。この理由は、曲げひ

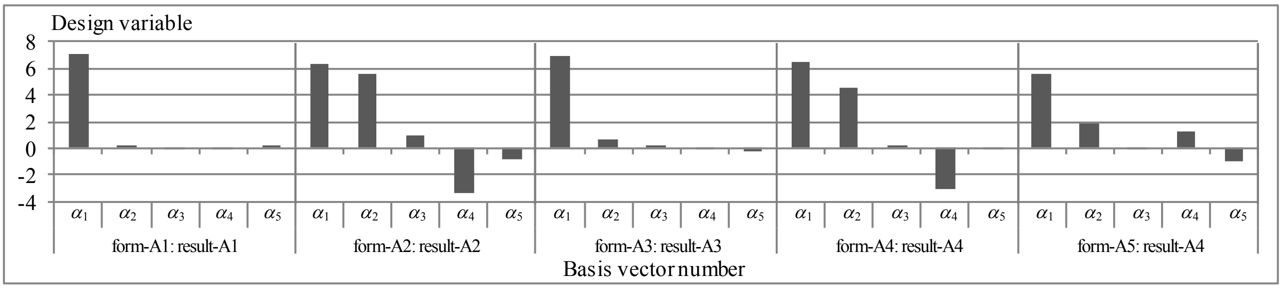


a. 総ひずみエネルギの遷移

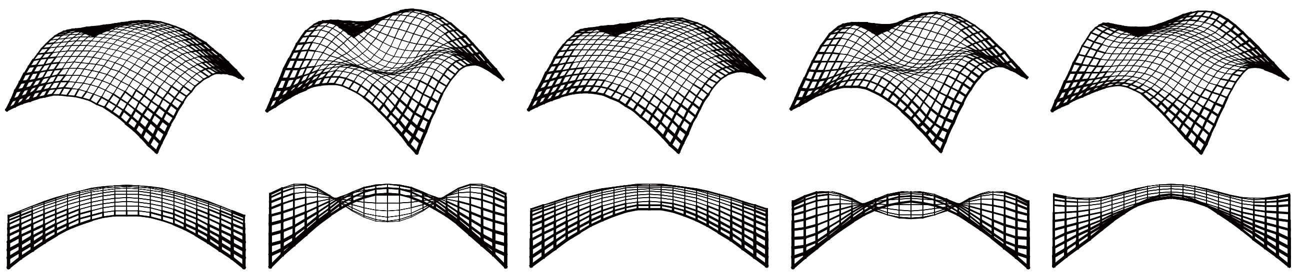


b. 情報エントロピ E_p の遷移

図 5 Model-A の数値結果

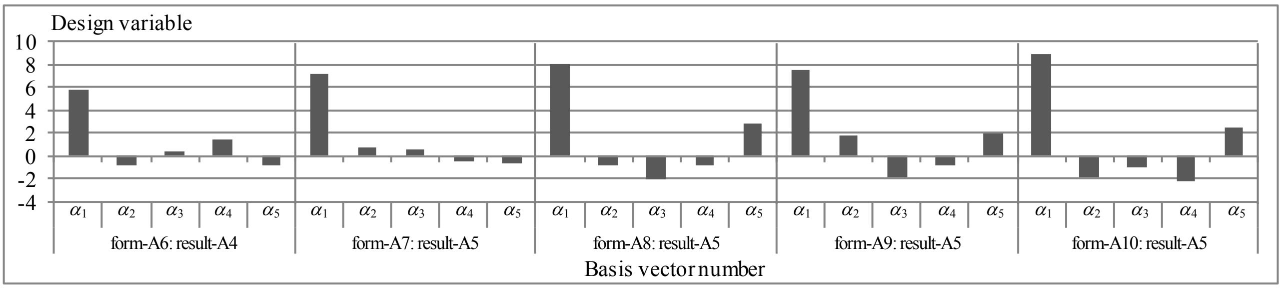


a. 設計変数分布

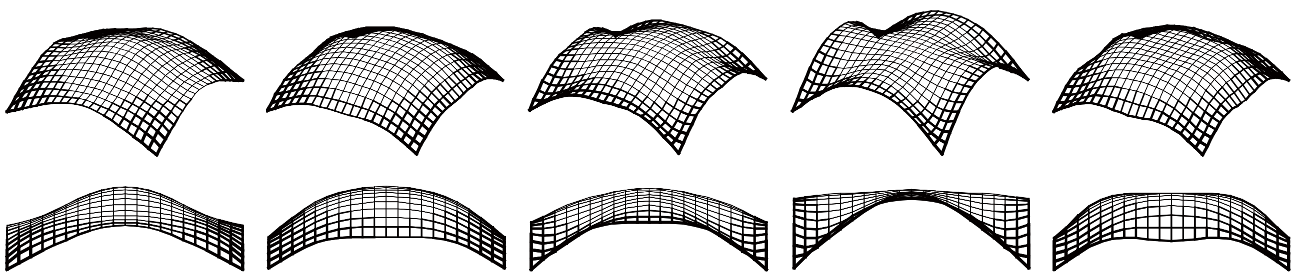


f_t = 0.598 *kNm*	f_t = 0.820 *kNm*	f_t = 0.652 *kNm*	f_t = 0.983 *kNm*	f_t = 0.768 *kNm*
E_b = 0.0255 *kNm*	E_b = 0.0609 *kNm*	E_b = 0.0315 *kNm*	E_b = 0.0718 *kNm*	E_b = 0.0657 *kNm*
${}_z\delta_{max}$ = - 0.0025 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0028 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0028 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0029 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0022 *m*
Thrust = 235.5 *kN*	*Thrust* = 210.5 *kN*	*Thrust* = 240.4 *kN*	*Thrust* = 251.5 *kN*	*Thrust* = 250.5 *kN*
form-A1: result-A1(SGA)	form-A2: result-A2(SGA)	form-A3: result-A3(*H*=0.05)	form-A4: result-A4(*H*=0.1)	form-A5: result-A4(*H*=0.1)

b. 解形態



c. 設計変数分布



f_t = 0.786 *kNm*	f_t = 0.815 *kNm*	f_t = 0.815 *kNm*	f_t = 0.822 *kNm*	f_t = 0.999 *kNm*
E_b = 0.0366 *kNm*	E_b = 0.0479 *kNm*	E_b = 0.0556 *kNm*	E_b = 0.0601 *kNm*	E_b = 0.0878 *kNm*
${}_z\delta_{max}$ = - 0.0017 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0020 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0022 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0026 *m*	${}_z\delta_{max}$ = - 0.0059 *m*
Thrust = 294.2 *kN*	*Thrust* = 298.9 *kN*	*Thrust* = 270.3 *kN*	*Thrust* = 221.6 *kN*	*Thrust* = 305.6 *kN*
form-A6: result-A4(*H*=0.1)	form-A77: result-A5(*H*=0.1)	form-A8: result-A5(*H*=0.1)	form-A9: result-A5(*H*=0.1)	form-A100: result-A5(*H*=0.1)

d. 解形態

図 6　Model-A の形態

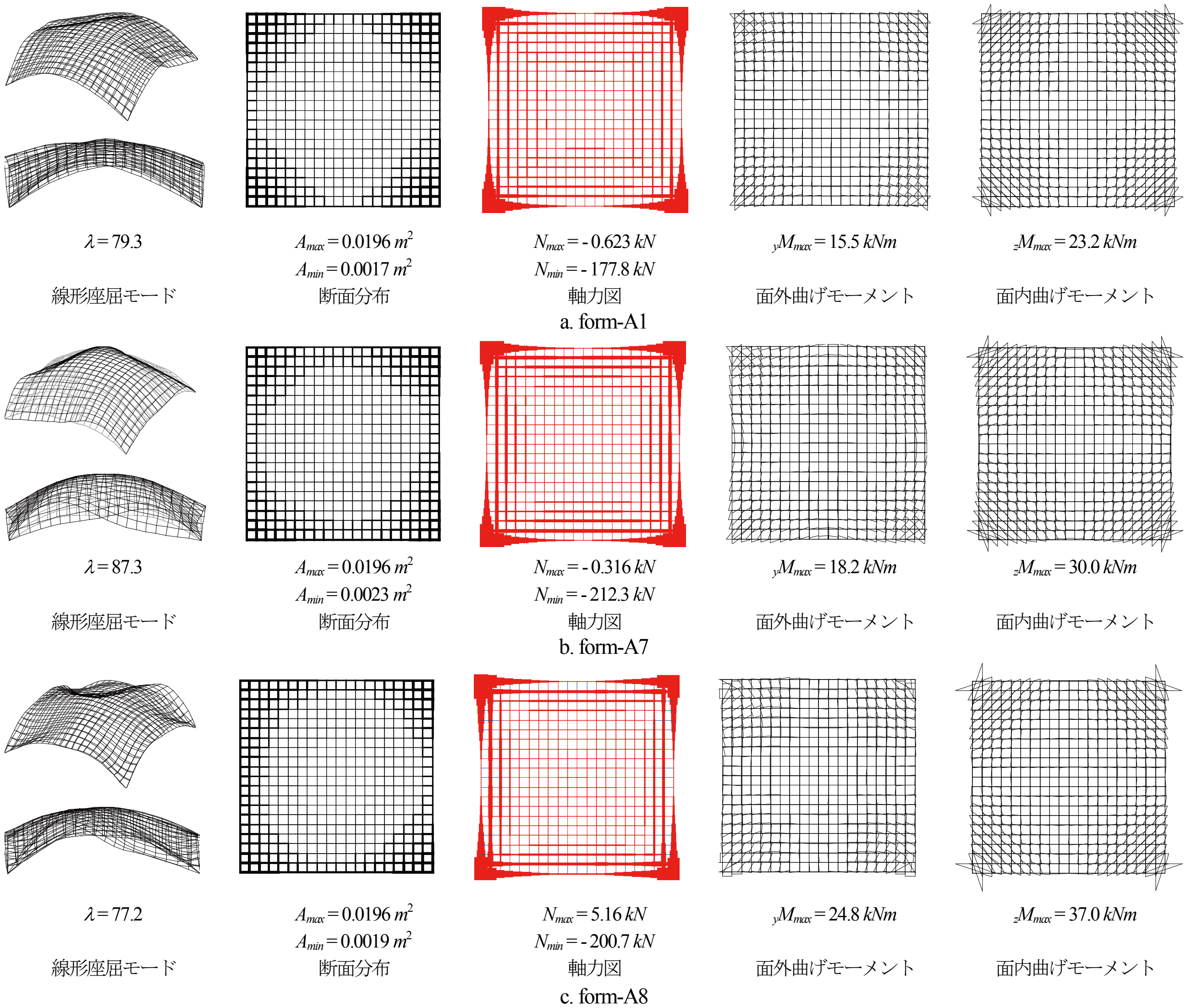


図 7　Model-A の力学性状

ずみエネルギが最小化された結果である。なお、全ての形態で線形座屈モードは全体座屈を示している。

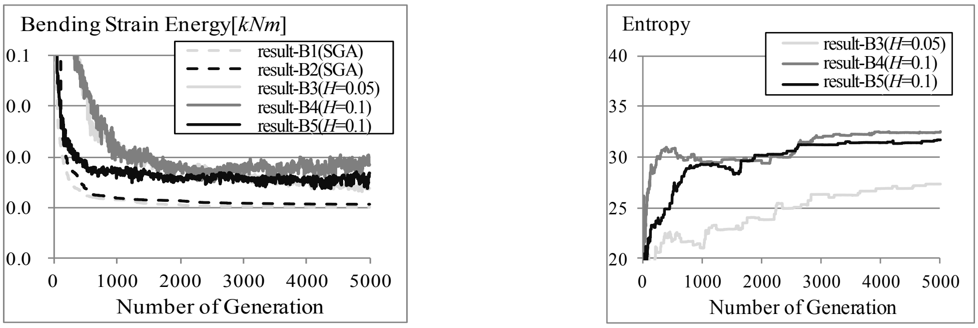
ISGA の結果は目的関数値が Model-A, -B 共に SGA より大きくなっている。この理由は、多様性考慮の探索が行われた結果であると考えている。情報エントロピ E_p については H=0.05 のとき低く、H=0.1 のとき高い。つまり、ISGA は H を低く設定すると大域的最適解近傍の解を捉え、高く設定すると多様な解形態を得るというアルゴリズム上の特性が確認できた。

各基本形状に対する設計変数分布では、全ての形態で $\mathbf{R}_1$ の設計変数値が大きい。つまり、$\mathbf{R}_1$ は Model-A, -B に適した基本形状である。一方、$\mathbf{R}_2$ は設計変数が負のとき境界部のライズを下げるため、Model-B で適応されやすい。このように、ベーシスベクトル法では各々目的関数で、適用されやすい基本形状が存在する。従って、形状表現の自由度が基本形状の構成に依存するため $\mathbf{R}$ の選択・決定には注意が必要である。

4　まとめ

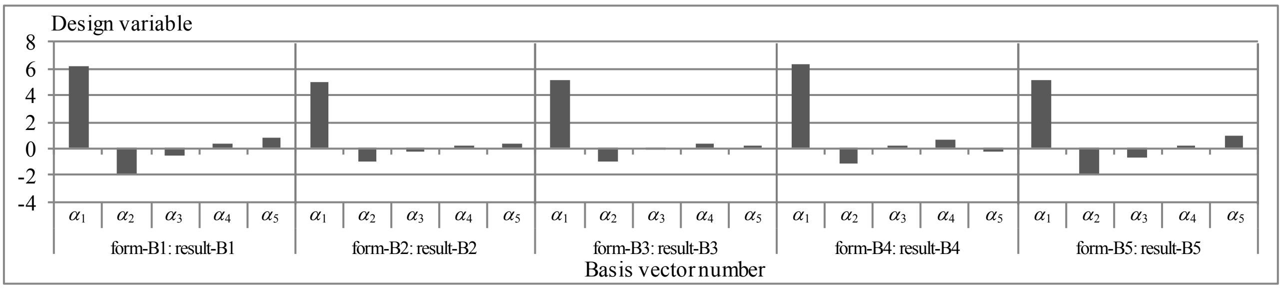
本論では、優良解の獲得を目的とした構造最適化にベーシスベクトル法を適用させ、総ひずみ及び曲げひずみエネルギ最小化を行った。得られた結果より 2 種類の目的関数に適したそれぞれの基本形状が存在し、形状表現の自由度が基本形状の構成に依存することを明らかにした。また、これらの基本形状が局所解を構成する可能性も示せた。

今後、基本形状の構成が解に与える影響を調べ、グリッドシェル構造の形態決定に適した基本形状の把握をすると共に、HP 曲面や EP 曲面など構造抵抗機構を有する形状と任意の自由曲面形状を設定した構成も考え、多様な形態の創生を行いたい。

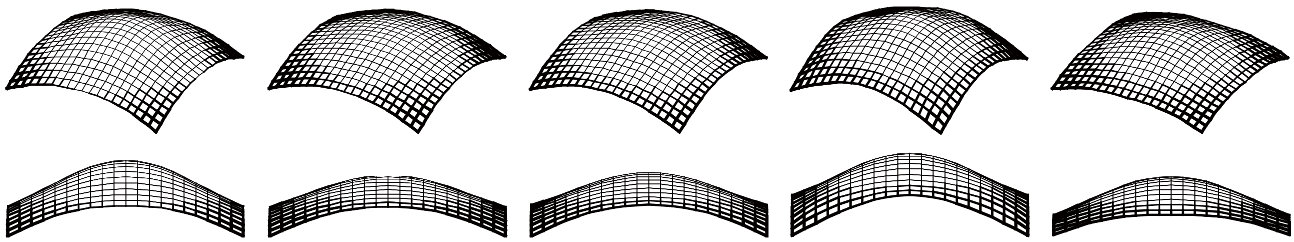


a. 曲げひずみエネルギの遷移　　b. 情報エントロピ E_p の遷移

図 8　Model-B の数値結果



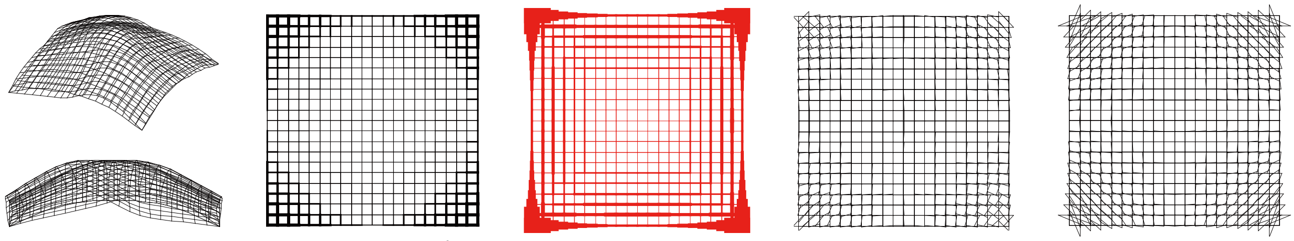
a. 設計変数分布



$f_b = 0.0200\ kNm$	$f_b = 0.0206\ kNm$	$f_b = 0.0238\ kNm$	$f_b = 0.0294\ kNm$	$f_b = 0.0294\ kNm$
$E_t = 0.832\ kNm$	$E_t = 0.993\ kNm$	$E_t = 0.993\ kNm$	$E_t = 0.746\ kNm$	$E_t = 1.509\ kNm$
${}_z\delta_{max} = -0.0021\ m$	${}_z\delta_{max} = -0.0024\ m$	${}_z\delta_{max} = -0.0023\ m$	${}_z\delta_{max} = -0.0015\ m$	${}_z\delta_{max} = -0.0023\ m$
$Thrust = 311.5\ kN$	$Thrust = 373.2\ kN$	$Thrust = 365.6\ kN$	$Thrust = 301.8\ kN$	$Thrust = 517.2\ kN$
form-B11: result-B1(SGA)	form-B2: result-B2(SGA)	form-B3: result-B3(H=0.05)	form-B4: result-B4(H=0.1)	form-B5: result-B5(H=0.1)

b. 解形態

図 9　Model-B の形態



$\lambda = 43.9$	$A_{max} = 0.0196\ m^2$	$N_{max} = -0.286\ kN$	${}_yM_{max} = 12.8\ kNm$	${}_zM_{max} = 29.8\ kNm$
	$A_{min} = 0.0015\ m^2$	$N_{min} = -204.9\ kN$		
線形座屈モード	断面分布	軸力図	面外曲げモーメント	面内曲げモーメント

図 10　Model-B の力学性状: form-B1

参考文献

1) 本間俊雄: 構造形態の創生と最適化, 第 9 回新「シェル･空間構造」セミナー ― 設計への計算機の応用と解析上の留意点, 日本建築学会, 25-32, 2010.7h
2) 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, 2007-04-30
3) 和田大典, 本間俊雄: 自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性, 日本建築学会, 構造工学論文集, **58B**, 453-460, 2012.3
4) Y.Okita and T.Honma : Structural Morphogenesis for Free-Form Grid Shell Using Genetic Algorithms with Manipulation of Decent Solution Search, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, **53**(3), 177-184, 2012.9
5) 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
6) 富士テクニカルリサーチ: http://www.ftr.co.jp/products/opera/opera_basis_j.html, 2012.9.22
7) 川添勝介, 本間俊雄: ベーシスベクトル法によるグリッドシェル構造の形状最適化 -固有振動モードを基にした基本形状の構成-, 日本建築学会大会学術講演会, 20415, 2012.9
8) 日本建築学会 : *鋼構造設計基準*, 1995
9) 杉原厚吉: *グラフィックスの数理*, 共立出版, 1995
10) 能井宏弥, 藤井大地 : 力法の原理を用いたシェル構造の形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, 第 616 号, 121-126, 2007

平面充填形と不規則性による壁面デザインの最適化の模索

佐藤京介 1)，前稔文 2)，小林竜一 3)
1)大分工業高等専門学校都市システム工学科 5 年，hogeuser@hogedomain.hoge-u.ac.jp
2)大分工業高等専門学校都市・環境工学科，准教授，博士（工学）, mae@oita-ct.ac.jp
3)フリーランス，修士（工学），　ryuichi@da2.so-net.ne.jp

1 はじめに

近年、情報技術の進歩によって、設計や建設、ものづくりにおいてデジタル環境が浸透し、建築や都市のデザインにネットワーク技術やコンピュータアルゴリズムを用いた事例などが多く示されている[1)]。それらの中でも、アルゴリズミック・デザインによる形態創成への期待は非常に大きなものと考えられる。

そのような背景のもと、筆者らは自然界に存在するかたちや現象に見られる特性や合理性を建築形態に取り込むことを試み、その一例として、樹木の生成過程と同じシステムを数理的に扱い、IFS コードを用いた反復関数システムから積層状のアーチ構造を提案することができた[2)]。同様にして自然からヒントを得ようと、ハニカム構造で広く知られている正六角形による平面充填形に着目した。このかたちは、蜂の巣以外にもトンボの複眼、亀の甲羅などに見られ、自然界において多数存在している。しかし、いずれの六角形も環境等の条件に対して適応できるようなかたちに成長し、厳密にはそれぞれ独自のかたちではないかと推測できる。そこで、整然と並列した充填形に不規則性を与えることで、より自然なかたちに近いデザインを見出すことができると考えた。これまでにも、平面形を扱ったデザインとして壁面等の事例が多く示されており[3-4)]、本研究もそれらに類するものと位置づけられる。

ここでは、構造体としての強度も考慮した平面形状のデザインの提示を試みており、不規則性による形状の評価、および壁面に適用した場合の骨組解析による評価をプログラムに組み込み[5)]、このようにして生成された不規則性をもつ壁面形状を、より合理性のある形状に誘導することを目的としている。なお、合理性については、構造体としての強度を評価に含むことから、形状モデルに外力が加わったときの節点の変位量を小さくすることにより、合理性が高くなるものとした。さらに、最終的に誘導された形状モデルの評価値や節点変位量の推移について考察する。

2 初期形状の設定と形状評価

2.1　初期形状の設定

平面を充填する正多角形として、正三角形、正方形、正六角形があるが、ここでは、前述のハニカム構造を構成する正六角形（2 方向）に加え、正三角形と正六角形による平面充填形を基本形状とした。これらの形状の左上を原点として、右方向に X 軸、下方向に Y 軸をとり、X 軸方向：Y 軸方向＝2：1 となるように X 軸方向に 7 個、Y 軸方向に 3 個とした。各節点に番号を付したものを図 1～図 3 に示す。こうして設定した基本形状に不規則性を与えるが、その際、充填する図形の一辺の長さに対する割合としてランダム率 R(%)を 15%とし、壁面の四辺に重ならない節点を移動させた。

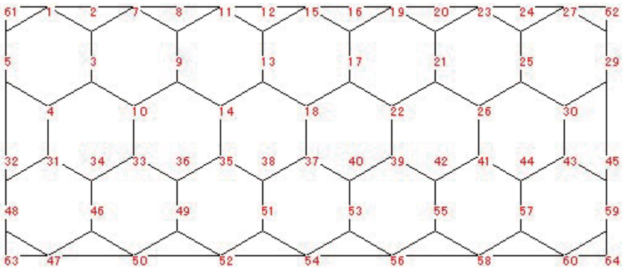


図 1　六角形充填 1（形状 1）

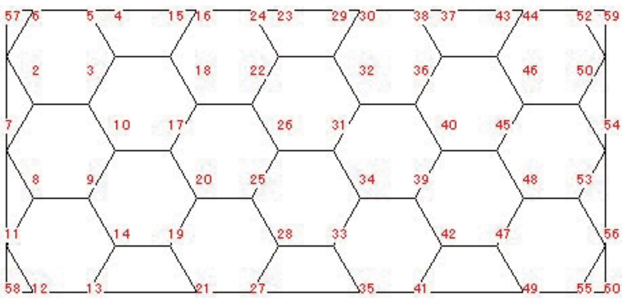


図 2　六角形充填 2（形状 2）

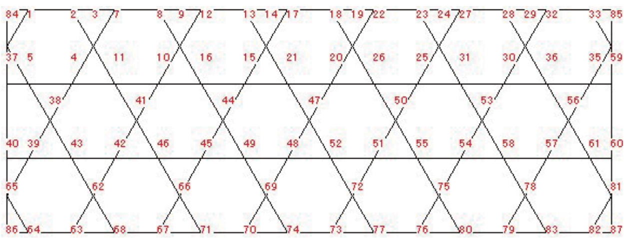


図 3　三角形-六角形充填（形状 3）

2.2　評価アルゴリズム

まず、不規則性による形状の評価について述べる。初期形状は、乱数により基本形状の各節点を移動させて不規則性を与えたものである。その初期形状のランダム率 R に対する不規則性の評価 $R1$ を次式のように定義した。

$$R1 = r \cdot \left(\sum Rij/nm\right)/R\max \tag{1}$$

ここで、Rij は j 行 i 列目の乱数による節点変位量、nm は全節点数、Rmax は乱数による移動量の最大値でランダム率 R により決まる。つまり、評価 $R1$ は節点の可能移動量に対する全節点の平均変位量に評価の重み r を乗じたものである。

次に、骨組解析による評価について述べる。基本形状に荷重が作用した場合の最大の節点変位量を基準値 Dbase とした。なお、骨組解析では、5cm×5cm の鋼材の矩形断面とし、各節点を剛接合とした。また、下辺の各節点を固定支持として、上辺の各節点に 10kN の鉛直荷重を作用させた。同様に設定した不規則性をもつ形状の骨組解析を行い、そのときの節点変位量に対する評価 $D1$ を次式のように定義した。

$$D1 = d \cdot \left(D\mathrm{base} - D\right)/D\,\mathrm{base} \tag{2}$$

ここで、D は骨組解析における最大変位量であり、評価 $D1$ は基本形状の最大変位 Dbase に対する節点変位量 D との差に、評価の重み d を乗じたものである。

こうして得られた不規則性に対する評価 $R1$ と骨組解析による評価 $D1$ を用いて、形状モデルの評価値 E を次式により求める。

$$E = R1 + D1 \tag{3}$$

なお、評価の重み r および d については、両者の割合を 30:70 と設定した。こうして得られた形状は、評価値 E が高いほど不規則性を持ちながらも、かたちとして成立する強度を満たす形状、つまり壁面デザインとしての評価が高いものとして位置づける。

以上の操作を繰り返し行い、評価値 E の値が高い 5 つの形状、ならびに評価が最も低い形状をフォーム上に描き、各データを格納する機能を加えた。この一連の処理の流れを**図 4**、生成された各形状モデルのうち最も評価が高かったものと評価が低かったものを**図 5** に示す。いずれの形状も基本となる六角形および三角形が確認でき、同時に基本形状とは違った不規則性を確認することができる。また、鉛直荷重に対する各モデルの評価値 E を見てみると、六角形で構成されているモデルの方が形状 3 よりも相対的に値は高い。

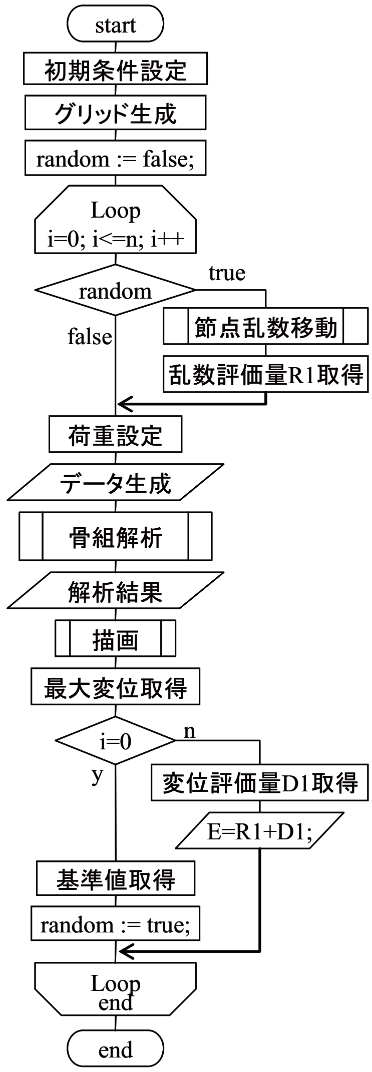
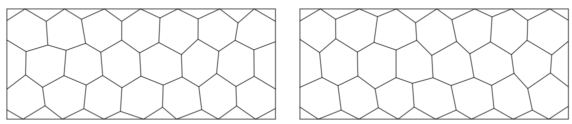
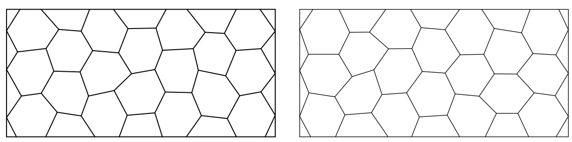


図 4　形状生成および評価アルゴリズムのフロー



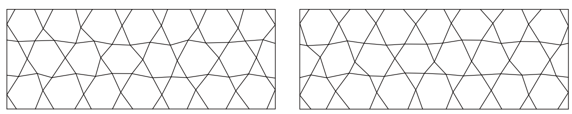
(a–1) best 評価(0.195)　(a–2) worst 評価(–0.333)

(a) 形状 1



(b–1) best 評価(0.180)　(b–2) worst 評価(–0.158)

(b) 形状 2



(c–1) best 評価(0.122)　(c–2) worst 評価(–0.942)

(c) 形状 3

図 5　生成された形状 (best 評価と worst 評価)

3 形状の最適化

前章では、乱数を基本形状に与えた不規則性と、骨組解析による最大変位量について形状を評価するアルゴリズム、ならびに生成された形状を示すことができた。ここでは、骨組解析による最大変位量が小さいことを合理性とし、それらの形状に対して合理的な形状への最適化を目指す。

まず、生成された形状の骨組データを読み込み、変位が最大となる節点および変位量を取得する。その変位量が小さくなるように形状を修正するため、ある節点（x_1, y_1）に着目する。その節点を有する全ての部材の長さを求め、一番長い部材を L_{max} とし、最長部材 L_{max} の長さが5%ほど短くなるよう、対象節点（x_1, y_1）を点（x'_1, y'_1）に移動させる（**図6(a)**）。このときの座標は、次の(4)および(5)式により求まる。

$$x'_1 = x_1 + (x_2 - x_1) \cdot 0.05 \quad (4)$$

$$y'_1 = y_1 + (y_2 - y_1) \cdot 0.05 \quad (5)$$

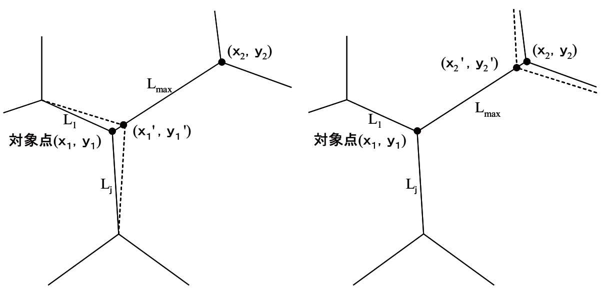
ここで、(x_2, y_2)は最長部材 L_{max} における対象部材(x_1, y_1)の他端側の節点座標であり、この処理を type 1 とする。同様にして、他端側の節点（x_2, y_2）を点（x'_2, y'_2）に移動させる処理を type 2 とする(**図6(b)**)。その際、点(x'_2, y'_2)は次の(6)および(7)式を用いて求まる。

$$x'_2 = x_2 - (x_2 - x_1) \cdot 0.05 \quad (6)$$

$$y'_2 = y_2 - (y_2 - y_1) \cdot 0.05 \quad (7)$$

なお、壁面の四辺にある節点に関しては、その辺のみでしか移動が許容されないものとする。

こうして修正された形状に対して骨組解析を行い、最大変位量が小さくなれば値を更新する。さらに、同じ操作を全節点に対して順次実行して最大変位が最も小さいものが最適化された形状モデルとなり、1 回の最適化処理が終了する。この操作を繰り返し実行しながら、より合理性の高い形状へと誘導する（**図7**）。



(a) type 1　　(b) type 2

図6　節点の移動方法

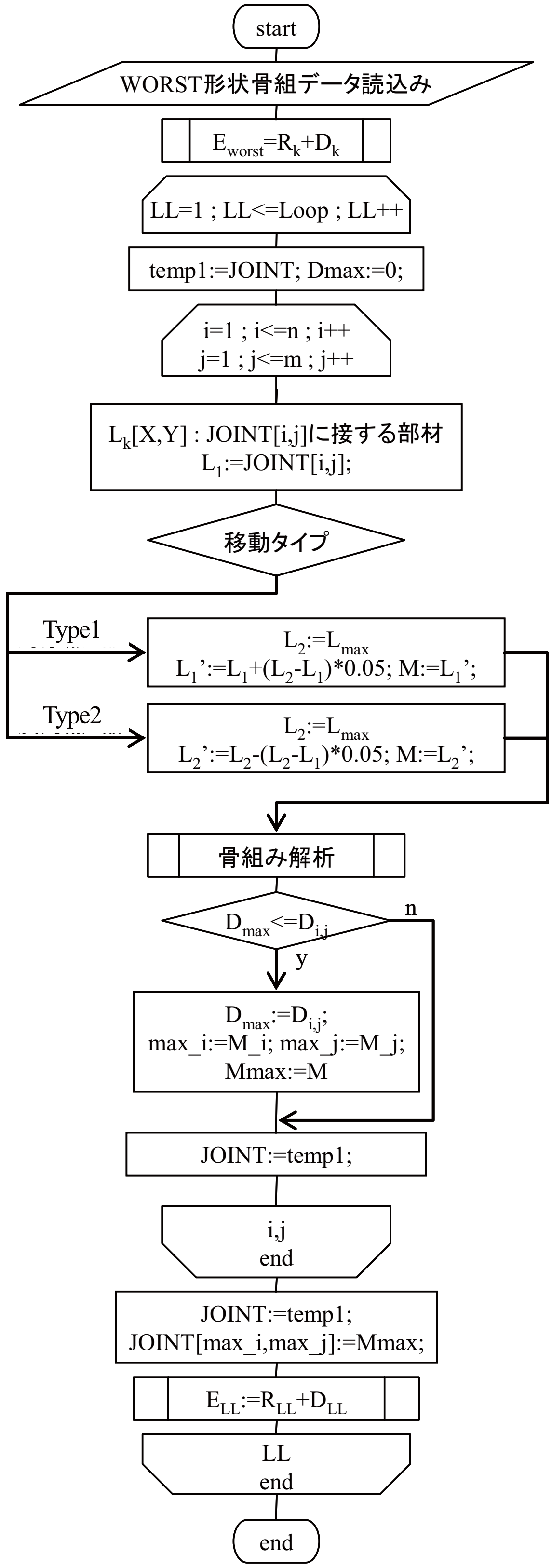


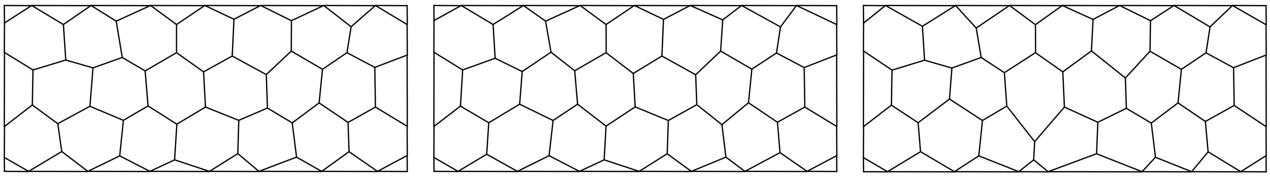
図7　形状の最適化のフロー

4 最適化形状の考察

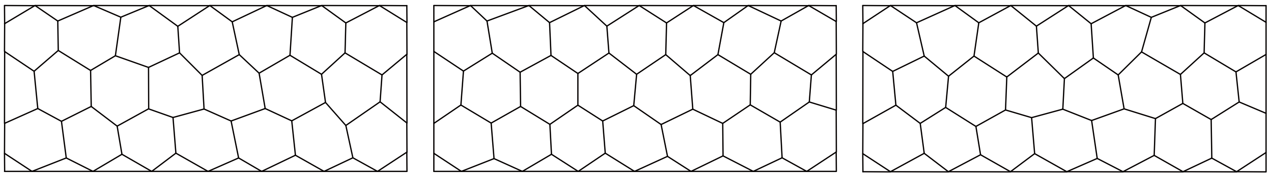
4.1 形状の変化

3 および 4 章のアルゴリズムを用いて、**図5** を初期形

状として最適化された最終形状を図 8 から 10 に示す。まず、形状ごとに見てみると、形状 3 のモデルは容易に視認できるほどの変化は見られず、形状 1 のモデルについては、形状の一部に視認できるほどの変化が見られたがそれほど目立ったものではない。一方、形状 2 のモデルは節点の移動や形状の変化が確認でき、形状の上辺および下辺の節点が大きく移動し、最適化された形状には垂直に近い部材見られた。次に、初期形状の評価の違いで比較すると best の評価のモデルよりも worst の評価のモデルの方が形状の変化が目立つものとなった。さらに、節点の移動方法の違いで見てみると、type 2 の対象点の他端側を移動させる方が形状の変化が大きく見られた。

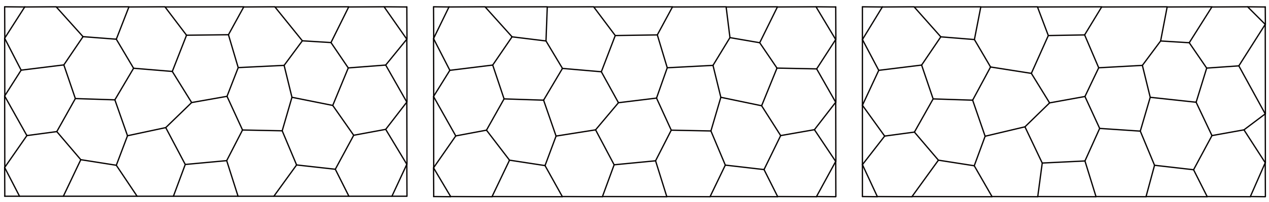


best 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）

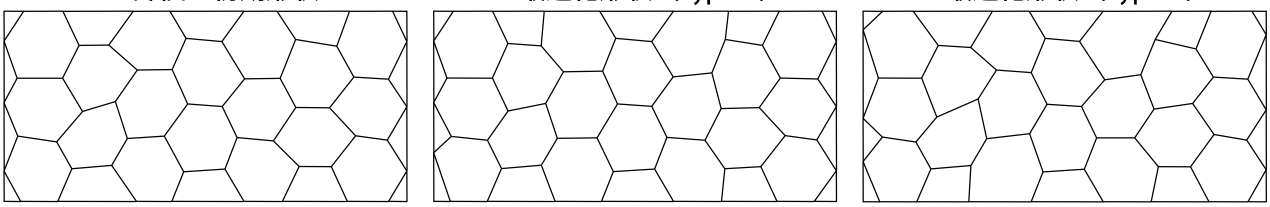


worst 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）

図 8　形状 1 の最適化

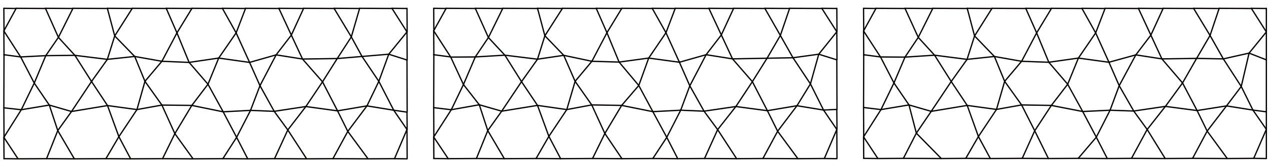


best 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）

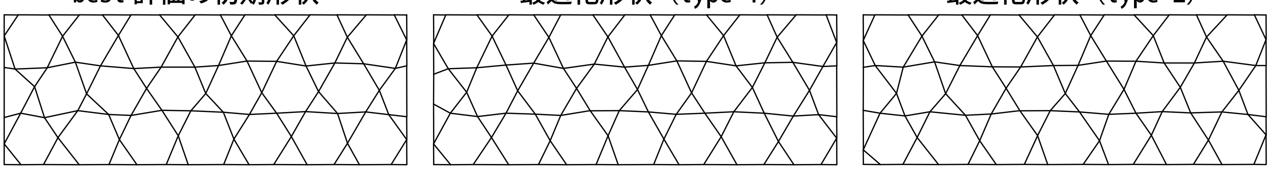


worst 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）

図 9　形状 2 の最適化



best 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）



worst 評価の初期形状　　最適化形状（type 1）　　最適化形状（type 2）

図 10　形状 3 の最適化

4.2 評価および最大変形量の推移

ここでは、最適化された形状の評価の推移について述べる。なお、本論文における最適化は構造体としての変形が小さいことが合理的であることから、骨組解析による最大変位量に関する評価 $D1$ に着目した。各形状の評価 $D1$ の推移を**図 11** から **13** に示す。いずれの形状においても、評価 $D1$ の値は増加していることから、前述の(2)式から、骨組解析による最大変位量 D は減少していることが分かる。また、いずれも概ねある一定の値に収束する傾向にあり、中には 20 回程度の処理段階で収束が見られるモデルもあった。

次に、初期形状のランダム率 R に対する不規則性の評価 $R1$ を加えた総合評価 E について**図 14** から **16** に示す。総合評価 E のグラフは上述の評価 $D1$ の推移とほぼ一致している。両者の値の差は不規則性の評価 $R1$ であることが(3)式から分かり、その差はほぼ一定の値となっていることから、評価 $R1$ の値に変化はあまり見られないことが分かる。また、両者の差は、評価 E および $D1$ に対してそれほど大きくないことから、不規則性の評価 $R1$ は総合評価 E に対してあまり影響しないことが分かる。

さらに、各形状モデルの最大変位量および評価について表 1 にまとめる。いずれのモデルも評価は増加していることは既に述べたが、形状 1 および 2 のモデルは全体的に評価値が高い。一方で形状 3 の初期形状が worst 評価のモデルは、評価値 E が-0.942 と他に比べて低い値だったが、最終的には type 1 が 0.179、type 2 が 0.104 と他のモデルと同じように評価値は高くなった。さらに、形状 3 のモデルは他のモデルに比べて節点数が多く、三角

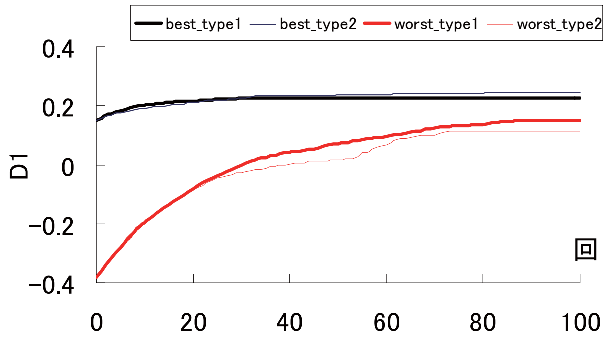


図 11　形状 1 の最大変位量に関する評価 $D1$ の推移

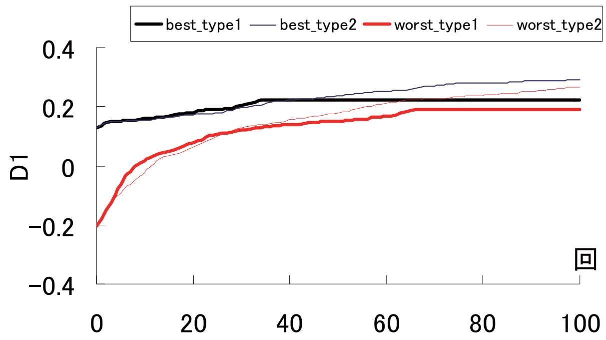


図 12　形状 2 の最大変位量に関する評価 $D1$ の推移

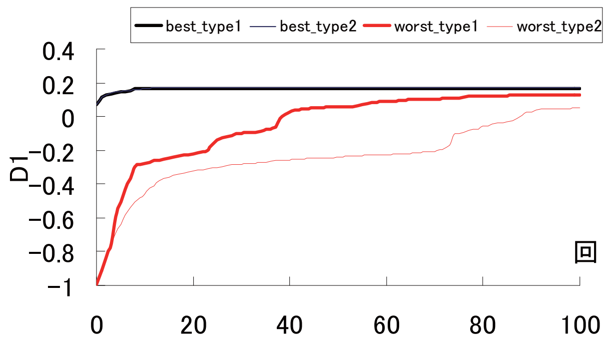


図 13　形状 3 の最大変位量に関する評価 $D1$ の推移

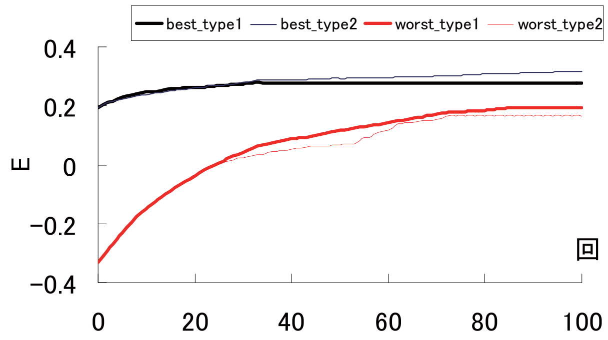


図 14　形状 1 の総合評価 E の推移

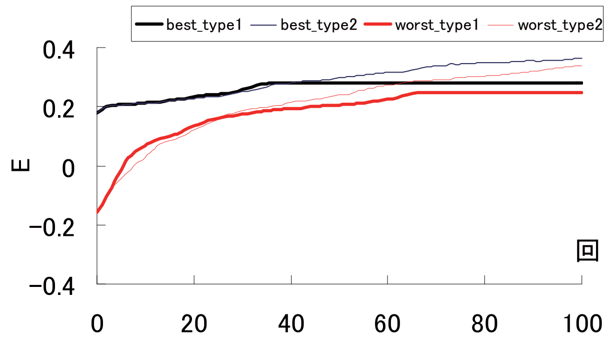


図 15　形状 2 の総合評価 E の推移

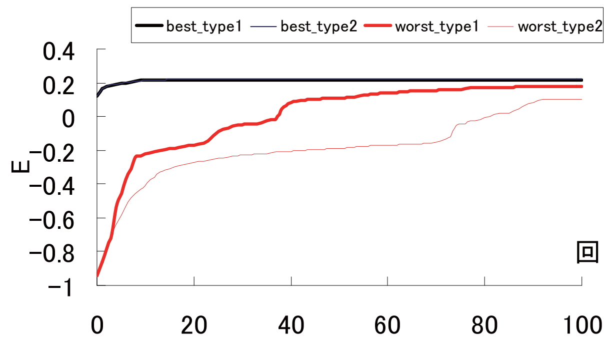


図 16　形状 3 の総合評価 E の推移

表１　各形状モデルの最大変位量と評価

形状	評価	type	最大変位量	総合評価	変位評価	乱数評価
形状１	best	初期	4.37E-03	0.195	0.150	0.045
		type1	3.75E-03	0.278	0.228	0.050
		type2	3.62E-03	0.316	0.245	0.071
	worst	初期	8.60E-03	-0.333	-0.382	0.049
		type1	4.36E-03	0.194	0.151	0.043
		type2	4.66E-03	0.166	0.114	0.053
形状２	best	初期	5.86E-03	0.180	0.127	0.054
		type1	4.87E-03	0.279	0.224	0.055
		type2	4.19E-03	0.362	0.291	0.071
	worst	初期	9.27E-03	-0.158	-0.206	0.049
		type1	5.22E-03	0.249	0.190	0.059
		type2	4.45E-03	0.337	0.265	0.072
形状３	best	初期	5.01E-04	0.122	0.071	0.051
		type1	4.26E-04	0.214	0.165	0.049
		type2	4.21E-04	0.224	0.171	0.052
	worst	初期	1.35E-03	-0.942	-0.995	0.053
		type1	4.55E-04	0.179	0.129	0.050
		type2	5.18E-04	0.104	0.049	0.055

形を含んでいることから最大変位量が少なくなったのではないかと考えられる。その値が小さいために僅かの値の変化でも評価に影響していると推察できる。

5　まとめ

本論文は、平面充填形に不規則性を与えることで、整然とした形状とは違う自然界に存在するかたちに似た形状を定義し、その形状および構造体としての評価を行った。さらに、得られた形状の骨組解析による最大変形量を抑制すること、すなわち変形しにくい形状を合理性として最適化を行った。いずれの形状においても最大変形量は小さくなったことが確認でき、また、基本図形の種類や配置の違いで評価に差が見られることが分かった。

ここでは、最適化された形状の適用例を図 17 および 18 に示す。ひとつは渡り廊下の開放された箇所に補助的な壁として設置した例で、もうひとつは室内の間仕切りに適用した例である。これらにより空間の雰囲気は違ったものとなり、形状としてのおもしろさは視覚的に捉えられる。

図 17　渡り廊下の適用例（形状 2, best 評価形状-type 2）

図 18 間仕切りの適用例（形状 3, worst 評価形状-type 1）

今後は、他の充填形モデルの提案や、鉛直荷重以外の外力に対する検討を重ねる。さらに、この形状を立体形状として扱い、壁面以外の適用も課題として挙げられる。

参考文献

1)　日本建築学会編：アルゴリズミック・デザイン，鹿島出版会，2009 年
2)　朝山秀一，前稔文：フラクタル幾何学に基づく積層アーチの自動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, 第 557 号, pp.181-188, 2002 年 7 月
3)　ダブルネガティヴス・アーキテクチャー：アルゴリズミック・ウォール，2007 年
4)　池田靖史／IKDS：慶應義塾大学 SFC 本館検収所，2007 年
5)　前稔文，小林竜一：平面充填形に不規則性を用いた壁面デザイン, 日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）, pp.87-88，2012.

三次元構造の自己組織化アルゴリズムによる自律的生成

渡部文仁[1)]，　三井和男[2)]
1)　日本大学大学院生産工学研究科，数理情報工学専攻，博士前期課程　cito11018@g.nihon-u.ac.jp
2)　日本大学生産工学部創生デザイン学科，教授，博士（工学）

1　はじめに

数理計画法を用いた合理的な構造物の形状最適化問題の解法は多く存在する。ラチスシェルの構造設計において、ひずみエネルギーの最小化と部材長の一様化を最適化問題として定式化し[1)]、構造物の形状最適化を行う研究などが例として挙げられる。しかし、数理計画法では設計問題の定式化に伴う設計変数の増加によって計算量が増加することにより、解析が困難になる場合がある。そこで本研究では、設計変数が増加しても単純な計算方法により形状最適化問題を解析できる自己組織化アルゴリズム[2)]を提案する。

自己組織化は「ランダムな状態からある秩序へと自律的に組みあがっていく現象」であり、自然界に多く観ることができる。例としては、水滴から雪の結晶が生成される様子や、孔雀の羽の模様が生成される様子などが挙げられる。また、自己組織化は多方面で応用されており、1988 年に T.コホネンによって発案された自己組織化マップはデータマイニングに応用されている。最適化問題への応用例としては巡回セールスマン問題(TSP)の解法や、アリのフェロモンをモデル化した構造形態創生などが挙げられる。

本研究では、自己組織化アルゴリズムの形状最適問題への有効性を示すために、骨組み構造物のひずみエネルギー最小化と部材長一様化の多目的最適化問題と、三次元の部材長一様化問題を扱った。本研究は魅力的なデザインであっても技術者の観点から力学的問題のある構造物をその意匠的なデザインを損なうことなく最適化することに応用できると考えられる。

2　多目的問題最適化問題

2.1　アルゴリズム

この章では自己組織化アルゴリズムのひずみエネルギー最小化と部材長一様化の多目的最適化問題への応用を述べる。最初に、ひずみエネルギー最小化について述べる。

本研究ではひずみエネルギーを最小化する指標としてコンプライアンスCを用いた。コンプライアンスCは節点加重ベクトルをP、節点変位ベクトルをuとして、(1)式で表される。

$$C = \frac{1}{2}\{P\}^t\{u\} \tag{1}$$

まず、図 1 のような骨組み構造物についてコンプライアンスCを計算する。コンプライアンスCを得た後、任意の部材を一つ選択し注目部材m_tとする。注目部材m_tは図 1 において黒色で示されている。

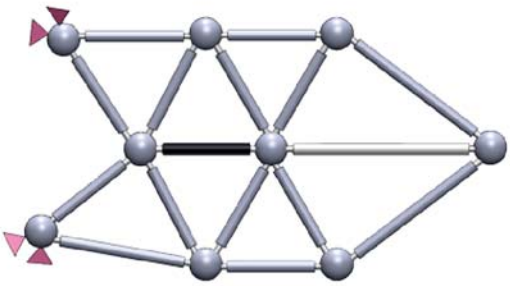


図 1

ひずみエネルギーは注目部材m_tのノードを移動することで増減する。ノードは候補点のいずれかに移動することにした。候補点は注目部材m_tの両端ノードにそれぞれ 1 点、図 2 のように両端ノードの位置に x，y 方向それぞれに$\pm r$加えた位置に 4 点ずつ生成される。候補点の組み合わせは 25 通りであり、この 25 通りの組み合わせの中からコンプライアンスを最小にする組み合わせを探索し、その組み合わせの候補点へ注目部材m_tの両端ノードを移動させることによって、コンプライアンスは減少する。

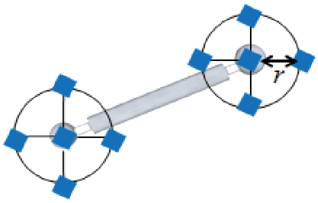


図 2

ここまではアルゴリズムの流れを説明してきたが、以降は候補点生成時に使用する半径rとコンプライアンスを最小にする候補点の組み合わせの探索方法を述べる。まず、候補点を生成する際に使用する半径rは注目部材m_tの部材長をl_tとし、αを 0<α<1 の任意の定数として、(2)式のようにする。

$$r = \alpha \cdot l_t \tag{2}$$

続いてコンプライアンスを最小にする候補点の組み合わせの探索方法について述べる。まず、各候補点に移動したときのコンプライアンスC'を求める。候補点に部材が移動した時の部材の節点変位ベクトルを$\{u^*\}$として、移動後のコンプライアンスC'は(3)式となる。

$$C' = \frac{1}{2}\{P\}^t\{u^*\} \tag{3}$$

(1)式、(3)式を用いてひずみエネルギーを最小化する最適な組み合わせを見つけるために評価値eを用いた。評価値eは(4)式とした。

$$e = C - C' \tag{4}$$

評価値eが最大となる候補点の組み合わせを探索し、その組み合わせの候補点に注目部材m_tの両端ノードが移動する。

次に、部材長一様化について述べる。ひずみエネルギー最小化と同様に注目部材m_tの両端のノードを移動させることで部材の長さを一様にしていく。まず、前述同様に候補点を生成する。候補点生成時の半径rは目標とする部材長をl_aとして、(5)式とした。

$$r = \alpha \cdot \frac{|l_t - l_a|}{2} \tag{5}$$

また、部材の長さを目標の長さl_aに最も近づく組み合わせを探索するために使用する評価値eは候補点に移動後の部材長をl_{new}として、(6)式とした。

$$e = (l_{new} - l_a)^2 \tag{6}$$

(6)式で表される評価値eが最小となる候補点に両端ノードを移動させ部材の長さを目標の部材の長さl_aに近づけていく。

ひずみエネルギー最小化のアルゴリズムのみを実行すると部材の長さが極端に長くなったり、極端に短くなったりすることがある。また、ひずみエネルギー最小化と部材長一様化のアルゴリズムを順に実行すると、ひずみエネルギー最小化と部材長一様化を満足する解がみつからず、局所解に陥ることがある。それを回避するためにノードの移動だけではなく、ノードの追加・削除をノードの移動後に行う。

ノードの追加は注目部材m_tの部材長l_tが目標とする部材長l_aに対して(7)式の条件を満たすときに実行され、注目部材m_tの中点にノードが追加される。ノードの削除は(8)式を満たす時に実行され、両端ノードを削除後、注目部材m_tの中点にノードを 1 つ追加する。ノードの追加・削除の様子は図 3 と図 4 にそれぞれ示されている。

$$l_t > 1.8 * l_a \tag{7}$$

$$l_t < 0.2 * l_a \tag{8}$$

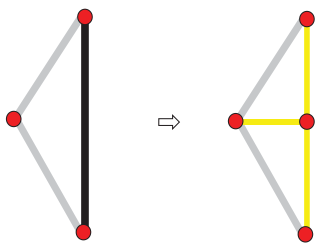


図 3

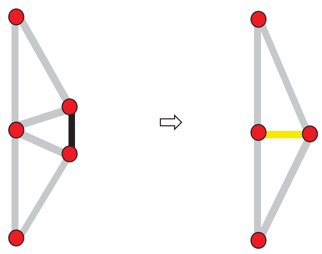


図 4

2.2　解析結果

図 5 は 17 節点 34 部材の構造物である。初期コンプライアンスは 0.81 で、部材長の平均は 2242.4mm である。また、概形線上のノードは概形線上のみを移動することができる。目標部材長を 1500mm として解析した。図 6 は図 5 で示された構造物の解析結果である。22 節点 51 部材の構造物となり、コンプライアンスは 0.54 で、部材長の平均は 1499.7mm となった。

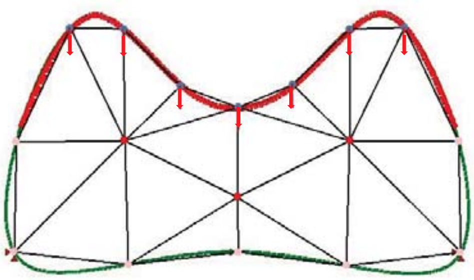


図 5

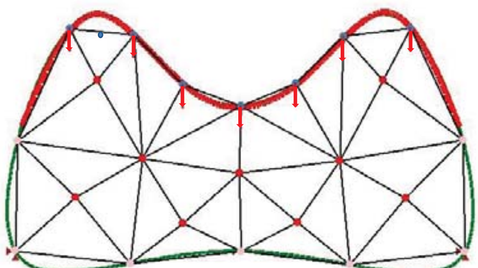


図 6

3　３次元の部材長一様化問題

3.1　アルゴリズム

2 章では任意の目標の長さを設定し、目標の長さに部材長を等しくしていく部材長一様化を扱ったが、3 章では目標とする部材の長さを設定せずに近傍部材との長さの差をなくしていくことで、部材の長さを一様にしていく部材長一様化を扱う。本研究では NURBS 曲面上を動くノードを持つ構造物の問題を扱った。

まず、2 章で説明したアルゴリズムと同様に構造物から部材を一つ選択しその部材を注目部材m_tとする。続いて、注目部材m_tの近傍部材の中から最も部材長が異なる部材を選択しそれを選択部材m_sとする。図 1 では選択部材m_sは白色で示されている。候補点は両端ノードの位置にそれぞれ 1 点と、NURBS のパラメータ u,v 方向にそれぞれ$\pm r$だけ加えられたパラメータによって決定される位置に 4 点ずつ生成される。候補点の組み合わせは 25 通りであり、この 25 通りの組み合わせから部材長の差を最小にする組み合わせに両端のノードを移動させ、部材長を等しくしていく。候補点生成時に使用する半径rの(5)式と部材長の差を最小にする組み合わせを探すために使用する評価値eの(6)式において、目標とする部材長l_aを選択部材m_sの部材長とする。

アルゴリズムをまとめると以下のようになる。

(1) 構造物から 1 つの部材を選択し、注目部材m_tとする。
(2) 注目部材m_tの近傍部材の中で注目部材m_tと長さの差が最大の部材を選択部材m_sとする。
(3) 注目部材m_tに候補点を生成する。
(4) 候補点の組み合わせから評価値eが最小となるものを探索する。
(5) 評価値eが最小となる候補点に注目部材m_tの両端のノードを移動させる。
(6) (1)~(5)を構造物すべての部材に行う。
(7) (1)~(6)を部材の長さが等しくなるまで行う。

3.2　解析結果

図 7 は 80 節点 210 部材の骨組み構造物で、ノードは球面上のみを動くことができる。図 8 は図 7 で示される構造物の解析結果である。図 9 は 66 節点 115 部材の骨組み構造物で、ノードは部分円筒上のみを動くことができる。図 10 は図 9 で示される構造物の解析結果である。図 11 は 60 節点 156 部材の骨組み構造物で、ノードは円筒上のみを動くことができる。図 12 は図 11 で示される構造物の解析結果である。

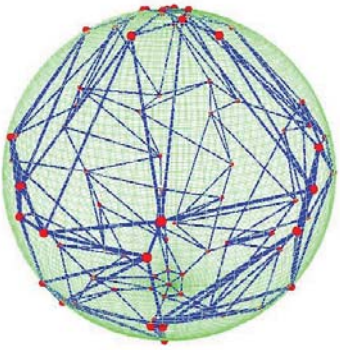


図 7

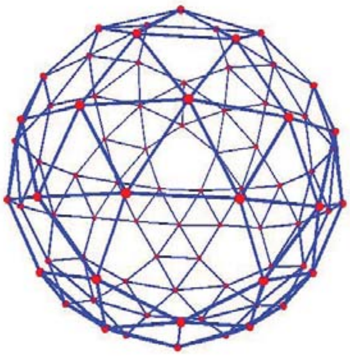


図 8

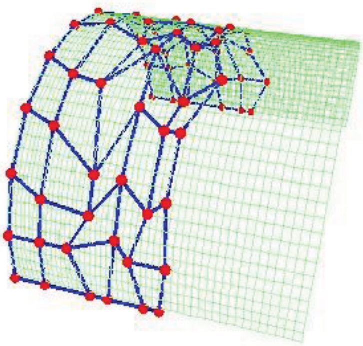


図 9

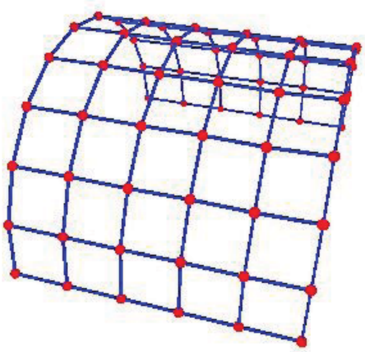


図 10

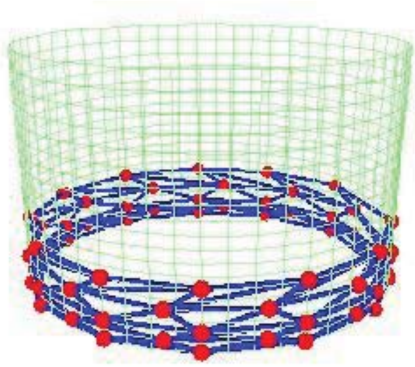


図 11

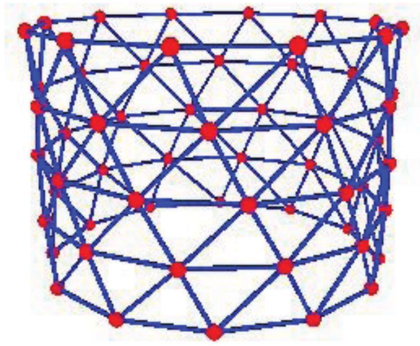


図 12

4　まとめ

2 章と 3 章の結果から自己組織化アルゴリズムは構造物の形状最適化に有効であることが分かった。今後は三次元のひずみエネルギー最小化問題への応用が課題となる。

5　参考文献

1) 大崎純, 藤田慎之介:四角形グリットを有するラチスシェルの部材一様化とひずみエネルギー最小化を考慮した多目的最適化, 第 33 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.135-138, 2010
2) Tomohito WATABE, Kazumi OKAMURA and Kazuo MITSUI : Autonomous Generation of Structural Form by Using Self-Organization Algorithm, IASS-APCS 2012

優良解探索 GA による NURBS を用いた自由曲面グリッドシェル構造の解形態

沖田裕介 1)，本間俊雄 2)
1)鹿児島大学理工学研究科建築学専攻，大学院生，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，教授，工博，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 序

単純な幾何学形状のグリッドシェルが数多く建設された頃の設計環境は一変し、計算技術の高度な発達が自由曲面空間構造の実現を可能にした [1), 2)]。構造形態創生法は、力学が形態に依存する空間構造に対する有効な設計手法の一つであり [3), 4)]、自由曲面グリッドシェル構造へ適用した研究が多く報告されている [5), 6)]。しかしこれらの設計手順は、力学指標や施工性に主眼を置くため、画一的な建築デザインとなる可能性が高い。許容解の内、大域的最適解を含む局所最適解及びそれら近傍にある解を優良解と定義し、この優良解の積極的な利用は意匠設計者への発想支援に繋がると考える。著者等は、優良解探索 GA (genetic algorithms)系解法 ISGA (GA with an immune system)[7), 8)]を提案し、ベジエで記述する自由曲面グリッドシェルの形態創生問題に適用してきた [9)]。

自由曲面の記述はパラメトリック曲面が一般に利用される。構造形態創生において得られる解形状は採用するパラメトリック曲面やそのパラメータに依存する。しかし、この関係を明確にした報告は著者の知る限り無い。特に、多様な形状を探求する優良解探索において、パラメトリック曲面と優良解の関係を把握することは重要である。本論文では、自由曲面記述方法に非一様有理 B スプライン(non-uniform rational B-spline: NURBS)[10)]を取り上げ、優良解との関係の把握を目的とする。

2 優良解探索解法 ISGA

ISGA は GA 系解法に優良解探索スキームを導入した最適化手法である。特に、設計変数空間にクラスタ化と端切法を適用することで、形態に重要な設計変数の多様性を維持する計算手順となっている。ただし、一般的な GA 系解法のパラメータに加え、ISGA 特有の 3 つのパラメータ（クラスタ数 r, 上位個体選択率 H, 記憶細胞数 M）の設定が必要である。ISGA の詳細なアルゴリズムは文献 8)を参照されたい。

3 NURBS

NURBS は曲面を定義する基底関数をパラメータ設定で調整可能な自由度の高い手法である。パラメータは 重み係数, 階数, ノットベクトル であり、これらの設定で、ベジエや B スプラインと同一表現が可能である。つまり、複数のパラメトリック曲面の一般化形式であり、次式で定義される。

$$\mathbf{r}(u,v)=\begin{bmatrix} r_x(u,v) \\ r_y(u,v) \\ r_z(u,v) \end{bmatrix}=\frac{\sum_{i=0}^{nu-1}\sum_{j=0}^{nv-1} w_{ij}N_{i,mu}(u)N_{j,mv}(v)\mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{nu-1}\sum_{j=0}^{nv-1} w_{ij}N_{i,mu}(u)N_{j,mv}(v)} \tag{1}$$

$$u_{mu-1}\le u\le u_{nu}\quad v_{mv-1}\le v\le v_{nv}$$

$$N_{i,1}(u)=\begin{cases}1 & \text{if } u_i\le u<u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise}\end{cases} \tag{2}$$

$$N_{i,m}(u)=\frac{u-u_i}{u_{i+m-1}-u_i}N_{i,m-1}(u)+\frac{u_{i+m}-u}{u_{i+m}-u_{i+1}}N_{i+1,m-1}(u) \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\mathbf{U}&=[u_0 \dots u_i \dots u_{mu+nu-1}] \quad (u_i\le u_{i+1}) \\ \mathbf{V}&=[v_0 \dots v_i \dots v_{mv+nv-1}] \quad (v_i\le v_{i+1})\end{aligned} \tag{4}$$

ここで、$\mathbf{r}(u,v)$: 曲面座標, $\mathbf{P}_{ij}$: 制御点ベクトル, $u\cdot v$: 曲面パラメータ, $nu\cdot nv$: $u\cdot v$ 方向の制御点数, $mu\cdot mv$: $u\cdot v$ 方向の階数($mu = mv = m_{uv}$), w_{ij}: 重み係数, $\mathbf{U}\cdot\mathbf{V}$: $u\cdot v$ 方向のノットベクトル, $N_{i,m}$: 階数 m の B スプライン基底関数である。重み係数は制御点の影響力、階数は曲面の滑らかさ、ノットベクトルは曲率連続性等の性質を決定する。ここでは階数 m_{uv} の比較を示すため、重み係数を一定、ノットベクトルを文献 10)で標準的に用いられている開一様とする。開一様は、端部の制御点と曲面座標が一致する設定で扱いが容易となる。特に、ノットベクトルが開一様かつ m_{uv} = ［制御点数］の NURBS は、ベジエと同一表現である。

4 解形状の特徴を表す指標

m_{uv} の比較を示す際、曲面形状に関するうねりの強弱を表す指標が必要になる。ここでは微分幾何学の曲率 [11)]に着目し、曲面形状全体の曲率を平均した値を採用する。

参照点の曲がり具合である曲率の代表には、ガウス曲率と平均曲率があり、最大主曲率と最小主曲率から算出される。ガウス曲率は例えば円筒曲面で 0、平均曲率は極小曲面で0となり、うねりの強弱を表すには適切でない。ここでは、凹凸方向の情報である符号を無視した平均曲率を利用する。解形状の特徴を表す指標として、主曲率

の絶対値を採った平均曲率を曲面上で平均したCを次式で定義する。

$$C=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\frac{\left|\kappa_{1,i}\right|+\left|\kappa_{2,i}\right|}{2} \tag{5}$$

ここで、N: 曲面上の参照する点の数, $\kappa_{1,i}$･$\kappa_{2,i}$: i番目の最大・最小主曲率である。Cが曲面の曲がり具合を表す指標であることを、単純な曲面に適用して確認した結果を付録に示す。

目的関数及び各パラメータ設定の特性を確認するため、得られた解形状の平均曲率Cを記憶細胞内で平均した値$\bar{C}$を次式で定義する。

$$\bar{C}=\frac{1}{M'}\sum_{i=1}^{M'}C_i \tag{6}$$

ここで、M': 記憶細胞数, C_i: i番目の個体に対するCである。ISGA はエリート戦略を採っておらず、記憶細胞内に評価の低い解が残る可能性がある。そのためここでは、M'を記憶細胞内上位 50 個体とした。

5 定式化

一般に、形態創生問題は構造最適化として定式化する。解析例は、目的関数が異なる Model-1（総ひずみエネルギ）と Model-2（曲げひずみエネルギ）であり、次式の単一目的最適化を扱う。

$$\textit{Find}\quad \mathbf{A},\mathbf{R} \qquad \text{(設計変数)} \tag{7}$$

$$\textit{to minimize}\quad f_{\mathrm{t}}(\mathbf{A},\mathbf{R})=\frac{1}{2}\mathbf{d}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}\mathbf{d}\ \text{ or }\ f_{\mathrm{b}}(\mathbf{A},\mathbf{R})=\frac{1}{2}\mathbf{w}^{\mathrm{T}}\mathbf{K}_{\mathrm{b}}\mathbf{w} \qquad \text{(総ひずみエネルギ, 曲げひずみエネルギ)} \tag{8}$$

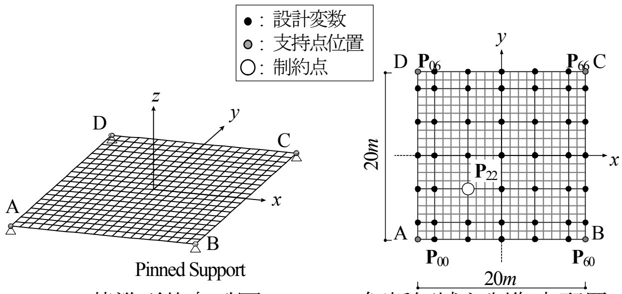
$$\textit{subject to}\quad \sigma_i(\mathbf{A},\mathbf{R})\le\sigma_{\mathrm{a}} \qquad \text{(応力制約)} \tag{9}$$

$$\mathbf{A}^{\mathrm{L}}\le\mathbf{A}\le\mathbf{A}^{\mathrm{U}}\quad \mathbf{R}^{\mathrm{L}}\le\mathbf{R}\le\mathbf{R}^{\mathrm{U}} \qquad \text{(側面制約)} \tag{10}$$

$$_{z}p_{ij}=h \qquad \text{(制御点高さ制約)} \tag{11}$$

ここで、$\mathbf{A}$: 部材特性ベクトル(=[A_i]), $\mathbf{R}$: 節点情報ベクトル(=[R_i]), f_{t}: 目的関数（Model-1: 総ひずみエネルギ）, $\mathbf{d}$: 節点変位ベクトル, $\mathbf{K}$: 剛性マトリクス, f_{b}: 目的関数（Model-2: 曲げひずみエネルギ）, $\mathbf{w}$: 面外節点変位ベクトル, $\mathbf{K}_{\mathrm{b}}$: 面外剛性マトリクス, σ_i: i部材の部材応力度, σ_{a}: 許容応力度, $R_i^{\mathrm{L}}=0.0\ m$, $R_i^{\mathrm{U}}=7.0\ m$である。グリッドシェル構造の曲面形状と部材分布は NURBS による関数表現を採用し、設計変数は $\mathbf{A}$ と $\mathbf{R}$ に関する制御点 z 軸座標値とする。$\mathbf{A}$ は表 1 に示す一般構造用炭素鋼管 (STK400) 20 種類の部材リストに対応させる。制約条件は、許容応力度計算 [12]による応力制約（基準強度: 235 N/mm^2）と側面制約を与える。荷重条件は長期に自重 78.5 kN/m^3 と等分布荷重 1.0 kN/m^2 を設定する。構造解析は線形弾性範囲で行う。ISGA のパラメータは表 2 の通りとする。なお、本論文では多様な形状を獲得する事を考慮し、ISGA の多様性維持操作の対象を $\mathbf{R}$ に限定する。

NURBS はm_{uv}を大きく設定すると、各制御点の影響範囲が広がり滑らかさが向上するが、計算コストが大きくなる。m_{uv}を小さく設定すると滑らかさが低下する。滑らかさと計算コストの関係から 3D モデリングソフト等では$m_{uv}=4$が採用されることが多い。また、ノットベクトルが開一様の場合、m_{uv}の上限値は制御点数である。従って、数値解析例では$\mathbf{A}$は$m_{uv}=4$で固定、$\mathbf{R}$はm_{uv}を 4 から 7 に設定する。



a. 基準形状鳥瞰図　　b. 解析領域と制御点配置

図 1　解析モデル

表 1　選択部材リスト

番号	外径 [mm]	厚さ [mm]	断面積 [cm^2]	断面二次モーメント [cm^4]
1	101.6	3.2	0.989×10^1	0.120×10^3
2	114.3	3.2	0.112×10^2	0.173×10^3
3	114.3	3.6	0.125×10^2	0.192×10^3
4	139.8	3.6	0.154×10^2	0.357×10^3
5	139.8	4.0	0.171×10^2	0.394×10^3
6	139.8	4.5	0.191×10^2	0.438×10^3
7	165.2	4.5	0.227×10^2	0.734×10^3
8	165.2	5.0	0.252×10^2	0.808×10^3
9	190.7	5.0	0.292×10^2	0.126×10^4
10	190.7	6.0	0.348×10^2	0.149×10^4
11	216.3	6.0	0.396×10^2	0.219×10^4
12	216.3	7.0	0.460×10^2	0.252×10^4
13	267.4	7.0	0.573×10^2	0.486×10^4
14	267.4	8.0	0.652×10^2	0.549×10^4
15	318.5	8.0	0.780×10^2	0.941×10^4
16	318.5	9.0	0.875×10^2	0.105×10^5
17	355.6	9.0	0.980×10^2	0.147×10^5
18	355.6	12.0	0.130×10^3	0.191×10^5
19	406.4	12.0	0.149×10^3	0.289×10^5
20	406.4	16.0	0.196×10^3	0.374×10^5

表 2　ISGA パラメータ

世代数	5000	コーディング	グレイ
個体数	200	選択方式	トーナメント
世代交代率	0.9	交叉方式	2 点交叉
交叉率	0.7	記憶細胞数 M	100
突然変異率	0.7×10^{-3}	クラスタ数 r	10

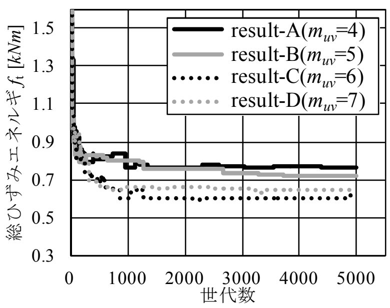


図2　総ひずみエネルギ f_t の遷移

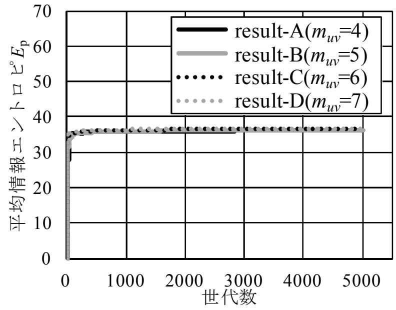


図3　情報エントロピ E_p の遷移

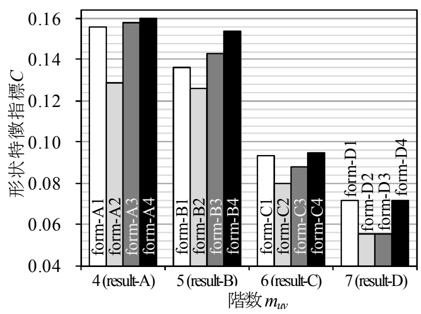
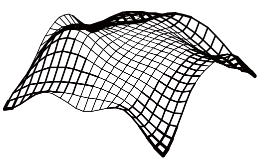
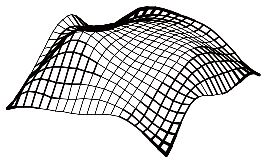


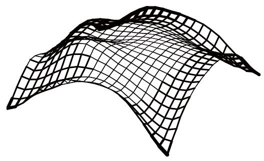
図4　各形態の形状特徴指標 C



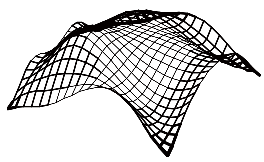
f_t=0.766 *kNm*
E_b=0.221 *kNm*
C=0.156
・form-A1



f_t=0.783 *kNm*
E_b=0.212 *kNm*
C=0.129
・form-A2

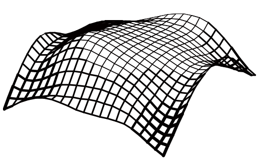


f_t=0.795 *kNm*
E_b=0.211 *kNm*
C=0.158
・form-A3

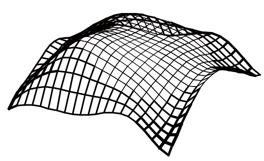


f_t=0.853 *kNm*
E_b=0.223 *kNm*
C=0.160
・form-A4

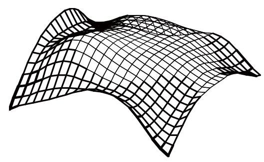
a. result-A(m_{uv}=4)



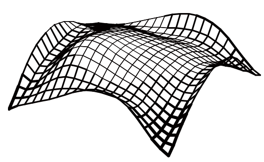
f_t=0.722 *kNm*
E_b=0.144 *kNm*
C=0.136
・form-B1



f_t=0.729 *kNm*
E_b=0.164 *kNm*
C=0.126
・form-B2

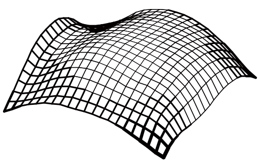


f_t=0.791 *kNm*
E_b=0.209 *kNm*
C=0.143
・form-B3

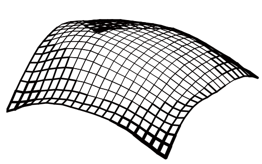


f_t=0.740 *kNm*
E_b=0.176 *kNm*
C=0.154
・form-B4

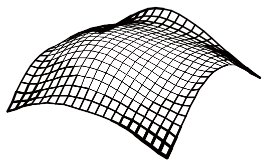
b. result-B(m_{uv}=5)



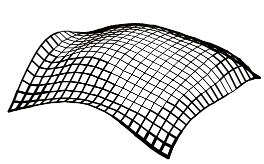
f_t=0.615 *kNm*
E_b=0.129 *kNm*
C=0.934×10^{-1}
・form-C1



f_t=0.619 *kNm*
E_b=0.138 *kNm*
C=0.795×10^{-1}
・form-C2

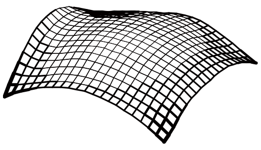


f_t=0.655 *kNm*
E_b=0.176 *kNm*
C=0.882×10^{-1}
・form-C3

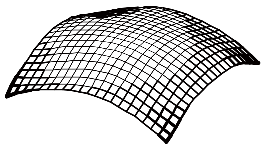


f_t=0.732 *kNm*
E_b=0.135 *kNm*
C=0.948×10^{-1}
・form-C4

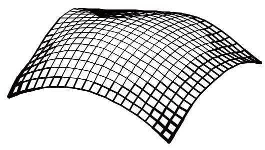
c. result-C(m=6)



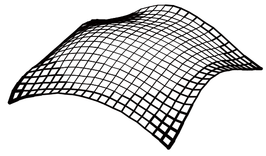
f_t=0.647 *kNm*
E_b=0.136 *kNm*
C=0.719×10^{-1}
・form-D1



f_t=0.651 *kNm*
E_b=0.152 *kNm*
C=0.554×10^{-1}
・form-D2



f_t=0.661 *kNm*
E_b=0.153 *kNm*
C=0.557×10^{-1}
・form-D3



f_t=0.695 *kNm*
E_b=0.155 *kNm*
C=0.715×10^{-1}
・form-D4

d. result-D(m_{uv}=7)

図5　優良解形状例 (Model-1)

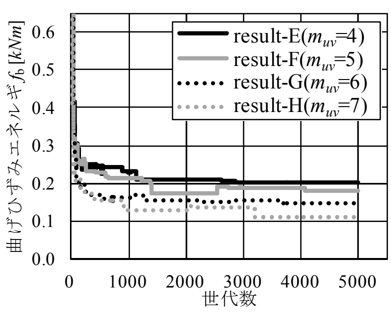


図６　曲げひずみエネルギ f_b の遷移

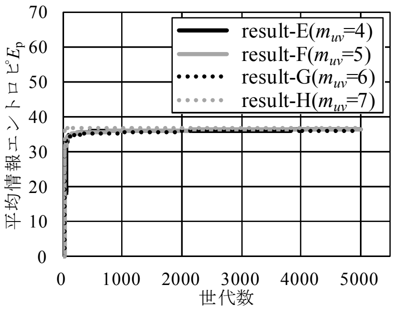


図７　情報エントロピ E_p の遷移

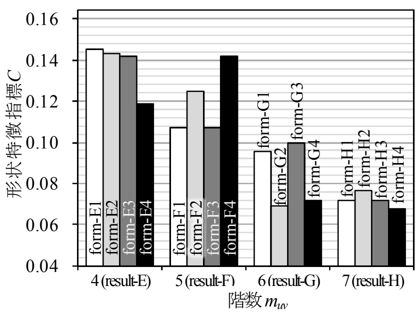
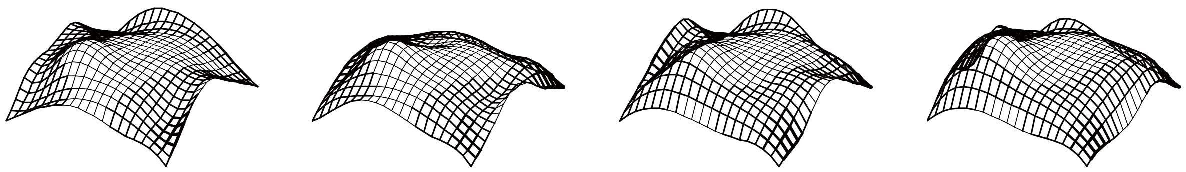
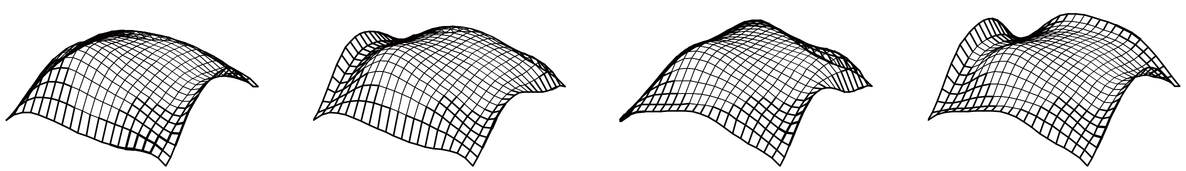


図８　各形態の形状特徴指標 C



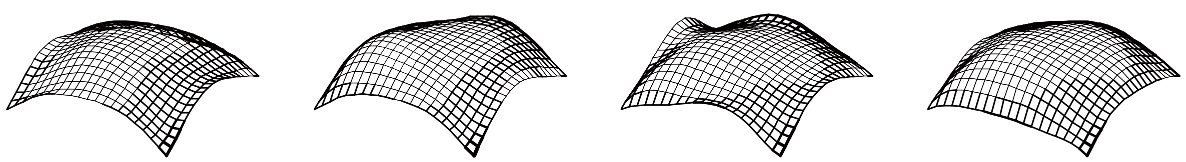
f_b=0.204 kNm	f_b=0.226 kNm	f_b=0.216 kNm	f_b=0.243 kNm
E_t=0.806 kNm	E_t=0.916 kNm	E_t=0.916 kNm	E_t=0.108×10 kNm
C=0.145	C=0.143	C=0.142	C=0.119
･form-E1	･form-E2	･form-E3	･form-E4

a. result-E(m_{uv}=4)



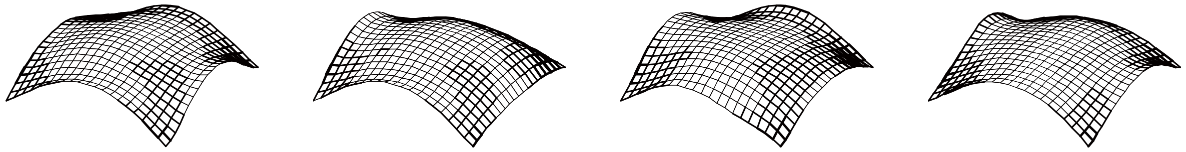
f_b=0.179 kNm	f_b=0.192 kNm	f_b=0.193 kNm	f_b=0.197 kNm
E_t=0.958 kNm	E_t=0.934 kNm	E_t=0.923 kNm	E_t=0.811 kNm
C=0.107	C=0.125	C=0.107	C=0.142
･form-F1	･form-F2	･form-F3	･form-F4

b. result-F(m_{uv}=5)



f_b=0.147 kNm	f_b=0.155 kNm	f_b=0.156 kNm	f_b=0.164 kNm
E_t=0.850 kNm	E_t=0.842 kNm	E_t=0.872 kNm	E_t=0.827 kNm
C=0.955×10^{-1}	C=0.690×10^{-1}	C=0.998×10^{-1}	C=0.718×10^{-1}
･form-G1	･form-G2	･form-G3	･form-G4

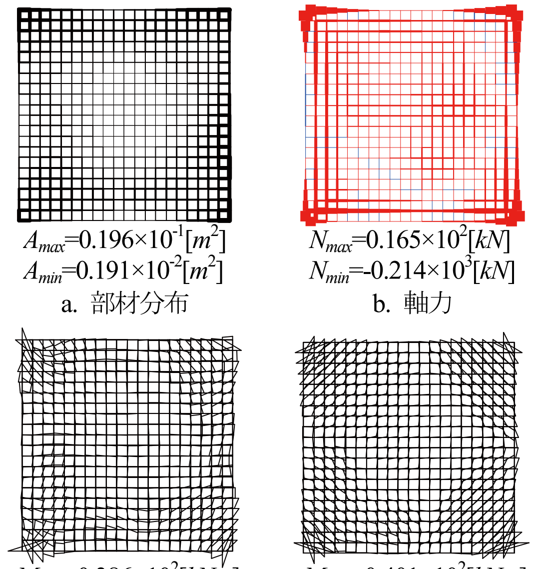
c. result-G(m_{uv}=6)



f_b=0.111 kNm	f_b=0.116 kNm	f_b=0.132 kNm	f_b=0.151 kNm
E_t=0.675 kNm	E_t=0.788 kNm	E_t=0.740 kNm	E_t=0.816 kNm
C=0.721×10^{-1}	C=0.767×10^{-1}	C=0.715×10^{-1}	C=0.679×10^{-1}
･form-H1	･form-H2	･form-H3	･form-H4

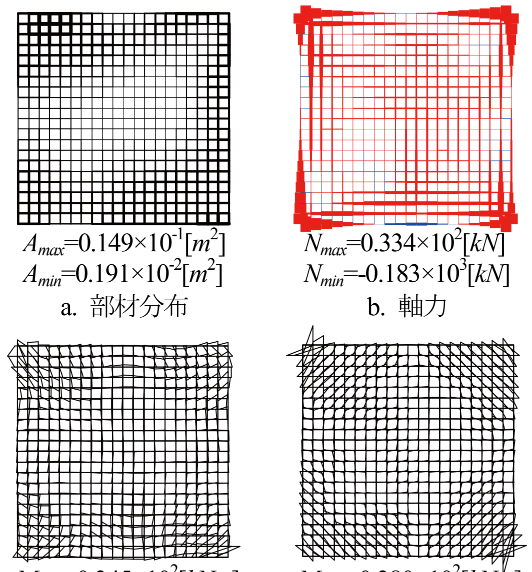
d. result-H(m_{uv}=7)

図９　優良解形状例 (Model-2)



a. 部材分布 A_{max}=0.196×10^{-1}[m^2] A_{min}=0.191×10^{-2}[m^2]
b. 軸力 N_{max}=0.165×10^{2}[kN] N_{min}=-0.214×10^{3}[kN]
c. 面外曲げモーメント ${}_yM_{max}$=0.386×10^{2}[kNm]
d. 面内曲げモーメント ${}_zM_{max}$=0.401×10^{2}[kNm]

図 10　form-A1 の力学性状 (Model-1)



a. 部材分布 A_{max}=0.149×10^{-1}[m^2] A_{min}=0.191×10^{-2}[m^2]
b. 軸力 N_{max}=0.334×10^{2}[kN] N_{min}=-0.183×10^{3}[kN]
c. 面外曲げモーメント ${}_yM_{max}$=0.345×10^{2}[kNm]
d. 面内曲げモーメント ${}_zM_{max}$=0.380×10^{2}[kNm]

図 11　form-E1 の力学性状 (Model-2)

6 解析モデル

解析モデル(Model-1, -2)は、図 1a に示す、一辺 20 m の正方形平板を基準形状としたグリッドシェルである(節点数: 441, 要素数: 840)。境界条件は隅角部をピン支持とする。制御点配置は図 1b に示す。ここでは、凸形状の非対称自由曲面グリッドシェルを得る制約条件として、側面制約の外側に制御点の高さ制約を与える方法を採用する[13]。図 1b の○で示す制約点 $\mathbf{P}_{22}$ の位置で曲面形状が上に凸となるように、式(7)に対応する制御点高さ制約を次式で与える。

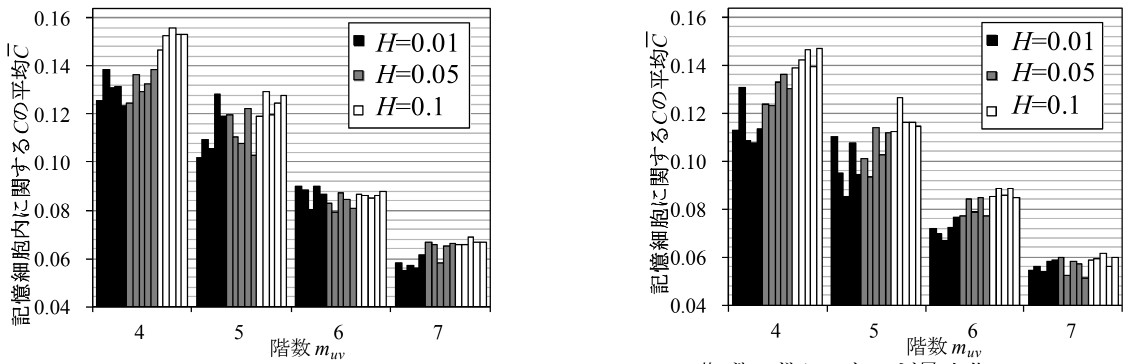
$$ {}_zp_{22} = 15.0\ m \tag{12}$$

7 解析結果と考察

階数 m_{uv} の設定値 4 から 7 に関して、f_t 最小化(Model-1)の結果を図 2-5 に、f_b 最小化(Model-2)の結果を図 6-9 に示す。各々ISGA パラメータ H=0.01, 0.05, 0.1 に対して 5 回試行し、多様性が高い H=0.1 の結果を示す。図 2, 6 は記憶細胞内のエリート解に対する目的関数値の遷移である。図 3, 7 は形状に関する設計変数 $\mathbf{R}$ の平均情報エントロピ E_p の遷移である。E_p は、大きな値の時、設計変数空間における解の多様性が高いことを示す指標(多様度)である。E_p の詳細については文献 9)を参照されたい。図 4, 8 は各々図 5, 9 に示す形態に対する形状特徴指標 C の値である。図 5, 9 は各 m_{uv} の結果の内、特徴的な 4 形態を例示する。各結果の左に示す形態は記憶細胞(解集合)内のエリート解である。図中数値情報は、f_t･f_b: 式(4)に対応する目的関数値, E_t: 総ひずみエネルギ, E_b: 曲げひずみエネルギ, C: 式(2)に対応する形状特徴指標 である。解形態の力学性状は form-A1, -E1 を例に図 10, 11 に示す。図中数値情報は、$A_{\rm max}$･$A_{\rm min}$: 最大･最小断面積, $N_{\rm max}$･$N_{\rm min}$: 最大･最小軸力(正値: 引張力, 負値: 圧縮力), ${}_yM_{\rm max}$･${}_zM_{\rm max}$: 面外･面内最大曲げモーメント である。部材分布と軸力の実線太さは、各々部材断面積、軸力の値に比例させ表示した。図 12 に、各 m_{uv} について、ISGA パラメータ 3 種類の 5 試行結果の記憶細胞に対する $\bar{C}$ を示す。

高さ制約により制約点位置において上に凸となる形状を、各 m_{uv} の設定で複数得た。特に、form-C1 と-C2, form-F2 と-F3, form-G2 と-G3 のように、目的関数値がほぼ同値でも異なる形状を得る。このような形状は ISGA が多様性を維持する探索を行った結果である。

同じ制御点高さ制約を与えた場合でも、m_{uv} を大きく設定すると、小さく設定した場合と比較して制約点位置の凸形状は滑らかとなり、ライズが約 2 m 低くなる(図 5, 9)。これは、m_{uv} を大きく設定すると制御点の影響が弱まり範囲が広がるためである。m_{uv} を小さく設定した場合、制御点の影響が強まり範囲が狭まるため、多様性を考慮するとうねりのある形状が多く得られた。これらの C は比較的大きな値となっている。図 4, 8, 12 より、目的関数の種類に関わらず、m_{uv} を大きく設定する程 C の値が小さくなる。図 10, 11 より、うねりは応力レベルの低い個所に発生する。m_{uv} を大きく設定するにつれて形状のバリエーションが少なくなる傾向を示した。これは、制約点位置の凸形状が滑らかになる事と同じ理由であると考える。



a. 総ひずみエネルギ最小化 (Model-A)　　b. 曲げひずみエネルギ最小化 (Model-B)

図 12　各試行の記憶細胞内解形状に関する C の平均値 $\bar{C}$

なお、図 3, 7 より、m_{uv} に関わらず設計変数の多様性が高い探索が行われている。エリート解の目的関数値は、m_{uv} を大きく設定する程小さくなる。これは、制約点位置のライズが低くなることで非対称の制約が緩和されたためと考える。目的関数の種類による違いは、Model-1 の $\bar{C}$ が Model-2 と比較して小さい傾向を示した(図 12)。つまり、f_b 最小化の解は f_t 最小化と比較して、曲率が小さい形状を得る。

8　結語

本論文では、優良解探索 GA 系解法 ISGA をグリッドシェルの単一目的最適化に適用し、自由曲面形状を記述する NURBS のパラメータ設定値(階数)と優良解の関係を確認した。その際、形状の特徴(うねりの強弱)に関する指標に、主曲率の絶対値を採った平均曲率を利用した。

階数は制御点の影響を変化させるパラメータであり、大きく設定する程曲率の小さな形状が得られる。階数が優良解に与える影響は、うねりの強弱であることを示した。目的関数に関しては、総ひずみエネルギ最小化と比較して曲げひずみエネルギ最小化は、曲率が小さい解形状を獲得する。

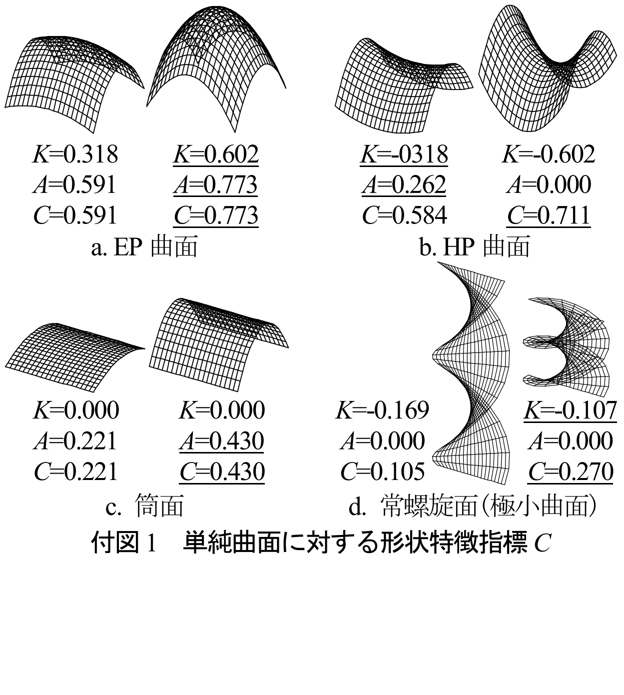
本論文で示した制御点高さ制約は、曲面の座標値を指定できず、階数の設定値によって制約点位置のライズが変わる。文献 14)ではベジエの補間を行うことで設計変数を曲面上の任意節点座標とする方法が採られている。今後はこの方法を NURBS に適用し、曲面座標を指定した制約下で優良解とパラメータの関係を確認したい。

参考文献

1) KOLAREVIC B.: Architecture in Digital Age – Design and Manufacturing, Taylor and Francis, 2005.
2) 日本建築学会編: ラチスシェルの黎明期を支えた理論・技術・施工 -先人の手法をどう学ぶか- 日本建築学会大会(関東) 構造部門(シェル・空間構造) パネルディスカッション資料, 日本建築学会, 2011. 8.
3) 三井和男, 大崎純, 大森博司, 田川浩, 本間俊雄: *発見的手法による構造フォルムとシステム*, コロナ社, 2004.
4) 日本建築学会編: *空間構造におけるコンピュータ利用の新しい試み*, 日本建築学会・丸善, 2005.
5) H. Ohmori , K. Yamamoto: Shape optimization of shell and spatial structures for specified stress distribution. Part 2: Space frame analysis, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, **39**(3), 147-157, 1998. 12.
6) 藤田慎之輔, 大崎純: ラチスシェルの部材一様化のための最適化手法, コロキウム構造形態の解析と創生 2010, 71-76, 2010. 10.
7) 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.
8) 本間俊雄, 和田大典, 永田洸大, 沖田裕介: 優良解探索機能を導入した GA 系解法及び SI 系解法の特性と構造形態創生, 日本建築学会シンポジウム「ソフトコンピューティングの最前線」講演論文集, 日本建築学会, 21-32, 2011. 7.
9) Y. Okita, T. Honma: Structural morphogenesis for free-form grid shell using genetic algorithms with manipulation of decent solution search, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, **53**(3), 177-184, 2012. 9.
10) 三浦曜, 望月一正: *CAD・CG 技術者のための実践 NURBS*, 工業調査会, 2001.
11) 小林昭七: *曲線と曲面の微分幾何*, 裳華房, 1996. 5.
12) 日本建築学会: *鋼構造設計規準 許容応力度設計法*, 日本建築学会, 2005.
13) 沖田裕介, 和田大典, 本間俊雄: 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, コロキウム構造形態の解析と創生 2010, 121-126, 2010. 10.
14) 和田大典, 本間俊雄: 自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性, 日本建築学会, 構造工学論文集, **58B**, 453-460, 2012. 3.

付録　形状特徴指標 C の比較検討

式(5)の形状特徴指標 C が、曲がりが強い曲面程大きな値となることを示す。EP, HP, 筒, 極小曲面に対して計算した結果を付図 1 に示す。各曲面式の係数を変更し、右が左よりも曲がりの強い形状とした。図中には、ガウス曲率を利用した K と平均曲率を利用した A を併せて示した。二つの形状を比較して大きい値には下線で示す。C はいずれの曲面に対しても右の方が大きな値を示しており、形状の曲がり具合を表す指標として有効である。



付図 1　単純曲面に対する形状特徴指標 C

断面形状変化によるアルミニウム建築の重量最小化

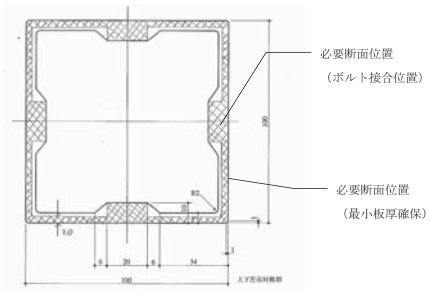
長野 光朗[1)]，大森 博司[2)]
1)名古屋大学大学院環境学研究科，大学院生，nagano@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp
2)名古屋大学大学院環境学研究科，教授，工博, hero@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

1　序論

今日、持続可能な社会が求められている現代において，アルミニウム建築は多大な注目を浴びている。しかし，アルミニウム建築が求められているにもかかわらず，未だ広く一般に普及していると言えない。その最大の理由の一つに，コストの問題が挙げられる。アルミニウム押出形材は，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り，アルミニウム押出形材を構造部材に使用する建築家が少ないのも現状である。そのため，アルミニウム押出形材のコストを削減し，アルミニウム押出形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に必要なことであり，重要な課題になっている。

そこで，田邉らにより発見的手法(大域的最適化手法)と理論的手法(局所的最適化手法)の連携による新たな手法の提案[1]を行い，多峰性のある目的関数を有する設計問題の大域的最適解を効率良く探索する手法の開発がされ，アルミニウム押出形材の断面形状を設計変数にし，要求される断面性能を維持しながら断面積を最小化する断面形状最適化問題に適用し有効性の検証が行われてきた。さらに川崎らにより，アルミニウム押出形材の無垢からの断面設計手法の提案[2]がされ，ある断面性能をもった最小断面積の断面の開発が行われてきた。

今まで以上に，コストを削減し，設計者の手間を省くためには，構造物全体の断面形状を決定し，重量最小化を目指すプログラムの開発が必要である。本研究では断面形状最適化のプログラムを使い，構造物の全ての断面の性能を評価しながら，断面を変化させることで，建物全体の重量を最小化するプログラムを開発する事を目的とする。



a. 基断面
・□-100×100の無垢材
b, 断面の必須条件
・外径寸法□-100×100
・断面2次半径 i=3.7cm以上
・断面2次モーメント I=280cm^{4}以上(Ix, Iyとも)
c. 目標断面
・最小断面積断面

図1　柱材要求条件の詳細

2　断面形状最適化手法

ここでは，本研究の重量最小化に用いる，文献[1]の断面形状最適化手法について述べる。

図1のような断面を考える。同図中に示す制約条件が設けられている場合，その制約条件を満たすように断面の形を変化させ，断面積を最小化する事を考える。断面は，上下左右で対称な形状をしているため，図 2に示す1/4領域を解析対象とする。対象とする柱材断面は，外形寸法の形状修正は許されていないため，図中に○で示した 17 個の節点番号 (1-3,13-26) は不動節点として設定し，残りの□で示した節点番号 (4-12) の座標を設計変数とする。また，各部位の板厚条件を考慮し，柱材断面における実行可能範囲は図 2に示す薄黒の範囲とする。実行可能範囲の詳細は，最低板厚の $t = 3$mm を満足するために，実行可能範囲のX，Y方向の最大値をそれぞれ47mm と設定し，ボルト接合部位の必要断面位置を満足するため，最小値をX，Y方向にそれぞれ10mm と設定する。これによって囲まれた範囲が図中の薄黒の範囲になる。また，図中で斜線で示されている部分が必要断面位置を示している。その結果，図3(a)のような断面が図3(b)のように変化していき，制約条件を満たしながら断面積を最小化している。

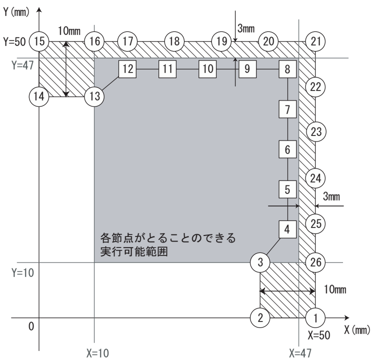
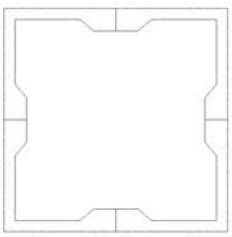
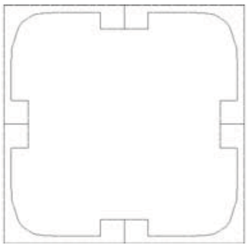


図2　柱材断面における解析モデルと実行可能範囲



Area	24.2 cm^2
I_x	335 cm^4
I_y	335 cm^4
i_x	3.72 cm
i_y	3.72 cm
Z_x	67.1 cm^3
Z_y	67.1 cm^3

(a)初期断面



Area	20.3 cm^2
I_x	283 cm^4
I_y	280 cm^4
i_x	3.73 cm
i_y	3.71 cm
Z_x	56.6 cm^3
Z_y	56.1 cm^3

(b)最適化断面

図3　断面形状の変化

3　重量最小化手法

ここでは簡単のために図4の建物の重量最小化をするプログラムを考える。以下に既存断面に対する断面最適化手法を利用した，重量最小化プログラムのアルゴリズムを示す。

1. 図4の部材１，２，３において，柱には矩形，梁にはH形などのように，あらかじめ形を決め，図5のような断面を考える。図5中の$a_1, a_2, s, b, h, t_1, t_2$については，取り得る値の範囲を決めておく。
2. 発生させた断面を基に応力計算を行う。
3. 求めた応力を基にし，許容応力度などを計算し制約条件にする。図5中の$a_1, a_2, s, b, h, t_1, t_2$を設計変数にして，目的関数をminimize $\sum Al$として，数理計画法を用いて新たなa_1〜t_2を発生させる。(図6)
4. 収束の終了条件を満たしたら５へ，それ以外は２に戻る。
5. 求まった断面を初期断面として，求めた応力を基にした断面の検定式などを制約条件し，目的関数をminimize $\sum Al$として，断面形状最適化手法を用いて新たな断面を発生させる。(図7)
6. 収束の終了条件を満たしたら終了，それ以外は５に戻る。

この方法では，初めに図5から図6にかけてどの位置にどれくらいの大きさの断面の部材を配置すれば総重量を最小化できるか評価し，その後図6から図7にかけてそれぞれの部材について更に細かく断面積を減少させているので，建物全体の重量を評価できる。

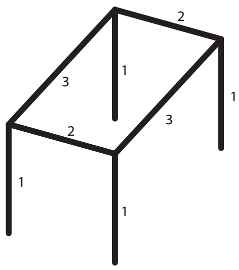
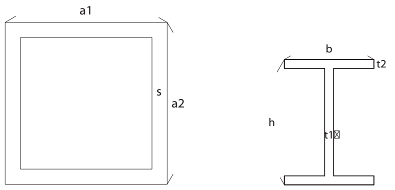
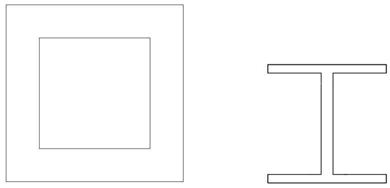


図4　解析対象



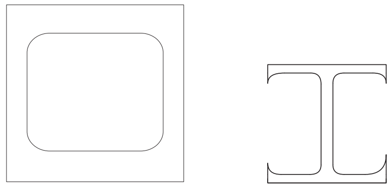
(a) 柱材断面　　(b)梁材断面

図5　初期断面



(a) 柱材断面　　(b)梁材断面

図6　断面最適化の初期断面



(a) 柱材断面　　(b)梁材断面

図7　最適化断面

4　制約付き最適化問題の定式化

ここでは，制約付き最適化問題の解析手法について述べる。

最適化問題は次式で与える。

$$
\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & f(x) = \rho \sum_{i=1}^{N} A_i l_i \\
\text{subject to} \quad & \sigma_i \leq \sigma_a \\
& R_j \leq R_a \\
& \delta_i \leq \delta_a \\
& x_i \leq x_a
\end{aligned} \tag{1}
$$

x　部材形状
A_i　i部材の断面積
l_i　i部材の部材長
N　部材総数
ρ　アルミニウムの比重（2.7）
σ_i　i部材の応力度（曲げ，圧縮，引張，せん断）
σ_a　許容応力度（曲げ，圧縮，引張，せん断）
R_j　j層の層間変形角
R_a　許容層間変形角（1/200）
δ_i　i部材のたわみ（梁について）
δ_a　許容梁たわみ（梁スパン×1/250）
x_a　部材形状の制約条件

(1)式の制約条件を満たしながら，断面積を変化させていき，目的関数である重量（体積）を最小となるように梁，柱の断面積を変化させていく最適化問題である。

制約付き最適化問題の解法は，逐次二次計画法，乗数法など様々あるが，今回はペナルティ法を用いて制約付き最適化問題を制約なし最適化問題とし，それを最急降下法を用いて解いた。

4.1　ペナルティ法による制約付き最適化問題の無制約化

制約付き最適化問題(2)式がある時，式(2)の制約条件を式(3)のように扱い，目的関数を(4)式のように書き換える事で制約なしの最適化問題とした。(4)式のαは制約条件に重みをつけるパラメータである。無制約最適化問題となったこの問題を最急降下法を用いて解いていく。

$$
\begin{aligned}
\text{minimize} \quad & f(x) \\
\text{subject to} \quad & g_i(x) \leq 0
\end{aligned} \tag{2}
$$

$$
g_i(x) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad g_i(x) \leq 0 \\ g_i(x) & \text{if} \quad g_i(x) > 0 \end{cases} \tag{3}
$$

$$
\text{minimize} \quad f(x) + \alpha \sum_{i=1}^{n} g_i(x) \tag{4}
$$

4.2　最急降下法

降下法は、目的関数の微分(勾配) の情報を用いることにより、各反復において必ず目的関数の値を減らす反復法である。

ここでは、目的関数f を制約なしで最小化する次の問題を扱う。

$$
\text{minimize}\, f(\boldsymbol{x}) \tag{5}
$$

制約なし最小化問題の解法の1 つである降下法は，目的関数の値を減らす(降下する) 点を$\boldsymbol{x}^1, \boldsymbol{x}^2, . . .$ と生成していく反復法であり，

$$
f(\boldsymbol{x}^0) > f(\boldsymbol{x}^1) > \cdots \tag{6}
$$

となる点列$\boldsymbol{x}^k$ を生成する。このような点列は、各反復において、方向ベクトル$\boldsymbol{d}^k$ とステップ幅α_k が求めた後、

$$
\boldsymbol{x}^{k+1} = \boldsymbol{x}^k + \alpha^k \boldsymbol{d}^k \tag{7}
$$

と与えられる。降下法では，探索方向$\boldsymbol{d}^k$ が次の条件を満たしている必要がある。

$$
\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)^T \boldsymbol{d}^k < 0 \tag{8}
$$

このような条件を満たしてるベクトル$\boldsymbol{d}^k$ を降下方向とよぶ。この降下方向を決める方法として**最急降下法**(steepest descent method)と呼ばれる方法がある。この方法は点$\boldsymbol{x}^k$における方向ベクトル$\boldsymbol{d}^k$として

$$
\boldsymbol{d}^k = -\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k) \tag{9}
$$

をとる方法である。探索方向ベクトルが$\boldsymbol{d}^k = -\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)$で決めるので、$\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k) \neq 0$ならば、

$$
\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)^T \boldsymbol{d}^k = -\|\boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)\|^2 < 0 \tag{10}
$$

となり、式(8)より探索方向ベクトル$\boldsymbol{d}^k$は、$\boldsymbol{x}^k$における降下方向を取っている。最急降下法を使う際には，ステップ幅を決める方法も重要になってくる。ステップ幅を決める方法は，Curryの規則，Altmanの規則，Goldsteinの法則などいくつかあるが，今回はArmijoの方法と呼ばれる手法を用いた。

Armijoの方法

$\mu \in (0,1), \beta \in (0,1)$に対して

$$f(\boldsymbol{x}^k + \beta^l \boldsymbol{d}^k) - f(\boldsymbol{x}^k) \leq \mu\beta^l \boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)\boldsymbol{d}^k \tag{11}$$

を満たす最小の非負整数lを求めステップ幅を$\alpha^k = \beta^l$と決定する方法を**Armijoのの方法**という。アルゴリズムを以下に示す

$$\theta(l) = f(\boldsymbol{x}^k + \beta^l \boldsymbol{d}^k) - f(\boldsymbol{x}^k) - \mu\beta^l \boldsymbol{\nabla} f(\boldsymbol{x}^k)\boldsymbol{d}^k \tag{12}$$

とする。

1. $\mu \in (0,1), \beta \in (0,1), l = 0$とする。
2. $\theta(l) \leq 0$ならストップ
3. $l = l + 1$とおいて2にいく。

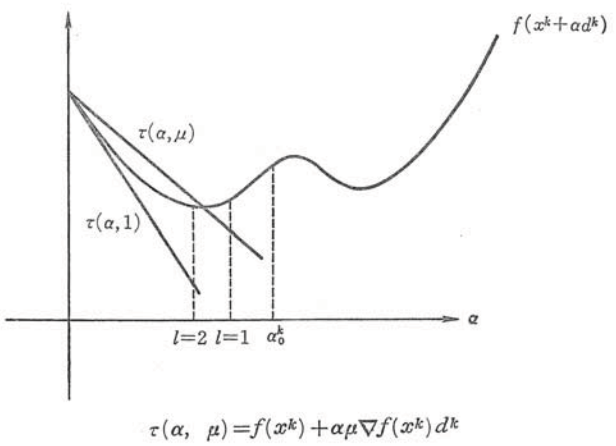


図8　Armijoの方法

このようにペナルティ法と最急降下法を用いる事で，最適化問題を解いていく。よって式(1)は式(13)のようになり，今後はこれを最急降下法を用いて解いていく。

$$\text{minimize} \quad f(x) = \rho\sum_{i=1}^{N} A_i l_i + \alpha\sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{4}(g_{ik}(x)) \tag{13}$$

$$g_{i1}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad \sigma_i - \sigma_a \leq 0 \\ \sigma_i - \sigma_a & \text{if} \quad \sigma_i - \sigma_a > 0 \end{cases} \tag{14}$$

$$g_{i2}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad R_i - R_a \leq 0 \\ R_i - R_a & \text{if} \quad R_i - R_a > 0 \end{cases} \tag{15}$$

$$g_{i3}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad \delta_i - \delta_a \leq 0 \\ \delta_i - \delta_a & \text{if} \quad \delta_i - \delta_a > 0 \end{cases} \tag{16}$$

$$g_{i4}(x) = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad x_i - x_a \leq 0 \\ x_i - x_a & \text{if} \quad x_i - x_a > 0 \end{cases} \tag{17}$$

5　数値解析例　-2次元単純モデル-

5.1　解析モデル

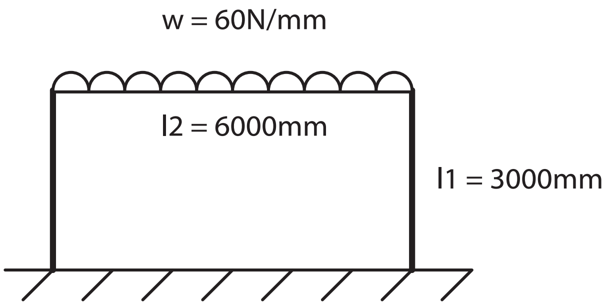


図9　2次元単純モデル

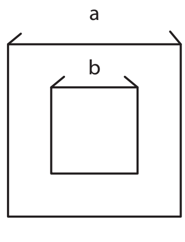


図10　柱，梁の断面

前節で定式化したものを用いて，2次元の単純モデルに対して解析を行う。図9に今回解析する架構について示す。柱が3000mm，梁が6000mmであり，梁に60N/mm の分布荷重がかかっている。支持条件は固定端としている。計算を簡単にするために，柱と梁どちらも断面は正方形の対称な図10の断面とした。２本の柱の断面は同じとし，断面寸法を(a_1, b_1)とし，梁の断面寸法を(a_2, b_2)とする。解析に用いた制約条件は，断面寸法に関する制約条件と応力に関する制約条件のみとした。また，断面の寸法の上限は，500mmとした。

5.2　解析方法

解析は，(a_1, b_1, a_2, b_2)の値を1～1000の値でランダムに発生させ，その値について最急降下法で20回計算させ，これを2000回繰り返す事を行う。これは，モデルが簡単なため解析が早く収束することと，結果の初期値への依存度が高いのを考慮したためである。以下に計算のフローを示す。

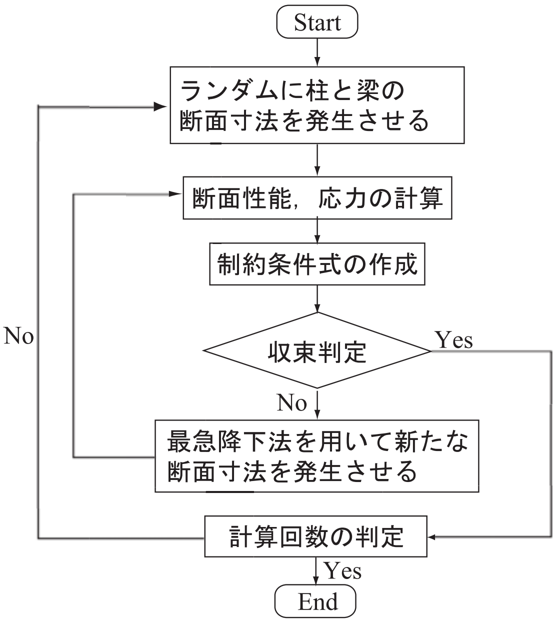
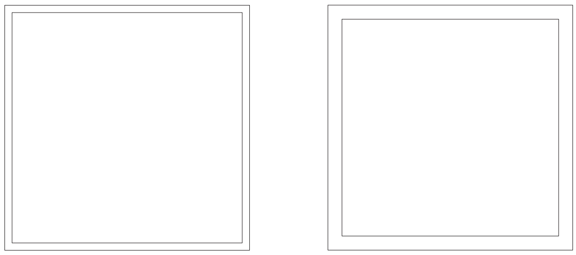


図11　計算フロー

5.3　解析結果

次に解析結果を示す。図12の(a)に柱材最終形状を，(b)に梁材の最終形状を示し，その時の断面寸法を表1に示す。また，最終断面形状が得られた時の，柱の断面寸法の変化を図13に，梁の断面寸法の変化を図14に，柱の断面積の変化を図15に，梁の断面積の変化を図16に，柱の断面2次モーメントの変化を図17に，梁の断面2次モーメントの変化を図18に，全体の重量である目的関数の推移を図19に示す。なお，最終形状は制約条件を全て満たしたものとなっている。

断面の寸法は，柱，梁ともに内側はより大きく，外側はより小さくなっていき，断面の厚さを小さくすることで断面積が小さくなり，全体の重量を小さくしていっていることが分かる。それに伴って最終断面は，かなり厚さの薄い断面となった。外形寸法が大きいので，より小さな断面積で必要な断面二次モーメントや断面係数などの断面性能を確保しているといえる。



(a) 柱材最終形状　　(b)梁材最終形状

図12　断面最終形状

表１　最終断面の断面性能

	a(cm)	b(cm)	A(cm^2)	I(cm^4)	Z(cm^3)
柱	43.50	40.86	22.33	66290	1524
梁	43.47	38.49	40.83	114700	2639

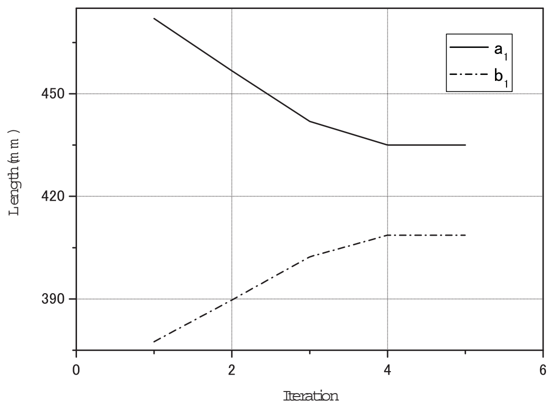


図13　柱材断面寸法

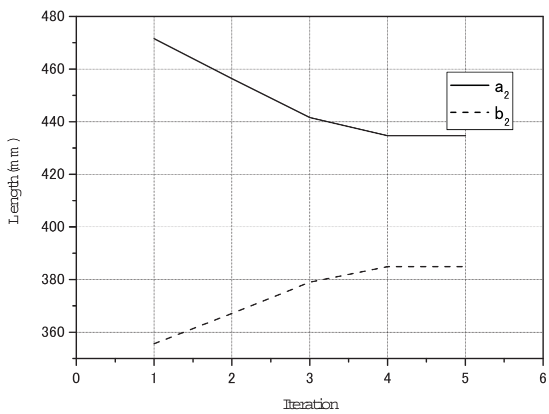


図14　梁材断面寸法

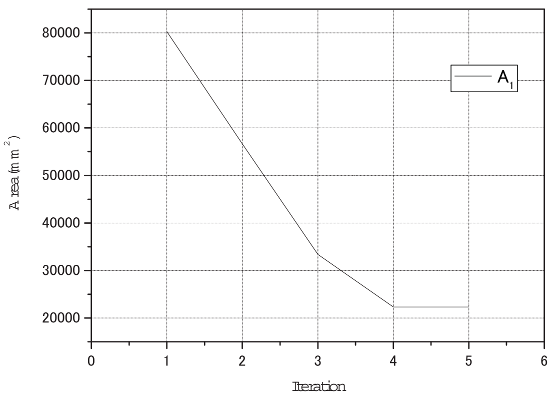


図15　柱材断面積

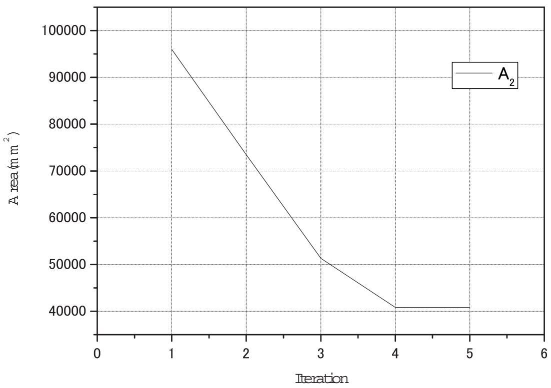


図16　梁材断面積

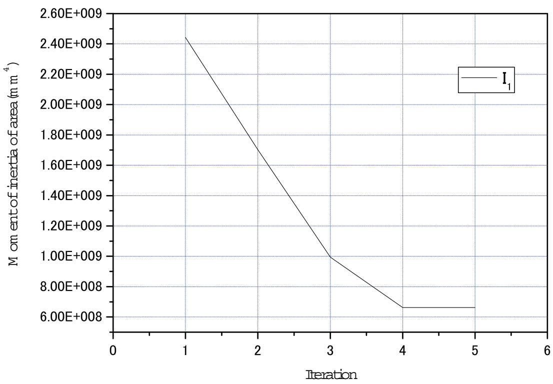


図17　柱材断面2次モーメント

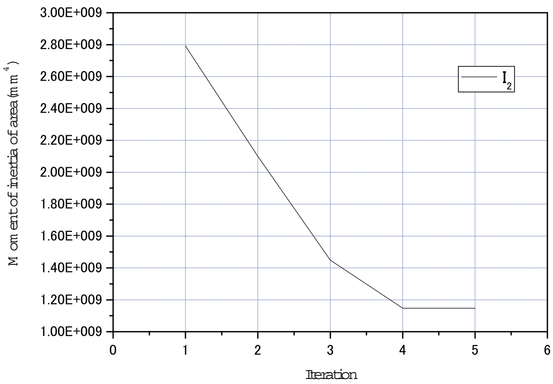


図18　梁材断面2次モーメント

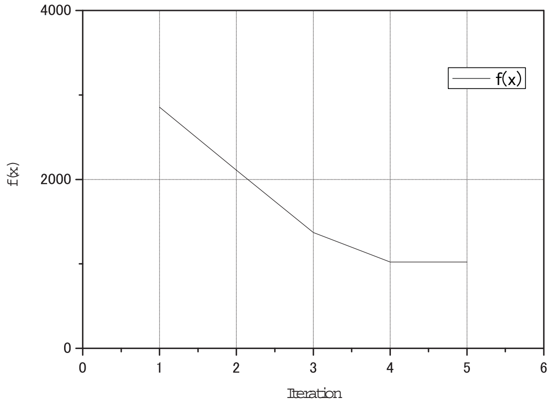


図19　目的関数

6　結論

アルミニウム構造物の重量最小化に関する手法を提案した。この手法が用いれば，建物全体の重量を評価をすることができるので，コスト削減に貢献ができる。また，構造物の全ての断面の形が決まるので，設計の手間も大きく削減できるといえる。今回は簡単な例題に対してのみの解析となったが，断面は断面2次モーメントなどの断面性能は大きく断面積は小さいものとなり，それによりより小さい重量で構造物を設計できている。

今後はさらに大きく複雑な構造物に対して解析を行う事や，制約条件をより実際の設計に近いものにしていく事，また鉄骨造などとのコストの比較などを行っていく事を考えている。

参考文献

1）田邉昌基，桜井 克頼，大森 博司，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形材の最適断面算出システムの開発（その2大域的・局所的最適化手法の連携手法への拡張），日本建築学会学術講演梗概集，B-1， pp.343-344， 2009
2）川崎将臣，長野光朗，大森 博司，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形材の最適断面算出システムの開発（その5無垢からの断面生成），日本建築学会学術講演梗概集，B-1， pp.345-346, 2011
3）谷口健男：FEMのための要素自1.0割　デローニー三角分割法の利用，森北出版，1992
4）小島政和：土谷隆，水野眞治，矢部博：内点法，朝倉書店，2001
5）飯嶋俊比古：アルミニウム建築構造設計 -新たなる建築の可能性-，鹿島出版社，2006
6）アルミニウム構造協議会,アルミニウム建築　構造設計規準･同解説，2007

細胞の性質（増殖・消滅・伸縮が同時発生）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)]，益田　翼 [2)]

1 ）有明工業高等専門学校建築学科，准教授，博士（工学）
2 ）有明工業高等専門学校専攻科建築学専攻，学生

1 ．序

最適化の研究の歴史は古く，百数十年以上も前から様々な最適化手法が考案されている．たとえば，適応度の高い個体を優先的に選択して近似解を探索する遺伝的アルゴリズムや，応力の小さい部材を取り除いていくグランドストラクチャ法などがあげられる．これらの最適化手法を応用して形態創生された建築構造物が近年見られ，建築構造物における様々な形態創生手法が開発されている状況である．

一方，構造的およびデザイン的に優れている生物の形態を応用して創生された建築構造物が見られる．しかし，生物を構成する細胞に着目して形態創生した建築構造物は，ほとんど見られない．生物の形態が細胞の特性により決定されていることに着目すれば，生物の形態発生手法を建築構造物にも応用できると考えられる．

このような背景より，本研究では，細胞の発生や成長などの細胞の性質を建築構造物の形態創生へ応用することにより，さらに自由でユニークな建築構造物の形態創生を目的とする．細胞の代表的な性質は，成長・分裂（増殖）・柔軟・分化・移動・接着・伸縮・細胞死（消滅）が挙げられるが（図 1 参照），本研究において，その中の成長，分裂（増殖），伸縮および細胞死（消滅）を応用した建築構造物の形態創生手法について確立している．そこで，本論文では，細胞の代表的な性質である成長（図 1 (a))，分裂（増殖）（図 1 (b))，移動（図 1 (e))，伸縮（図 1 (g))および細胞死（以下，消滅と称す（図 1 (h))が同時発生する形態創生手法について検討した結果について報告する．

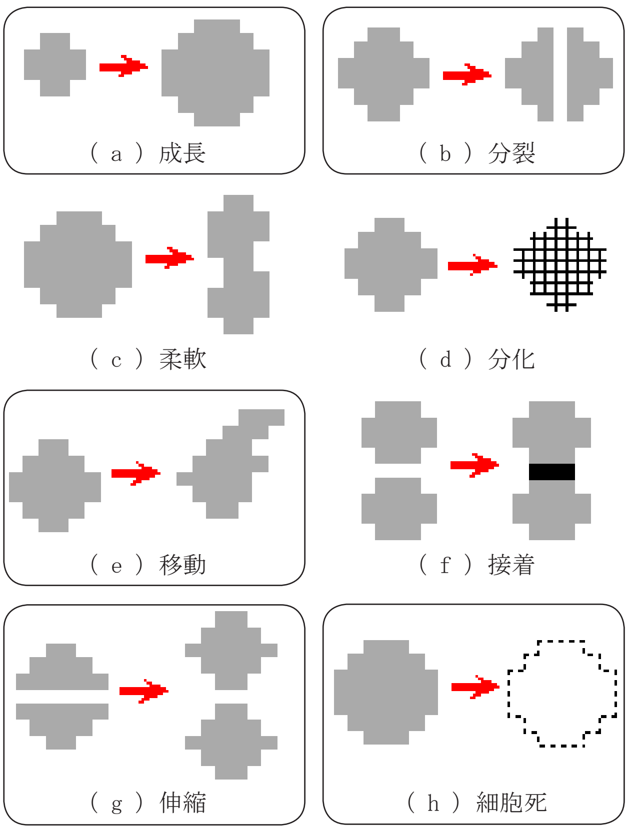


図 1　代表的な細胞の性質（イメージ図）

2 ． 形態創生に用いるモデル

本研究で用いるスプリングネットワークモデルを図 2 に示す．スプリングネットワークモデルとは，質点間をバネで連結した質点バネモデルである．粒子は細胞として，スプリングは細胞間に働く力として表現する．各粒子には情報が組み込まれており，粒子が自分自身の状態を常に把握している．

本論文では，トラス構造物を対象としているため，スプリングネットワークモデルにおける粒子部分をトラス構造物におけるノードとして，スプリング部分をトラス構造におけるトラス部材として，それぞれをモデル化する．本研究では，粒子およびスプリングにステンレス（ SUS304 ）を使用する．また，粒子（ノード）の半径は 6.0 (cm) であり，スプリング（トラス部材）の半径およびバネ定数は 3.0 (cm) および 6.0 (N / m) である．

3 ． 本研究における形態創生方法

本研究で考えている形態創生方法は，下記のとおりである．これらを組み合わせることにより，建築構造物の形態を創生する．

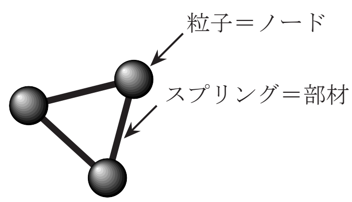


図 2　スプリングネットワークモデル

3.1　粒子の分裂および増殖による形態創生

粒子の分裂および増殖による形態創生を図 3 に示す．図 3 において，増殖粒子を青色で，内側粒子を赤色で，生まれる粒子（娘粒子）を緑色で，それぞれを示す．

内側粒子 1 個および外側粒子 6 個の合計 7 個の粒子から構成される初期状態（図 3（ a ））から，外側粒子が増殖を繰り返すことにより，初期形態（外力を作用させることが可能な状態）を創生する．ただし，乱数が粒子分裂確率以下の場合に，外側粒子のみが分裂・増殖して形態を創生する．乱数によって決定された増殖粒子は，連結している内側粒子数を確認したのち，増殖粒子に連結している内側粒子の数が 1 個ならば娘粒子は 3 個（図 3（ b ）），連結している内側粒子の数が 2 個ならば娘粒子は 2 個（図 3（ c ）），連結している内側粒子の数が 3 個以上ならば娘粒子は 1 個（図 3（ d ））と，内側粒子数によって増殖する粒子数を決定する．さらに，増殖粒子に連結している粒子の情報から方向ベクトルを算出したのち，この方向ベクトルの作用する方向に初速度を与えることにより初期形態を創生する．また，粒子の増殖にともない，スプリングも増殖する．

3.2　スプリングの変化による形態創生

スプリングの消滅・増殖・伸縮による形態創生の一例を図 4 に示す．細胞の増殖，消滅および伸縮をシミュレーションするため，スプリングに生じる応力（軸方向力）および伸縮量から増殖，消滅および伸縮を決定する．つまり，固定荷重や積載荷重および外力を作用させた際に生じるスプリングのひずみ量により，スプリングの消滅あるいは粒子の増殖を決定する．初期形態に外力を作用させて，形態に変化を生じなくなったときに，各スプリングのひずみエネルギーを算出する．スプリングの応力（軸方向力）が設定値未満の場合には，スプリングを消滅させる（図 4（ b ））．あわせて，スプリングの消滅にともなって，不必要な粒子も消滅させる．また，スプリングの応力（軸方向力）が設定値以上の場合には，スプリングおよび粒子を増殖させる（図 4（ c ））．

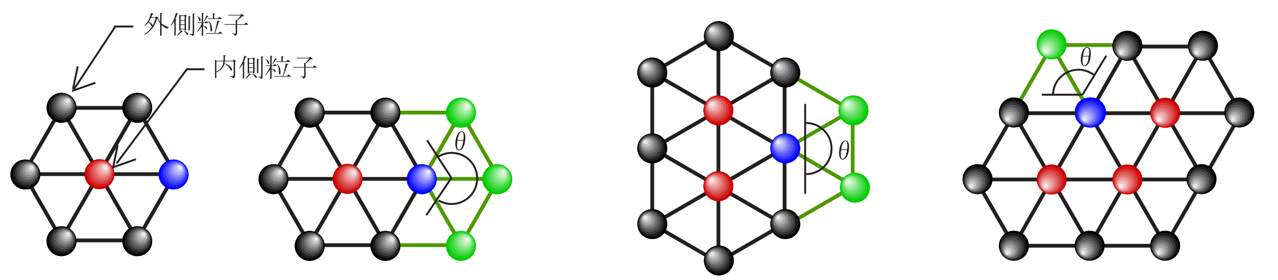
スプリングの伸縮による形態創生の一例を図 4（ d ）に示す．発生している形態に外力を作用させて，各スプリングの伸縮量を算出する．スプリングの伸縮量が設定値以上の場合は，スプリングは伸縮量に応じて伸長する．また，スプリングの伸縮量が設定値未満の場合には，スプリングが伸縮量の逆数だけ収縮する．

4．目的関数および収束条件

本研究では，創生されたトラス構造物の総ひずみエネルギーを目的関数とする．その目的関数を下式に示す．この目的関数を最小化することを収束条件とする．

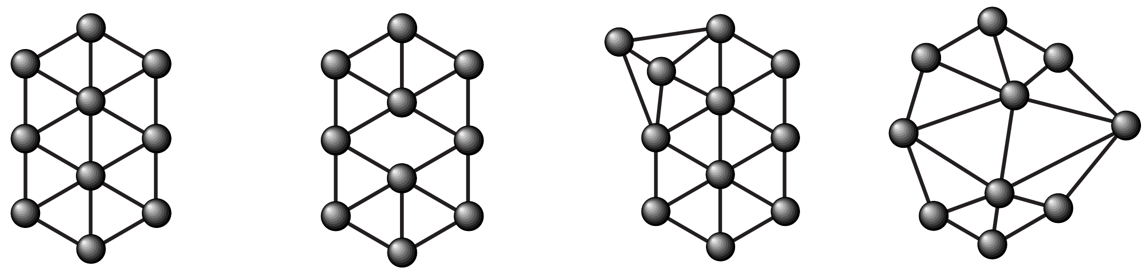
$$\text{目的関数：}\ U = \frac{1}{2}\Sigma\frac{N^2\ell}{EA} \quad \rightarrow \ \text{Minimize}$$

ここで，N はスプリング（部材）に作用する軸方向力，ℓ は部材長さ，E はスプリング（部材）のヤング



（ a ）初期状態　（ b ）内側粒子:1 個（θ:鈍角）（ c ）内側粒子:2 個（θ:180°）（ d ）内側粒子:3 個（θ:鋭角）

図 3　粒子の分裂および増殖による形態創生



（ a ）初期形態　（ b ）消滅後の状態　（ c ）増殖後の状態　（ d ）伸縮後の状態

図 4 スプリングの消滅・増殖・伸縮による形態創生の一例

係数および A はスプリング（部材）の断面積である．

トラス構造物のひずみエネルギーを求めるため，下式により，軸方向力を算出する．

$$F = kx$$

ここで，F は軸方向力，k は部材のバネ定数および x はトラス部材の伸縮量である．なお，F については，引張力を正の力とする．

5．形態創生の手順

本論文では，下記の手順でトラス構造を創生させる．なお，本研究では Processing を使用した．

Step 1：使用する材料の設定

使用する材料およびその材料の力学的性質を設定する．

Step 2：初期形態の発生

初期状態から初期形態となるまで，ノードや部材を増殖させる．

Step 3：支点の決定

1 個の内側粒子（ノード）と連結する外側粒子（ノード）を固定する．

Step 4：外力による変形

固定していないノードに外力を作用させて，形態を変形させる．

Step 5：部材の伸縮・増殖・消滅

部材の伸縮量に応じて，部材を収縮あるいは伸長させる．あわせて，ひずみエネルギーの大小により，ノードや部材の消滅あるいは増殖させる．

Step 6：最終形態の発生

創生した形態に変化を生じなくなるまで，前述の Step 4 から Step 5 を繰り返す．創生した形態に変化を生じなくなれば，シミュレーションを終了する．

6．形態創生の結果

前節 5 の手順により創生されたトラス構造物の一例を図 5 に示す．図 5 は時系列により示しており，ノード数：50（個），部材長さ：50（cm），外力：自重＋屋根＋積雪の場合における結果である．

外力の作用後，ノードや部材の消滅・増殖・伸縮により，トラス構造物を創生していることがわかる．特に，ノードの増殖後に部材が大きく伸縮しており，参考文献（3）と比較してもユニークな形態を創生している．ただ，ノードの重なりなど実構造物として成立しない箇所もみられた．

7．本形態創生手法の検証

本研究で考えている形態創生手法の特性や問題点を把握するため，下記の 3 つのケースについて検討した．なお，条件について，シミュレーションを 5 回ずつ試みた．

Case 1：最大ノード数を変化させた場合

50（個），100（個），150（個），200（個）

Case 2：初期部材長さを変化させた場合

50（cm），75（cm），100（cm），125（cm）

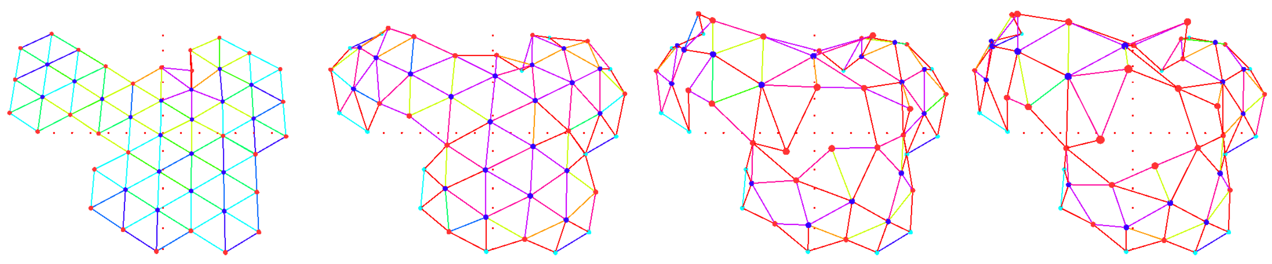
Case 3：外力を変化させた場合

自重，自重＋屋根荷重，自重＋屋根荷重＋積雪

8．形態創生の結果およびその考察

各ケースについて得られた結果の一例を図 6 ～図 8 に示す．図 6 ～図 8 において，縦軸は総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，最大ノード数を変化させた Case 1 の結果の一例である．最大ノード数が少ないほど最終的な総ひずみエネルギーは小さくなるが，いずれの場合でも総ひずみエネルギーの減少率は 10（%）以下であり，ひずみエネルギーはほとんど減少していない．図 7 は，初期部材長を変化させた Case 2 の結果の一



（a）初期形態（ステップ 0）（b）ステップ 1000 （c）ステップ 2700 （d）最終形態（ステップ 4579）

図 5 形態創生結果の一例［最大ノード数：50（個）・部材長さ：100（cm）・外力：自重＋屋根＋積雪］

例である．初期部材長さが短いほど最終的な総ひずみエネルギーは小さくなるが，いずれの場合でも総ひずみエネルギーの減少率は 20（％）以下であり，総ひずみエネルギーの大幅な減少を確認できなかった． 図 8 は，外力を変化させた Case 3 の結果の一例である．大きな鉛直荷重が作用した場合，ステップ数が進むにつれて総ひずみエネルギーは増加を続ける．それ以外の場合については，ステップ数が進んでも総ひずみエネルギーはほとんど変化しない．つまり，いずれの場合において，総ひずみエネルギーは減少していない．

これらの結果より，細胞の増殖・消滅・伸縮を同時に取り入れてトラス構造物を創生した場合，最大ノード数，初期部材長さおよび作用させる外力にかかわらず，総ひずみエネルギーの大幅な減少は確認できなかった．特に，作用させる外力次第では，総ひずみエネルギーが減少せず，総ひずみエネルギーは増加する一方であった．この原因として，ノードや部材を消滅や伸縮させるための設定条件が関係しているのではないのかと考えている．

9． 結論

今回の結果から，応力負担の大小に応じてノードや部材を消滅あるいは増加させたり，部材長さを変化させることにより，以前よりもユニークな構造物を創生することが可能となった．ただし，ノードの重なりなど実構造物として考えると問題点もあり，制約条件を与えることにより，問題点を解決する必要がある．また，本手法における問題点などを把握するため，最大ノード数，初期部材長さおよび外力をパラメータとして検討したところ，総ひずみエネルギーはステップを追っても飛躍的に減少せず，作用する外力次第で，総ひずみエネルギーが減少しなかった．特に，作用する外力が大きい場合には，総ひずみエネルギーはまったく減少せず，総ひずみエネルギーは増加を続けた．この原因として，ノードや部材を消滅あるいは増加させる条件および部材長さを伸縮させる条件が考えられる．現段階では，部材にある一定値以上の応力（軸方向力）が生じた場合に部材を伸長させているが，応力（軸方向力）に応じて部材の収縮や部材断面の増加などにより対応すれば，総ひずみエネルギーを減少させることが可能になるのではないかと考えている．今後は，最終的な総ひずみエネルギーの減少率を飛躍的にアップさせるため，消滅・伸縮・増殖の条件を検討する予定である．

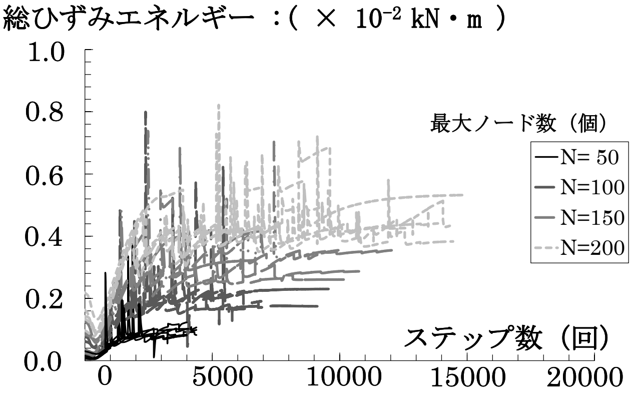


図 6 ひずみエネルギー－ステップ数関係
［初期部材長さ：75（cm）・外力：自重＋屋根面］

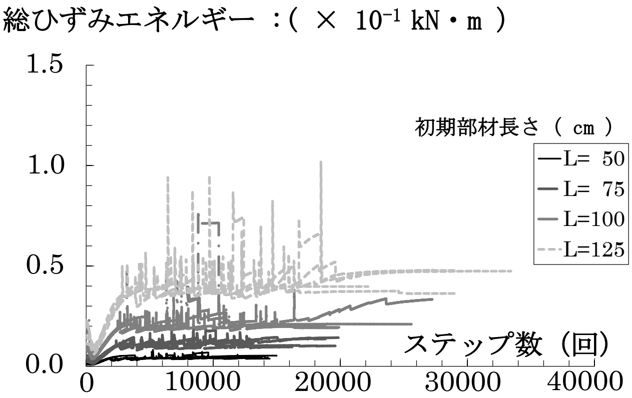


図 7 ひずみエネルギー－ステップ数関係
［最大ノード数：200（個）・外力：自重］

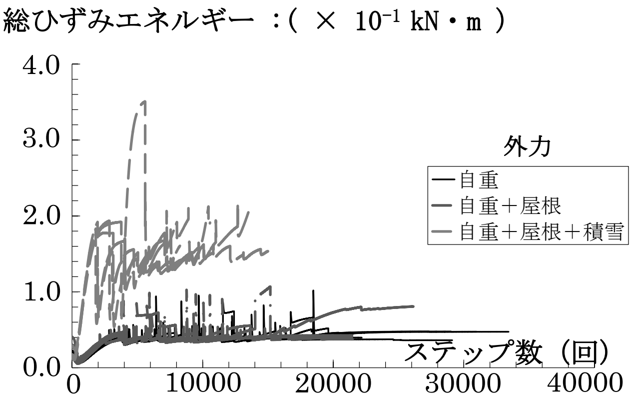


図 8 ひずみエネルギー－ステップ数関係
［最大ノード数：200（個）・初期部材長さ：125（cm）］

［参考文献］
（1）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（九州），pp. 337 ～ 338，2007 年 8 月
（2）小野聡子，松野哲也：ピクセルクラスタ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，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，構造 I（中国），pp. 789 ～ 790，2008 年 9 月
（3）小野聡子，益田　翼：細胞の増殖や消滅および伸縮を応用したトラス構造物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 2011」，pp.87 ～ 90，2011 年 10 月

自由曲面シェル構造の多目的最適化における優良解探索 ABC の解特性

永田洸大 [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，k-nagata@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，教授，工博，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

大空間が構成可能な自由曲面シェルは、形状と力学が密接に関係した構造であり、設計初期段階に構造合理性を有した形態の提示が求められる。このような曲面形態の決定手順には、構造最適化を利用した構造形態創生による設計法が注目されている。構造最適化は複数の制約条件下で設計目標に沿い、最適解を探索する手法である。一般に、設計目標は複数存在し、それらは相反関係にあることが多い。ここに、構造最適化は多目的最適化として扱われることがある。本研究では、多目的最適化において、パレート最適解や局所パレート解及び近傍の比較的評価の高い解（優良解：decent solutions）の獲得を目指す。これら優良解の利用は、構造形態創生の一助になると考えている。優良解探索解法には、遺伝的アルゴリズム系解法 ISGA（GA with immune system）[1)]が提案され、曲面構造に対する形態創生問題の適用例が示されている [2),3)]。

最近、最適化手法として発見的多点探索手法に分類される群知能（swarm intelligence：SI）が注目されている [4)]。SI 系解法は、離散値で解探索を行う GA 系解法に対し、実数値を直接扱うことができ、計算コストの圧縮が図られる。特に、人工蜂コロニー最適化（artificial bee colony：ABC）[5)]は大域的最適解探索能力が優れた解法である。しかし、ABC は多目的最適化への応用例 [6)]が少なく、アルゴリズム上優良解探索は考えられていない。

本研究では、ABC に ISGA のスキームを応用した優良解探索のアルゴリズムを提案する。提案手法は開発の経緯から ISABC（ABC with immune system）と名付けており、単一・多目的最適化に区別なく適用することが可能である [7)-9)]。文献 8)，9) では、対称曲面シェルの単一目的最適化に対する ISABC の有効性が確認されている。

本論文では、文献 7) のアルゴリズムを一部改良した ISABC による対称曲面シェル構造の多目的最適化を行い、提案手法の解探索特性を示す。

2 優良解探索機能を導入した人工蜂コロニー最適化

2.1　優良解探索 ABC

ISABC の計算手順を図 1 に対応させて、以下に示す。

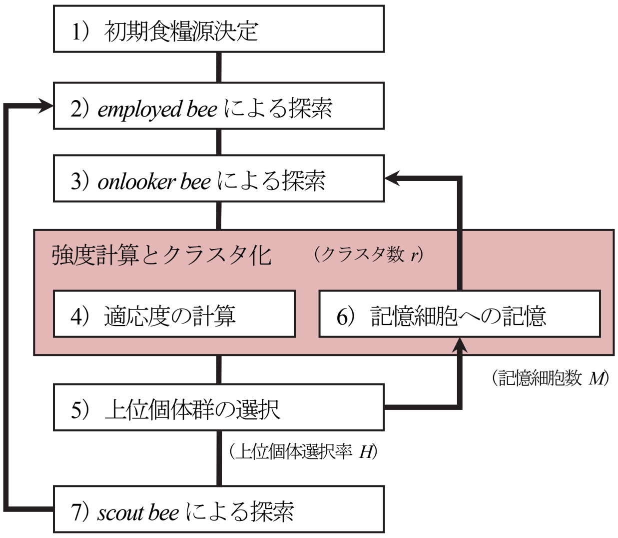


図 1　ISABC の計算フロー

ここでは、単一・多目的最適化に対する共通の表現を用いて、目的関数の最小化問題を対象に説明する。

<u>1) 初期食糧源決定</u>：食糧源を設計変数空間にランダムに配置する（初期食糧源集団 $\mathbf{P}_0$）。食糧源一つ $\mathbf{X}_i^0$（i = 1, 2, 3…, n）に対して *employed bee* 一匹 ${}_{eb}\mathbf{X}_i^0$ が割り当てられる。

<u>2) *employed bee* による探索</u>：$\mathbf{X}_i^{t-1}$（$t \geq 1$）に対し、近傍の新たな食糧源を次式で探索する。

$$ {}_{eb}X_{ih}^{t} = X_{ih}^{t-1} + \phi(X_{ih}^{t-1} - X_{jh}^{t-1}) \ , \ {}_{eb}X_{ik}^{t} = X_{ik}^{t-1} \qquad (1) $$

ここで、ϕは[-1,1]の乱数、j 食糧源は i 食糧源以外の食糧源からランダムに選択される。また、h はランダムに選択された 1 変数であり、k は h 以外の設計変数である。

次に集団 $\mathbf{P}_{t-1}$ と ${}_{eb}\mathbf{X}_i^t$ の集団に含まれる全ての個体に対して、後述する強度計算を用いて次の操作を行う。

①食糧源 $\mathbf{X}_i^{t-1}$ の強度 $S(i)$を算出する。

②*employed bee* ${}_{eb}\mathbf{X}_i^t$ の強度 $S'(i)$を算出する。

③$S'(i) \leq S(i)$ならば、$\mathbf{X}_i^t \leftarrow {}_{eb}\mathbf{X}_i^t$ と更新する。

$S'(i) > S(i)$ならば、$\mathbf{X}_i^t \leftarrow \mathbf{X}_i^{t-1}$ と更新しない。

<u>3) *onlooker bee* による探索</u>：集団 $\mathbf{P}_t$ と記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_{t-1}$ 全ての個体の強度 G_iにより、次式による確率からルーレット選択を行う。

$$ P_i = (G_{i_g} - G_i + 1) \Big/ \sum_{s=1}^{m} (G_{i_g} - G_s + 1) \ , \ i_g = \arg\max_i G_i \qquad (2) $$

ここで、m は食糧源数と反復回数 t-1 回目における記憶細胞数の合計である。ルーレット選択後、2) と同じ手順で onlooker bee ${}_{ob}\mathbf{X}_i^t$ $(i=1, 2, 3,\ldots, n)$ の探索を行う。ただし、強度を用いた食糧源の評価は行わない。

4) 適応度 $F(i)$の計算：${}_{ob}\mathbf{X}_i^t$ に対し、後述する適応度計算を実施する。

5) 上位個体群の選択：${}_{ob}\mathbf{X}_i^t$ で構成された集団内の適応度上位 H（上位個体選択率）の個体を記憶細胞候補 $\widetilde{\mathbf{P}}_t$ とする。

6) 記憶細胞への記憶：記憶細胞候補 $\widetilde{\mathbf{P}}_t$ と記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_{t-1}$（暫定解集合）を統合し、新たな記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_t$ を構成する。その際、強度を基準に定率 q で記憶細胞から個体を削除する（記憶細胞除去率）。q の範囲は記憶細胞の個体に対し、比率 $0.0 \le q \le 0.3$ を指定する。さらに、記憶細胞の個体が設定した数 M を超えている場合、後述する端切り法により個体を削除し、記憶細胞の個体数を M に調整する。ただし、$\overline{\mathbf{P}}_0 = \phi$（空集合）である。

7) scout bee による探索：食糧源があらかじめ決めた limit 回更新されなければ、その食糧源はランダムに初期化される。

以上の 2)-7)を指定反復回数まで繰り返し計算する。

2.2　優良解探索スキーム

上述する解法に導入した優良解探索機能、適応度計算・クラスタ化・端切り法を説明する。これらの基本スキームは ISGA と同じである。

1) 強度と適応度の算定：各個体 i が集団の中で支配される個体数を計算し、強度 $S(i)$とする。強度は目的関数値に応じた絶対評価であり、パレート・ランキング方式を用いる。反復回数 t 回目の集団 $\mathbf{P}_t$ の個体 i（設計変数 $\mathbf{x}_i$）に対し、集合 $\mathbf{P}_t$ と後述する記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_t$ に含まれる全ての個体 j（設計変数 $\mathbf{x}_j$）を用いた集合 $\mathbf{Q}(i)$を次式で定義する。

$$\mathbf{Q}(i) = \left\{ j \middle| \left(f_k(\mathbf{x}_j) \le f_k(\mathbf{x}_i), k = 1, 2, \cdots, l \right), i \in \mathbf{P}_t, j \in \mathbf{P}_t \cup \overline{\mathbf{P}}_t \right\} \quad (3)$$

強度 $S(i)$は次式で与えられる。

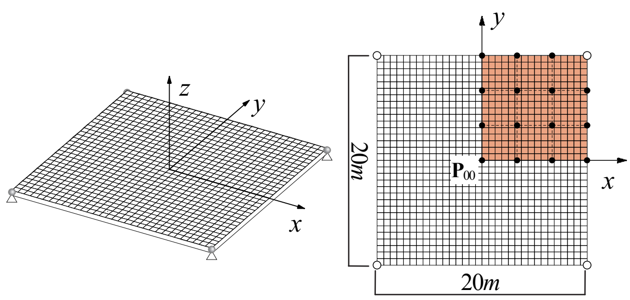
$$S(i) = \left| \mathbf{Q}(i) \right| \quad (4)$$

次に集団を後述する手順でクラスタ C_s（s=1, 2, 3…, r）に分ける。このクラスタに対し、各個体が同一クラスタ内で支配される個体の強度を次式のように計算し、適応度 $F(i)$とする。

$$F(i) = \sum_{\substack{l \\ \Lambda \\ k=1}} f_k(\mathbf{x}_i) \ge f_k(\mathbf{x}_j) S(j) - \sum_{\substack{l \\ \Lambda \\ k=1}} f_k(\mathbf{x}_i) = f_k(\mathbf{x}_m) S(m) \quad (5)$$

$$\left(i \in \mathbf{P}_t; i, j, m (i \ne m) \in_{C_s} \mathbf{P}_t (\equiv \mathbf{g}_s) \subset (\mathbf{P}_t \cup \overline{\mathbf{P}}_t) \right)$$

ここで、$\mathbf{g}_s$ はクラスタ内の全個体集合である。この強度概念を用いた適応度は、クラスタ内だけで算出した相対評価値であり、値が小さいほど高評価となる。クラスタは設計変数空間で構成する。



a. 鳥瞰図　　　　b. 制御点配置

図 2　自由曲面シェルモデルの基準形状

2) クラスタ化：次の操作を実施し、クラスタ化を行う。

① 集合の定義：クラスタ C_l の各個体 β_k(k=1, 2, 3…, k_l) を要素とする集合 $\mathbf{g}_l$ とその個体数 k_l を次のように定義する。

$$\mathbf{g}_l = \left\{ \beta_1, \beta_2, \beta_3, \cdots, \beta_{k_l} \right\}, \quad k_l = \left| \mathbf{g}_l \right| \quad (6)$$

② 集合間距離の計算：設計変数空間において集合 $\mathbf{g}_m$ と集合 $\mathbf{g}_n$ との集合間距離 $d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_n)$を次式で計算する。

$$d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_m) = \frac{1}{k_m \cdot k_n} \sum_{i \in \mathbf{g}_m, j \in \mathbf{g}_n} d(i, j) \quad (7)$$

ここで、$d(i, j)$は個体 i と個体 j 間における設計変数空間上の無次元化したユークリッド距離である。

③ 集合の統合：設計変数空間上の最短距離を持つ二つの集合（クラスタ）を同一集合に統合し、②に戻す。以上の操作を指定されたクラスタ数 r に達するまで繰り返す。

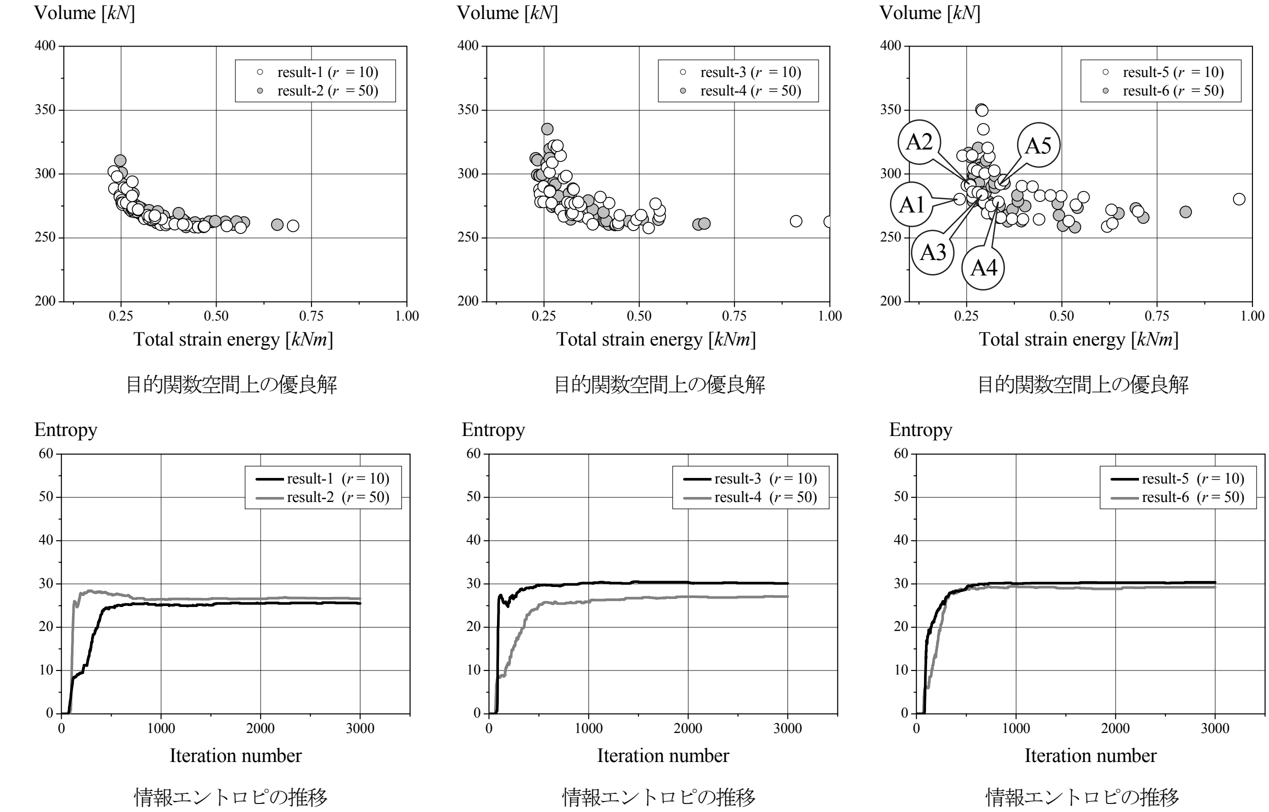
3) 端切り法：記憶細胞候補と記憶細胞の和が設定された個体数を超える場合、以下の操作により個体を削除する。

① 最短距離にある個体の選択：設計変数空間上で、無次元化したユークリッド距離を用いて、最も隣接する 2 個体を探す。

② 個体の削除：選択した 2 個体の内、各々もう一つの隣接する個体との設計変数空間上の無次元化したユークリッド距離を比較し、近い方の個体を削除する。削除操作は指定された個体数 M（記憶細胞数）になるまで繰り返す。

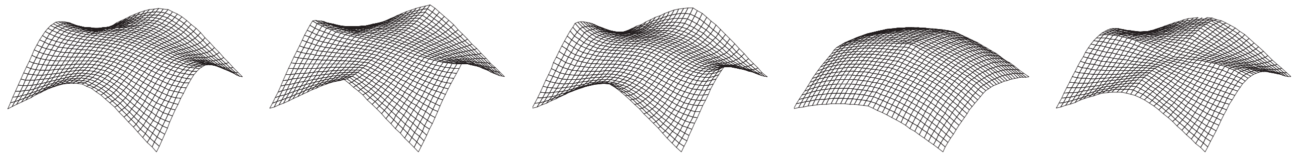
3　矩形対称曲面シェルの多目的最適化

ISABC を矩形対称曲面シェルの形態創生に適用する。解析モデルは、図 2a に示す一辺が 20m の正方形平面を有する自由曲面シェル（節点数：1089, 要素数：1024）である。シェル要素の分割数は文献 10) に基づいている。構造解析は図 2b に示すように、モデルの対称性を考慮してハッチングした 1/4 領域で計算する。隅角部はピン支持とし、基準形状は平板である。本研究では滑らかな曲面



a. $H = 0.01$　　b. $H = 0.05$　　c. $H = 0.1$

図 3　ISABC による数値結果　Case-A



$f_t = 0.232$ [kNm]	$f_t = 0.260$ [kNm]	$f_t = 0.280$ [kNm]	$f_t = 0.334$ [kNm]	$f_t = 0.339$ [kNm]
$f_v = 280.3$ [kN]	$f_v = 291.0$ [kN]	$f_v = 285.6$ [kN]	$f_v = 278.1$ [kN]	$f_v = 292.1$ [kN]
$E_b = 6.21\times10^{-3}$ [kNm]	$E_b = 2.55\times10^{-2}$ [kNm]	$E_b = 1.70\times10^{-2}$ [kNm]	$E_b = 7.88\times10^{-3}$ [kNm]	$E_b = 3.35\times10^{-2}$ [kNm]
Thrust = 420.9 [kN]	*Thrust* = 421.9 [kN]	*Thrust* = 499.4 [kN]	*Thrust* = 530.9 [kN]	*Thrust* = 518.7 [kN]
form-A1	form-A2	form-A3	form-A4	form-A5

図 4　得られた優良解形状（$r = 10, H = 0.1$）　Case-A

表現と計算効率の向上を図るため、制御点とバーンスタイン基底関数で定義される有理テンソル積ベジエ曲面[11]により曲面記述を行う。制御点は平面形状に沿って、1/4 領域で均等に 4×4 配置とした（図 2b）。

3.1　数値計算例 1（Case-A）

Case-A は総ひずみエネルギと部材総体積の多目的最適化を扱う。定式化は次式で与える。

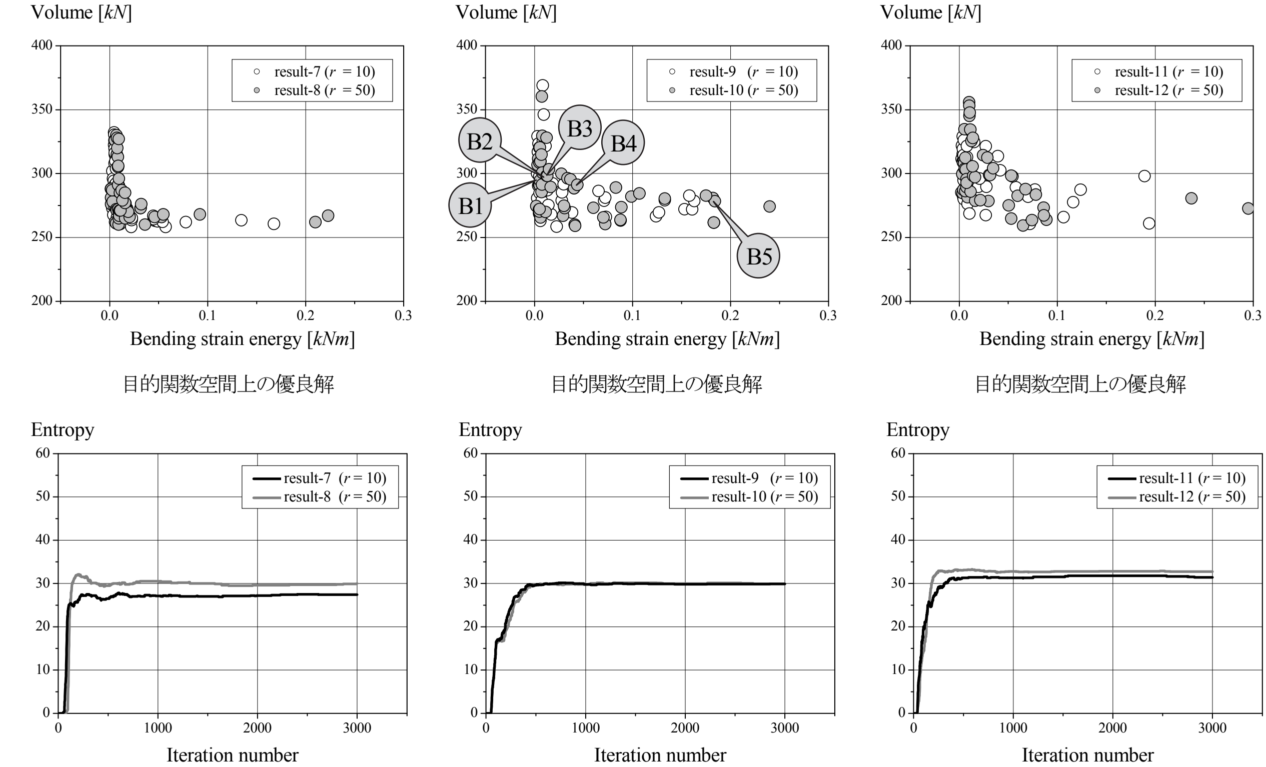
$$\textit{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \tag{8}$$

$$\textit{to minimize} \quad f_t(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d}, \quad f_v(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})^T\mathbf{A} \tag{9a, b}$$

$$\textit{subject to} \quad \sigma^L \le \sigma_j \tag{10}$$

$$\mathbf{A}^L \le \mathbf{A} \le \mathbf{A}^U, \ \mathbf{R}^L \le \mathbf{R} \le \mathbf{R}^U \tag{11a, b}$$

ここで、$\mathbf{A}(=[A_i])$：断面積ベクトル, $\mathbf{R}(=[R_i])$：節点座標ベクトル, $\mathbf{d}$：節点変位ベクトル, $\mathbf{K}$：全体剛性マトリクス, $\mathbf{S(R)}$：表面積ベクトル, σ^L：許容圧縮応力度である。設計変数 $\mathbf{A}, \mathbf{R}$ は有理テンソル積ベジエ曲面の制御点 z 軸座標値である。材料は普通コンクリートを想定し、弾性定数 $E = 2.1862\times10^7\ kN/m^2$, ポアソン比 $\nu = 0.2$ とする。応力制約として圧縮応力に対して長期許容応力度 $\sigma^L = -1.0\times10^4\ kN/m^2$ と設定する。側面制約条件は $A_i^L = 0.1\ m, A_i^U = 0.2\ m, R_i^L = 0.0\ m, R_i^U = 7.0\ m$ である。載荷荷重は自重 $24.0\ kN/m^3$ と等分布荷重 $w = 1.0\ kN/m^2$ を与える。ABC パラメータは *employed bee*：200, *onlooker bee*：200, *limit*：1900, 最大反復回数：3000 と設定する。

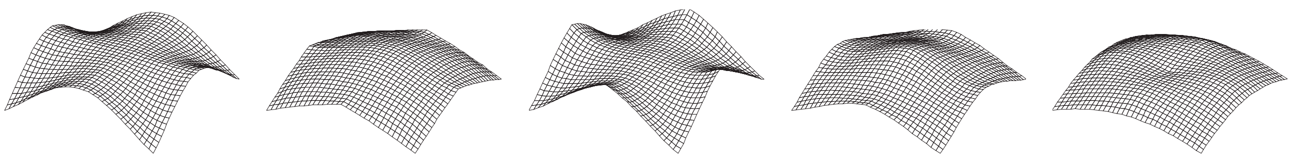


目的関数空間上の優良解　目的関数空間上の優良解　目的関数空間上の優良解

情報エントロピの推移　情報エントロピの推移　情報エントロピの推移

a. $H = 0.01$　b. $H = 0.05$　c. $H = 0.1$

図 5　ISABC による数値結果　Case-B



form-B1	form-B2	form-B3	form-B4	form-B5
$f_b = 7.67\times10^{-3}$ [kNm]	$f_b = 1.22\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 1.31\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 8.31\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 1.84\times10^{-1}$ [kNm]
$f_v = 291.4$ [kN]	$f_v = 298.1$ [kN]	$f_v = 298.1$ [kN]	$f_v = 289.0$ [kN]	$f_v = 278.3$ [kN]
$E_t = 0.265$ [kNm]	$E_t = 0.313$ [kNm]	$E_t = 0.318$ [kNm]	$E_t = 0.489$ [kNm]	$E_t = 0.764$ [kNm]
Thrust = 453.9 [kN]	*Thrust* = 571.7 [kN]	*Thrust* = 545.4 [kN]	*Thrust* = 619.8 [kN]	*Thrust* = 707.7 [kN]

図 6　得られた優良解形状（$r = 50, H = 0.05$）　Case-B

数値結果を図 3, 4 に示す。図 3 は ISABC（クラスタ数 $r = 10, 50$, 上位個体選択率 $H = 0.01, 0.05, 0.1$, 記憶細胞数 $M = 100$, 記憶細胞除去率 $q = 0.0$）により得られた目的関数空間上の優良解と解の多様度を示す情報エントロピ [3] の推移である。得られた優良解は記憶細胞内の強度評価上位 50 個体を示している。図 4 は優良解形状例であり、目的関数値に加えて曲げひずみエネルギ E_b、スラスト値 *Thrust* も示す。

3. 2　数値計算例 2（Case-B）

Case-B は曲げひずみエネルギと部材総体積の多目的最適化であり、Case-A の式(9a)と次式を入れ替えて行う。

$$f_b(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{w}^T\mathbf{K}_b\mathbf{w} \tag{12}$$

ここで、$\mathbf{w}$: 面外節点変位ベクトル, $\mathbf{K}_b$: 曲げ剛性マトリクスを表す。パラメータや解析条件は Case-A と同様である。

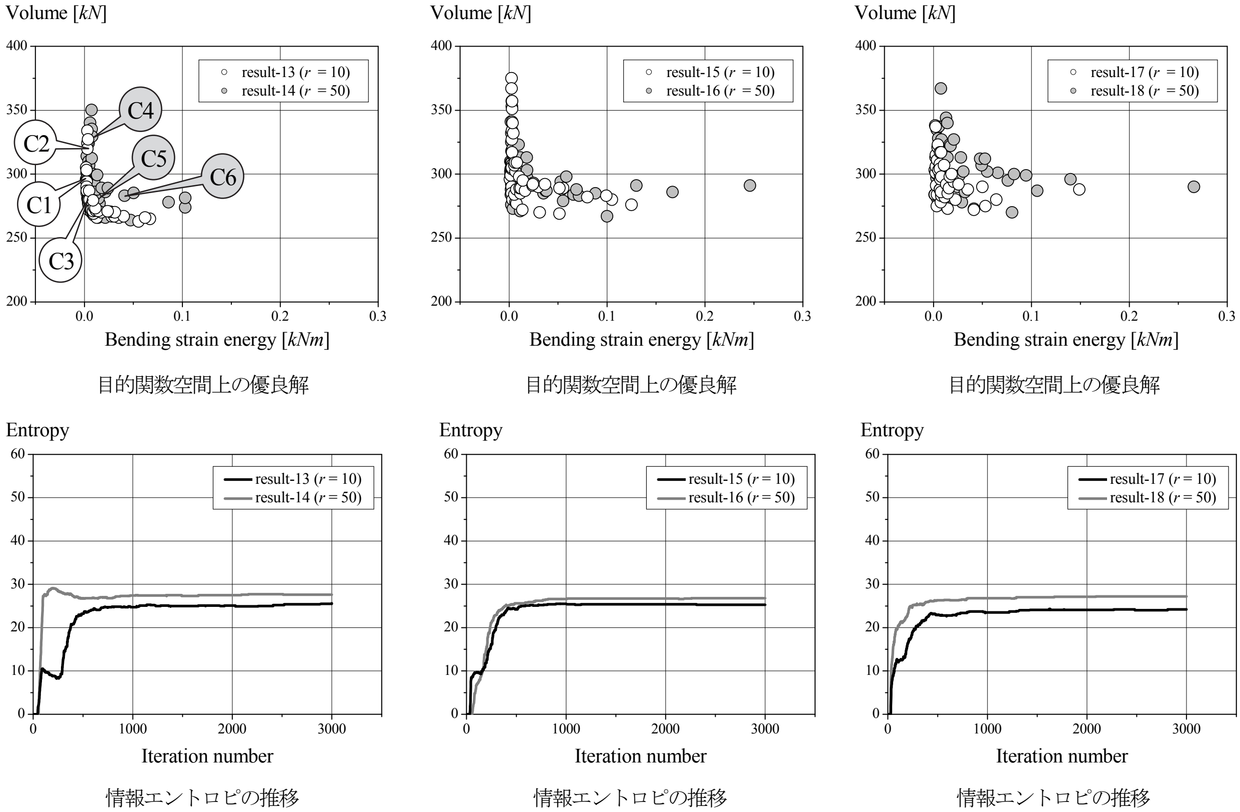
数値結果は図 5, 6 に Case-A と対応させて示す。図 6 には総ひずみエネルギ E_t の値も示す。

3. 3　数値計算例 3（Case-C）

Case-C では制御点に高さ制約を与え、曲げひずみエネルギと部材総体積の多目的最適化を行う。高さ制約条件は制御点 $\mathbf{P}_{00}$ に一定値を与える方法を採用する [2]。定式化は Case-B に、次式を追加することで与える。

$$\textit{subject to} \quad {}_zP_{00} = 7.0\ [m] \tag{13}$$

ここで、${}_zP_{00}$ は制御点 $\mathbf{P}_{00}$ の z 座標値である。パラメータや解析条件は Case-B と同様とする。



a. $H=0.01$　　b. $H=0.05$　　c. $H=0.1$

図 7　ISABC による数値結果　Case-C

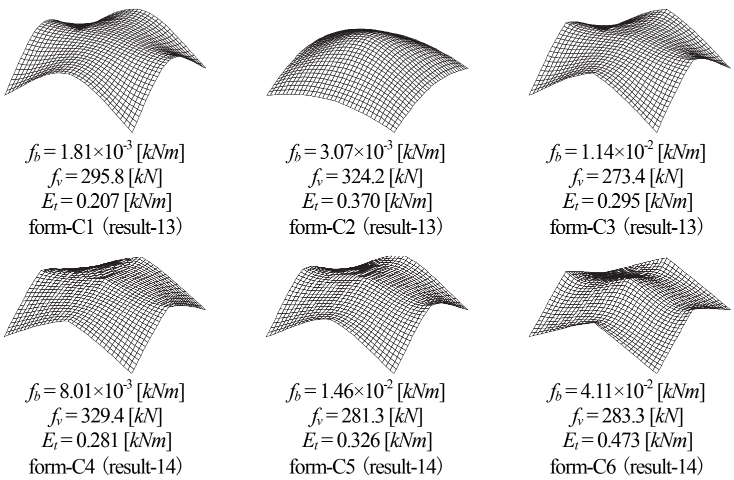


図 8　得られた優良解形状（$H=0.01$）　Case-C

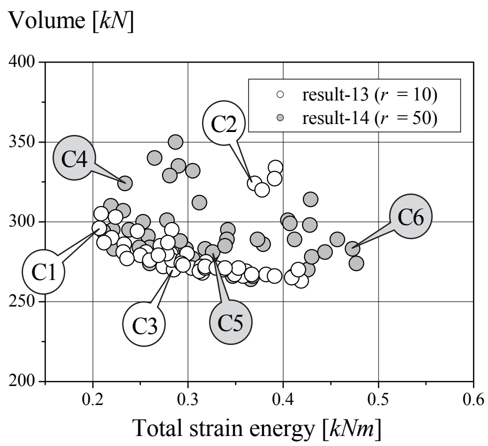


図 9　目的関数値の比較（$H=0.01$）

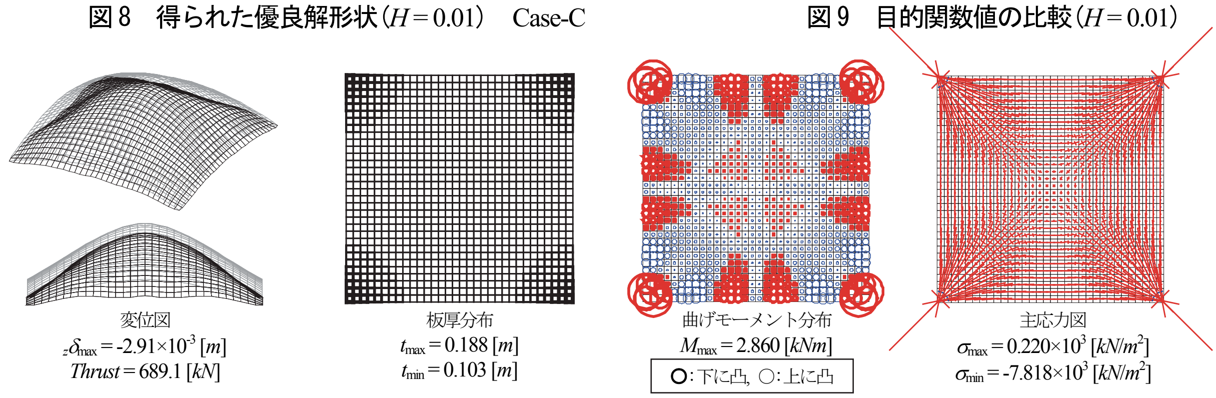


図 10　form-C2 の力学性状　Case-C

数値結果を図 7-10 に示す。図 7, 8 は得られた数値結果と優良解形状である。図 9 には、$H = 0.01$ のときに得られた形状の総ひずみエネルギと部材総体積の関係を示す。図 10 は form-C2 の力学性状であり、変位図は細線が解形状・実太線が変形後の形状、板厚分布の線の太さは板厚の比率、曲げモーメント分布の円の大きさは曲げモーメントの比率（太○が下に凸, 細○が上に凸）、主応力の実線長さは主応力の比率を示す。数値情報は、最大鉛直変位 ${}_z\delta_{max}$, 最大･最小板厚 t_{max}, t_{min}, 最大曲げモーメント M_{max}, 最大･最小主応力 σ_{max}, σ_{min} である。

4 考察

Case-A において、ISABC は上位個体選択率 $H = 0.01$ のときパレートフロントと見なせる解分布を形成し、H の増加により近傍の解が獲得可能となる。特に、クラスタ数 $r = 10$, $H = 0.1$ のとき得られた優良解は異なる 2 つのパレートフロントを形成した（図 3c）。これは ISABC がクラスタ毎に評価値の高い解を探索した結果である。情報エントロピの値は H の増加に伴い高い値となり、H の設定により解の多様性を維持した解探索を行っている。

Case-B においても、ISABC は Case-A と同様に、パラメータ設定に応じた解探索を行う。Case-B では、特に r = 50 のとき情報エントロピが高い値を示した（図 5）。r は多峰性を有する問題に対し、峰密度に応じて設定する必要がある。つまり、Case-B は Case-A に比べ解空間が複雑であり、許容解が多く存在していると考える。結果として、form-B2 と form-B3 のように目的関数値が殆ど同一の形状を含む、多くの形態が得られている。ただし、曲げひずみエネルギ最小化により曲げ応力のみに沿って最適化するため、Case-A より低ライズの形状が得られ易く、スラスト値の増加に繋がる。

Case-C は、Case-B の結果よりシェル中央部のライズを確保する制約を与えたモデルである。有理テンソル積ベジエ曲面は端部の制御点と表現された曲面座標値が一致する性質を持つ [9]。これより、モデル中央の節点 z 座標は常に 7.0 m となる。Case-C において、ISABC は Case-B と同傾向の解探索特性を示す。得られる優良解は全て、高さ制約を満たす解である。注目すべきは、同一パレートフロント上の解であるにもかかわらず、form-C2 のように総ひずみエネルギが大きく異なる解が得られた点である（図 9 参照）。この解は、総ひずみエネルギを目的関数とした場合の局所最適解であると考えている。ただし、高さ制約の導入により、1/4 領域の境界部で比較的尖った形状が記憶細胞内に多く含まれており、制約値の設定には注意が必要である。

ISABC は多目的最適化に対し、クラスタ数 r, 上位個体選択率 H の設定により多様な解探索が可能であることを確認した。ISGA と比較すると、複数の解を 1 回の試行で獲得できた。これは ISABC が解探索に乱数を多用し、大域的探索（*employed bee*）と局所探索（*onlooker bee*）を交互に行う ABC 解法の特徴を有しているためと考えている。つまり、ISABC は ISGA の優良解探索スキームを利用しているが、得られる優良解は異なる特性を持つ。ただし、ISABC はこれらの操作により、解析に ISGA の約 1.5～2 倍程度の時間を費やす。これら優良解探索解法の解特性については、今後検討していく必要がある。

5 まとめ

本論文では、群知能系解法人工蜂コロニー最適化に優良解探索機能を導入した ISABC による矩形対称シェル構造の多目的最適化を行った。本解法は、ABC 解法によるパレート解集合獲得の手法として有効であることを確認した。さらに、パレート最適解だけでなく、近傍の比較的評価の高い解も獲得できた。以上より、優良解探索手法として本解法の有効性を示した。今後、提案手法を種々の構造に対する形態創生問題に適用し、解法の特性と有効性を示していきたい。

参考文献

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, **614**, 35-43, 2007.4
2) 和田大典, 本間俊雄：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, 日本建築学会, コロキウム構造形態の解析と創生 2010, 35-40, 2010.10
3) Y.Okita and T.Honma：Structural Morphogenesis for Free-Form Grid Shell Using Genetic Algorithms with Manipulation of Decent Solution Search, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, **53**(3), 177-184, 2012.9
4) Xin-She Yang:*Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms*, *second edition*, Luniver Press, 2010
5) D.Karaboga and B.Basturk：A Powerful and efficient algorithm for numerical function optimization：artificial bee colony (ABC) algorithm, Journal of Glob Optimization 39, 459-471, 2007
6) S.N.Omkar, J.Senthilnath, Rahul Khandelwal, G.Narayana Naik, S.Gopalakrishnan：Artificial Bee Colony (ABC) for multi-objective design optimization of composite structures, Applied Soft Computing, **11**, Issue 1, 489-499, 2011.1
7) 永田洸大, 本間俊雄：優良解探索を導入した人工蜂コロニー最適化（ABC）による構造最適化, 日本建築学会, コロキウム構造形態の解析と創生 2011, 103-108, 2011.10
8) K. Nagata, T. Honma：Structural Morphogenesis for Free Form Surface Shell Using Swarm Intelligence with Decent Solution Search Manipulation, 7th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, CD-ROM Proceeding, J083, 2012.6
9) 永田洸大, 本間俊雄：優良解探索機能を導入した人工蜂コロニー最適化による自由曲面シェル構造の形態, 日本建築学会, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, 827-828, 2012, 9
10) 永田洸大, 本間俊雄：構造最適化における自由曲面シェルの要素分割とベジエ曲面の制御点に関する考察, 日本建築学会研究報告, 九州支部, 構造系, **51**, 285-288, 2012.3
11) 杉原厚吉: *グラフィックスの数理*, 共立出版, 1995

空間骨組構造物における耐力の評価手法に関する研究
- Compact Procedure Methodを用いた多目的遺伝的最適化問題 -

闇 星宇[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，yan@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

高速演算を可能とするコンピュータの発達により，従来，計算負荷が大きく実用的見地から重要視されてこなかった構造最適化手法が見直され，実設計への応用も次第に広がりつつある。しかしながらその結果として，構造物の余剰性能が取り除かれ，冗長性の欠落した構造物の設計が助長される懸念がある。構造物の安全性をより確実なものとするためには，不測の外乱に備えた設計が不可欠と言え，このことを実現するためには外乱の正確な予測とそれに対する構造物の正確な応答を知ることが基本であろう。この研究では，構造物の余剰性能の一つである構造冗長性を扱っている。冗長性の確保が構造安全性を担保する上で重要であることは既に広く認識されていることではあるが，これを定量化することは困難と言える[1]。

構造冗長性の定量化の一つの方法について，空間骨組構造物における極限抵抗能力を把握するための簡便な手法(Compact Procedure Method) を提案した[2][3]。更に，数値解析例を通してこの手法を軸力崩壊型空間構造物への適用を実現した[4]。本論文ではCompact Procedure Methodと多目的遺伝的アルゴリズムを併用し，立体トラスを対象として構造物の質量変化による耐力に及ぼす影響を把握する多目的最適化を行う。

2　Compact Procedure Method(CPM)[4]

CPMは，本質的には線形計画法におけるシンプレックス法と同一の方法であるが，スラック変数を導入せずに崩壊荷重係数を算出することにより，シンプレックス法の欠点を解消した手法である。一般に，極限解析法は許容応力場に基づく下界定理と許容速度場に基づく上界定理から成る極限定理を理論的根拠にもつ固体の限界強度を求める手法で，これを建築骨組構造に適用したものが骨組の極限解析と呼ばれるものである。CPMはこれらのうち下界定理で求められる荷重の大きさを線形計画法により最大荷重を求めることで正解を得ようとする手法で，骨組構造に特化した方法として1976年にLivesley[2]が提案し，1977年以降，青山ら[3]が改良したものである。これによれば，骨組の崩壊荷重は以下の線形計画法の解として求めることができる。

$$\begin{aligned} &\text{maximize} \quad \lambda \\ &\text{subject to} \quad \lambda \boldsymbol{p} = \boldsymbol{H}\boldsymbol{r} \end{aligned} \tag{1}$$

$$-\boldsymbol{r}^L \leq \boldsymbol{r} \leq \boldsymbol{r}^U \tag{2}$$

ここで，λは初期荷重に対する荷重係数，$\boldsymbol{p}$は節点における荷重ベクトルを表す。$\boldsymbol{H}$は$\boldsymbol{p}$と$\boldsymbol{r}$の関係を表す係数マトリクスである。$\boldsymbol{r}$は部材力ベクトル，$\boldsymbol{r}^L$ は部材耐力の下限値ベクトル，$\boldsymbol{r}^U$ は部材耐力の上限値ベクトルを表す。すなわち，骨組に生じる断面力の上下限と力の釣合条件を満たすことを制約条件とし，荷重係数λを最大化する線形計画問題を構成することで，骨組の崩壊荷重を求めようとするのがCompact Procedure法である。

3　多目的遺伝的アルゴリズムによる多目的最適設計

本節で目標とする軸力崩壊型空間構造物は，総質量および構造物の終局耐力の両者を同時に考慮し，CPMによって構造物の崩壊荷重係数を求める多目的最適化問題を扱う。本論文では多目的遺伝的アルゴリズムの代表的な手法の１つであるSPEA2（Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2）を最適化手段として用いる。

3.1　定式化

構造物の崩壊荷重係数を構造物の耐力として評価し，構造物の総質量と崩壊荷重係数の逆数を目的関数とする多目的最小化問題を次式のように与える。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad f(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} f_1(\boldsymbol{x}) = & M(\boldsymbol{x}) \\ f_2(\boldsymbol{x}) = & \dfrac{1}{\lambda_{cr}(\boldsymbol{x})} \end{cases} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) \leq \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{3}$$

f_i : 評価関数
M : 構造物の総質量
$\boldsymbol{x}$: 部材断面形状
λ_{cr} : 構造物の崩壊荷重係数
$\boldsymbol{g}$: 制約条件

なお，制約条件を満たさない場合，$f(\boldsymbol{x})$自体にペナルティ関数γ_jの逆数を乗じたものを新たな目的関数$h(\boldsymbol{x})$として，以下のように無制約の多目的最適化問題として定式化する。

$$\text{minimize} \quad h(\boldsymbol{x}) = \frac{f(\boldsymbol{x})}{\prod_j \gamma_j} \tag{4}$$

多目的最適化問題の定式化より，多目的遺伝的アルゴリズムの進化の尺度となる適合度関数を以上のように評価し，多目的最適化を行う。

3.2 短期許容応力度によるペナルティ

部材 i における軸力を $N^{(i)}$, 座屈荷重を $N_{cr}^{(i)}(<0)$, 降伏軸力を $N_y^{(i)}(>0)$ 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。

$$r^{(i)} = \begin{cases} \dfrac{N^{(i)}}{N_{cr}^{(i)}} & \text{if} \quad (N^{(i)} < 0) \\ \dfrac{N^{(i)}}{N_y^{(i)}} & \text{if} \quad (0 < N^{(i)}) \end{cases} \tag{5}$$

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。

$$r_{\max} = \max_i \quad r^{(i)} \tag{6}$$

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。

$$\gamma_1 = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad 0 \le r_{\max} \le 1 \\ \dfrac{1}{r_{\max}} & \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

3.3 全部材の細長比によるペナルティ

部材が弾性座屈する場合に，座屈後軸力は一定のひずみ量以下であれば維持されるが，塑性座屈の場合には，座屈後の耐力低下が早期に現れる[5]。ここでは，部材の塑性座屈が先行する崩壊を回避するために，部材の細長比の下限値に応じたペナルティを設ける。また，細長すぎる部材を防ぐため，細長比の上限値を設定する。部材 i の細長比によるペナルティ関数γ_{si}を次式のように計算する。λ^Uとλ^Lは細長比の上下限，λ_iは部材iの細長比を表す。

$$\gamma_{si} = \begin{cases} \dfrac{\lambda_i}{\lambda^L} & \lambda_i < \lambda^L \\ \dfrac{\lambda^U}{\lambda_i} & \lambda_i > \lambda^U \\ 1 & \lambda^L \le \lambda_i \le \lambda^U \end{cases} \tag{8}$$

各部材の細長比によるペナルティ関数 γ_{si} をかけ合わせた値を，γ_2 と扱い，次式で表す。

$$\gamma_2 = \prod_{i=1}^{n} \gamma_{si} \tag{9}$$

ここに，n は部材数である。

3.4 SPEA2のアルゴリズム

SPEA2のアルゴリズムの流れは 2 つの母集団（アーカイブ母集団 $\overline{P}$，探索母集団 P）を用いて探索を行い，アーカイブ母集団から探索母集団を選択し，探索母集団を用いたアーカイブ母集団の更新を行うということである。図1にSPEA2の流れを示している。

Step 1 初期化：初期母集団 P_0 を生成する。空のアーカイブを生成する。

$$\overline{P_0} = \emptyset \quad Set\ t = 0 \tag{10}$$

Step 2 適合度割当て：P_t と $\overline{P_t}$ における個体適合度を計算する。

Step 3 環境選択：P_t における全ての非劣個体を $\overline{P_t}$ へコピーし，$\overline{P_{t+1}}$ とする。ただし，$|\overline{P_{t+1}}| > \overline{N}$ の場合には，端切りオペレータを用いて $\overline{N}$ に削減する。また，$|\overline{P_{t+1}}| < \overline{N}$ の場合には，P_t における優良個体 $\overline{N} - |\overline{P_{t+1}}|$ 個分を $\overline{P_{t+1}}$ へコピーし，$\overline{P_{t+1}}$ の個体数を $\overline{N}$ にする。

Step 4 終了判定：もし $t \ge T$ もしくはその他の終了条件が満たされた場合，$\overline{P_{t+1}}$ の中の非劣個体群が最終的な解として出力され探索は終了する。そうでなければ，Step 5 へ進む。

Step 5 メイティング選択：$\overline{P_{t+1}}$ からバイナリトーナメント選択によって N 個分の P_{t+1} を選択する。

Step 6 変化：P_{t+1} に対して交叉と突然変異オペレータを実行する。

4章では立体二層トラスをモデルとして，CPMとSPEA2を併用した多目的最適化問題を行なう。

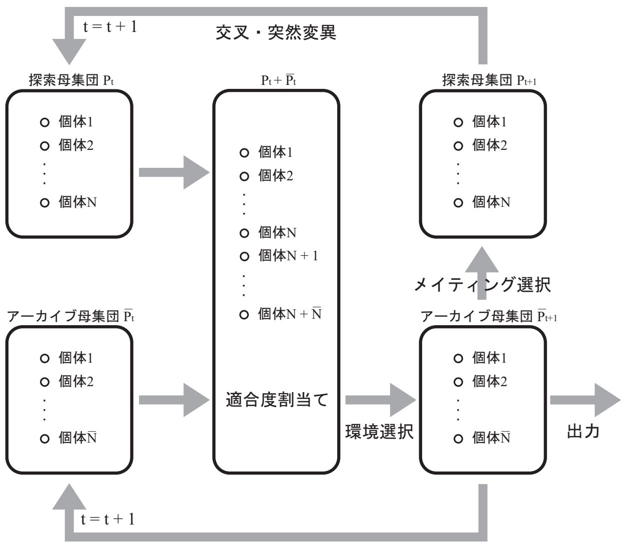


図1　SPEA2の概念図

4　スペーストラスによる数値解析

4.1　解析モデル

数値解析例として，図 2 に示すような 2 層立体トラスを考える。支持条件は四隅をピン支持とし，ピン支持の中点に位置する計 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。対称条件を考慮して図 3 の太線で示された 1/8 のモデルを解くことにする，図中に表された数値は部材番号である。トラス部材の断面は表 1 から選ばれる。

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 をトラス上端に作用させる。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，これの荷重係数λ倍の荷重をトラス上端に作用させる。これらの荷重は等価節点荷重として各節点に分配するものとする。

表 1　選択対象部材(鋼管)

部材番号	ϕ-t(mm)	Area(mm^2)	I (mm^4)
No.0	21.7 - 2	123.8	6,070
No.1	27.2 - 2	158.3	12,600
No.2	27.2 - 2.3	179.9	14,100
No.3	34.0 - 2.3	229.1	28,900
No.4	42.7 - 2.3	291.9	59,700
No.5	42.7 - 2.5	315.7	64,000
No.6	48.6 - 2.3	334.5	89,900
No.7	48.6 - 2.5	362.1	96,500
No.8	48.6 - 2.8	402.9	106,000
No.9	48.6 - 3.2	456.4	118,000
No.10	60.5 - 2.3	420.5	178,000
No.11	60.5 - 3.2	576.0	237,000
No.12	60.5 - 4	710.0	285,000
No.13	60.5 - 4.5	791.7	312,000
No.14	76.3 - 2.8	646.5	437,000
No.15	76.3 - 3.2	734.9	492,000
No.16	76.3 - 4	908.5	595,000
No.17	76.3 - 4.5	1015.0	657,000
No.18	89.1 - 2.8	759.1	707,000
No.19	89.1 - 3.2	863.6	798,000
No.20	89.1 - 4.5	1196.0	1,070,000
No.21	101.6 - 3.2	989.2	1,200,000
No.22	101.6 - 4	1226.0	1,460,000
No.23	101.6 - 4.5	1373.0	1,620,000
No.24	101.6 - 5	1517.0	1,770,000

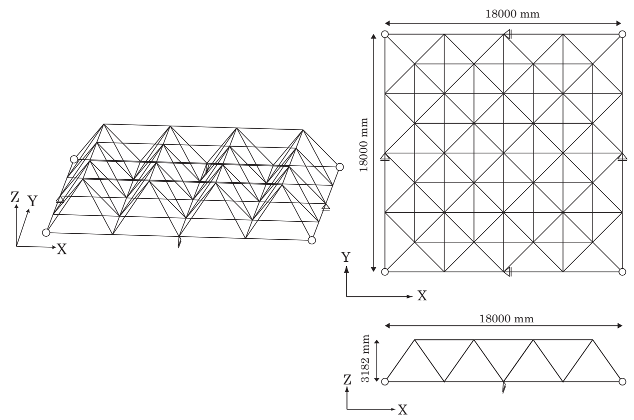


図2　解析モデル

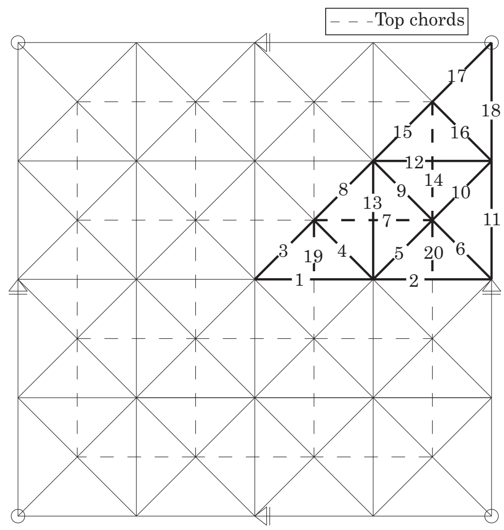


図3　部材番号

4.2　最適化パラメータおよび制約条件

部材断面を設計変数とし,選択対象部材のリストを表 1 に示す。表2に示す最適化パラメータと表3に示す制約条件を用いて，多目的最適化を行う。

4.3　解析結果

多目的最適設計によって，得られたPareto解集合について分析を行う。表4は，計算終了世代(1000世代)におけるアーカイブ母集団の総質量と崩壊荷重係数に関する結果を示している。Pareto解集合の総質量に関して，その最小値と最大値の差は約2058kgであり，その間にPareto解が分布している。

SPEA2による1000世代の目的関数空間上のアーカイ

表 2　最適化パラメータ

最適化	SPEA2
目的関数	総質量 崩壊荷重係数の逆数
設計変数	20
個体数	50
アーカイブ数	20
世代数	1000
交叉率	0.8
突然変異率	0.3

表 3　制約条件

許容応力度設計	あり
全部材の細長比	$\lambda^L=120$ $\lambda^U=300$

表 4　1000世代における解析結果

MAX Mass	AVERAGE Mass	MIN Mass
3904.064 kg	2996.432 kg	2085.800 kg
MAX λ_{cr}	AVERAGE λ_{cr}	MIN λ_{cr}
5.8024	3.1262	0.4499

ブ母集団を図4に示し，図中に記載される個体数はこの空間内に含まれるアーカイブ母集団の個体数である。図5に総質量と崩壊荷重係数の関係を示している。図4に二つの劣解があることがわかる。これは解析が1000世代まで続いても完全に収束してないと考えられる。

このように多目的遺伝的アルゴリズムによる多目的最適設計によって，崩壊荷重係数および総質量を目的関数とする多目的最適化問題の多様なPareto解集合を１度の最適化計算によって得ることができ，２つの目的関数は互いにトレードオフの関係にあることをそのPareto曲線形状から確認できる。

4.3.1　部材配置形態

図6に1000世代のアーカイブ母集団における三つの個体（図4のNo.1,No.10,No.20）の断面分布を示している。左上の凡例に示す番号は表1に示すものに対応している。図中では各部材において選択された断面積の大きさにほぼ比例して線幅を表している。いずれの個体においても，圧縮となる上弦材や支持点に接続された斜材にも相対的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。

4.3.2　崩壊メカニズム

各個体に区分的線形解析法を適用して求めた際の崩壊機構の形成過程を図7,8,9 に示す。表5に個体毎に崩壊までの累積荷重係数を表わす。

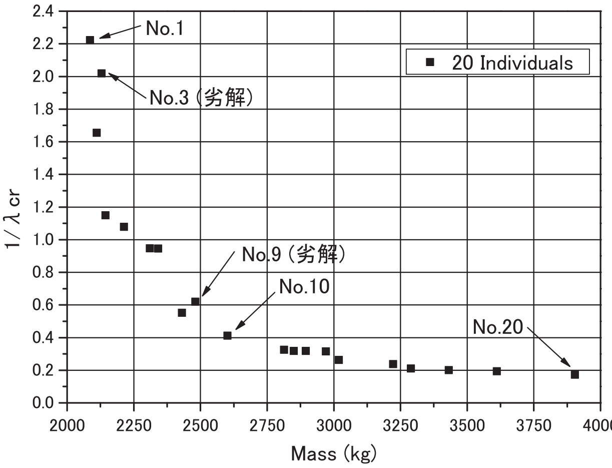


図4　1000世代のアーカイブ母集団におけるPareto解集合

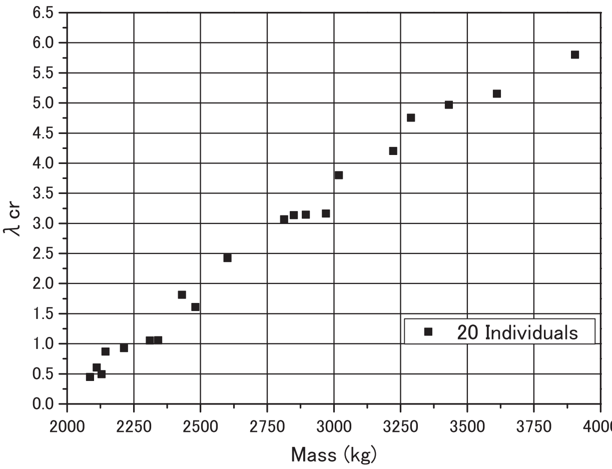


図5　1000世代のアーカイブ母集団におけるPareto解集合

No.1とNo.10の崩壊過程において，トラスは圧縮部材の座屈のみによって崩壊に達した。No.20の場合，Phase5で降伏部材が現れた。壊機構形成までの過程を比較すると，各個体の崩壊機構は全体崩壊に近い形態となっている。No.1の上弦材は最終的にほぼ壊れる状態になった。No.10とNo.20において，耐力の上昇に伴って、部材が座屈・降伏することがわかる。立体トラスNo.20の全体を板として考えた際に，曲げモーメントが最も大きくなり，引張力を受けると考えられる中心の下弦材が最終的に降伏することになった。

4.3.3　荷重係数と変位の関係

各個体の荷重係数と中央節点Z方向変位の関係を図10に示す。最大変位が得られた節点である下層の中央に位置する節点に着目する。

図10から，No.1で選択された部材断面が全体的に細いため，ほとんどの上弦部材に座屈が発生し，崩壊ま

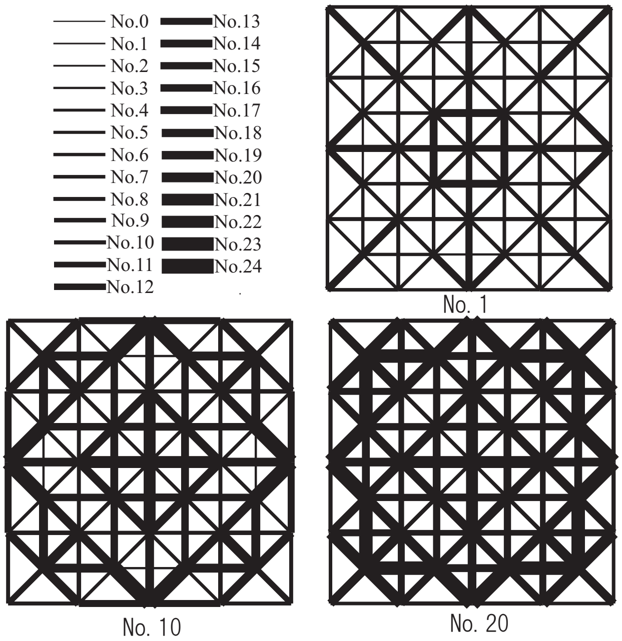


図6　No.1，No.10，No.20の断面分布

表 5　最終世代における各個体の崩壊メカニズム

荷重係数	No.1	No.10	No.20
λ_1^{acc}	0.0793	0.0691	0.0804
λ_2^{acc}	0.1231	0.2334	0.6474
λ_3^{acc}	0.2133	2.8229	1.3208
λ_4^{acc}	0.4499	4.2048	2.8064
λ_5^{acc}	-	-	5.8024

(λ_m^{acc}は $m-th$ Phaseでの累積荷重係数を表す)

での耐力や変形が小さく，荷重に耐えられなくなる。No.10とNo.20の形態は，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増えてていくにつれて剛性が低下し，ラーメン構造物が持つ靭性的な特性がもたらされていることがわかる。

5　結語

Compact Procedure Methodを利用し，構造物の崩壊荷重係数あるいは耐力を簡単に算出することと多目的遺伝的アルゴリズムを併用することが実現した。どのくらいの質量を変化させせると，崩壊荷重係数がどのように応答するかを把握することができ，設計者が構造物の耐力性能のレベルを決定するときに有用な情報となると考えられる。

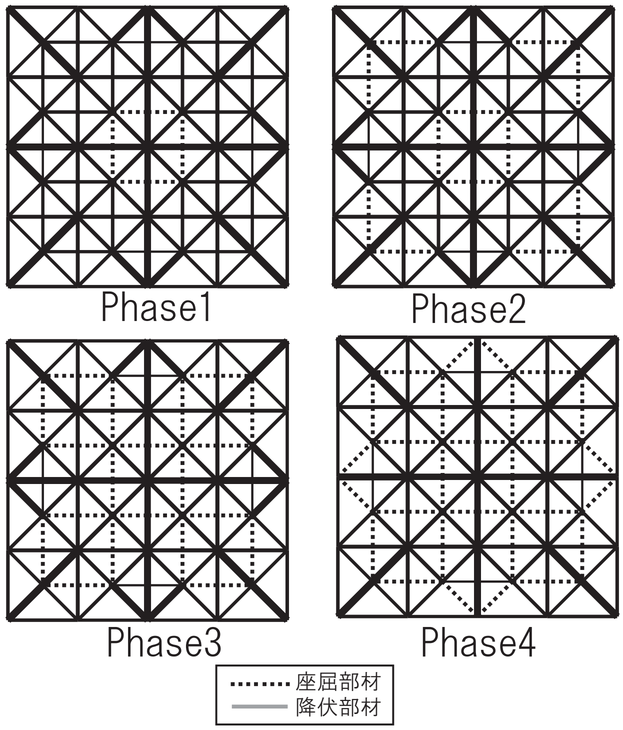


図7　No.1の崩壊メカニズム

参考文献

1) ロバスト性・冗長性を向上させた建物の構造デザイン, 2011年度日本建築学会大会(関東), 構造委員会応用力学運営委員会.

2) R.K.Livesley.: Matrix Methods of Structural Analysis(2nd ed.), Pergamon Press,1976.

3) 青山博之，上村恵彦：マトリックス法による構造解析，培風館, 2 1988.

4) 閻星宇，山崎康太，大森博司：Compact Procedure法の空間骨組構造の崩壊解析への応用，構造工学論文集，Vol.58B, 2012.3, pp.445-452.

5) Van den Broek:Theory of Limit Design, 1948. 2*John Wiley and Sons, Inc.*.

6) 山崎康太，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,，日本建築学会大会学術講演梗概集, 2009, B-1, p.731.

7) E. Zitzler, and L.Thiele: Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and The Strength Pareto Approach. IEEE Transactions and Evolutionary Computation, Vol.3, No.4, pp.257-271,1999.

8) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Technical Re-

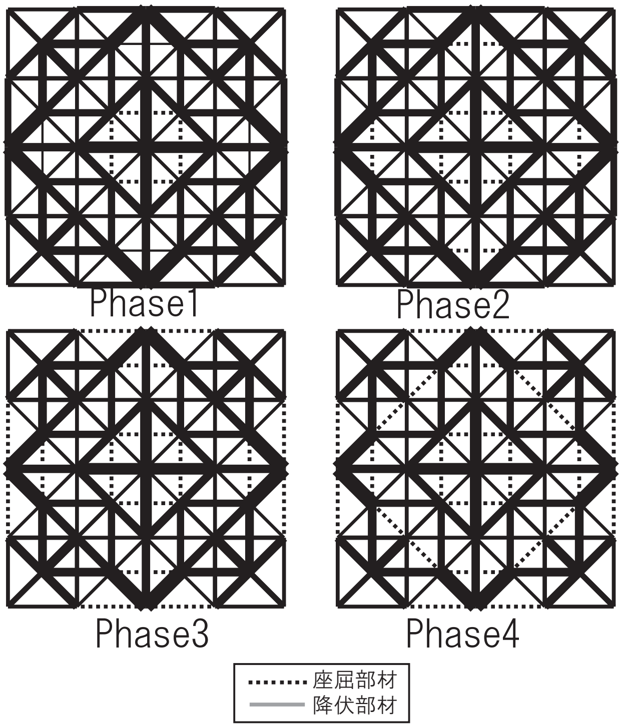


図8　No.10の崩壊メカニズム

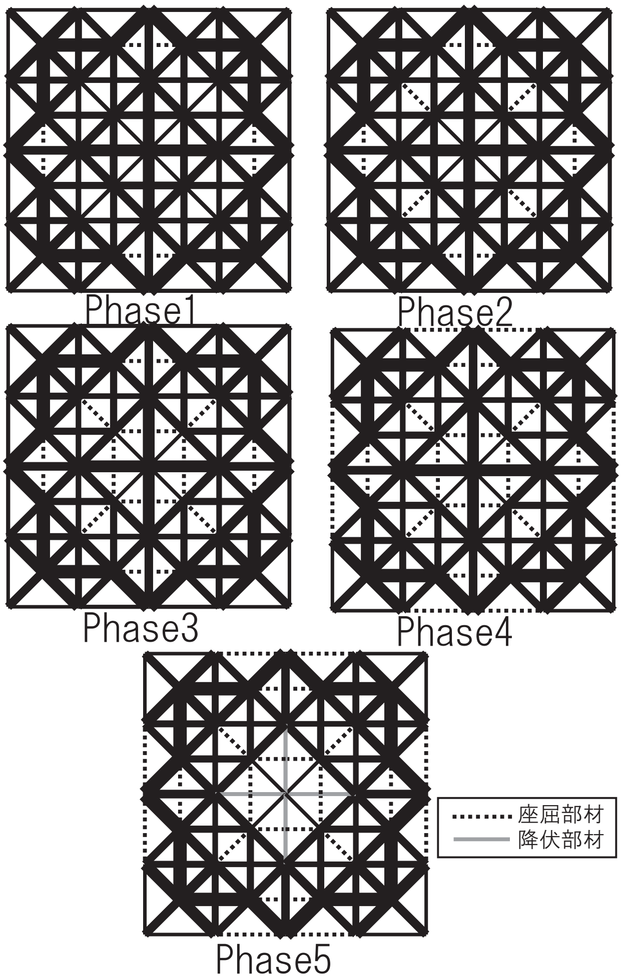


図9　No.20の崩壊メカニズム

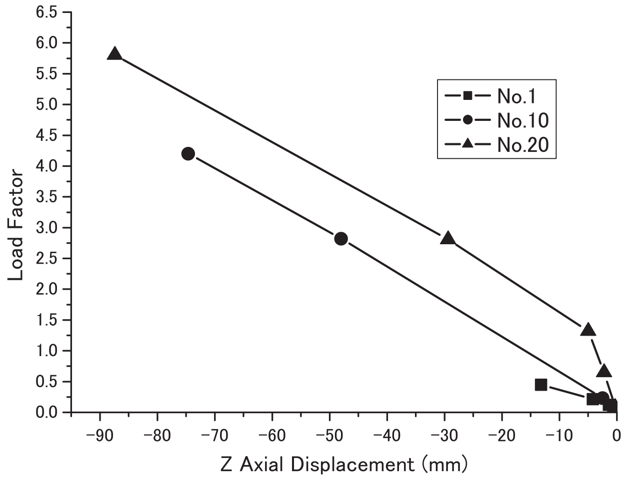


図10　No.1，No.10，No.20の荷重係数とZ方向変位の関係

port 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), 2001.

9) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization. Evolutionary Methods for Design, Optimisation, and Control, pp. 95-100,2002.

10) Goldberg, D. E. and K. Deb. A Comparison of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms. Foundations of Genetic Algorithms 1 (FOGA-1), pp. 69-93, 1991.

優良解探索 GA による任意境界形状を有する自由曲面シェル構造の形態解析

佐々木亜衣 [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，sasaki@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，教授，工博，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

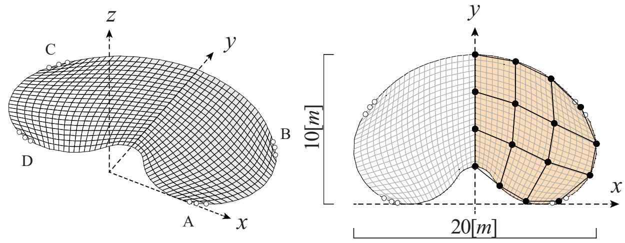
時代の変化に伴う多様な設計要求を許容する構造の一つに、自由曲面を有する空間構造がある。特に、連続体自由曲面シェル構造は施工技術や高強度材料の開発により、美しく軽快な空間が構成可能になっている。しかし、力学と形状が密接に関わるこれらの構造は、設計者の経験や直観による形態決定が難しい。

最近、自由曲面シェルの形態決定手順に構造最適化による方法が注目･展開され、多くの研究例がある[1)-4)]。本研究では従来の構造最適化における大域的最適解の獲得を目指した形態決定ではなく､大域的最適解（パレート最適解）や局所最適解（局所パレート解）を含む比較的評価の高い解、すなわち優良解の獲得による構造形態創生法の確立を考える。優良解探索解法には、遺伝的アルゴリズム系解法ISGA（GA with immune system）[5), 6)]が提案されており､基準形状が矩形･円形平板の自由曲面シェルに適用されている[7), 8)]。

本論文では、意匠性を考慮した任意境界形状の自由曲面シェル構造にISGAを適用させ､優良解の獲得を目指す｡数値解析例には、総ひずみエネルギや曲げひずみエネルギを目的関数とした単一目的最適化問題と、総ひずみエネルギと部材総体積を目的関数とした多目的最適化問題を扱う。

2 ISGA について

ISGA は従来の GA 系解法にクラスタ化と端切り法の操作導入により、形態決定に重要な設計変数空間の多様性を維持した解の探索が可能な解法である。計算パラメータはクラスタ数 r、上位個体選択率 H、記憶細胞数 M を設定する。r は設計変数空間の解状況、H は個体評価の上限値、M は高評価個体の記憶数である。ISGA ではエリート戦略が導入されておらず、記憶細胞（暫定解集合）は解の多様性に基づいて更新され､初期世代で保存される個体が最終世代で低評価個体になる可能性がある。ここに、記憶細胞除去率 q を設定し、低評価個体の削除[付1)]を行う。q の設定は、$0.0 \le q \le 0.3$ とする。ISGA の詳細なアルゴリズムは文献 5), 6) を参照されたい。



a. 基準形状　　b. 解析領域と制御点配置

図１　解析モデル

表１　ISGA パラメータ

個体数	200	記憶細胞数 M	100
世代数	5000	突然変異率	0.02
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

3 任意境界形状を有する自由曲面シェル

3.1 総ひずみエネルギ最小化（Model-A）

総ひずみエネルギ最小化に対する単一目的最適化の定式化は次式で与える。

Find　$\mathbf{A}, \mathbf{R}$　(1)

to minimize　$f_t(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d}$　(2)

subject to　$\sigma_i^C(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \le \sigma^L$　(3)

$\mathbf{A}^L \le \mathbf{A} \le \mathbf{A}^U,\ \mathbf{R}^L \le \mathbf{R} \le \mathbf{R}^U$　(4a, b)

ここで、$\mathbf{A}(=[A_i])$：断面情報ベクトル、$\mathbf{R}(=[R_i])$：節点情報ベクトル、$\mathbf{d}$：節点変位ベクトル、$\mathbf{K}$：全体剛性マトリクス、σ_i^C：i 要素の圧縮応力、σ^L：許容圧縮応力度の上限値である。

解析モデルは任意境界形状を有する自由曲面シェル構造である。ここでは、基準形状として勾玉をイメージした境界形状を採用する。図 1a に示す基準形状は長辺方向 20 m, 短辺方向 10 m、四隅の 3 節点をピン支持にした平板である。要素分割は文献 9) を参考に設定する。計算はモデルの対称性から図 1b に示す 1/2 領域を用い、境界部には要素の勾配を用いた連続条件を設定している。曲面形状と板厚には計算効率向上と滑らかな曲面表現のた

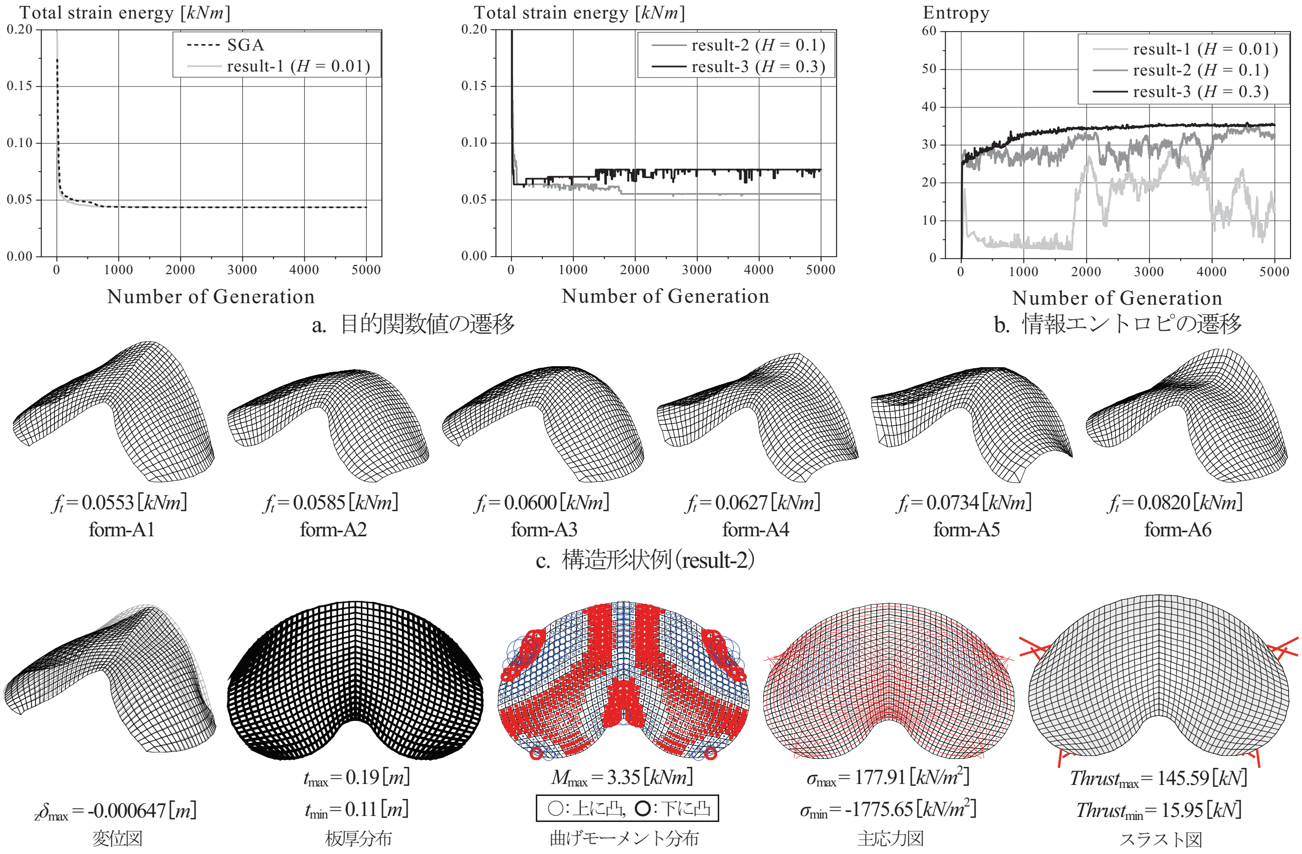


図 2　数値解析結果（$r = 10$） Model-A

め、有理テンソル積ベジエ曲面[付2]を採用する。設計変数は境界部の制御点のうち支持点と一致する箇所を除き、合計 30 である。z 軸節点座標と板厚の側面制約条件は $R_i^L = 0.0\ m$, $R_i^U = 7.0\ m$、$A_i^L = 0.1\ m$, $A_i^U = 0.2\ m$ と与え、応力制約は F_c30（$\sigma^L = 1.0\times10^4\ kN/m^2$）を想定する。載荷条件は長期荷重として自重 $24.0\ kN/m^3$ と等分布荷重 $1.0\ kN/m^2$ を設定する。構造解析は線形弾性範囲内で行い、弾性定数は $2.1862\times10^7\ kN/m^2$、ポアソン比は 0.2 とする。ISGA パラメータは表 1 の通りである。なお、遺伝子長に応じて定める突然変異率は、解探索の範囲を広げるため、従来の GA 系解法より大きく設定する。また、記憶細胞除去率 q は、計算データの蓄積により大域的最適解への収束や過剰な個体削除を避けるため、$q = 0.1$ とした。

ISGA（$r = 10, 50, H = 0.01, 0.1, 0.3$）により得られた数値解析結果を図 2, 3 に示す。図 2, 3 は同形式で、a. 記憶細胞内のエリート解における目的関数値の遷移、b. 情報エントロピ[10]の遷移、c. 特徴的な解傾向を示した $H = 0.1$ における記憶細胞内の解形状である。図 2d, 3d は form-A1 と form-A9 の力学性状（変位図・板厚分布・曲げモーメント分布・主応力図・スラスト図）である。変位図は細線が解形状・太線が変形後の形状（1000 倍）、板厚分布の実線太さは板厚の厚さ、曲げモーメント分布の円の大きさは曲げモーメントの大きさ（○:上に凸, ○:下に凸）、主応力図の実線長さは主応力の大きさ、スラスト図の実線長さはスラストの大きさに比例させている。図中の数値情報は、総ひずみエネルギ:f_t，最大鉛直変位:$_z\delta_{max}$，最大・最小板厚:t_{max}, t_{min}，最大曲げモーメント:M_{max}，最大・最小主応力:σ_{max}，σ_{min}，最大・最小スラスト値：$Thrust_{max}$, $Thrust_{min}$ である。

3. 2　曲げひずみエネルギ最小化（Model-B）

曲げひずみエネルギ最小化に対する単一目的最適化の定式化は Model-A で示した式(2) と次式を入れ替える。

$$f_b(\mathbf{A},\mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{w}^T\mathbf{K}_b\mathbf{w} \tag{5}$$

ここで、$\mathbf{w}$:面外節点変位ベクトル、$\mathbf{K}_b$:曲げ剛性マトリクスである。ISGA パラメータや解析条件は Model-A と同様に設定する。

ISGA（$r = 10, 50, H = 0.01, 0.1, 0.3$）により得られた数値解析結果は Model-A と同様に、図 4, 5 に示す。図 4d, 5d は form-B5 と form-B10 の力学性状である。図中の数値情報は、Model-A に曲げひずみエネルギ: f_b を加える。なお、

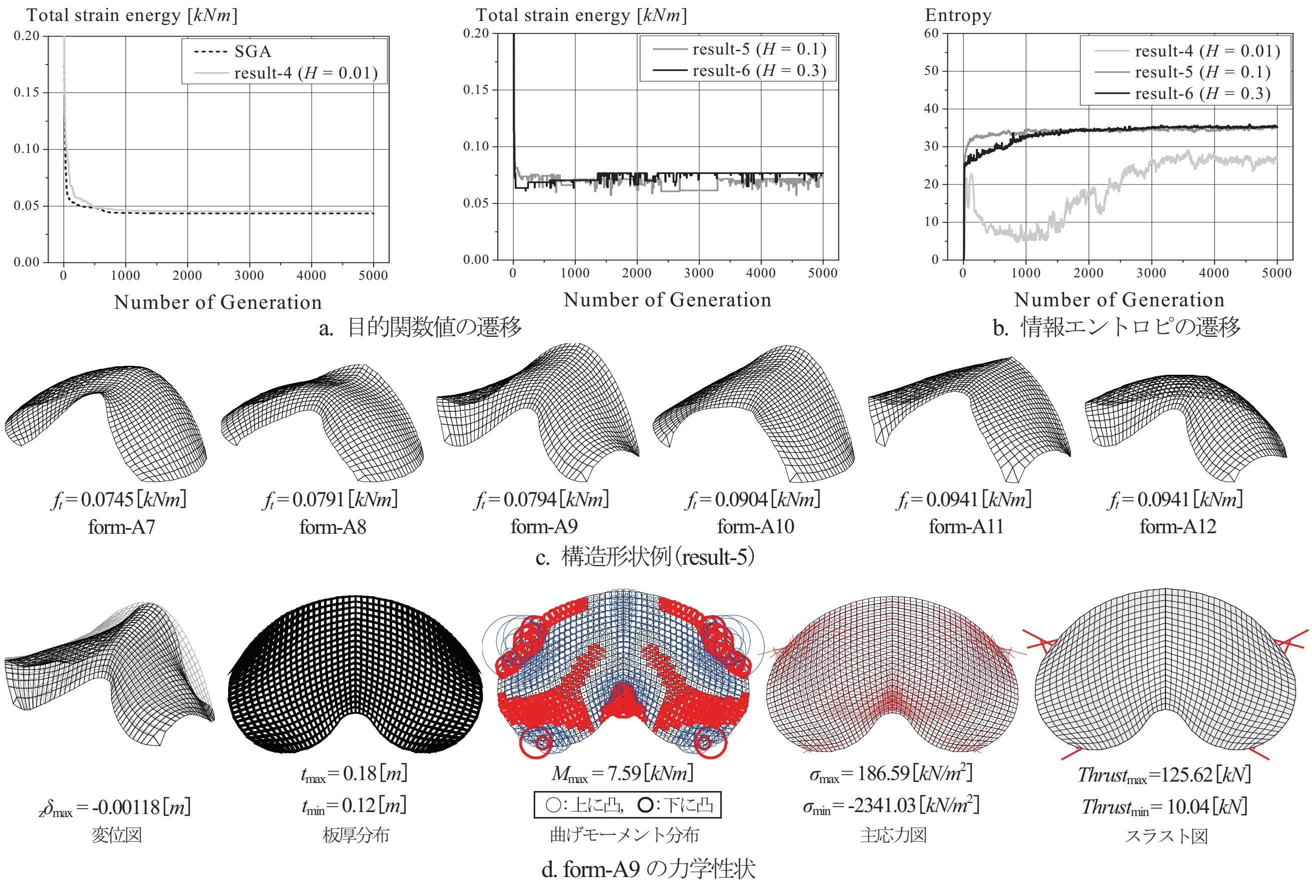


図3　数値解析結果(r = 50)　Model-A

総ひずみエネルギはE_tで示す。

3.3　多目的最適化(Model-C)

総ひずみエネルギと部材総体積の最小化に対する多目的最適化の定式化は次式で与える。

$$\textit{Find} \quad \mathbf{A}, \mathbf{R} \tag{6}$$

$$\textit{to minimize} \quad f_t(\mathbf{A},\mathbf{R}) = \frac{1}{2}\mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d} \tag{7}$$

$$f_v(\mathbf{A},\mathbf{R}) = \mathbf{S}(\mathbf{R})^T\mathbf{A} \tag{8}$$

$$\textit{subject to} \quad \sigma_i^{\,C}(\mathbf{A},\mathbf{R}) \le \sigma^L \tag{9}$$

$$\mathbf{A}^L \le \mathbf{A} \le \mathbf{A}^U,\ \mathbf{R}^L \le \mathbf{R} \le \mathbf{R}^U \tag{10a, b}$$

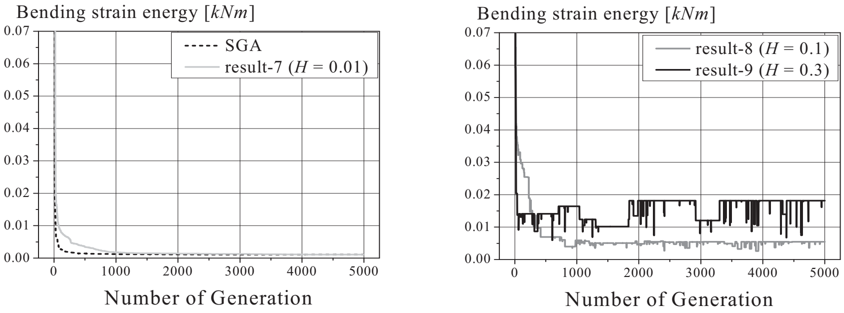
ここで、$\mathbf{S}(\mathbf{R})$:表面積ベクトルを表す。ISGA パラメータや解析条件はModel-A と同様である。

ISGA(r = 10, 50, H = 0.01, 0.1, 0.3)により得られた数値解析結果を図6, 7に示す。図6, 7は同形式で、a. 目的関数空間上の解、b. 情報エントロピ[10]の遷移、c. 得られた構造形状である。図6d, 7dはform-C5とform-C9の力学性状を示す。図中の数値情報は、Model-Aに部材総体積:f_vを加える。

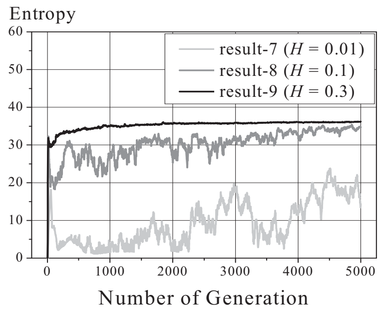
4　考察

Model-A, -Bでは上位個体選択率Hの設定により異なる解を捉える。特にH = 0.01の場合、除去操作の導入により記憶細胞内のエリート解がSGAで得られる解と一致する。$H \ge 0.1$に設定することで優良解の範囲を広げ、form-A11, -A12(図3)やform-B9, -B10(図5)のように目的関数値が殆ど同値で複数の形状が得られる。これはISGAが解の多様性に従い解を更新した結果である。解の多様性はクラスタ数rの設定で異なり、設計変数空間が細分化されるr = 50のとき、多様度が増加する傾向を示す。この傾向はH = 0.1のときに顕著である。Model-Aの解形態は引張力が小さく圧縮力で抵抗する形状が多く、境界部のライズに特徴的な変化が見られる。短辺方向の境界部の多くはライズが異なるアーチのみを形成するが、長辺方向の境界部(BC・AD間)は多様な形を形成している。一方、Model-Bでは、Model-Aで得られた形状に加えて、form-B4のようにライズが低く面内応力が大きい形状も得る。曲げひずみエネルギを目的関数に設定すると総ひずみエネルギのときよりも複数の解が得られる。

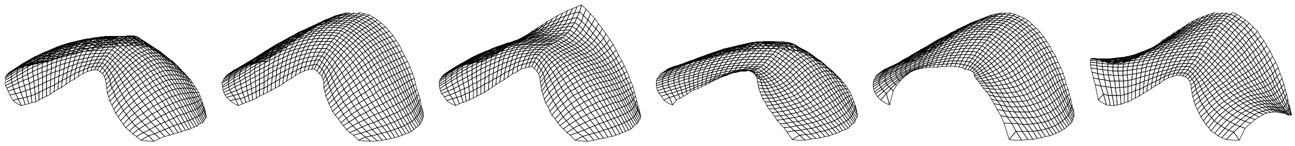
Model-Cでは、Hの設定により異なるパレートフロントが得られている。特にH = 0.01の場合、SPEA2で得られるパレートフロントと一致し、パレートフロント上の解は部材総体積の減少に伴いライズが減少する。$H \ge 0.1$



a. 目的関数値の遷移

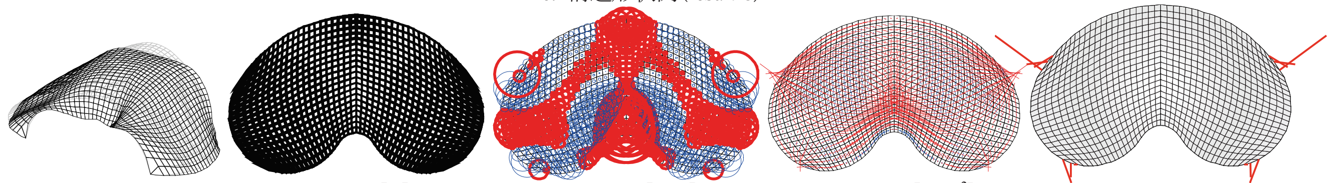


b. 情報エントロピの遷移



form-B1	form-B2	form-B3	form-B4	form-B5	form-B6
$f_b = 5.50\times10^{-3}$ [kNm]	$f_b = 6.96\times10^{-3}$ [kNm]	$f_b = 7.09\times10^{-3}$ [kNm]	$f_b = 1.93\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 3.16\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 3.17\times10^{-2}$ [kNm]
$E_t = 0.0836$ [kNm]	$E_t = 0.0688$ [kNm]	$E_t = 0.0722$ [kNm]	$E_t = 0.134$ [kNm]	$E_t = 0.114$ [kNm]	$E_t = 0.109$ [kNm]

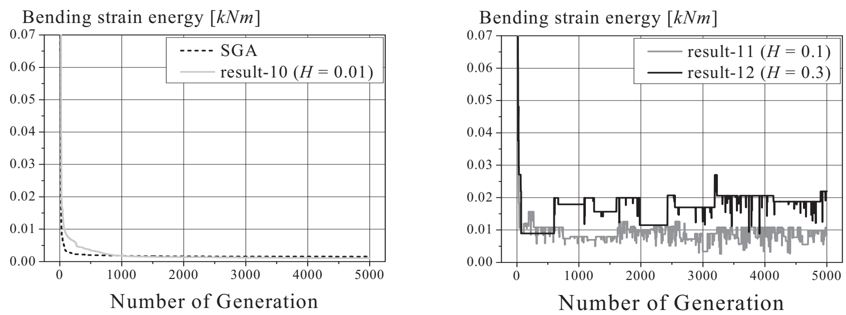
c. 構造形状例(result-8)



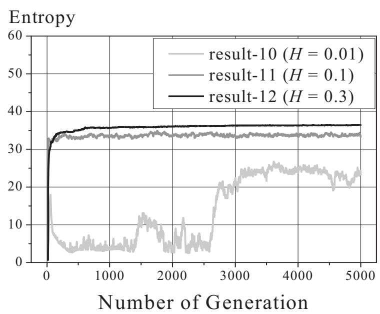
変位図	板厚分布	曲げモーメント分布	主応力図	スラスト図
$_z\delta_{max} = -0.00313$ [m]	$t_{max} = 0.19$ [m] $t_{min} = 0.12$ [m]	$M_{max} = 7.17$ [kNm] ○:上に凸, ○:下に凸	$\sigma_{max} = 343.54$ [kN/m^2] $\sigma_{min} = -1907.00$ [kN/m^2]	$Thrust_{max}$=218.06 [kN] $Thrust_{min}$= 14.06 [kN]

d. form-B5 の力学性状

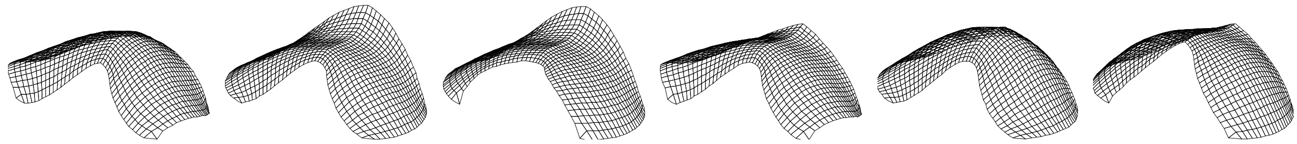
図 4　数値解析結果($r = 10$)　Model-B



a. 目的関数値の遷移

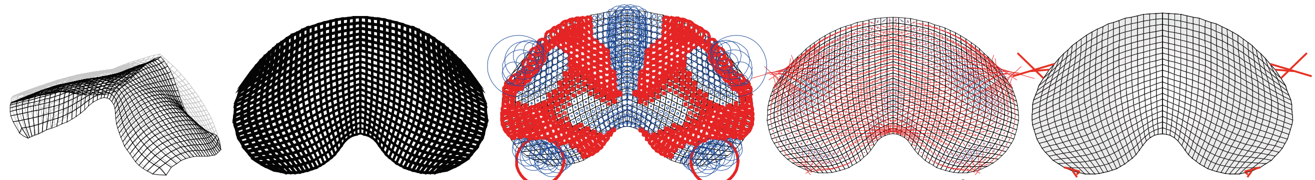


b. 情報エントロピの遷移



form-B7	form-B8	form-B9	form-B10	form-B11	form-B12
$f_b = 8.51\times10^{-3}$ [kNm]	$f_b = 1.12\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 1.80\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 1.81\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 2.24\times10^{-2}$ [kNm]	$f_b = 2.35\times10^{-2}$ [kNm]
$E_t = 0.0850$ [kNm]	$E_t = 0.0855$ [kNm]	$E_t = 0.0891$ [kNm]	$E_t = 0.0882$ [kNm]	$E_t = 0.0992$ [kNm]	$E_t = 0.0971$ [kNm]

c. 構造形状例(result-11)



変位図	板厚分布	曲げモーメント分布	主応力図	スラスト図
$_z\delta_{max} = -0.00115$ [m]	$t_{max} = 0.17$ [m] $t_{min} = 0.13$ [m]	$M_{max} = 7.24$ [kNm] ○:上に凸, ○:下に凸	$\sigma_{max} = 241.48$ [kN/m^2] $\sigma_{min} = -2453.79$ [kN/m^2]	$Thrust_{max}$=162.59 [kN] $Thrust_{min}$= 11.10 [kN]

d. form-B10 の力学性状

図 5　数値解析結果($r = 50$)　Model-B

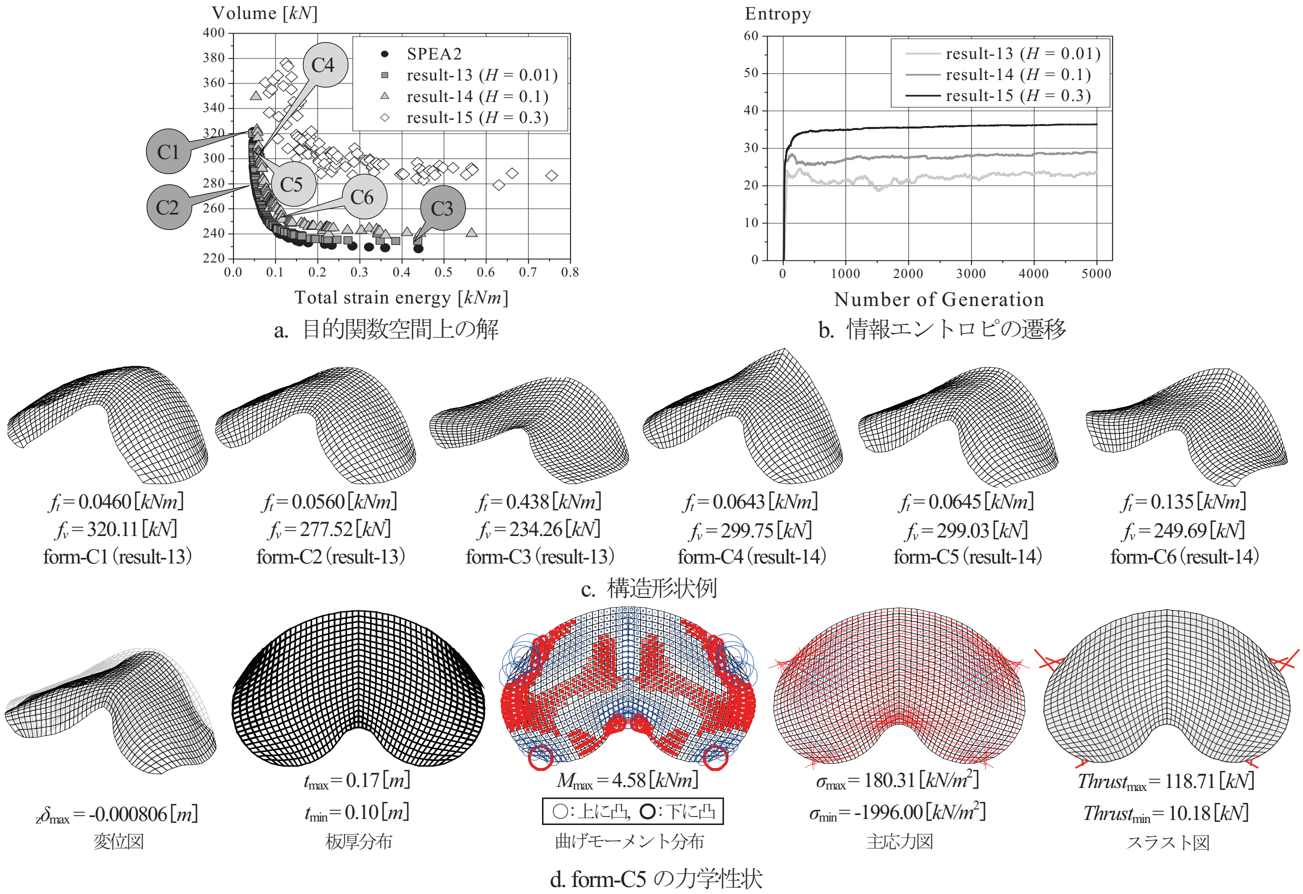


図 6 数値解析結果 (r = 10) Model-C

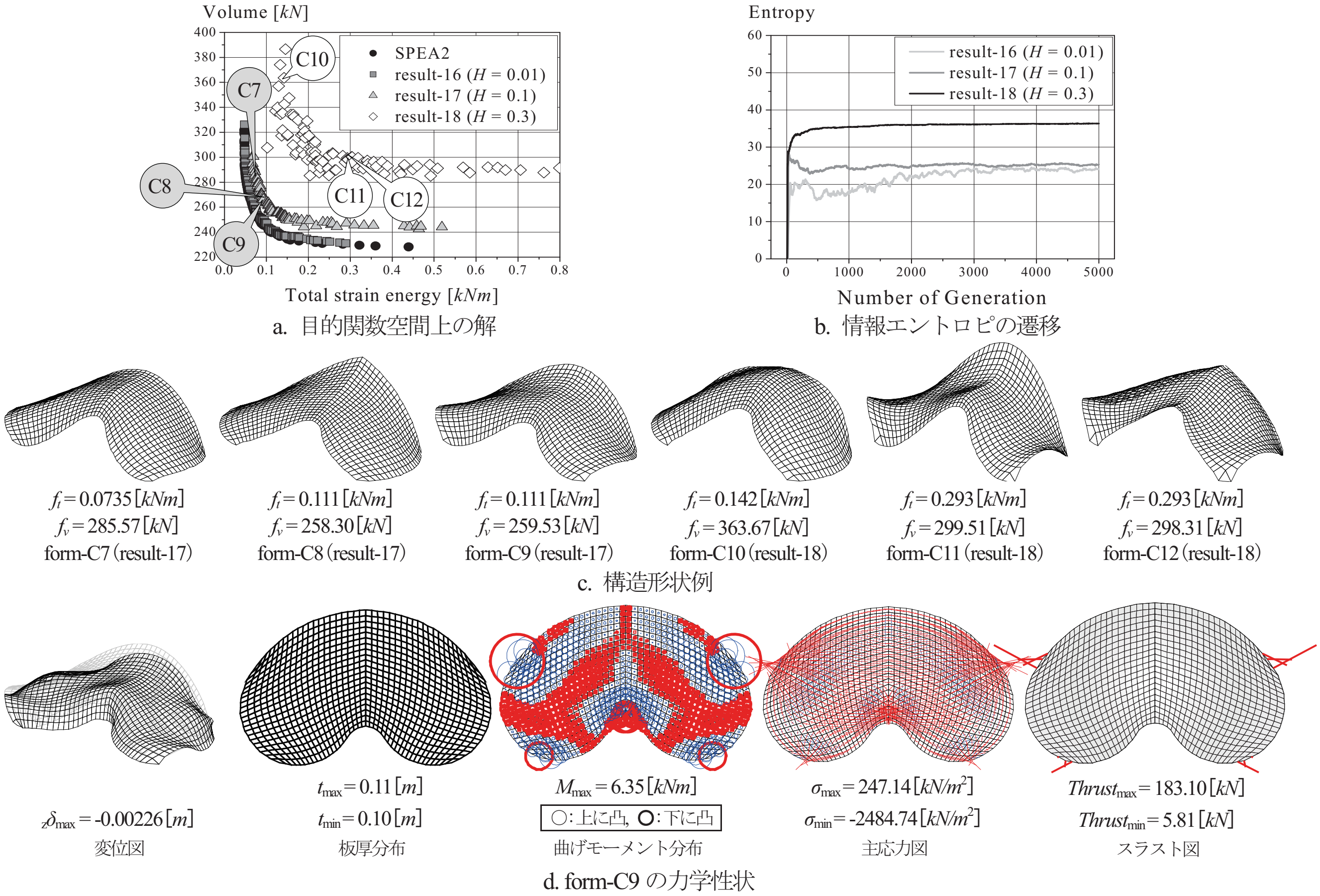


図 7 数値解析結果 (r = 50) Model-C

に設定すると、form-C4, -C5（図6）や form-C8, -C9（図7）に示すようにパレートフロント上で同じ位置にある解の形状は異なる。多様度は r, H の設定で異なり、$H = 0.1$ においては $r = 10$ のとき高い。この理由はISGA特有のパラメータ設定により、除去個体数が一つのクラスタ内に存在する記憶個体数よりも多くなることで生じるためである。ただし、H が大きく暫定優良解集合の解密度が低い場合は、この限りではない。

任意境界形状を有する自由曲面シェルは、基準形状の複雑さから力学的な制約条件を満たすことが難しく、解の多様性が失われ易い。ISGA パラメータの設定内容により優良解探索の範囲を広げることで、このような現象は改善されるが、過剰な探索範囲拡大は低評価個体の獲得に繋がる。ここに、低評価個体を削除する除去操作の導入で、多くの高評価個体を得ることが確認できた。力学性状を見ても、総ひずみ・曲げひずみエネルギを目的関数にすると、前者は面内・面外応力に対し、後者は面外応力に対して板厚が最適化されている。ただし、記憶細胞除去率 q の設定によっては多様性が失われる可能性があり、数値設定の扱いには注意しなければならない。

5 まとめ

本論文は任意境界形状を有する自由曲面シェル構造の単一・多目的最適化に対する優良解の探索を行った。数値計算例では、高評価かつ多様な構造形態が優良解探索GA により獲得できることを示した。以上より、優良解の獲得による任意境界形状を想定した自由曲面シェルの一例が示せた。今後は、より自由な境界形状に対して種々の機能・意匠的条件を導入した自由曲面シェルの構造形態創生へ展開したい。

参考文献

1) 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) 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
3) 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－自由曲面シェル構造の構造形態創生法の提案（その1）－，日本建築学会構造系論文集，**640**, 1091- 1098, 2009.6
4) 本間俊雄：構造形態の創生と最適化，第 9 回新「シェル・空間構造」セミナー－設計への計算機の応用と解析上の留意点，日本建築学会，25-32, 2010.7
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) 本間俊雄，和田大典，永田洸大，沖田裕介：優良解探索機能を導入したGA系解法及びSI系解法の特性と構造形態創生，日本建築学会，日本建築学会シンポジウム「ソフトコンピューティングの最前線」講演論文集，21-32, 2011.7
7) D.Wada, T.Honma : Structural Morphogenesis for Free Surface Shell Structure by Using Genetic Algorithms with Diversity of Solution, 6th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems, CD-ROM Proceeding, J35, 2010.6
8) 和田大典，本間俊雄：自由曲面シェル構造の形態決定における優良解探索と解の多様性，日本建築学会，構造工学論文集，**58B**，453-460, 2012.3
9) 永田洸大，本間俊雄：構造最適化における自由曲面シェルの要素分割とベジエ曲面の制御点に関する考察，日本建築学会研究報告，九州支部，構造系，**51**, 285-288, 2012.3
10) Y.Okita, T.Honma : Structural Morphogenesis for Free-form Grid Shell Using Genetic Algorithms with Manipulation of Decent Solution Search, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, **53**(3), 177-184, 2012.9

付録1 除去操作手順

目的関数値の最小化問題を対象として除去操作手順を以下に説明する。

① 記憶細胞除去率 q を設定し、記憶細胞候補から除去する個体数（除去個体数）を決定する。

② 記憶細胞候補の評価を行う。個体評価は、個体が集団の中で支配される個体数から算出する強度 $S(i)$を採用する。強度はパレート・ランキング方式を用いる。第 t 世代の記憶細胞候補 $\widetilde{\mathbf{P}}_t$ と記憶細胞 $\overline{\mathbf{P}}_t$ に含まれる全ての個体 i を用いた集合 $\mathbf{Q}(i)$ を次式で定義する。

$$\mathbf{Q}(i) = \left\{ j \middle| \left(f_k(\mathbf{x}_j) \le f_k(\mathbf{x}_i), k = 1, 2, \ldots, l \right), i, j \in \widetilde{\mathbf{P}}_t \cup \overline{\mathbf{P}}_t \right\} \quad (付.1)$$

強度 $S(i)$は次式で与えられる。

$$S(i) = \left| \mathbf{Q}(i) \right| \quad (付.2)$$

③ 強度により評価が低いとみなされた個体は記憶細胞候補から除去する。

④ ③で除去された個体の合計が①で決定した除去個体数に達していなければ③へ、達していれば終了とする。

付録2 有理テンソル積ベジエ曲面

有理テンソル積ベジエ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節点位置ベクトルは次式で与える。

$$\mathbf{r}_{kl}(x, y) = \left[r_x(u_k, v_l), r_y(u_k, v_l), r_z(u_k, v_l) \right]^T \quad (付.3)$$

(u_k, v_l : [0.0, 1.0], k=1, 2, 3, …, m, l=1, 2, 3, …, n)

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。

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u) B_i^{n'}(v) \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m'} \sum_{j=0}^{n'} w_{ij} B_i^{m'}(u) B_i^{n'}(v)} \quad (付.4)$$

$$B_i^{m'}(u) = \frac{m'!}{i!(m'-i)!} u^i (1-u)^{m'-i} \quad \text{(バーンスタイン基底関数)} \quad (付.5)$$

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。

格子状平板の初期曲げにより形成されるグリッドシェルの形状解析
－コンパス法と構造最適化による方法の形状比較－

山本 憲司[1)]，森澤 健人[2)]
1)東海大学工学部建築学科，准教授，博士(工学)，kyamamoto@tokai-u.jp
2)東海大学工学部建築学科，学部生

1　はじめに

シェル構造を容易に施工する方法として、直線材をピン接合して組んだ格子状平板の境界に強制変位を与え、直線材に生じる曲げ変形によって曲面を形成する方法がある（図1)。この種のシェルでは変形後のかたち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。既往の形状解析の方法としてケーブルネットの吊り形状を用いる方法[1)]や、任意曲面を幾何学的な関係から等間隔メッシュで分割して座標を算出する方法[1),2),3)]などが提案されている。これらの方法は幾何学的な関係のみが考慮されており、格子状平板の力学的な曲げ性状等は考慮されていない為、目標とする形状と実際の釣合形状に大きな差が生じるケースも考えられる。

本報ではこれら既往の形状解析の方法のなかで、特に幾何学的な関係から等間隔メッシュを作成する方法（以下ではこの方法をコンパス法[1)]と呼ぶ）に注目し、幾つかの曲面に対してその適用性について調査する。コンパス法を用いて比較的な複雑な曲面の等間隔メッシュを求め、この結果を元に格子状平板データを作成して幾何学的非線形解析を実行する。そして幾何学的に求めた形状が格子状平板の曲げ変形によって再現可能であるか数値解析により調査した結果について報告する。

また、著者の一人は過去に格子状平板の曲げ性状を直接的に考慮した新しい形状解析の方法として、構造最適化を用いて目標曲面との座標誤差ノルムを最小化する方法（以下、構造最適化による方法と呼ぶ）を提案した[4)]。本報では、この方法を適用した場合の結果とコンパス法による結果の比較についても行う。

2　コンパス法による形状解析

細長い直線材から構成される格子状平板の境界に強制変位を与えて曲面を形成する場合、直線材の変形成分の多くは曲げ変形であり、軸変形は十分に小さいと考えられる。この為、グリッドシェルの既往の形状解析の方法として、形成しようとする曲面を何らかの方法で等間隔メッシュに分割し、この等間隔メッシュの形状を近似的に釣合形状として扱うことが行われている。F. Otto らはコンパスだけによって任意の曲面に等間隔メッシュを描く方法を示した[1)](図2)。本報では、この等間隔メッシュの座標をコンピュータの数値計算により求める。以下にその方法を示す。（尚、以降では、この任意曲面の等間隔メッシュを数値計算により求める方法を（コンパスは用いないが結果は同じであるので）コンパス法と呼んでいる。）

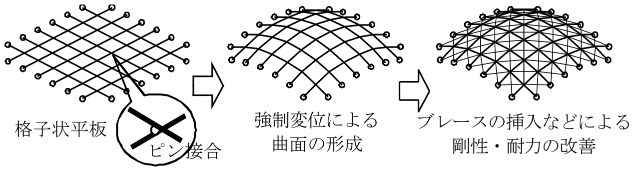


図1　曲面形成の概念図

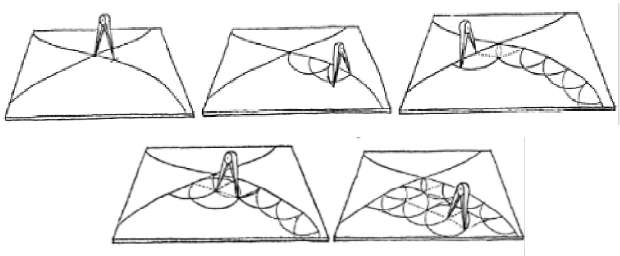


図2　コンパス法[1)]

形成する曲面の形状は直交座標空間に$z = f(x, y)$の関数で与えられるものとする。曲面関数$z = f(x, y)$上に格子状に配置された節点が隣接する節点との直線距離が指定距離$\overline{\ell}$となるように節点を配置する問題を考える。全節点のx座標ベクトル、y座標ベクトルをそれぞれ、$\mathbf{x} = (x_1, \cdots, x_n)^T$, $\mathbf{y} = (y_1, \cdots, y_n)^T$と表す。ここに$n$は総節点数である。目的とする$\mathbf{x}, \mathbf{y}$は次の関数を極小化することで求められる。

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_e \left(\ell_e - \overline{\ell} \right)^2 \tag{1}$$

ここにℓ_eは要素eの長さを表し、例えば要素eが節点i, jから成るものとすれば次式で表せる。

$$\ell_e = \sqrt{\left(x_j - x_i\right)^2 + \left(y_j - y_i\right)^2 + \left(f(x_j, y_j) - f(x_i, y_i)\right)^2} \tag{2}$$

(1)式を任意節点kの座標x_k, y_kで偏微分し、(1)式の停留条件式として次式が得られる。

$$\frac{\partial g}{\partial x_k}=\sum_e 2\left(\ell_e-\overline{\ell}\right)\left(\frac{\partial \ell_e}{\partial x_i}\cdot\frac{\partial x_i}{\partial x_k}+\frac{\partial \ell_e}{\partial x_j}\cdot\frac{\partial x_j}{\partial x_k}\right)=0 \quad (k=1.\cdots,n)$$

$$\frac{\partial g}{\partial y_k}=\sum_e 2\left(\ell_e-\overline{\ell}\right)\left(\frac{\partial \ell_e}{\partial y_i}\cdot\frac{\partial y_i}{\partial y_k}+\frac{\partial \ell_e}{\partial y_j}\cdot\frac{\partial y_j}{\partial y_k}\right)=0 \quad (k=1.\cdots,n) \tag{3}$$

ここに、i, j は要素 e を構成する節点を表し、例えば式中の $\partial x_i / \partial x_k$ は節点 k と節点 i が一致する時 1 となりそれ以外は 0 になる。(3)式は $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ の非線形連立方程式であり、これを解く為にニュートンラプソン法を適用する。反復計算 s ステップにおける $\mathbf{x}$ を $\mathbf{x}^s$ で表し、$s+1$ ステップにおける $\mathbf{x}$ を $\mathbf{x}^{s+1}=\mathbf{x}^s+\Delta\mathbf{x}^s$ と表すものとする。$\mathbf{y}$ についても同様である。この場合、修正公式は次のようになる。

$$\left[\begin{array}{ccc:ccc}
\frac{\partial^2 g^s}{\partial x_1 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_1 \partial x_n} & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_1 \partial y_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_1 \partial y_n} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{\partial^2 g^s}{\partial x_n \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_n \partial x_n} & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_n \partial y_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial x_n \partial y_n} \\
\hdashline
\frac{\partial^2 g^s}{\partial y_1 \partial x_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_1 \partial x_n} & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_1 \partial y_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_1 \partial y_n} \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
\frac{\partial^2 g^s}{\partial y_n \partial x_1} & \ddots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_n \partial x_n} & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_n \partial y_1} & \cdots & \frac{\partial^2 g^s}{\partial y_n \partial y_n}
\end{array}\right]
\left\{\begin{array}{c}\Delta x_1^s \\ \vdots \\ \Delta x_n^s \\ \hdashline \Delta y_1^s \\ \vdots \\ \Delta y_n^s\end{array}\right\}
=-\left\{\begin{array}{c}\frac{\partial g^s}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial g^s}{\partial x_n} \\ \hdashline \frac{\partial g^s}{\partial y_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial g^s}{\partial y_n}\end{array}\right\} \tag{4}$$

ここに $g^s=g\left(\mathbf{x}^s,\mathbf{y}^s\right)$ である。(4)式の連立方程式を $\Delta\mathbf{x}^s, \Delta\mathbf{y}^s$ について解き、$\mathbf{x}^{s+1}=\mathbf{x}^s+\Delta\mathbf{x}^s$, $\mathbf{y}^{s+1}=\mathbf{y}^s+\Delta\mathbf{y}^s$ として新しい $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ を求め、これを繰り返すことで(3)式を満たす $\mathbf{x}, \mathbf{y}$ を求めることができる。

3　コンパス法の数値解析例

次式で表される二つの曲面（図4）に対し、等間隔メッシュの座標を求める（図4）。但し x,y に代入される数値の単位は m である。メッシュ間隔 $\overline{\ell}=0.15\,(\mathrm{m})$ とする。

$$曲面\mathrm{A}: z=-\frac{1}{2}\left\{x^2+\left(y+\frac{3}{4}\right)^2\right\}\left\{x^2+\left(y-\frac{3}{4}\right)^2\right\} \tag{5}$$

$$曲面\mathrm{B}: z=\frac{1}{2}(x+2)\sin\left(\frac{\pi}{2}\sqrt{(x+1)^2+y^2}\right) \tag{6}$$

メッシュの節点座標の初期値は x-y 平面上に 0.15m 間隔で配置した（図5）。節点の拘束条件は図5中に記入してある。尚、建築構造物としては小さな寸法の曲面を扱っているが、これは本結果を用いて今後模型実験を行う予定がある為である。

ニュートンラプソン法では初期値を解近傍に設定しないと、収束計算時に発散し解が求められない場合がある。本問題では初期値が上述の平面状態では解が求められないケースがあった。この為目標曲面を $z=\alpha\times f(x,y)$ として、$\alpha=0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ のように目標曲面のライズを少しずつ増加させながら逐次解を求めた。最終的に得られた等間隔メッシュの形状を図6に示す。これらの等間隔メッシュを特定の高さで切断しシェルの境界とす

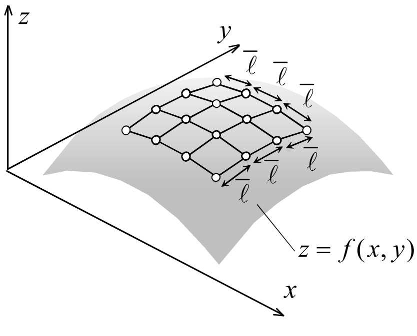
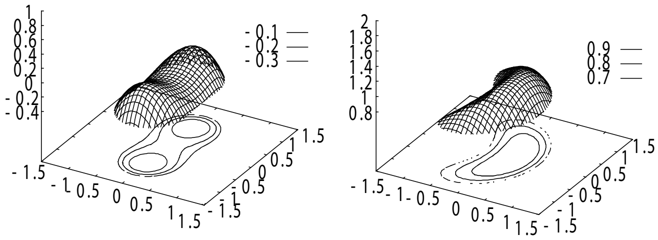
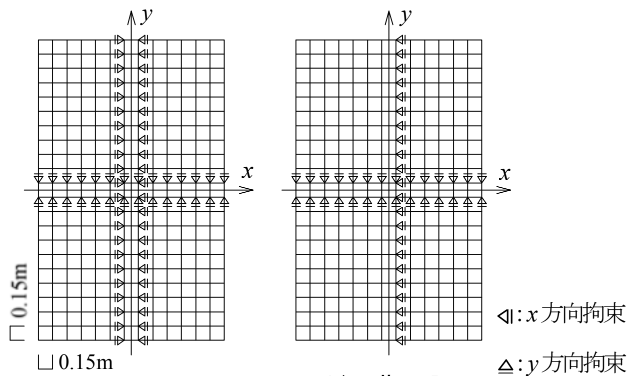


図3　等間隔メッシュ



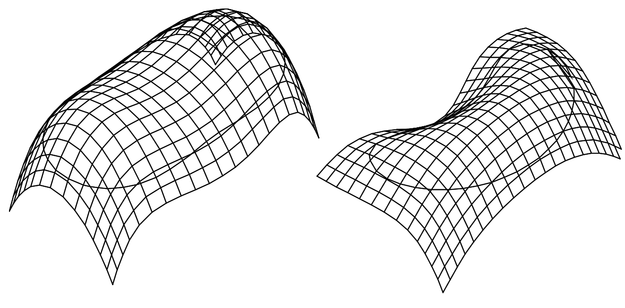
a）曲面A　　b）曲面B

図4　目標曲面



a）曲面A　　b）曲面B

図5　メッシュ初期値



a）曲面A　　b）曲面B

図6　等間隔メッシュ

る。曲面Aは$z=-0.4$ (m)、曲面Bは$z=0.68$ (m)の高さで切断した（図6の曲面上の閉曲線が切断線を表す)。

4　幾何学的非線形解析

前章の幾何学的に求めたメッシュの形状が格子状に組まれた直線材の曲げ変形によって再現可能であるかを調べるために、幾何学的非線形性を考慮した構造解析によって実際の釣合形状を調査する。初期状態である格子状平板の寸法は、図6のコンパス法の結果より（格子間隔は決まっているので）特定高さで切断された境界付近の要素長さを算出して求められる。曲面A, 曲面Bのそれぞれの格子状平板の形状を図7-a,bに示す。解析は対称性を考慮し曲面Aでは1/4、曲面Bでは1/2の部分を解析領域としてモデル化している。要素分割は格子の一辺が2要素となるようにした。部材は模型実験での使用を予定しているGFRP製5 φの丸棒とし、ヤング率を40GPaとした。格子接合部は3軸周りの回転を自由とするピン接合と仮定した。接合部の偏心は考慮しない。境界の支持条件はピン支持とした。尚、格子状平板の境界節点の座標と強制変位の具体的な値については、後述の構造最適化による結果とまとめて表示しており、曲面Aは表2の「Grid Plate」及び「Initial Displacement」の欄に示している。曲面Bについても同様に表3に示している。

幾何学的非線形解析は変位増分法を用い、境界の節点を所定の位置に移動させるまでに50ステップに分けて釣合形状を求めた。釣合形状を図8に示す。図4の曲面のイメージを良く再現していることが分かる。コンパス法による形状と、幾何学的非線形解析により求められた釣合形状の比較を、曲面Aの場合を図9に、曲面Bの場合を図10に示す。破線がコンパス法のメッシュの形状を、実線が幾何学的非線形解析により求められた釣合形状を表す。両者の差は比較的小さいことが分かる。コンパス法の形状と釣合形状の節点距離（誤差）を表1にまとめて示す。誤差の最大値は曲面Aでは12.0mm、曲面Bでは7.1mmであった。

表1　コンパス法メッシュ形状と釣合形状の誤差（mm）

	最大値 (mm) (Ratio (%))	平均値 (mm) (Ratio (%))	標準偏差 (mm) (Ratio (%))
曲面A	12.0 (8.0)	4.6 (3.1)	2.6 (1.7)
曲面B	7.1 (4.8)	2.8 (1.8)	1.7 (1.1)

（括弧内は格子間隔$\bar{\ell}$(=150mm)との比）

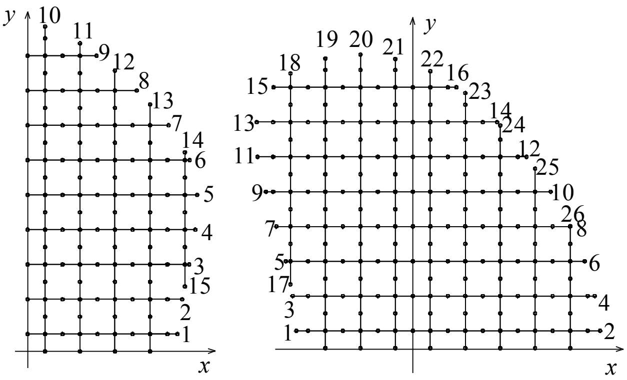

a）曲面A　　b）曲面B

図7　格子状平板

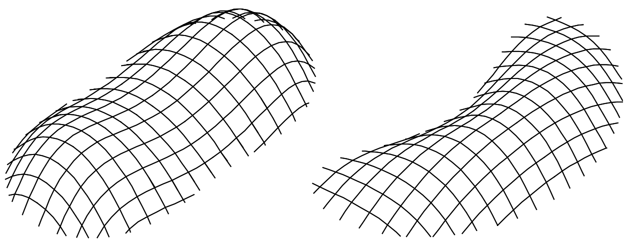

a）曲面A　　b）曲面B

図8　幾何学的非線形解析による釣合形状

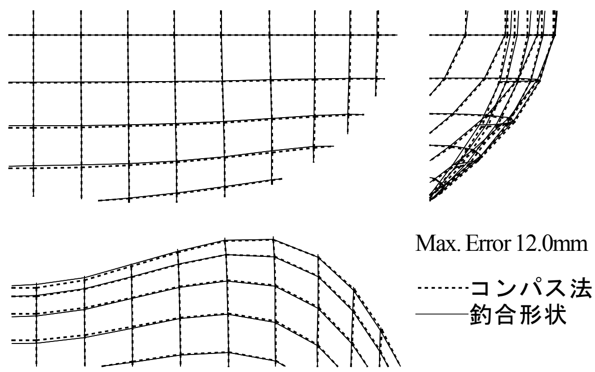


図9　ｺﾝﾊﾟｽ法ﾒｯｼｭ形状と釣合形状の比較（曲面A）

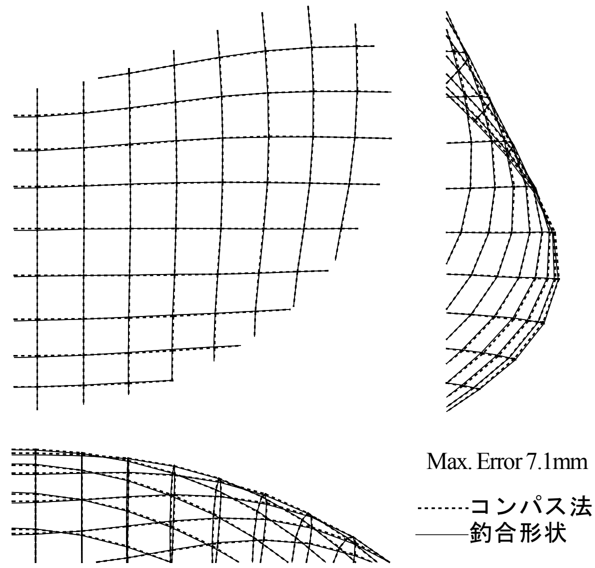


図10　ｺﾝﾊﾟｽ法ﾒｯｼｭ形状と釣合形状の比較（曲面B）

研究の当初ではコンパス法の形状と釣合形状には比較的大きな差が生じるものと考えていたが、実際には小さいことが分かった。様々な曲面形状やメッシュの配置角度の場合について更に検討する必要があるが、図5に示すようなメッシュの初期配置と拘束条件が適切に与えられれば、コンパス法による形状解析は十分な実用性を有するようである。

5　構造最適化による釣合形状の修正

前章の結果から、コンパス法によって算定される格子状平板の形状及び強制変位を用いて得られる釣合形状が、曲面関数の形状を比較的良く再現することを示した。一方で、設計時により高い精度で特定の曲面形状を形成することが要求されるケースも考えられる。著者の一人は既往の研究[4)]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(構造最適化による方法)。本章では、この方法を用いて、更に釣合形状を可能な限り目標曲面に近づけることを試みる。

5.1　構造最適化による方法の概要

論文の完結性の為に最適化手法の概要について説明する。変形後の釣合形状を目標とする曲面$z = f(x, y)$にできるだけ近づけるような境界節点の強制変位を求める最適化問題を考える（図11)。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有限要素解析により求められる。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。

$$\min \quad \sum_{i}^{N} \left\{ f(x_i + u_i, y_i + v_i) - (z_i + w_i) \right\}^2 \tag{7}$$

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し、u_i, v_i, w_iはi節点のx,y,z方向変位を表す。Nは総節点数である。ただしこの目的関数のみでは釣合形状に構造的に意味の無い面内曲げ変形を生じる場合がある事を確認しており[4)]、これを避けるために次の制約条件を考慮する。

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12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。

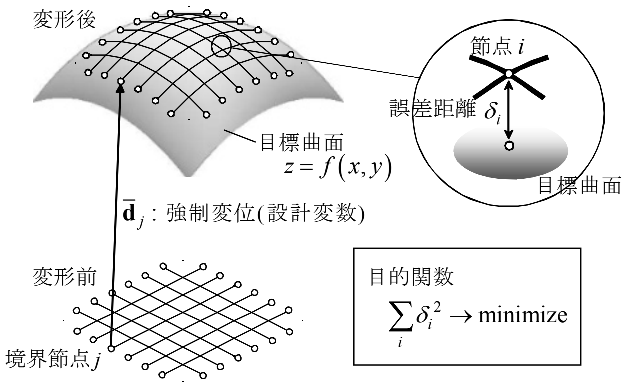


図11　最適化の概念図

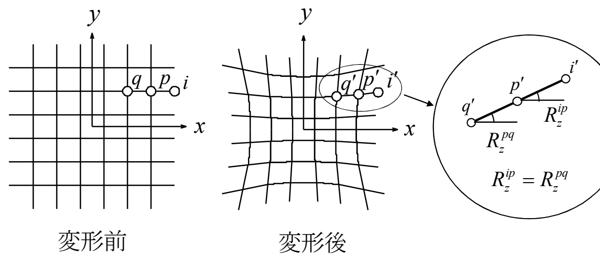


図12　部材角の等式制約条件

$$\text{subject to} \quad R_z^{ip} = R_z^{pq} \quad (i \in \mathbf{P}) \tag{8}$$

ここに、$\mathbf{P}$は強制変位を与える境界節点の集合を表す。(7),(8)式で表される最適化問題を解くことで、目標曲面に出来る限り近づけた釣合形状を求めることができる。問題の解法には逐次二次計画法[5)]を用いる。なお、強制変位の感度係数の計算方法など、より詳細な内容については文献4)を参照されたい。

5.2　構造最適化手法による計算結果

前章の釣合形状に上述の最適化手法を適用した場合の結果について、曲面Aの結果を図13に、曲面Bの結果を図14に示す。それぞれ図aは初期釣合形状（即ち4章で示した釣合形状）を表し、図bは最適釣合形状を表す。これらの図中に記入されている破線は釣合形状のx,y座標を用いて算定される目標曲面上の点を結んで描いた目標曲面の形状である。曲面A、曲面Bともに初期釣合形状では目標曲面との僅かな差がみられるが、最適形状では破線と実線がほぼ重なり差が殆ど見られない。最適化により得られた曲面A、曲面Bの境界節点の強制変位の詳細な値を表2, 表3の「Optimal Displacement」の欄にそれぞれ示した。また、各釣合形状の目標曲面との節点における座標誤差の最大値、平均値、標準偏差を表4に示す。曲面Aの最大誤差は15.4mmから2.2mm（ライズとの比では3.8%から0.6%）に減少し、曲面Bでは8.9mmから

5.3mm（ライズとの比では2.5%から1.5%）に減少した。この他の平均値や標準偏差に対しても初期釣合形状に比べて最適釣合形状では値が小さくなっており、構造最適化による方法を適用することでより目標曲面に近い形状が得られていることがわかる。

最適釣合形状の曲げ応力の分布を図15,16に示した。模型実験での使用を考えているGFRP材の曲げ強度は1000N/mm² であり、曲げ応力はこれよりも低い値となる

表２　初期座標と強制変位（曲面Ａ）

Node	Grid Plate(m)			Initial Displacement (m)			Optimal Displacement (m)		
	x	y	z	u	v	w	u	v	w
1	0.6425	0.0750	0.0	-0.0681	0.0000	-0.40	-0.0671	0.0000	-0.3976
2	0.6631	0.2250		-0.0787	-0.0008		-0.0783	-0.0006	-0.3981
3	0.6927	0.3750		-0.0995	-0.0028		-0.0983	0.0058	-0.3975
4	0.7191	0.5250		-0.1262	-0.0052		-0.1260	0.0048	-0.3981
5	0.7272	0.6750		-0.1508	-0.0068		-0.1520	0.0033	-0.3993
6	0.6951	0.8250		-0.1589	-0.0110		-0.1611	-0.0038	-0.3991
7	0.6043	0.9750		-0.1359	-0.0315		-0.1346	-0.0327	-0.3958
8	0.4683	1.1250		-0.0870	-0.0768		-0.0849	-0.0787	-0.3939
9	0.2957	1.2750		-0.0332	-0.1396		-0.0308	-0.1410	-0.3921
10	0.0750	1.4009		0.0000	-0.2002		-0.0008	-0.2005	-0.3964
11	0.2250	1.3283		-0.0148	-0.1660		-0.0165	-0.1656	-0.3955
12	0.3750	1.2116		-0.0531	-0.1138		-0.0568	-0.1112	-0.3939
13	0.5250	1.0648		-0.1051	-0.0591		-0.1108	-0.0543	-0.3905
14	0.6750	0.8591		-0.1531	-0.0159		-0.1574	-0.0069	-0.3934
15	0.6750	0.2802		-0.0858	-0.0015		-0.0829	0.0074	-0.4038

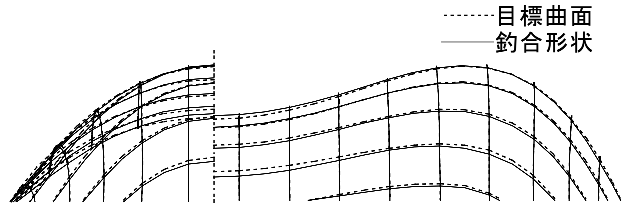
表３　初期座標と強制変位（曲面Ｂ）

Node	Grid Plate(m)			Initial Displacement (m)			Optimal Displacement (m)		
	x	y	z	u	v	w	u	v	w
1	-0.4997	0.0750	1.0	0.1264	0.0000	-0.32	0.1199	0.0000	-0.3257
2	0.8033	0.0750		-0.1481	0.0000		-0.1534	0.0000	-0.3093
3	-0.5154	0.2250		0.1196	-0.0009		0.1136	-0.0008	-0.3253
4	0.7808	0.2250		-0.1420	-0.0012		-0.1463	-0.0014	-0.3095
5	-0.5449	0.3750		0.1067	-0.0043		0.1021	0.0070	-0.3208
6	0.7375	0.3750		-0.1302	-0.0056		-0.1310	-0.0068	-0.3126
7	-0.5853	0.5250		0.0887	-0.0106		0.0911	0.0035	-0.3123
8	0.6755	0.5250		-0.1128	-0.0149		-0.1078	-0.0214	-0.3205
9	-0.6300	0.6750		0.0683	-0.0184		0.0702	0.0000	-0.3162
10	0.5913	0.6750		-0.0926	-0.0296		-0.0865	-0.0339	-0.3164
11	-0.6663	0.8250		0.0483	-0.0245		0.0506	-0.0017	-0.3159
12	0.4878	0.8250		-0.0671	-0.0498		-0.0604	-0.0586	-0.3160
13	-0.6699	0.9750		0.0306	-0.0259		0.0329	-0.0015	-0.3173
14	0.3609	0.9750		-0.0385	-0.0731		-0.0325	-0.0821	-0.3131
15	-0.5982	1.1250		0.0169	-0.0236		0.0197	-0.0065	-0.3218
16	0.1873	1.1250		-0.0116	-0.0881		-0.0088	-0.0903	-0.3158
17	-0.5250	0.2750		0.1154	-0.0019		0.1093	0.0084	-0.3257
18	-0.5250	1.1846		0.0129	-0.0242		0.0137	-0.0139	-0.3182
19	-0.3750	1.2496		0.0108	-0.0332		0.0091	-0.0342	-0.3181
20	-0.2250	1.2667		0.0102	-0.0501		0.0098	-0.0509	-0.3191
21	-0.0750	1.2476		0.0074	-0.0704		0.0080	-0.0705	-0.3182
22	0.0750	1.1943		0.0000	-0.0869		0.0000	-0.0851	-0.3176
23	0.2250	1.1005		-0.0149	-0.0889		-0.0138	-0.0919	-0.3212
24	0.3750	0.9609		-0.0405	-0.0717		-0.0392	-0.0726	-0.3179
25	0.5250	0.7745		-0.0745	-0.0436		-0.0738	-0.0454	-0.3185
26	0.6750	0.5258		-0.1126	-0.0149		-0.1110	-0.0176	-0.3197

表４　目標曲面と釣合形状のｚ座標誤差

		最大値 (mm) (Ratio (%))	平均値 (mm) (Ratio (%))	標準偏差 (mm) (Ratio (%))
曲面A	初期釣合形状	15.4 (3.8)	5.8 (1.4)	3.6 (0.9)
	最適釣合形状	2.2 (0.6)	0.6 (0.2)	0.6 (0.1)
曲面B	初期釣合形状	8.9 (2.5)	3.0 (0.8)	2.2 (0.6)
	最適釣合形状	5.3 (1.5)	1.0 (0.3)	0.8 (0.2)

(括弧内はライズ(曲面A:400mm, 曲面B:360mm)との比)



a)　初期釣合形状

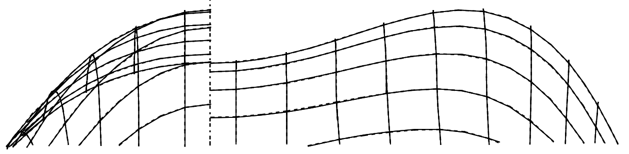
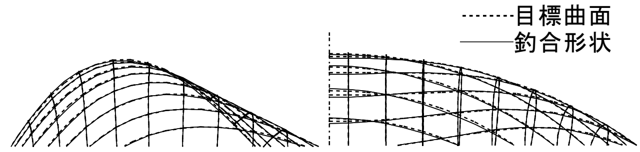

b)　最適釣合形状

図13　最適化結果(曲面A)



a)　初期釣合形状

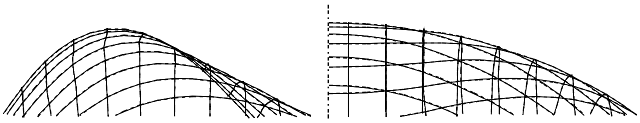
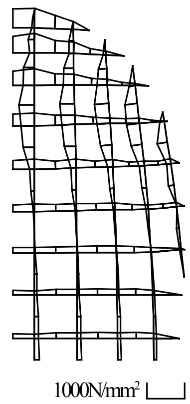
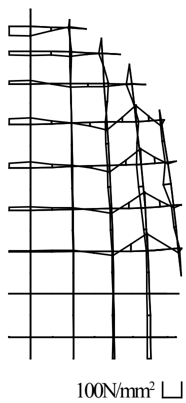

b)　最適釣合形状

図14　最適化結果(曲面B)

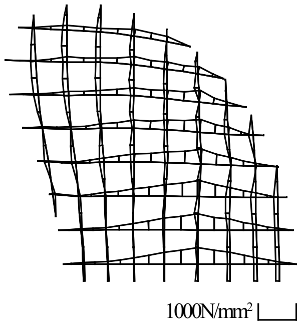


a)　面外(My/Z)

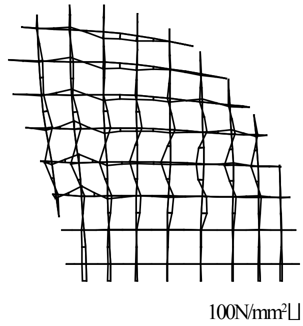


b)　面内(Mz/Z)

図15　最適釣合形状の曲げ応力図(曲面A)



a)　面外(My/Z)



b)　面内(Mz/Z)

図16　最適釣合形状の曲げ応力図(曲面B)

ことを確認した（尚、部材に生じる曲げ応力は(5),(6)式の曲面の曲率を用いてもおおよその値を評価できる）。

6　まとめ

格子状平板の初期曲げによってグリッドシェルを形成する際の形状解析の方法として、既往の文献で提案されている曲面上の等間隔メッシュを求める方法（コンパス法）に注目し、この手法を比較的複雑な形状を有する曲面に適用した場合について調査を行った。幾何学的非線形性を考慮した構造解析を行い、コンパス法によって幾何学的に求めたメッシュの形状が格子状平板の曲げ変形によって再現可能であるか調査した。また、著者の一人が過去に提案した構造最適化による方法[4)]との比較も行った。本報で得られた結果をまとめると、次のようになる。

1. 本報で扱った曲面形状において、コンパス法で求めたメッシュ形状と幾何学的非線形解析により求めた実際の釣合形状との差はライズの3,4%程度であり、比較的精度良く目標曲面の形状を形成できることが分かった。本結果から、コンパス法はグリッドシェルの形状解析法として有効な手法であると言える。
2. 構造最適化による方法を適用することによって、コンパス法を用いて得られる釣合形状よりも更に高い精度で目標曲面の形状を表現する釣合形状を求めることができた。

上記2の結果は構造解析と現実の構造物の挙動との間に誤差がある為、必ずしも構造最適化による方法がより正確であるとは言えず、実用的にはコンパス法を用いれば十分なケースも多いと考える。ただし、コンパス法のメッシュ形状は二方向に与える軸線（図5に示した節点拘束条件）の与え方に依存しており、曲面の形状やこの軸線の与え方によって、コンパス法のメッシュ形状と実際の釣合形状に大きな差が生じるようなケースも十分に考えられる為、今後様々なケースについて調査が必要である。また、構造最適化による方法は構造的な諸条件（例えば、変断面、接合部の偏心、接合部の状態など）を直接的に考慮することが出来る点で、有利性を持つ。これらの条件が釣合形状に与える影響については詳細な検討が必要であり、今後の課題としたい。

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)長瀬 正 , 前野 敏元 , 木林 長仁 , 久徳 敏治：木造格子シェルの曲面設計，日本建築学会近畿支部研究報告集 . 構造系 pp.389-392, 1988

3)前野 敏元 , 長瀬 正 , 木林 長仁 , 久徳 敏治：木造格子シェルの構造実験，日本建築学会近畿支部研究報告集 . 構造系，pp.393-396, 1988

4)山本憲司，中村達哉，本間俊雄：格子状平板の初期曲げにより形成されるグリッドシェルの形状解析，日本建築学会構造系論文集，No.668, pp.1803-1812, 2011.10

5)茨木俊秀，福島雅夫：FORTRAN77 最適化プログラミング，岩波書店，1991

6)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

7)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

8)Bouhaya, L., Baverel, O., Caron, J.-F.: Mapping two-way continuous elastic grid on an imposed surface: Application to grid shells, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia, pp.989-997

9)豊田良平，斉藤公男，岡田章，宮里直也：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，日本建築学会関東支部研究報告，pp.193-196, 2006.2

10)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形成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, pp133-138, 2008

11)山本憲司，中村達哉，本間俊雄：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，コロキウム構造形態の解析と創生 2010，pp.139-144, 2010.10

12)谷淵且浩，山本憲司，本間俊雄：格子状平板の初期曲げにより形成されるグリッドシェルに関する研究ー線形解析を用いた部材応力・座屈に関する検討ー，日本建築学会九州支部研究報告，第 50 号・1，pp.281-284,2011.3

13)額田直子，西村匡弘，澤修平，永井拓生，陶器浩一：丸竹曲げによる形態創生とその実例，コロキウム構造形態の解析と創生 2011，pp.197-102, 2011.10

14)大野麻衣子，中村達哉，山本憲司，本間俊雄：格子状平板の初期曲げにより形成されるグリッドシェルに関する研究ー塩ビ管を格子材としたスパン 8m EP ドームの施工実験ー，日本建築学会九州支部研究報告，第 51 号・1，pp.269-272，2012.3

環境逆解析の木造住宅リノベーションへの適用

○永井拓生[1]，中川純[2]，陶器浩一[3]

1) 滋賀県立大学環境科学部，助教，修士（工学），nagai.t@ses.usp.ac.jp

2) レビ設計室，levi@njun.jp

3) 滋賀県立大学環境科学部，教授，博士（環境科学），toki@ses.usp.ac.jp

1　はじめに

建築の形態は意匠、構造、環境において不可分な関係にあり、また形態の変化は人間の心理にも影響を及ぼすことから、これらの領域の全体を有機的に計画する必要がある。その意味で、意匠・構造・環境の 3 分野に跨る最適化手法の適用例はいまだ事例が少なく、今後、さらに領域を拡大した研究の発展が望まれる。

逆解析による最適化問題の建築設計への利用は、建築構造の分野では既に数多くの研究がなされており、特に形態創生の手法として多くの提案があり、実際に建設された事例の報告も増えつつあり、設計実務に多大な影響を与え始めている。さらに、近年は構造の形態そのものだけでなく、ライフサイクルコストや部材製作コストなどのようにハードとソフトの混合した問題[1,2]や、耐震改修をはじめとしたリノベーション分野への応用についての研究[3]も始まってきており、対象とする領域の拡大を見せてきている。

一方、環境シミュレーションにおける逆解析とは、気候や周辺環境から導かれた条件と居住空間に確保したい温熱・風環境から、最適な環境形式や形態を導くことである。大規模なプロジェクトを除き、環境の数値解析は物理現象の可視化の段階にとどまっており、実際的な設計段階で有効に使われている事例はまだ少ない。しかし、たとえば桃瀬ら[4~8]は建築空間を想定した 3 次元流体解析を用いた逆解析によるノンパラメトリック最適化手法の研究を行ってきており、その手法は 2010 年に 3 次元流体解析プログラム「FlowDesigner」（株式会社アドバンスドナレッジ研究所）のエンタープライズ版として発表され、一般のユーザーが環境分野における最適化手法を利用するツールが徐々に整備されつつある。

本稿では心理的圧迫感の強い都市住宅において、開放的な空間を獲得することを目的とし、風環境から内部空間を創生するために最適化手法を用いた事例について、計画の概要と環境・構造の関係について紹介する。

2　基本計画

敷地は東京都大田区にある閑静な住宅街にあり、築 45 年（一部増築）の木造住宅をモデルとし、耐震・断熱改修を計画する。図 1 に改修前と改修後の平面図を示す。

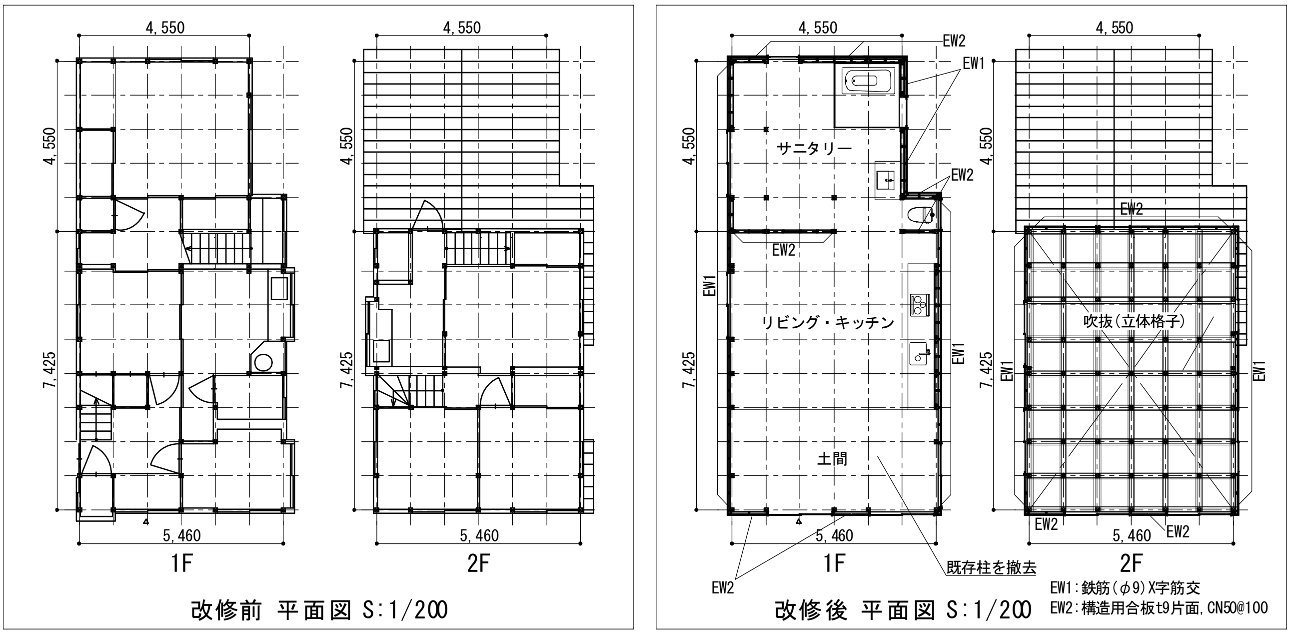


図1：対象建物の改修前後平面図

改修前は各居室が 4 畳半程度に分れて配置されており、既存の間取りを生かして耐震補強を行う場合、空間を分断する要素が多く、広く自由な空間を実現するのは難しい。また隣棟間隔が狭いことから 1 階部分の日射取得は道路に面した居室に限られており、都市住宅に共通して、年間暖房日数を増やす原因[9]ともなっている。

本計画では、2 階の床を撤去して 2 層吹き抜けの空間をつくり、そこに耐震補強としての立体格子（図 2）を挿入し、季節に応じた僅かな設えによって、夏は日射を防ぎつつ 1 階の生活空間に風を送り込み、冬は吹き抜け空間から日射を最大限取り込む計画とする。また、付加的な目標数値として、4 人家族を想定した時の契約電力を15A に抑えても不自由なく生活できる住空間を目的としている。

2.1　構造計画（耐震改修計画）

本計画の耐震改修の基本方針は、以下の 3 点である。

a) 屋根仕上げの軽量化と 2 階床の撤去による重量軽減
b) 1 階、2 階共通：建物外周耐震壁としての補強
c) 2 階：床を撤去後吹抜とし、立体格子挿入による補強

建物外周は改修前の 1 階、2 階レベルともに鉄筋ブレースと構造用合板釘打ちにより耐震補強を行う（図 1）。また、2 階レベルの床と、1 階の柱のほとんどを撤去し、残った吹抜けの空間に立体格子を挿入し、屋根を支持し、水平力を外周に伝達する。この立体格子は半剛接の木造ラーメンのフレームとし、それ自身が水平力に対しても抵抗する機能を持つ。また、この立体格子の各レベル、要所に構造用合板を釘打ちした水平パネルが配置されており（図 3）、このパネルが立体格子に生じる地震力や風圧力による応力を外周の耐震壁まで伝達させると同時に、後節で示すように建物内部の風の流れを制御する役割を持っている。

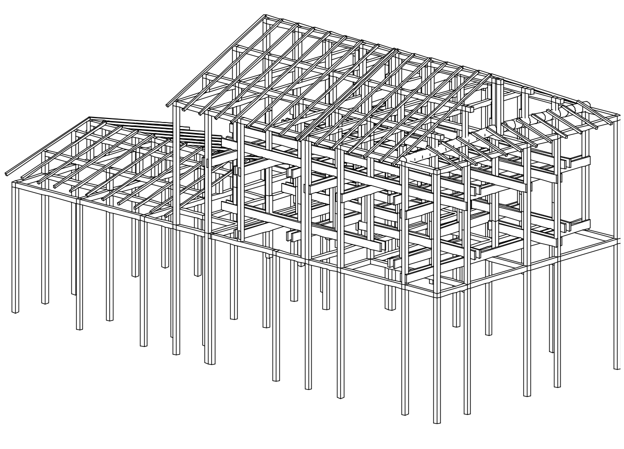


図 2：吹抜けに挿入される立体格子

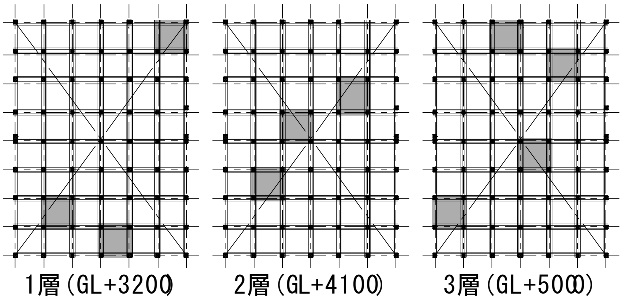


図 3：各層の水平パネルの配置

2.2　環境計画

環境計画の基本方針を下記に示す。

a) 外皮性能の向上（断熱改修計画）
b) 日射取得と通風の最適化（構造計画との融合）
c) 契約電力に制限を設けたオンデマンド型電力供給システム

生活で使用するエネルギーに制約を持たせつつも不自由なく生活するために、使用電力に応じて消費電力を制御するシステムを採用している。オープンソースハードウェアであるマイコン付センサ基盤 Arduino（ウェブサイト http://www.arduino.cc）を用いて使用電力を計測し、最大 15A になるようサイリスタ位相制御を行い、停電することなくできる限り電力を供給するベストエフォート型の電力供給システムを計画する。

住宅で消費されるエネルギーは、給湯、冷暖房、照明、家電、厨房に分けることができるが、4 人家族における電力の契約アンペア数を 15A に制限した場合、一般的には冷暖房などの温熱環境を制御するための電力が不足すると予想され、建築側の外皮性能を上げるだけではなく、日射や通風といった建築の形態と温冷感が密接に関わる部分を最適化する必要がある。

そこで、夏は快適な涼感を得るため、外部風速が平均値と仮定した場合において、生活の中心的な場所となる 1 階レベルに風速 0.5m/s 程度の風を流すこと、冬は日射を最大限取り込むことを数値的目標とし、立体格子中に水平パネルの最適な配置を検討する。

また、構造の制約から水平パネルは X 軸 Y 軸に通るように配置する必要があり、これらのパネルを有効に配置することによって夏の風をコントロールしつつ冬の日射を最大限に取り込む。冬場にはこの水平パネル日射を遮る可能性があるため、両季節で日射量と風速の両方の目標数値をクリアすることが目標となる。最適化の解析には「FlowDesigner エンタープライズ版」（株式会社アドバ

ンスドナレッジ研究所）を用いる。

また、これらの前提として、外皮性能としては次世代省エネ基準（IV 地域）を満たす仕様とし、断熱材はポリエチレンフォーム 3 種 b55mm を採用する。開口部は樹脂または木サッシとし、Low-e ガラスを採用する。

3　周辺気候の解析

建物への日射量と外部通風の条件を確認するため、拡張アメダスの情報を元に図 4 に示すように広域環境シミュレーションを行った。モデル作成領域は 300m×300m、境界条件を 900m×900m×高さ 150m として標高 6m の風速を 5m/s、大都市周辺市街地として 500 万メッシュで CFD 解析を行ったところ、敷地前面道路の風上側に T 字路があるにもかかわらず、10m ほど進んだところから風が流れはじめ、建物内部に風を取り込むのに十分な風速があることを確認できた。

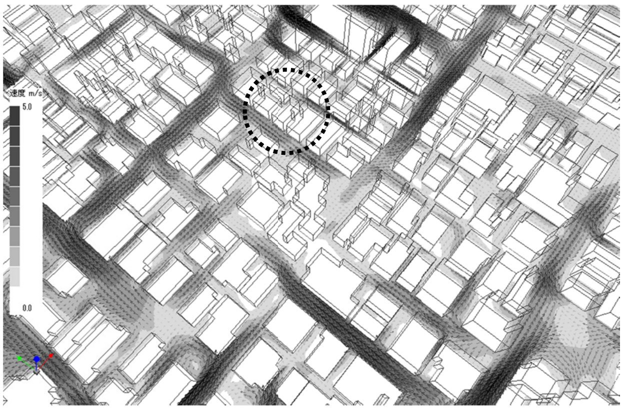


図 4：広域環境解析

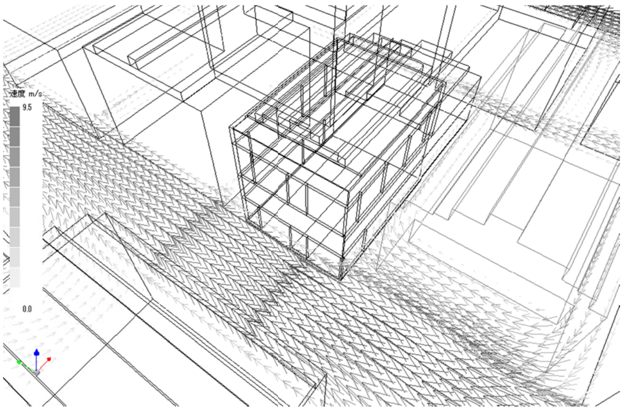


図 5：敷地周辺風環境解析

次に敷地周辺の細かなモデルを作成し、敷地南面にある犬走りに流れる風を解析した。解析結果を図 5 に示す。モデル作成領域は 50m×50m、境界条件を 150 m×150 m ×高さ 40m、メッシュ数を 100 万として、広域で得られた風分布に近い値で解析をおこなったところ、隣地との狭いスペースにも風速 2.0m/s 前後の風が流れ込んでおり、建物南側から風を取り込むことも可能であることを確認できる。この値に応じて流入風速を算定し、次節に示す逆解析の境界条件とする。

また、このモデルでは積算日射量も算定しており、図 6 に結果を示す。これらより各開口部における夏の日射遮蔽の割合を算定している。

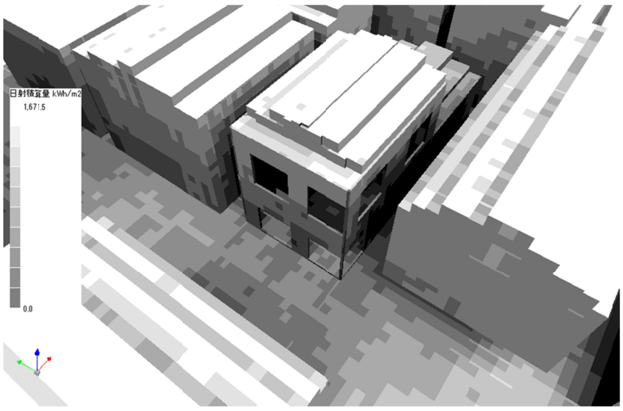


図 6：敷地周辺積算日射解析

4　建物への日射と内部風速の最適化

前節で求めた風の境界条件（表 1、周辺風速）をもとに、1 階レベルでの通風を確保するために逆解析を行う。

表 1：逆解析の境界条件（風速：m/s）

方位	西面				南面		
窓	2FN	2FS	1FN	1FS	2FW	2FE	1FW
周辺風速	2.5	2.5	1.8	1.8	2.0	0.9	2.0
流入風速	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.3	0.7

・設計目標

建物内部の風速は、1 階キッチン付近にターゲットボリュームを配置し、このボリューム表面に生じる風圧から風速が目標値を満たしているかどうか算定する。

・最適化の方法

最適化の対象は立体格子の各層への水平パネルの配置である。各層の全面に開口率 99.99 %の圧力損失パネルを配置し、内部に流れる風が水平に敷かれた圧力損失パネルを通過する際、ターゲットボリュームに目標値である 0.5m/s の風を流すように圧力損失パネルの開口率を圧力に従って変化させながら流体解析を行い、圧力分布を目標値に向かわせるために必要な、水平パネルの圧力損失の感度分布を求める。

このパネルは、冬場のために日射を遮らないような配

置（図 7）とする。一方で夏場については、窓からの日射はルーバーなどでコントロールができると仮定し、それに応じて流入風速の軽減（表 1、流入風速）を行うこととする。

なお、本計画では上部の圧力損失パネルの最適化を優先的に行う事とし、上層から 1 層ずつパネルの配置を決定し、その度に、感度解析をやり直して下部へとパネル決定を進めていく。

・解析フロー

Step 1：境界条件とターゲットの設定、圧力損失パネルを水平面 3 層に設置

Step 2：逆解析によりターゲットの風速が設計目標（0.5 m/s）に近づけるための圧力損失率の感度分布を求める。

Step 3：まず、3 層目の感度の高い箇所にパネルを配置する。この際、パネルの配置は冬場に 1F リビングへの日射を遮らないような配置とする。

Step 4：以上の手順 step 2〜step3 を残りの 2 層目、1 層目ついても、同様に実施する。

図 8 に最終的な感度の分布とパネル配置の結果を示す。なお、感度解析の結果、感度の高い箇所にパネルを設ければ十分に設計目標を達成できるが、パネルは構造的にも水平力の伝達機能を持っているため、構造的な意味でのみ必要なパネル（図 8 中○印）は、風速の分布に影響の少ない、感度の低い箇所に配置している。

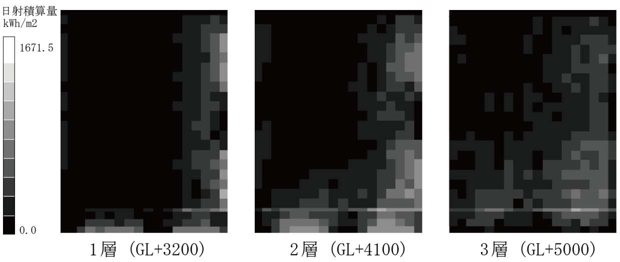


図 7：各層への積算日射量の分布

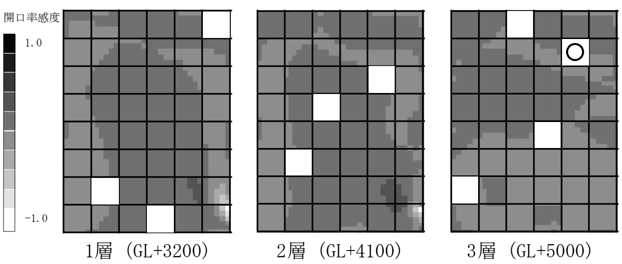


図 8：感度分布とパネル配置

以上により求まったパネル配置を境界条件とした、居室内の順解析の結果を図 9 に示す。立体格子に挿入された水平パネルが風の渦を起こすことによって、1 階部分に 0.5m/s 程度の風が発生していることが確認できる。

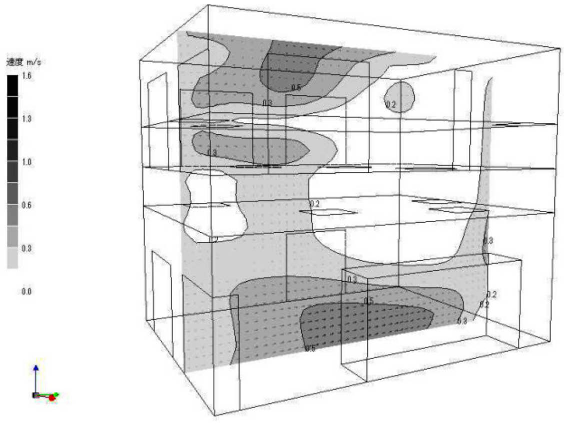


図 9：パネル配置後の順解析結果

5　直交長押工法による立体格子

本計画改修案の吹抜け上部の空間に挿入される立体格子状の構造フレームの構成するために、直交長押工法と名付けた構造方法を用いる。この立体格子状のフレームは、それ全体で屋根を支持する小屋組みであり、また水平力を 1 層部分まで伝達する機能を持たせる。

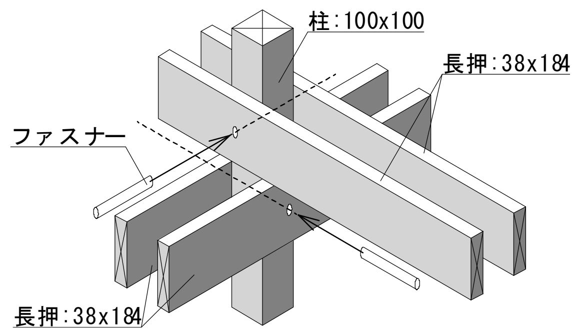


図 10：直交長押工法の概念

直交長押工法の概念を図 10 に示す。これは、安価な構造用の木材として普及しているツーバイ材（SPF）を、既存の木造柱に対して直交 2 方向に挟み込むように配置し、仕上げボルトやドリフトピンなどのファスナーで縫うという方法である。この方法では、柱芯上に打たれたファスナーと、相互に 2 方向に直交するツーバイ材同士の接触点とで、テコのように曲げモーメントに対して抵抗する仕組みとなっている。

直交長押システムの利点は、施工の簡易さであり、小屋組みや独立柱の補強が非常に容易である。また、筋交いや合板による補強と違って、空間的な障壁となることがなく、既存の柱・梁の骨組みに添えて抱かせるように追加するだけで耐震補強効果を得ることが可能である。また、曲げモーメントを伝達させる木造ラーメン構造の一種としても、ガセットプレートなどの中間治具もなく、

極めてシンプルで簡単な接合方法である。

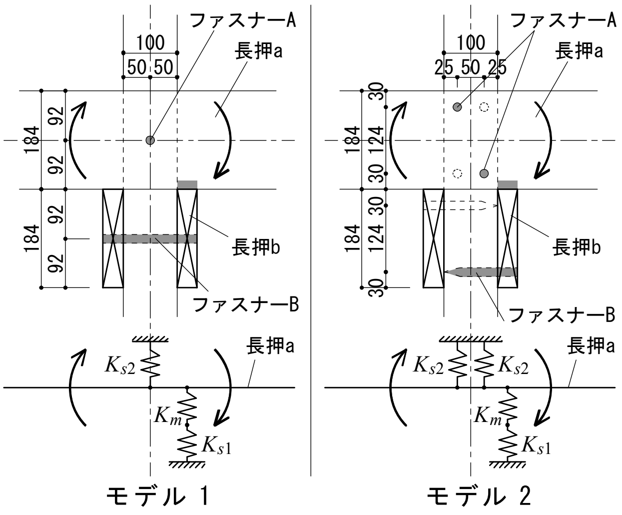


図 11：直交長押のモデル化

直交長押接合部は、図 11 のようにモデル化できる。同図のモデル 1 はファスナーにボルト 1 本を用いたもの、モデル 2 は複数（ここでは 4 本）を用いる場合である。ファスナーは、曲げ降伏型のシアコネクタとしての役割を持ち、ドリフトピンや仕上げボルト、ラグスクリューボルトなどが考えられる。図 11 のように、紙面の面内の曲げを受ける時、ファスナーA には柱と両側の梁材による 2 面せん断抵抗（ばね $Ks1$）が生じ、ファスナーB へは、長押 a が直交する長押 b に接触する際の支圧応力（ばね Km）が伝達され、柱材と長押の 1 面せん断抵抗（ばね $Ks1$）によって、柱へ曲げモーメントを伝達する。したがって、本接合方法の剛性や耐力の算定においては、柱と長押との 1 面せん断、2 面せん断、長押同士の直交めり込みの各ばねの剛性と耐力を求める事が必要となる。

曲げ降伏型のファスナーの木材へのめり込み抵抗によるすべり剛性は、弾性床上の梁理論により求められ、現在設計においては、一般的に次式[10]が用いられている。

・1 面せん断のすべり剛性

$$K_{s1} = \frac{1}{2(LL_1 + L_2) - \dfrac{(JJ_1 - J_2)^2}{KK_1 + K_2}} \tag{1}$$

・2 面せん断のすべり剛性

$$K_{s2} = \frac{1}{L_1 + L_2 - \dfrac{(J_1 - J_2)^2}{2(K_1 + K_2)}} \tag{2}$$

上式におけるそれぞれのパラメータについては、文献 10) を参照して頂きたい。また、各パラメータの算出に必要なボルトなどファスナーの木材へのめり込み剛性については、次式[10]によって求めることができる。

$$K_E = \frac{E_0}{31.6 + 10.9d} \quad （単位：N,mm） \tag{3}$$

上式で E_0 は繊維方向のヤング係数、d はファスナー（円形に限る）の直径を表わす。

直交する長押同士の接触によるめり込みばね K_m の算には、ここでは簡易的な仮定として等変位めり込み式[10]を用いる。樹種は J3 グループ（スプルース）とする。

以上をもとに回転剛性（初期剛性）を求めた結果を下表に示す。ファスナーについては交差部中央に M16 仕上げボルトを 1 本打ったもの（モデル 1）、M16 ラグスクリューボルトを片側から 2 本ずつ、計 4 本打ったもの（図 11 モデル 2）の 2 種類について検討した。また、参考に付録 2 に示した実験結果（モデル 1、3 体の試験結果の平均）による値を示す。

表 2　直交長押接合部の回転剛性（kN*m/rad）

モデル 1	モデル 1（実験の平均値）	モデル 2
6.96	(42.88)	27.51

モデル 1 の計算値では、建物の層間変形角が規定値（1／120）を超える恐れがあり、モデル 2 の方法を用いる予定である。また、ファスナーを仕上げボルトでなくラグスクリューボルトとしたのは、先孔を空ける手間を省き、またガタによる初期すべりを軽減させるためである。モデル 2 についても、今後実験を行う予定である。

降伏耐力は、剛性の算定と同じく設計で一般的に用いられているヨーロッパ型降伏理論[10]によって求めるが、計算式が複雑なため詳細は割愛し、使用したパラメータのみを示す。

・ファスナーの降伏応力度：F_y= 240 N/mm^2
・めり込み降伏応力度（柱）：F_{E1}= 19.4 N/mm^2
・めり込み降伏応力度（長押）：F_{E2} = 35 N/mm^2

6　まとめと今後の計画

環境の性能を目的とした最適化手法と、その枠組みとして適した構造補強の方法を組み合わせた改修計画の事例を示した。2011 年 11 月着工、2012 年 3 月竣工の予定で、今後、構造的観点から補強実施前後の周期・減衰特性の計測、環境的観点から、竣工以降、年間を通じた室内環境の計測を行い、環境の逆解析の建築設計への利用を見据えたデータベース構築を行っていく予定である。

謝辞　大阪工業大学の河野良坪先生に逆解析の多大な協力を得た。また、直交長押接合部の試験結果は鳴海友貴さん（滋賀県立大学大学院修士課程）が卒論として行った実験の結果である。記してここに謝意を表す。

付録１　直交長押の名称について

長押[11]は日本建築に古くから見られる部材で、通常は鴨居の上部に柱を挟むように両側から打ち付けられた 2 本の横架材の組を指す。古代では梁として構造的役割を持ったが、中世以降は、貫構法の発達とともに装飾的な意図で使用されるようになったとされる。柱との接合は古代より釘で留められており、釘を隠すために飾り金具が用いられる。この意匠が一般に長押の印象と結びついている。本計画で用いた直交長押工法は、柱を両側から挟むことと、接合部のファスナーの頭がこの飾り金具の類似の意匠に見えることから、このように名付けている。

付録２　直交長押の接合部基礎実験

直交長押工法接合部の実大試験（モデル 1）の試験体寸法および 3 試験体の $M-\theta$ 関係を以下に示す。

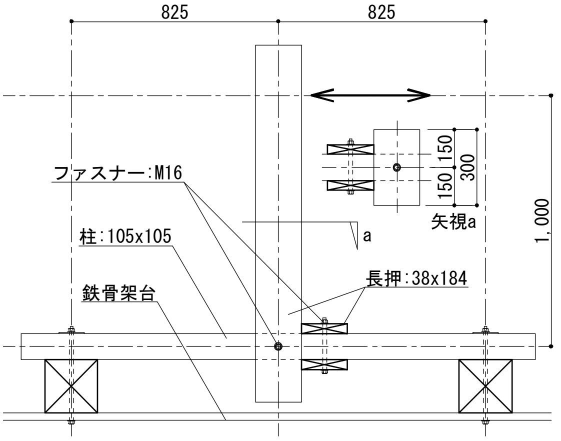


図 A1　トの字型試験体の設置状況

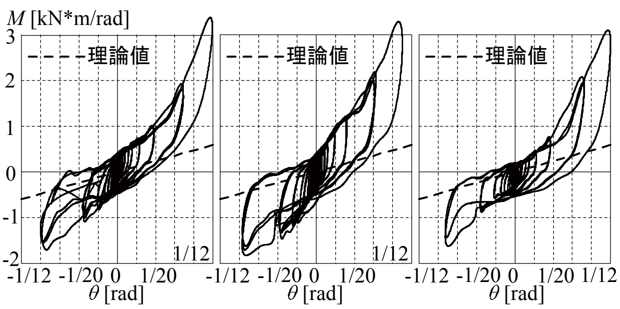


図 A2　接合部の M－θ 関係

実験では摩擦の影響と考えられる立ち上りが見られ、その後は1/10 rad程度の回転角まで十分な粘りを発揮した。その後、ストロークの限界まで載荷したが、剛性低下や耐力の低下は見られない。回転剛性は理論値（図中、点線で勾配を表記）よりもかなり高い数値を示した。また、スリップ特性があまりなく高い減衰性能が期待できる。この実験では終局耐力には至らなかったため、再度実験を予定している。

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) 林将利、永井拓生、新谷眞人：SPEA2 を用いた既存学校建築リノベーションの設計支援システムに関する研究、知能と情報（日本知能情報ファジィ学会誌）、Vol. 23、No. 4、pp.438-446、2011.8
4) 桃瀬一成、北尾知之、森琢磨、河原源太：ノンパラメトリック感度解析を用いた対流熱伝達問題における壁面熱通過率の同定、日本機械学会講演論文集、No.085-2、pp.225-226、2008.10
5) 桃瀬一成、大久野孝史、河原源太：非定常対流熱伝達問題におけるノンパラメトリック感度解析と最適制御への応用、日本機械学会講演論文集、No.085-2、pp.225-226、2008.10
6) 桃瀬一成、河野紘明、河原源太：熱対流場における形状感度解析と最適化アプローチ、日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集、pp.177-178、2009.11
7) 桃瀬一成、森琢磨、河原源太：フーリエ級数展開法を用いた周期熱対流場の安定な数値解析、日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集、pp.179-180、2009.11
8) 黒田清貴、桃瀬一成、河原源太：逆解析に基づく物体内熱伝導率のノンパラメトリック感度解析と最適化、日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集、pp.87-88、2010.10
9) 河野良坪：都心住宅地を想定した二階リビング住宅の熱負荷シミュレーション、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、環境工学Ⅱ、pp.173-174、2012.9
10) 日本建築学会編：木質接合部設計マニュアル、日本建築学会、pp.269-276、2009.11
11) 中川武：日本の家　空間・記憶・言葉、TOTO 出版、2002.6

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　-施工性および修復性の考慮-

平野 伯恭[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，hirano@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

高速で大容量のコンピュータの効果的な利用により、構造計画における高度で複雑な解析が手軽にできるようになり、建築のデザインそのものに構造が深く関わる傾向が増している。その一方、環境問題への配慮や、建物の長寿命化など長期的な建築計画が希求され、多様化する建築の価値観の中で構造設計者の果たすべき役割は、多くの要素が相互に絡み合い、複雑で広範なものとなっている。そのため、構造計画は非常に重要な役割を担っており、その行為は、様々な建築計画や要求性能に対して、いくつもの構造システムを立案する創造行為と、その構造システムの様々な指標や力学的性質の分析行為および、構造システムを選定する判断行為という三つの思考行為の積み重ねと、多大な繰り返し作業により行われるのが一般的である。

著者らは、鋼構造物の許容応力度等設計の過程に進化的多目的最適化手法を導入し、目的関数として最大層間変形角と鋼材コストを採用することと、制約条件として応力度、層間変形角などを採用した多目的最適化問題を構成し、その結果得られるPareto解集合を通して、複数の設計解の提案ができる、実用的で効果的な設計支援の方法を提案している[1–3]。さらに、提案手法が保有耐力設計法へも適用できることを示した上で[4]、X型ブレース[5]と偏心K型ブレース[6,7]および、小梁の最適設計・配置[8,9]や、柱脚や基礎梁の最適設計まで拡張しており[10]、それらの定式化や構造創生ツールとしての有効性を確認している。また、構造最適化の評価コストとして鋼材単価のみを考慮してきた構造設計支援手法[11]に、鉄骨製作プロセスにおけるコストや、柱梁接合部における溶接費および、その施工可能性を制約条件として、最適化問題に取り入れることにより、より実務的な鋼構造創生支援が可能であることを示している[12]。

また、現代は度々起こる巨大地震による建物被害について大きな関心を集めている。1995年に起きた兵庫県南部地震では、多くの被災建物に対して早急に再使用のために復旧工事が実施する必要が迫られた。兵庫県南部地震以前において鋼構造物は大規模な被害を経験しておらず、複雑な被害パターンが想定されていなかったが、これを契機に大林組技術研究所では、部材別に被害パターンを分類してそれぞれのパターンに適用すべき補修・補強技術を検討・考案し、鉄骨ファブリケータと施工の可否を検討した上で復旧技術マニュアルをまとめている[13]。これにより兵庫県南部地震では、被害を受けた建物に対して修復を施すことで復旧した建物が数多く存在しており、建物の安全性の確保だけでなく、修復性の確保に対しても関心が高まってきている。これに基づき桑村らは修復性を配慮した新たな設計プロセスの実現に向け、建物の修復性に関わる残留変形と修復コストに着目して分析を行い、技術的および経済的観点から鋼構造建築物の修復限界を明らかにすることを試みている[14]。

本研究では、構造創生支援手法により得られたParero解に対して立体フレーム解析および時刻歴応答解析を行い、地震時の損傷度の判定による修復性を検討することにより、評価コストの最小化とともに損傷度や修復性のバランスを保ちながら、より合理的な構造物の選定が可能であることを示す。

2　地震時の修復性

現在の建築基準法における大地震時の建築物の耐震性能は、人命の確保を目標に倒壊に至らなければ損傷を許容する設計に準拠している。ところが、被災後の建物の機能維持や資産の面から考えると、損傷や被害の小さい、あるいは復旧可能な建築物が望ましいと考えられるため、建築主との合意の上で、耐震性能を決定すべきである。

本章では、大地震における損傷度および修復性の検討方針を示す。損傷度および修復性の検討は図1の流れに沿って行う。まず、Patero解に対して立体フレーム解析を行うことにより復元力特性を決定する。次に、時刻歴応答解析を行うことにより、最大応答変形と残留

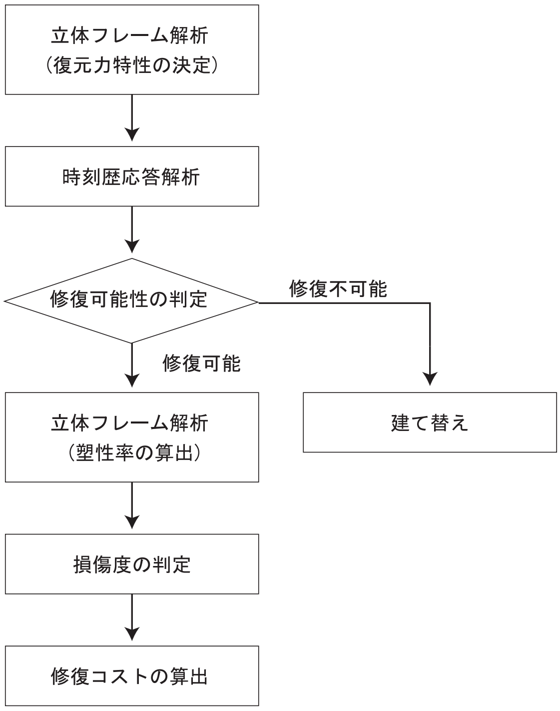


図1　修復性検討の流れ

変形を算出し、修復可能性の判定を行う。その後、静的増分解析を行うことにより部材塑性率を算出し、損傷度の判定を行う。最後に得られた結果を用いて修復コストの算出を行う。以下に修復性の検討方針の詳細について述べる。検討対象として、解析によって得られたPareto解集合のうち、代表的な7つの設計解を用いる。

2.1　修復性の検討方針

2.1.1　時刻歴応答解析の方針

表 1に時刻歴解析条件を示す。設計用入力地震動は、50kineで規準化した観測波3波(EL CENTRO NS, TAFT EW, HACHINOHE NS)を用いる。

2.1.2　修復可能性の判定方針

修復限界に関する既往の研究[15]より構造物の修復が可能か否かの判断は残留変形角により判定することができると考えられる。文献[15]によれば、地震荷重に対する鋼構造建築物の修復限界は、全体残留変形角で1/200、最大残留層間変形角で1/90である。ここで、全体残留変形角とは地震動終了後の建物頂部の基礎に対する相対残留変位を建物の高さで除したものであり、最大残留層間変形角とはすべての層の残留層間変形角（残留層間変形を当該層の高さで除したもの）のうちの最大値であると定義している。これに基づき、修復可能性の判定を、表2に示す。

表 1　時刻歴解析条件

振動解析モデル	5質点等価せん断棒モデル
復元力特性	標準型トリリニア型
減衰	剛性比例型,減衰定数2%
時刻歴応答計算	Newmarkのβ法

表 2　残留変形角と修復限界

全体残留変形角[*1]	最大残留層間変形角	修復
$\frac{\triangle r}{H} \leq \frac{1}{200}$	$\max_i \left(\frac{\delta_{ri}}{h_i}\right) \leq \frac{1}{90}$	可能
$\frac{\triangle r}{H} > \frac{1}{200}$	$\max_i \left(\frac{\delta_{ri}}{h_i}\right) > \frac{1}{90}$	不可能

[*1] $\triangle r$は地震動終了後の建物頂部の基礎に対する相対残留変位、Hは建物の高さ、δ_{ri}は第i層の層間変形角、h_iは第i層の高さである。

表 3　部材塑性率と損傷度

部材塑性率(μ)[*1]	損傷度
$\mu \leq 1$	損傷なし
$1 < \mu \leq 2.5$	軽微な損傷
$2.5 < \mu$	修復を要する損傷

[*1] μは部材塑性率で最大変形量を降伏時の変形量で除した値である。

2.1.3　損傷度の判定方針

JSCA耐震性能メニュー[16]を参照し、安全限界は地震時に人命は失われないが地震後に建物に立ち入ることは危険である状況を、安全限界余裕度IIは限定された区画内で機能が確保されている状況を、安全限界余裕度Iは指定された機能が確保されている状況を示す。JSCA耐震性能メニューに基づき、安全余裕度Iの状態になった時に修復を要する損傷とし、部材塑性率が2.5を超える場合は修復を要するものと考え、部材の塑性率に対する損傷度を表3に示すように設定する。損傷度の判定に関して、修復可能性のある立体フレームモデルに対して、時刻歴応答解析により得られた最大応答変形に達するまで静的増分解析を行い、その時点での部材の塑性率から損傷度を判定する。

2.2　修復方法

修復を行う対象は梁塑性部における梁部材の取り替えによる修復である。その対象は表3より構造部材の塑性率が2.5以上である場合とする。図 2に修復の流れを示す。図 2の左の図のようにデッキスラブを除去し、鋼材を切断および撤去した上で、図 2の右の図のように新鋼材を導入し、再溶接・ボルト接合して修復する。

2.3　修復コスト

前節に沿った修復コストを算出する。修復コストは次式で示すように、デッキスラブ除去、鋼材の切断・撤去するための除去コストおよび、鋼材の接合のためのコストと新しい鋼材コストの和で求める。

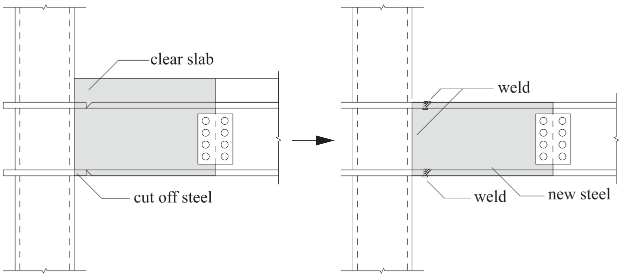


図2　梁端部の修復

$$C = C_{\mathrm{remove}} + C_{\mathrm{welding}} + C_{\mathrm{steel}} \tag{1}$$

ここで、　C　：修復コスト
C_{remove}　：除去コスト
C_{welding}　：溶接コスト
C_{steel}　：鋼材コスト

以下に、上式における各々のコストの詳細について述べる。

2.3.1　除去コスト

鋼材の切断・除去、合成スラブの除去コストは、交換部品代とガス・電気代，人件費を合算し、これを切断速度で割って単位切断長当たりの費用として求めるのが一般的であるが、ここでは式(8)に示すように、鋼材に関しては、鋼材の厚さと鋼材の切断長に単位面積当たりの鋼材の切断コスト[17]を乗じて求める。合成スラブに関しては、スラブ厚とスラブ面積に単位体積当たりのコンクリートの解体コスト[17]を乗じて求める。

$$C_{\mathrm{remove}} = C_{\mathrm{cutsteel}} \cdot t_{\mathrm{steel}} \cdot l_{\mathrm{steel}} + C_{\mathrm{cutcon}} \cdot t_{\mathrm{con}} \cdot A_{\mathrm{con}} \tag{2}$$

ここで、　C_{remove}　：除去コスト
C_{cutsteel}　：単位面積当たりの鋼材の除去コスト
t_{steel}　：鋼材の厚さ
l_{steel}　：鋼材の切断長
C_{cutcon}　：単位体積当たりのコンクリートの除去コスト
t_{con}　：コンクリート厚
A_{con}　：コンクリート面積

2.3.2　鋼材コスト

鋼材コストは、鋼材の単位重量当たりのコストを用い、以下のように評価する[17]。

$$C_{\mathrm{steel}} = \sum_i C_{\mathrm{s}_i} w_i \tag{3}$$

ここで、　C_{steel}　：鋼材コスト
i　：部材番号
C_{s_i}　：単位重量当たりの鋼材コスト
w_i　：重量($= \rho_i l_i a_i$)
ρ_i　：単位体積重量 (鉄鋼：$7.85 gf/\mathrm{cm}^3$)
l_i　：部材長
a_i　：断面積

2.3.3　溶接コスト

溶接コストは一般的に、溶接材料費と人件費、そして電力費の和で求められるが、ここでは、通常の溶接量積算時のように、各溶接部を隅肉溶接6mmに換算した溶接延長に、溶接長当りの単価[18]を乗じることで求める。各構造部材の柱梁接合部における溶接の延長は、溶接換算率を用いて隅肉6mmに換算することが可能であるため[19]、それに現場と工場における溶接単価を区別して適用すれば、式(4)のように、各溶接部におけるコストを求めることができる。

$$C_{\mathrm{welding}} = \sum_i \left(C_{\mathrm{wf}_i} l_{\mathrm{wf}_i} + C_{\mathrm{ws}_i} l_{\mathrm{ws}_i} \right) \tag{4}$$

ここで、　C_{welding}　：溶接コスト
C_{wf_i}　：工場溶接コスト単価
C_{ws_i}　：現場溶接コスト単価
l_{wf_i}　：工場溶接延べ長さ
l_{ws_i}　：現場溶接延べ長さ

3　多目的最適化問題の定式化

鋼構造計算ルート3における与えられた制約条件下で、構造物のコストと最大層間変形角を同時に最小化する多目的最適化問題を次式で与える。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) = \begin{cases} f_1(\boldsymbol{x}) = C(\boldsymbol{x}) \\ f_2(\boldsymbol{x}) = \max\limits_k \left(R_k(\boldsymbol{x}) \right) \end{cases} \\ &\text{subject to} \quad \boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}) \leq \boldsymbol{0} \end{aligned} \tag{5}$$

ここで、　f_i　：評価関数
C　：評価コスト
R_k　：k階の層間変形角
$\boldsymbol{x}$　：部材形状
$\boldsymbol{g}$　：制約条件

なお、制約条件を満たさない場合、$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$自体にペナルティ関数$\gamma_j$の逆数を乗じたものを新たな目的関数$\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$として、以下のように無制約多目的最適化問題として定式化する。

$$\text{minimize} \quad \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}) = \frac{\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})}{\prod_j \gamma_j} \tag{6}$$

表 4　最適化パラメータ

最適化手法	SPEA2
目的関数	コスト,層間変形角(2目的)
個体数	30
アーカイブ数	30
世代数	10000
交叉率	0.8
突然変異率	0.1

表 5　解析条件

構造計算	ルート3
応力	許容応力度以下
層間変形角	1/200 以下
保有水平耐力	必要保有水平耐力以上
たわみ	1/250 以下
各階柱梁耐力比	1.5 以上
ディテール制約[1]	あり
柱梁接合部の制約[2]	あり

[1] 上層柱の径が下層より大きくならないかつ、上下柱の径の差が一定範囲を超えないようにする制約。第一層の柱寸法が柱脚の境界条件により敏感に変化することが分かっている。その影響を抑制するためのもの。本研究では制約範囲として50mmを設定している。
[2] 柱に接合される梁せいの差が一定範囲以内に入らないようにする制約。ダイヤフラムの溶接が不可能にならないようにするため。本研究では柱に接合される梁せいの差が10mm以上150mm以下の場合のみに設定し、その範囲内の場合はペナルティを受けることにした。

ペナルティ関数γ_jは制約条件g_jを満たさない場合、制約を超過した度合いに応じた値を割当て、評価関数を除することで次世代において淘汰されやすくするものである。多目的最適化問題の定式化により、多目的遺伝的アルゴリズム[20]の進化計算の尺度となる適合度関数を式(2)のように評価し、最適化を行う。

3.1　最適化パラメータおよび制約条件

表4および5に、最適化計算のパラメータと解析条件を示す。鋼構造計算ルート3の制限値に加え、構造物の崩壊形が全体崩壊形となるように柱梁耐力比に関する制約や、柱の仕口に関する制約条件としてディテール制約、施工性を考慮して柱に接合される梁せいを制約条件として設定する。

4　数値解析

4.1　解析モデル

解析モデルは、図3に示す X 方向5スパン、 Y 方向3スパン、地上5階建ての鉄骨造のオフィスビルを想定する。長期および短期荷重を設定し、短期荷重としては地震荷重を想定する。地震荷重は構造物の重量を算出し、一次設計では、$C_0 = 0.2$ とした A_i 分布に基づく地震力を各層の重心位置に X 方向およびY 方向へ作用させるものとする。

4.2　設計変数

図 4に示すように、構造物の部材を1, 2Fで10グループ、3, 4Fで10グループ、 RFで10グループの全階30グループに分け、各グループの部材情報を設計変数とし、構造物の断面情報を遺伝子へ変換し、進化計算を行う。設計変数に対し、表 6に示す部材グループパラメータ

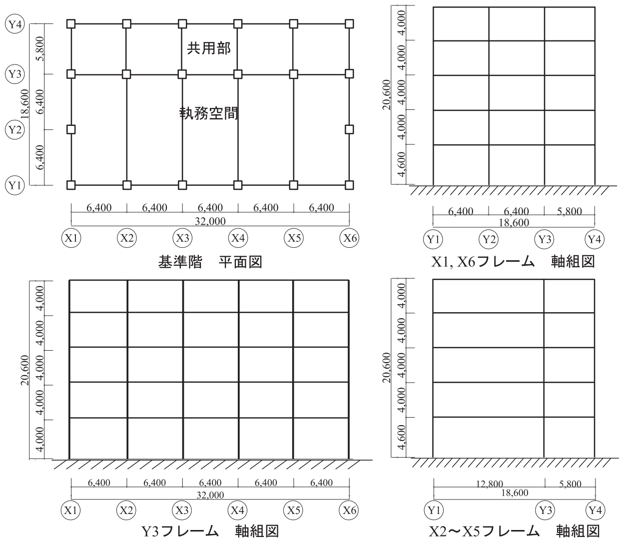


図3　解析モデル

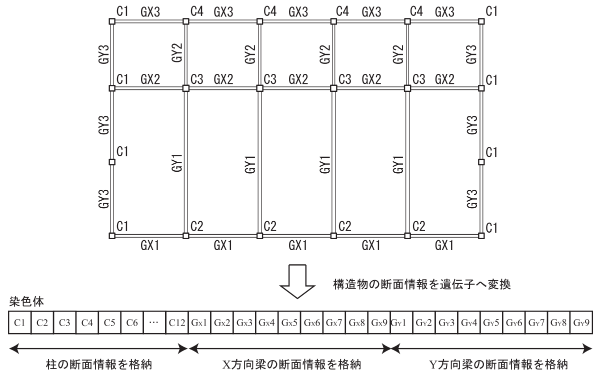


図4　部材グループ化

を設定する。柱を例にとると、符号C1〜C5を用い、角形鋼管の19種類の中から各層の柱を選択するということになる。

4.3　数値解析結果

表 7と図 5に、計算終了世代の10000世代におけるアーカイブ母集団のコストと層間変形角に関する結果およびPareto解集合を示す。Pareto No.1はコストが5,610万円で層間変形角は1/356であり、Pareto No.30はコストが7,890万円で層間変形角は1/259である。Pareto解集合に関して、コストの最大値と最小値で約2,500万円の幅がある。層間変形角の最大値は約1/250であり、制限値1/200に対して近い値となり、純ラーメン構造であるため、柔らかな変形能力を有する構造となっている。また、コストを増大させると、剛性が高くなり、層間変形角は減少する。一方コストを減少させると、剛性が小さくなり、層間変形角は増大する。またPareto解集合において、剛性が高くなっている解は、梁より柱の断面が大きくなっている傾向がある。これらによ

表 6　部材グループパラメータ

符号	階	選択部材	選択部材数
C1～C5	1F～5F	□450～□550	19種類
GX1～GX4	1, 2F	H-550～H-650	25種類
	3, 4F	H-500～H-600	29種類
	5F	H-450～H-550	32種類
GY1	1, 2F	H-700～H-800	30種類
	3, 4F	H-650～H-750	31種類
	5F	H-600～H-700	41種類
GY2	1, 2F	H-550～H-650	33種類
	3, 4F	H-550～H-650	33種類
	5F	H-500～H-600	33種類
GY3, GY4	1, 2F	H-550～H-650	25種類
	3, 4F	H-500～H-600	29種類
	5F	H-450～H-550	32種類

表 7　解析結果

Cost($\times10^4$Yen)		Maximum DriftAngle	
Max (Pareto No.30)	Min (Pareto No.1)	Min (Pareto No.30)	Max (Pareto No.1)
7890.0	5610.0	1/259	1/356

りコストと剛性の相反関係も確認でき、両者の評価値を同時に考慮した多目的最適化によるPareto解集合を得ていることが確認できる。

4.4　修復性の比較

残留変形角、最大層間変形角、修復コストを用い、修復性について検討を行う。

4.4.1　残留変形角

図 6, 7に、時刻歴応答解析により得られた建物の各層のX方向の最大残留変形角と、全体残留変形角を示す。図 6は、7つのPareto解の5層までの各層の残留変形角の最大値(縦軸)と最大層間変形角(横軸)の関係を示しており、標準3波による結果を1つにまとめて表示しているが、個別の判読ができなくとも、残留変形角の最大値が約1/250であることから、表 2に示した1/90を超えていないので修復は可能であると判断できる。また、図 7は7つのPareto解の全体残留変形角の最大値(縦軸)と初期コスト(横軸)の関係を示しており、標準3波による結果の最大値を表示しているが、個別の判読ができなくとも、最大値は1/600程度であり、1/200を超えていないので修復は可能であると判断される。

4.4.2　最大層間変形角

時刻歴応答解析により得られた建物のX方向の最大層間変形角を図 8に示す。図 8の最大層間変形角はPareto解7つに対して、標準3波により生じる層間変形角の最大の層の値を示している。コストと最大応答層間変形角はほぼトレード・オフの関係になっていることが分かる。

4.4.3　修復コスト

図9に初期コストと修復コストの関係を、図10に初期コストとトータルコストの関係を示す。初期コストとは、構造設計支援手法で用いている評価コストであり、修復コストとは、今回提案した修復方法を用いて建物を修復する時にかかるコストのことである。修復コストにおいては、表 3に示した修復を要する損傷を受けた部材の数に比例して増大していることが分かる。しかし増大の幅は均一ではなく、初期コストを大きくしていくと、ある点を境に修復コストの値が小さくなる傾向が見られる。図10で、初期コストとトータルコストの関係性を確認すると、Pareto解のNo.10近傍のコストが低くなる結果となった。初期コストを小さくしようとすると修復コストが大きくなり、また修復コストを小さくしようとすると初期コストが大きくなる傾向であり、下に凸の曲線になっている。そのため、大地震が供用年中に一回遭遇すると仮定した場合には、Pareto解のNo.10近傍の初期コスト近傍で構造性能を決定すると、トータルコストを小さくできることがわかる。ただし、複数回の大地震については、それに比例して修復コストが発生するため、このような事象を

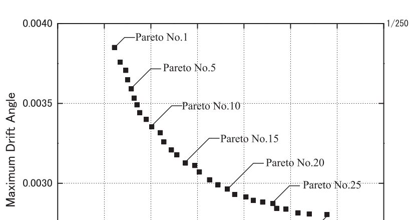


図5　Pareto解集合
(Pareto No.1～Pareto No.30までの解を示す)

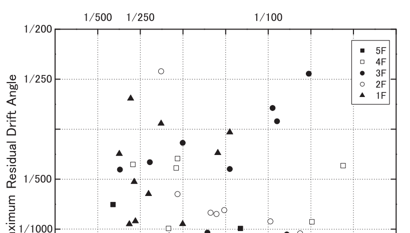


図6　層間変形角と残留変形角
(7つのPareto解の5層までの各層の残留変形角の最大値を示しており、標準3波による結果を1つにまとめて表示している)

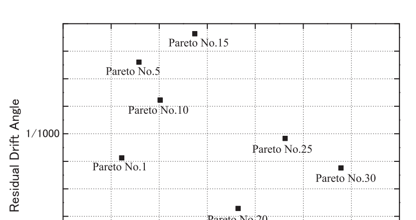


図7　初期コストと全体残留変形角
(7つのPareto解の全体残留変形角の最大値を示しており、標準3波による結果の最大値を表示している)

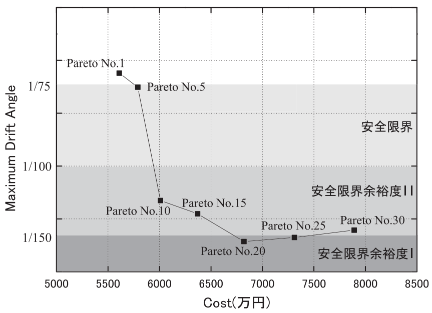


図8　初期コストと最大層間変形角
(標準3波により生じる層間変形角の最大の層の値を示している)

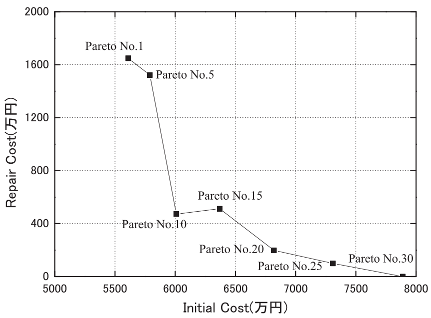


図9　初期コストと修復コスト

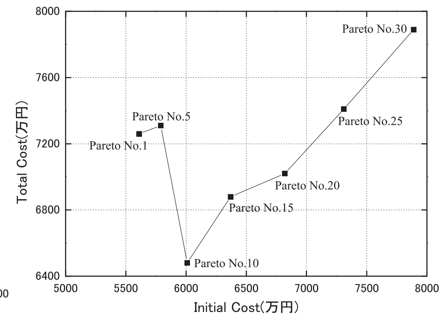


図10　初期コストとトータルコスト
(初期コストと修復コスト・初期コストの和の関係)

考える場合は、初期コストはできるだけ高く設定した方が望ましい。また、建物の修復に関してはその建物の状況にもよるため、提案手法の修復コストからばらつきを有することもあるが、これを目安に構造形式の選定を行うことができると考えられる。

5　結語

本研究では多目的最適化法を用いた構造設計支援手法の実用化が目的であり、実務設計の構造計画を想定して、Pareto解集合を数値解析によって求め、それぞれのPareto解の地震時の損傷度や修復性について考察を行うことにより、構造物の選定に際して目安となりうる情報が得られることを確認した。また、現代は度々起こる大地震による建物の損傷が大きな問題となっており、明確な構造性能の提示が重要となっている。経済性ばかりに目を向けられているのではなく、安全で災害に強いサスティナブルな建築が求められている。構造計画において修復性という概念を取り入れることにより、より持続可能な建築を創り上げることが可能となり、より耐震性の優れた建物の設計を促すことができると考える。また、大地震時の建物の状態を把握し、損傷を制御するような部材断面や耐震要素の配置を計画することは建物の長寿命化や機能性、復旧性の上で非常に重要となってくる。建物の修復性を判断できるツールの開発によって、より多様な構造計画が可能となり、意匠設計者や建築主に対するプレゼンテーションツールとしても利用でき、構造設計者が望む構造計画が支援できるようになり、とても有用となると考えられる。

参考文献

1）H. Ohmori, N. Tamura, T. Ito: Development of Supporting Scheme for Structural Design of Steel Frame Structures, Proceedings of Symposium of International Association of Shell and Spatial Structures, BP–14(CD–ROM), pp. 59-60, Beijing, China, 2006
2）大森博司, 田村尚土：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, 構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 251–257, 2008
3）田村尚土, 大森博司：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（その1）許容応力度等設計における最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 628, pp. 891–897, 2008
4）田村尚土, 大森博司：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（その2）保有耐力設計に基づく最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 643, pp. 1671–1676, 2009
5）大森博司, 伊藤智幸, 石田高義：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応用, 構造工学論文集, Vol. 55B, pp. 239–246, 2009
6）T. Ishida, H. Ohmori: Development of Supporting Scheme for Structural Design of Steel Structures –Expansion to Frames with Braces with Eccentricity, Proceedings of the 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, APCS09–P0088(CD–ROM), pp. 15–16(Extended Abstract), Nagoya, Japan, 2009
7）大森博司, 石田高義, 小玉真一：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 –偏心 K 型ブレース構造物の保有耐力設計法への応用, 構造工学論文集, Vol. 56B, pp. 395–401, 2010
8）S. Kodama, H. Ohmori: Development of Supporting Scheme for Structural Design of Steel Structures –Configuration Optimization of Binding Beam, Proceedings of the 9th Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, APCS09–P0087(CD–ROM), pp. 123–124(Extended Abstract), Nagoya, Japan, 2009
9）小玉真一, 石田高義, 大森博司：多目的最適化法による鋼構造物の構造設計支援に関する研究 –小梁配置最適化問題への応用, 構造工学論文集, Vol. 56B, pp. 553–558, 2010
10）小玉真一, 大森博司：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 –基礎梁を考慮した最適設計法, 構造工学論文集, Vol. 57B, pp. 55–60, 2011
11）田村尚土, S-W. Jin, 大森博司：多目的最適化手法を用いた鋼構造物の構造計画における設計支援法とその実用化に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 58B, pp. –, 2012
12）S-W. Jin, 田村尚土, 大森博司：柱梁接合部の施工性を考慮した鋼構造物の最適設計, 日本建築学会構造系論文集, No. 673, pp. 469–474, 2012
13）高橋泰彦，藤田佳広，杉本浩一：阪神・淡路大震災で被害を受けた鋼構造物建築物の復旧技術および補修例，大林組技術研究所報 特別号，1996
14）岩田善裕，杉本浩一，桑村仁：鋼構造建築物の修復限界-鋼構造建築物の性能設計に関する研究 その2-，日本建築学会構造系論文集，No.588，pp.165-172，2005
15）鋼構造運営委員会：鋼構造性能設計ガイドライン, 2005
16）(社)日本建築構造技術者協会：建築の構造設計,第4編目標性能と性能メニュー, 2002
17）建設物価調査会, 建設物価, 2005年12月
18）経済調査会, 建築施工単価, 2010年秋経済調査会
19）日本建築学会, 建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事2007, 丸善, pp. 81–87, 2009. 9
20）E. Zitzler, M. Laumanns, L. Thiele: SPEA2, Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), 2001

皺構造の生成と力学特性に関する基礎的研究

清本莉七 [1)]，寺田絵美 [2)]，新谷眞人 [3)]
1)早稲田大学創造理工学研究科（建築学），ri7-kiyo@toki.waseda.jp
2)安井建築設計事務所
3)早稲田大学理工学術院（建築学）特任教授

1 はじめに

1.1 研究の背景と目的

「皺」は物質の劣化を招き、美観を損なうものとして消極的に捉えられるため、皺を避ける既往研究 [1),2)] は多く見られるものの、皺そのものを考察した研究はほとんどない。しかし、力学的な観点から見ると、一度丸めてから広げた紙の方が平らな紙よりも面外剛性が高いように、皺が生じることにより面外剛性が上がることは経験的に知られている。本論では、皺をポジティブに捉え、最終的には屋根材のような建築構造部材に用いることを目指し、皺の生成により面外曲げ剛性・耐力が上がる理由について考察する。また、薄板やシェルの座屈によって、再現性のある皺モデルを実験と解析により生成し、その皺モデルの力学特性を定量的に把握する。

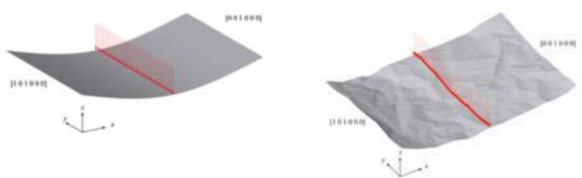


図１　平な紙と皺のある紙の変形の比較

1.2 本論で扱う皺の定義

本論では、紙に生じる皺から着想を得て、皺構造を以下のように定義する。

① 塑性座屈により生成する
② 一枚の平面から生じる
③ ２方向以上の波形をもつ

2 皺の力学特性に影響を与える因子

皺が生じることにより材料の力学特性が変化する要因を明らかにする。まず、紙に生じたランダムな皺の形状を 3D スキャンし、FEM 解析モデルを作成する。作成した解析モデルに面外力が作用したときの、皺の稜線分布と応力分布、各要素に働く断面力（軸力、曲げモーメント）の分布を比較し、皺の力学特性に影響する要因を抽出する。

寸法:282×195×t=0.5mm
材料:アルミニウム
要素:板要素
荷重:自重（面外方向）
支持条件:二辺単純支持

図 2.1 解析モデル

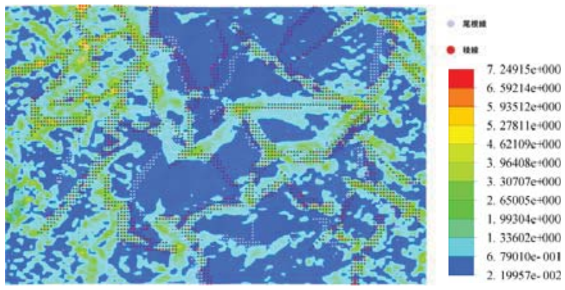


図 2.2von Mises 応力(N/mm²)と稜線分布図

図 2.3 軸力(N/mm)と稜線分布図

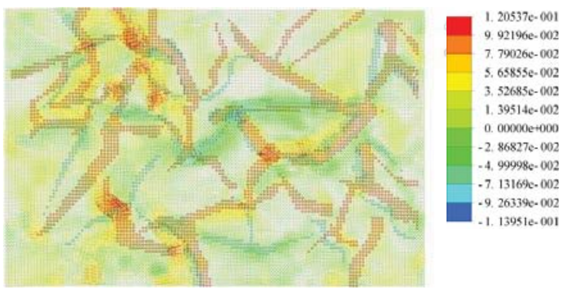
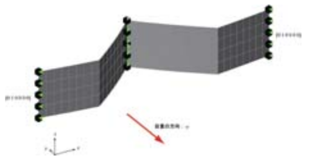


図 2.4 曲げモーメント(Nmm/mm)と稜線分布図

稜線の位置と応力・断面力の分布を比較すると、概ね稜線に応力と断面力が集中している。その事から、稜線の形状が皺の面外剛性に影響を与えていると考えられる。また、応力が分散するほど剛性・終局耐力が上昇するので、稜線・尾根線が分散している方が、すなわち皺の密度が疎である方が、剛性・耐力が上昇すると考えられる。

次に、稜線角度をパラメータとし、皺の弾性剛性への影響を把握する。解析モデルを図 2.5 に示す。



寸法:24×5×t=0.5mm
材料:アルミニウム
荷重:自重（-y 方向）
支持条件:二辺単純支持

図 2.5 解析モデル

稜線の角度と剛性の関係を図2.6に示す。図2.6を見ると、θ=180°、すなわち平板と、稜線のあるものを比較すると、稜線のあるものの方が剛性が大きくなっていることがわかる。これは、部材長が一定であるため、稜線の角度が鋭角になるほどスパンが短くなり剛性が上昇するものとも考えられるが、スパン長さと断面形状が等しい梁と剛性を比較すると、稜線のあるものの方が剛性が大きくなる。このことから、板を折り曲げた方が剛性が大きくなり、稜線角度が小さくなるほど、剛性が大きくなる。これは、応力図（図 2.7）を見ると明らかなように、稜線の角度が鋭角になると、加力部分脇の 2 か所に応力が分散されるため、剛性が上昇すると考えられる。

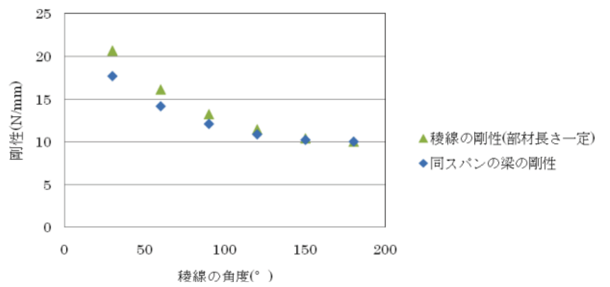


図 2. 6 折り曲げた板の角度と剛性

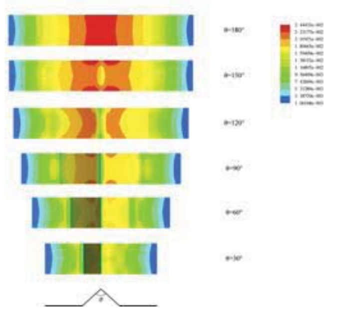


図 2. 7 応力図（パラメータ：稜線角度）

3 再現性のある皺の生成

本来、皺というのはランダムな方向と波長の波が合わさった物であるが、建築物への応用を目標に、力学特性について調べる必要があることを考慮すれば、再現性のある皺を作成する必要がある。

3.1 実験による皺の作成

一方向にあらかじめプレスして折り曲げた板を、板に生じた波の方向と直交方向に面内圧縮し、座屈させることにより皺を生じさせる。皺製作時のパラメータは、

① 折り曲げ量 h(mm)・・・プレスした際の高さ h=12,15,18mm

② 面内圧縮量 d(mm)・・・座屈の面外変形量ではなく、面内圧縮方向の変形量 d=0.75,1,1.5,2mm

③ 山の数 n・・・板に対し、n=2,n=3 の山を発生させるとする。材料はアルミニウム、板厚 0.5mm を用いた。

皺の製作状況を図 3.1 に示す。

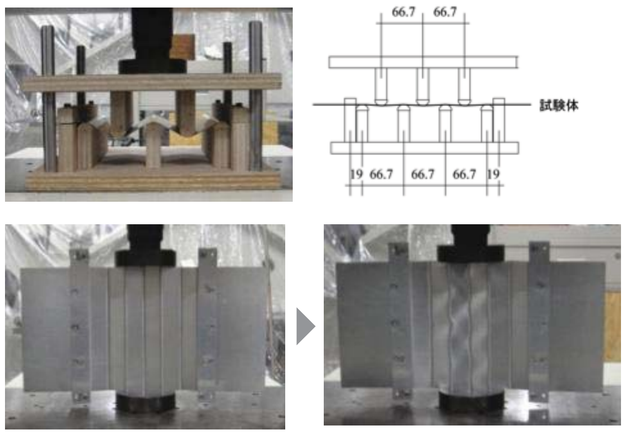


図 3. 1 皺の製作状況（上：プレス　下：面内圧縮）

さらに、n=3,h=12mm でプレスした板を面内圧縮した際の荷重変形曲線を図 3.2 に示す。試験体は弾性座屈時圧縮方向に複数の波を生じるが、塑性座屈すると一箇所に応力が集中し、局部座屈する。

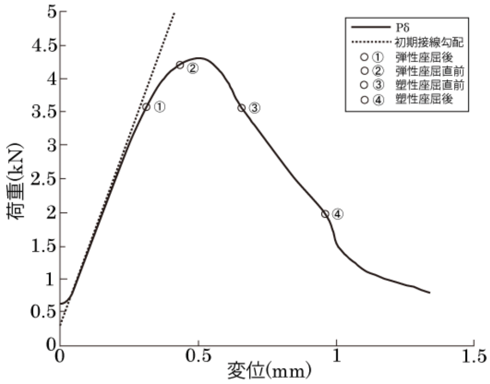


図 3. 2 荷重変形曲線

3.2 FEM 解析による皺の作成

次に、波板を作成し、それを面内圧縮した時の座屈固有値解析を行った。解析モデルを図 3.3 に示す。材料はアルミニウム、有限要素は四角形板要素、板厚 t=0.5mm、寸法は 200×200mm である。面内圧縮する波板は、sin カーブを押出したものと蛇腹状に折って半径 10mm で面取りしたものの２パターン用意し、実験と同様に波高さ h=12,15,18mm と変化させた。

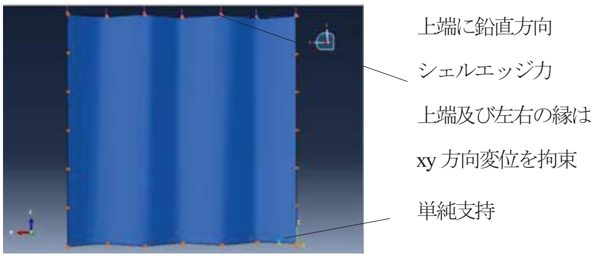


図 3.3 解析モデル

n=3 の時の解析結果をまとめたものを図 3.4 に示す。解析結果と皺作成の実験結果を比較すると、座屈形状、座屈荷重共に、sin 波を押し出したものよりも、蛇腹状のものを面取りした波板の方が実験に近いことがわかる。プレス加工により波板を製作しているため、折り目部分以外は平面的になると考えられ、蛇腹状の波板の方が実験の形状に近いのではないかと思われる。また、波高さ h が高くなるほど、座屈荷重が大きくなっており、sin 波を押し出したものの方が、蛇腹状のものを面取りした波板よりも座屈強度が２倍以上大きくなっている。面内圧縮による座屈後の形状を皺と捉えるならば、稜線高さが高く、稜線密度が疎である程、面外剛性が高くなるということから、波高さ h が高く、山の数 n が小さいものの方が、面外剛性が高いと考えられる。

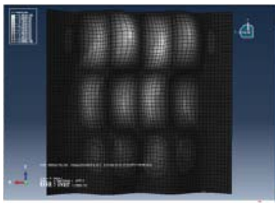
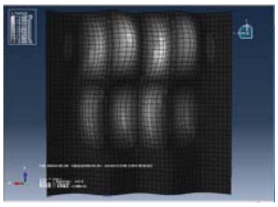
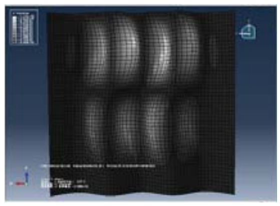
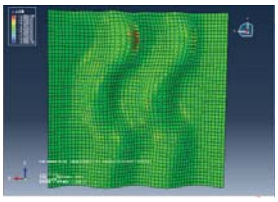
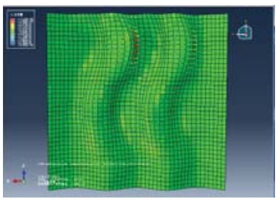
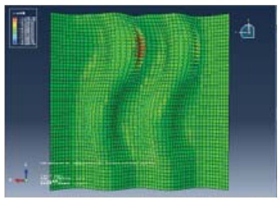
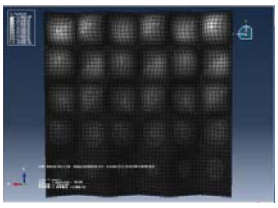
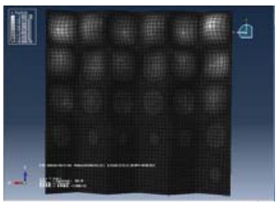
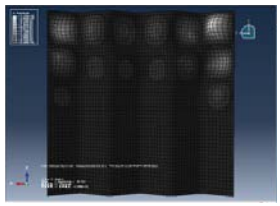
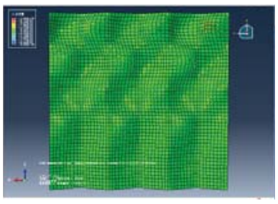
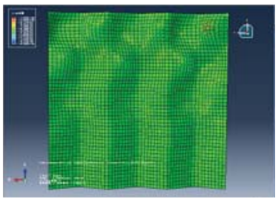
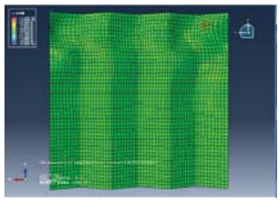
	h[mm]	12	15	18
sin 波	応力分布			
	座屈形状			
	座屈荷重	12723[N]	15200[N]	15843[N]
蛇腹	応力分布			
	座屈形状			
	座屈荷重	5720[N]	6239[N]	6287[N]

図 3.4 座屈解析結果

4 再現性のある皺の力学特性に関する考察

3 章で作成した皺試験体と同スケールの平板と一方向にのみ折り曲げた折板に対して 3 点曲げ実験を行い、力学的性能を比較、考察した。全て材料はアルミニウム、板厚は 0.5mm である。実験状況を図 4.1 に、平板、折板、皺の荷重変形曲線を図 4.2 に示す。また、各試験体の弾性剛性 K、降伏耐力 P_y、終局耐力 P_u、皺部分の等価断面二次モーメント I_w、平板の断面二次モーメント I_p に対する I_w の上昇率 α を表 4.1、表 4.2 にまとめる。

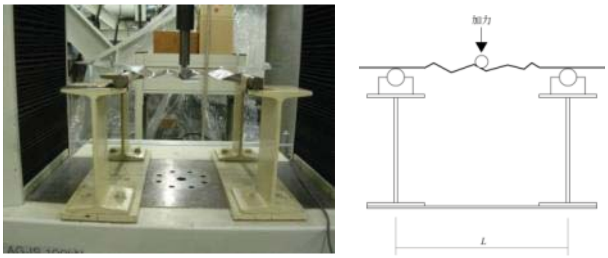


図 4. 1 実験状況

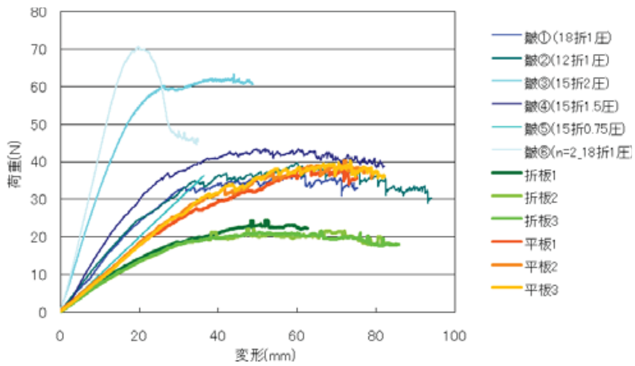


図 4. 2　3 点曲げ実験の際の荷重変形曲線

表 4. 1 各試験体の弾性剛性 K, 降伏耐力 P_y, 終局耐力 P_u

	K(N/mm)	P_y(N)	P_u(N)
皺①(18 折 1 圧)	1.12	32.98	36.13
皺②(12 折 1 圧)	1.35	24.4	38.67
皺③(15 折 2 圧)	3.31	47.22	61.50
皺④(15 折 1.5 圧)	1.82	27.35	42.60
皺⑤(15 折 0.75 圧)	1.01	29.19	35.80
皺⑥(n=2_18 折 1 圧)	2.88	56.09	69.82
折板	0.75	8.52	21.56
平板	0.90	24.02	38.66

表 4. 2 各試験体の等価断面二次モーメント I_w と上昇率 α

	I_w(mm^4)	$\alpha=I_w/I_p$
皺①(18 折 1 圧)	2.77	1.25
皺②(12 折 1 圧)	3.34	1.50
皺③(15 折 2 圧)	8.26	3.71
皺④(15 折 1.5 圧)	4.53	2.04
皺⑤(15 折 0.75 圧)	2.50	1.12
皺⑥(n=2_18 折 1 圧)	7.18	3.23
折板	1.85	0.84
平板	2.77	1.00

平板、折板、皺の荷重変形曲線を比較すると、弾性剛性、降伏荷重、終局荷重の大きさは概ね皺＞平板＞折板の傾向がある。皺の等価断面二次モーメントは、平板より上昇するが終局耐力は降下する場合もある。

平板の断面二次モーメント I_p に対する、各試験体の等価断面二次モーメント I_w の上昇率 α が大きい試験体は皺③、⑥であるが、これらの試験体に見られる特徴は、稜線形状が鋭角であること（皺③）と、稜線が試験体全体に分散していること（皺⑥）である。稜線の角度が鋭角であるほど応力が分散しやすいため、皺全体の剛性が上昇すると考えられる。また、稜線が試験体全体に分散することで、稜線に集中する応力が分散されるので、剛性が上昇すると思われる。

次に、3 点曲げ実験を模擬して FEM 解析を行った。材料はアルミニウム、有限要素は四角形板要素を用い、材料非線形解析、幾何学的非線形解析を行った。解析モデルを図 4.3 に示す。解析結果と、実験から得られた弾性剛性 K、等価断面二次モーメント（I_w[mm^4]）、平板の断面二次モーメント（I_p[mm^4]）に対する上昇率 α（$=I_w/I_p$）を表 4.3 で比較する。解析と実験より得られた弾性剛性はほぼ一致し、弾性域においては、FEM 解析により、実現象に近い剛性を計算できる。

また、解析と実験の荷重変形曲線を比較すると、降伏耐力は実験より解析のほうが若干小さくなる。これは、解析モデルが皺の稜線部分の残留歪、残留応力の影響を考慮せず、単純に皺の形状を模擬しただけの解析モデルであるためと考えられる。実際は、歪硬化により稜線部分の材料の降伏点上昇が起こり、塑性歪が大きいと降伏点が上昇する金属の履歴特性により耐力が上昇するので、形状を模擬しただけの解析モデルは耐力を安全側に評価する。

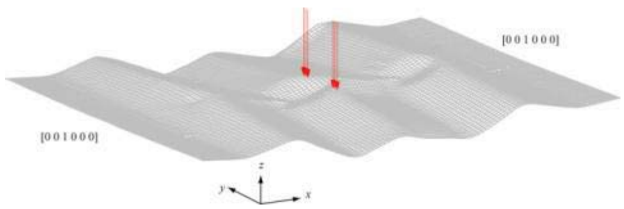


図 4.3　3 点曲げ試験を模擬した解析モデル

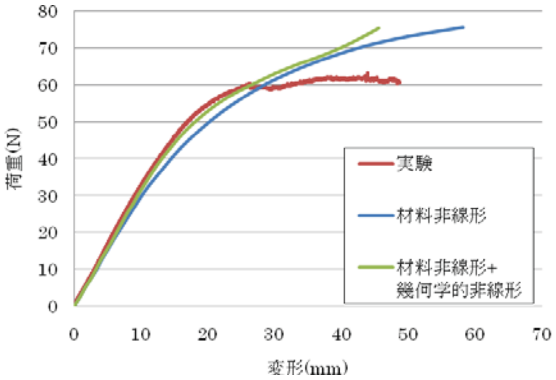


図 4.4 荷重変形曲線の比較

表 4.3 実験値と解析値の比較

	K(N/mm)	α	I_w(mm^4)
実験	3.22	3.61	8.03
解析	3.04	3.41	7.59

5 円筒シェルを用いた再現性のある皺の生成

紙を円筒シェル状にし、それを図 5.1 のように、加力部の面外変位を拘束した状態で、互い違いに捩ってせん断座屈させることにより、皺を生成することを試みる。すると、図 5.2 のように合同な三角形が組合わさったような再現性のある規則的な皺パターンが現れる。パラメータは円筒シェルの半径 R=50mm と一定にし、捩り間隔 L を L=25,50,75,100,150mm と変化させた。各パラメータにおける 1 周あたりの稜線の数を表 5.1 に示す。

図 5.1 互い違いに捩ることによりせん断座屈

表 5.1　1 周あたりの稜線数

L[mm]	25	50	75	100	150
稜線数	10	11	13	15	19

図 5.2 捩りにより生じた皺(左:L=150 右:L=50)

次に、円筒シェルのせん断座屈による皺をモデル上で再現できるか検討する。FEM 解析モデルを図 5.3 に、解析結果をまとめたものを図 5.4 に示す。材料はアルミニウム、基礎への固定方法は単純支持とし、天井面は剛であると仮定する。有限要素は四角形板要素を用いる。通常、円筒シェルの座屈における形状パラメータは、座屈モード、座屈現象および座屈強度に影響を与える高さ／半径比（L/R）と半径／板厚比（R/t）を取るが [3]、今回は半径 R=50mm、板厚 t=0.1mm を固定して、高さ L のみを変化させた。また、Donnell の式による座屈強度の理論解と FEM 解析によって求められる座屈強度を比較し、解析の妥当性を確認する。

Donnel の座屈強度を求める式

固定縁の場合

$$\left(1-\nu^2\right)\frac{\tau_{cr}}{E}\frac{l^2}{h^2}=4.6+\sqrt{7.8+1.67\left(\sqrt{1-\nu^2}\,\frac{l^2}{2ha}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

単純縁の場合

$$\left(1-\nu^2\right)\frac{\tau_{cr}}{E}\frac{l^2}{h^2}=2.8+\sqrt{2.6+1.40\left(\sqrt{1-\nu^2}\,\frac{l^2}{2ha}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

ただし、上式において l は円筒長さ、h は厚さ、a は半径である。

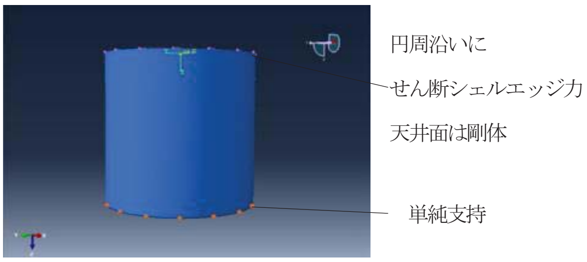


図 5.3 解析モデル

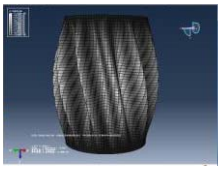
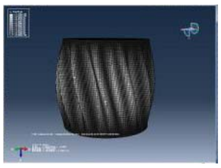
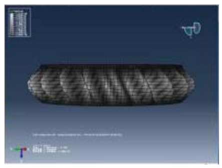
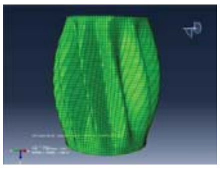
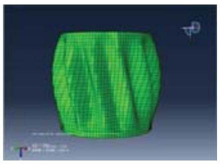
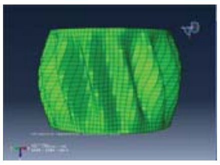
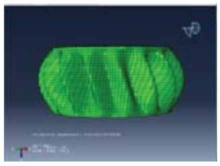
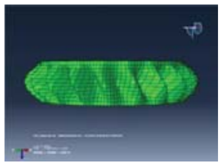
L/R	3.0	2.0	1.5	1.0	0.5
座屈形状 と 応力分布					
座屈形状					
波の数	11	12	14	16	20
M_{cr}	23182[Nmm]	27440 [Nmm]	31989[Nmm]	40354[Nmm]	63918[Nmm]
M_{cr} 理論解	22132[Nmm]	27360[Nmm]	31943[Nmm]	40152[Nmm]	62769[Nmm]
誤差	4.74%	2.92%	1.44%	5.03%	1.83%

図 5.4 解析結果

FEM による弾性座屈解析により、円筒シェルの振りによる座屈形状は、板厚一定の場合は L/R によって決まり、L/R が小さくなるほど、1 周あたりの稜線数が多くなる。紙によって実験的に円筒シェルをねじって作成した皺と、解析結果の座屈形状を比較すると、実験の方では稜線数が 1 つ足りないが、紙を丸めた際の継ぎ目部分がうまく座屈しないことを考慮すれば、実験と解析結果は形状的に概ね一致し、円筒シェルの振りによって生成される皺は再現性があると考えられる。また、座屈荷重（振りモーメント）の解析による解と理論解の誤差はパラメータによりばらつきはあるものの、1.44 ~5.03%となっており、もともと Donnel の式が安全側にとった簡略式であることを考慮すれば、今回の解析は妥当であったと考えられる。今後、円筒シェルの振りによって生成される皺についても定量的に力学特性を把握していく予定である。

6 まとめ

得られた知見を以下にまとめる。

板に皺が生じると、皺が生じる前の状態よりも面外曲げ特性（剛性、耐力）が上昇することが、実験と FEM 解析により確認された。さらに、皺の面外曲げ剛性は稜線形状の影響を受け、稜線高さが高く、角度が鋭く、密度が疎であるほど面外剛性が高いことがわかった。

皺の生成により面外曲げ剛性が上昇する理由は主に 2 つあり、1 つ目は、皺が生じることで断面性能が上昇するということ、2 つ目は、平板においては加力部分に集中していた応力が、皺においては稜線部分に沿って分散し、板全体で面外力に抵抗するということであると考えられる。今後、稜線によって応力が分散される機構について考察していきたいと考えている。

波板の面内圧縮と円筒シェルの振りにより、再現性のある皺を生成できることが実験と解析により確認された。今後は、より面白く、力学性能の高い再現性のある皺を生成することを目標として、様々な手法により皺モデルを生成し、力学特性を把握していきたい。

参考文献

1) 鳴瀬勝房, 竹山寿夫:金属円板の深紋り加工におけるフランジしわの基礎解析-2-しわ押えのばねによるしわの抑制効果,塑性と加工 20(220), p386-391, 1979-05
2) 氏原新,広瀬洋三:しわ押え力制御による車体パネルのプレス成形,塑性と加工 33(375), 373-378, 1992-04
3) 加藤秀雄, 佐々木享: 円筒容器における座屈強度の感度解析
4) M. Ben Amer and Y. Pomeau：Crumpled paper, Proc. R. Soc. Lond. A (1997) 453, pp. 729-755
5) ティモシェンコ, ギアー：弾性安定の理論<下>

任意境界を有する空気膜構造の形状･裁断図同時解析と試験体モデルによる形態確認

黒木涼 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建築学専攻，大学院生，kurogi@com.aae.kagoshima-u.ac.jp
2)鹿児島大学大学院理工学研究科，技術職員，t-naka@aae.kagoshima-u.ac.jp
3)鹿児島大学大学院理工学研究科，教授，工博，honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

張力構造は軽量で引張力のみを伝達する力学的特性より、無柱の大空間を構成することが可能である。これらの構造の膜材は初期状態が形状不確定な自然状態で存在し、張力を導入することで安定形態となる特異性を有する。そのため、初期形状解析や裁断図解析等、膜構造特有の解析が必要となる [1]。通常、裁断図解析は設計原型曲面を初期形状解析により決定し、得られた曲面の縮尺率を考慮した測地線を裁断線とする手順がとられ、想定した曲面形状や応力状態にならない場合もある。

本研究では、座標値を直接未知量とした座標仮定有限要素技術を用いた形状･裁断図同時解析を採用する [2]。サスペンション膜構造の要素分割モデルが、三角形や矩形の要素を用いると、形状･裁断図同時解析の結果が高ライズの場合、必ずしも一致しない。特に必要最小限の要素分割によるモデルにおいて解の収束性や解形態の状況により、矩形要素は三角形要素より優れていることを明らかにしている [3]。さらに、解析結果による試験体の形態や計測値の定性的な比較により、座標仮定有限要素法を用いた形状･裁断図同時解析の有効性が示されている。

本論文では、任意境界を有する空気膜構造をモデルの対象とする。まず矩形要素による円形境界空気膜構造モデルの形状･裁断図同時解析を行い､複数のライズによる数値例と試験体の定性的比較を通して解析結果の特性を把握する。次に、任意境界形状を有する空気膜構造モデルに展開する。解析モデルは勾玉をイメージした非対称境界形状の空気膜構造を扱い、試験体との比較を示して本手法の有効性を確認する。

2 構造モデルの支配方程式と離散化定式化

2.1 平衡方程式

ひずみ$\boldsymbol{\gamma}$を安定形態の座標値 $\mathbf{X}$ で表現すると、構造モデルの非線形平衡方程式と接線剛性行列は次の仮想仕事式より導かれる [2]。

$$\int_\Omega \delta\boldsymbol{\gamma}(\mathbf{X})\boldsymbol{\tau}(\mathbf{X})d\Omega - \delta\mathbf{X}^T\lambda\mathbf{f} = \mathbf{0} \tag{1}$$

ここで、$\boldsymbol{\tau}$: ベクトル，$\mathbf{f}$: 荷重モードベクトル，$\mathbf{0}$: 零ベクトル，λ : 荷重パラメータ，Ω : 解析領域とする。ひずみは Green ひずみを採用する。

最終的に次式に示す非線形平衡方程式と接線剛性行列が得られる。

$$\mathbf{F}(\mathbf{X},\mathbf{f},\lambda) = \int_\Omega \mathbf{B}^*(\mathbf{X})^T\boldsymbol{\tau}(\mathbf{X})d\Omega - \lambda\mathbf{f} = \mathbf{0} \tag{2}$$

$$\frac{\partial\mathbf{F}}{\partial\mathbf{X}} = \mathbf{K}_t(\mathbf{X}) = \mathbf{K}_G(\mathbf{X}) + \mathbf{K}_S(\mathbf{X}) \tag{3}$$

ここで、$\mathbf{K}_G$: 幾何剛性行列，$\mathbf{K}_S$: 線形＋大変位行列である。なお、ひずみ$\boldsymbol{\gamma}$と座標値の関係とひずみ増分と座標増分の関係及び構成関係は次式で与えられる。

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{B}(\mathbf{X})\mathbf{X} - \mathbf{C} \tag{4.a}$$

$$\delta\boldsymbol{\gamma} = \delta\mathbf{B}(\mathbf{X})\mathbf{X} + \mathbf{B}(\mathbf{X})\delta\mathbf{X} = \mathbf{B}^*(\mathbf{X})\delta\mathbf{X} \tag{4.b}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{D}\boldsymbol{\gamma} \tag{5}$$

2.2 離散化定式化

矩形要素の離散化は次の通りである [3]。双一次 4 節点アイソパラメトリック要素(矩形要素)を用いた定式化によると、要素任意点の座標 $\mathbf{X}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{X} = \mathbf{N}\bar{\mathbf{X}} \quad N_i = \frac{1}{4}(1+\xi_{0i})(1+\eta_{0i}) \quad (i = 1,\sim,4) \tag{6}$$

$$\xi_{0i} = \xi\xi_i, \eta_{0i} = \eta\eta_i \qquad -1 \le \xi,\eta \le 1$$

$$\xi_1 = \xi_4 = \eta_1 = \eta_2 = 1, \quad \xi_2 = \xi_3 = \eta_3 = \eta_4 = -1$$

ただし、$\bar{\mathbf{X}}$: 安定形態における節点座標値、N_i : 形状関数 $\mathbf{N}$ の各節点成分である。式(6)を用いて、式(2)より離散化平衡方程式が次のように得られる。

$$\int_\Omega \left\{ (\mathbf{Q}^T\mathbf{X})\mathbf{D}\left(\frac{1}{2}\mathbf{X}^T\mathbf{Q}\mathbf{X}\right) \right\} d\Omega - \lambda\mathbf{f} = \mathbf{0} \tag{7}$$

ただし、$\mathbf{Q} = \left[\sum_{k=1}^{3}\mathbf{Q}_{1k}^T\mathbf{Q}_{1k} \ \ \sum_{k=1}^{3}\mathbf{Q}_{2k}^T\mathbf{Q}_{2k} \ \ \sum_{k=1}^{3}\left(\mathbf{Q}_{1k}^T\mathbf{Q}_{2k} + \mathbf{Q}_{2k}^T\mathbf{Q}_{1k}\right) \right]^T$

$$\mathbf{Q}_{jk} = \left[\mathbf{S}_j\delta_{1k} \ \ \mathbf{S}_j\delta_{2k} \ \ \mathbf{S}_j\delta_{3k} \right] \quad (j = 1,2)$$

$$\mathbf{S}_1 = \frac{1}{|\mathbf{J}|}\left(\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{y}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi} - \frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{y}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta} \right), \ \mathbf{S}_2 = \frac{1}{|\mathbf{J}|}\left(\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{x}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi} - \frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{x}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta} \right)$$

$$|\mathbf{J}| = \frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{x}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{y} - \frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\xi}\mathbf{y}\frac{\partial\mathbf{N}}{\partial\eta}\mathbf{x} \qquad \mathbf{x} = [x_1 \ \ x_2 \ \ x_3 \ \ x_4]^T \quad \mathbf{y} = [y_1 \ \ y_2 \ \ y_3 \ \ y_4]^T$$

なお､非線形の収束計算は Newton Raphson 系の解法を用い、数値積分はガウスの２点積分を採用する。三角形要素の離散化式及び取り扱いは文献 2)を参照のこと。

3 空気膜構造の形状･裁断図同時解析

3.1 最適化問題の定式化

最適化では釣合曲面の座標値と想定形状の残差量の平方和を最小化する以下の形状指定･裁断図問題を扱う。

$$Minimize \qquad f(\mathbf{x}^*) = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{2} (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{i0})^T (\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_{i0}) \tag{8}$$

$$subject\ to \qquad t \cdot \boldsymbol{\sigma}^L \leq t \cdot \boldsymbol{\sigma}_e \leq t \cdot \boldsymbol{\sigma}^U \quad N/mm \tag{9}$$

ここで、n : 最適化対象となる総節点数，$\mathbf{x}^*$: 対象となる膜材の裁断図座標値情報，X_i : 形態形成後の膜面上における指定点の全体系座標，X_{i0} : X_iに対応する想定形状の全体系座標値，P : 30$mmAq$，t : 膜厚，$\boldsymbol{\sigma}_e$: 釣合形状における膜主応力，$\boldsymbol{\sigma}^L$: 膜応力下限値，$\boldsymbol{\sigma}^U$: 膜応力上限値である。ライズ指定箇所はモデル中央部であり、応力評価は要素中心とする。なお、最適化手法にはSQP法を採用する。

3.2 解析モデル

①円形境界空気膜構造モデル(Model-A)

解析対象(Model-A)は図 1 に示す円形境界空気膜構造モデルであり、形状の対称性により図 2 のハッチング部を解析領域とする。材料定数は表 1 に示す。膜帯接続情報は図 2 に、要素分割図(矩形要素数 60 節点数 79, 三角形要素 112 節点数 71)は図 3 に示す通りである。膜帯の初期要素分割では要素分割により、節点が内部に配置されるモデルも考える。この節点を内部点と称し、裁断図において内部点を持たないものを内部点なし、既知量として固定するものを内部点固定、未知量とするものを内部点自由と表記する。ここでは、スパン D＝40000mm とし、頂部高さ H = 8000, 9000, 10000mm の 3 種類設定する。ライズ･スパン比 H/D はそれぞれ 0.2, 0.225, 0.25 である。境界条件は円周上の節点を固定とする。裁断線は平滑化と設計変数の低減を図るため 3 次スプライン曲線を採用する。

②任意境界形状を有する空気膜構造モデル(Model-B)

解析対象(Model-B)は図 4 に示す勾玉をイメージした非対称境界形状の空気膜構造モデルとする。膜帯接続情報は図 5 に、要素分割図(要素数 208 節点数 237)は図 6 に示す通りである。収束状況を考慮し、材料定数は表 1 に示す剛性の 1/8 とした。最大スパン D = 65000mm、最小スパン D＝30000mm とし､任意位置の高さ指定(1 節点及び 2 節点)のモデルを 2 つ準備する。Case-1, -2 は 1 節点高さ指定モデル、Case-3 は 2 節点高さ指定モデルとする。支持条件は周囲境界を全て固定とする。

表 1 膜材の材料定数

膜厚	t=0.8mm
縦弾性係数	tE_x=tE_y=800 N/mm
ポアソン比	ν_{xy}=ν_{yx}=0.3
せん断剛性	tG_{xy}=60.0 N/mm
単位質量	1.215×10^{-6} kg/mm^2

4 試験概要

解析は実規模を想定したモデルを扱い、試験体は Model-A に対し、スケールを 0.015 倍に置換したモデル(試験体 A)、Model-B に対し、スケールを 0.026 倍に置換したモデル(試験体 B)とする。図 7 に試験体と境界型

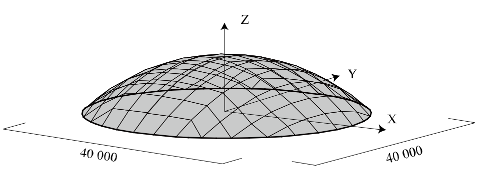


図 1 定形状鳥瞰図 (unit: mm)

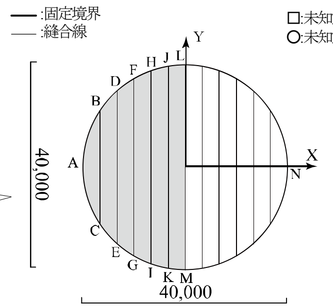
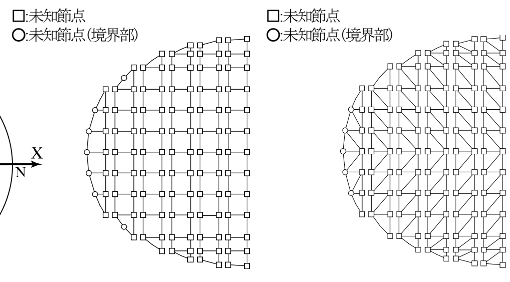


図 2 膜帯接続情報 (unit: mm)



a. 矩形要素(内部点なし) b. 三角形要素(内部点なし)

図 3 要素分割図

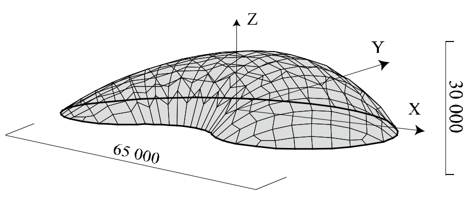


図 4 想定形状鳥瞰図 (unit: mm)

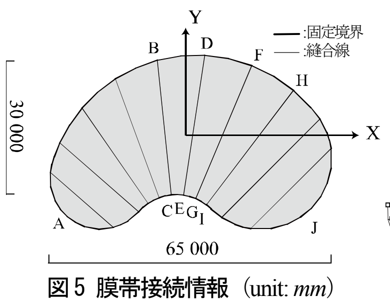


図 5 膜帯接続情報 (unit: mm)

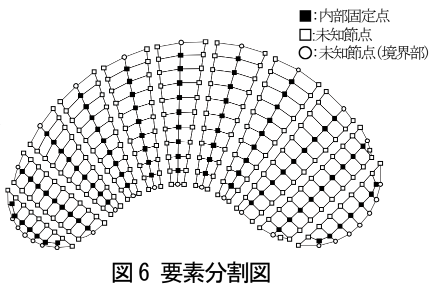
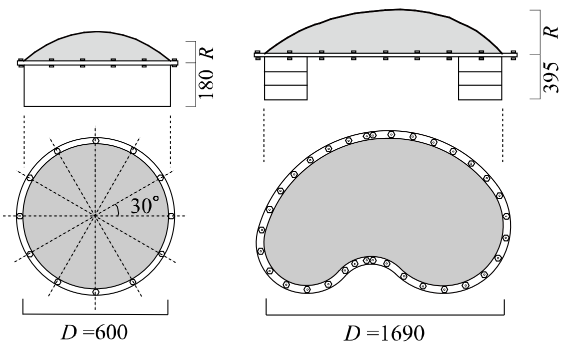
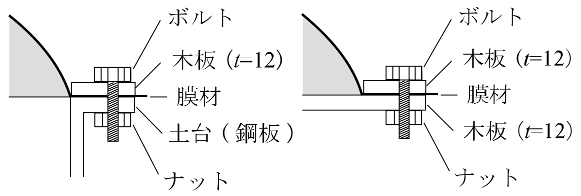


図 6 要素分割図



a. 試験体 A　　b. 試験体 B

図 7 試験体モデル（unit: *mm*）



a. 試験体 A　　b. 試験体 B

図 8 接合部詳細（unit: *mm*）

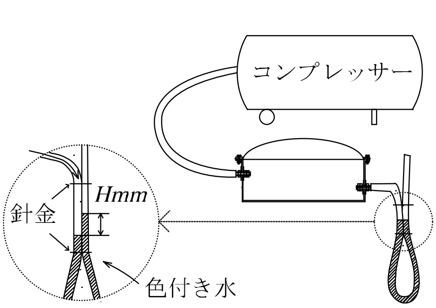
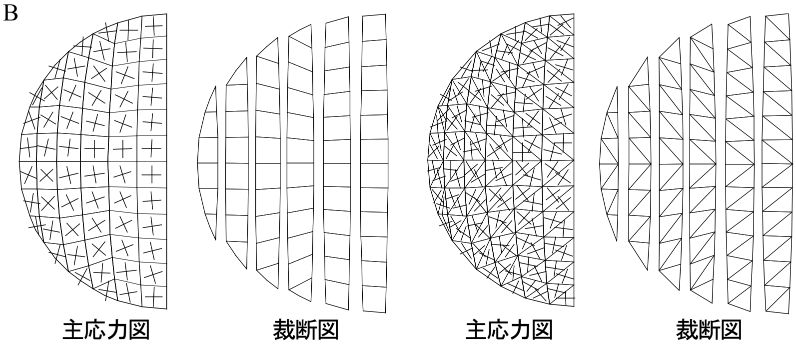


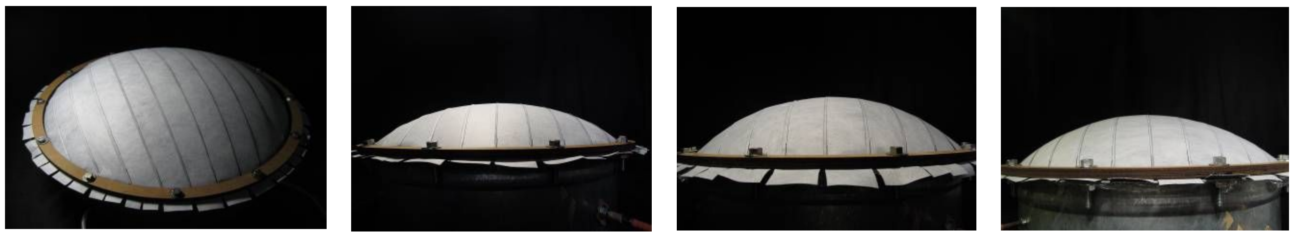
図 9 試験体加圧システム全体と圧力測定



$3.4 \le \sigma_e \le 3.8\ \ N/mm$　　$3.7 \le \sigma_e \le 4.3\ \ N/mm$

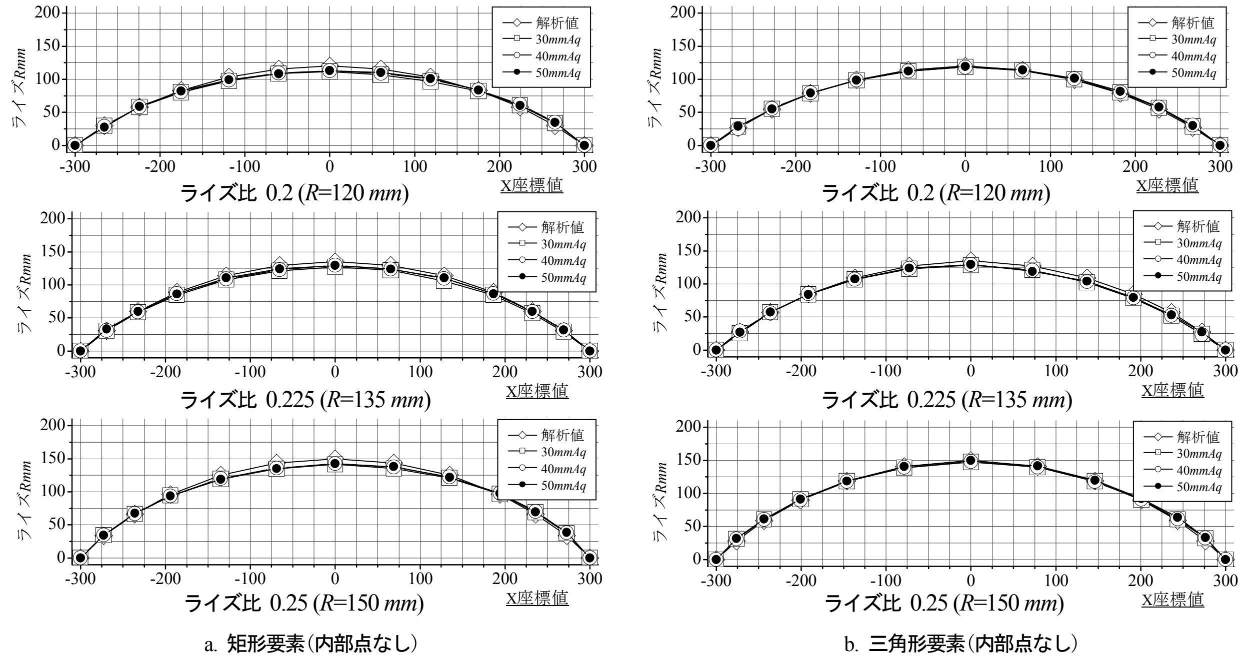
a. 矩形要素（内部点なし）　　b. 三角形要素（内部点なし）

図 10 膜応力状態と最適裁断図（Model-A）



a. 鳥瞰写真　　b. ライズ比 0.2（矩形）　　c. ライズ比 0.25（矩形）　　d. ライズ比 0.2（三角形）

図 11 30*mmAq* 作用時の膜面（Model-A）



a. 矩形要素（内部点なし）　　b. 三角形要素（内部点なし）

図 12 解析値と計測値の比較（Model-A）

枠の平面･立面図を示す。試験体 A は円形鋼板を土台とする。試験体 B はレーザーカッターでカットした木板を土台とする。型枠は膜材を覆うことで閉じた空間を構成する。使用膜材は炭不織布である。裁断した膜材は縫合後、型枠の内径に合わせて接合させる。膜と土台との接合部の詳細は図 8 の通りである。図 9 は試験体加圧システム全体の概略である。空気膜構造では内圧を一定に保つことが重要である。内圧は試験体に取り付けである水位差 *Hmm*（水頭圧 *HmmAq*）の測定で確認する。試験体内にはコンプレッサーの利用により空気を送風し、水頭圧 *HmmAq* を一定に保つ。膜帯間の縫合は、裁断図にのりしろ部を設け、布用テープによる仮止め後、ミシンにより縫合する方法をとる。縫合膜試験体の曲面形成に対する評価方法は次の 3 つの手順により行った。① 触手による検証：触手により膜面張力の確認と緩み･弛み･重なりの確認をする。確認後、境界部における引張力の調整を再度行う。② 光による皺の発生度合の検証：張力場の発生による皺や材の緩み･弛み･重なりによる皺の様子は暗所での試験体に光を当てることで視覚的に確認する。③ 各節点の測値：節点座標の測定はレーザー測定器を用いる。

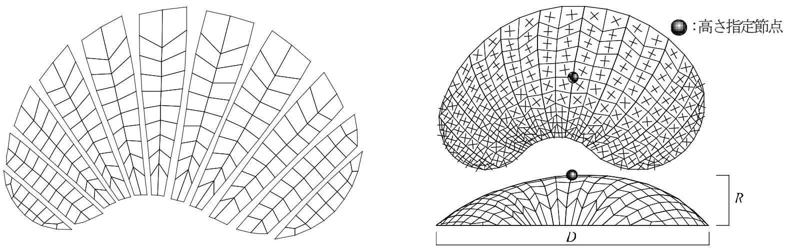
5 MODEL-A と試験体 A の比較

5.1 数値結果

30*mmAq* を基準とした、ライズ比 0.2 の解析に絞り、膜応力状態及び最適裁断図を図 10 に示す。三角形要素は初期要素分割で内部節点を設定すると、要素の潰れが生じて解析不可能に陥る場合がある。矩形要素はすべての初期要素分割に対して、要素の潰れが生じることなく安定した解が得られた。また、矩形要素はより厳しい制約条件に対応でき、三角形要素に比べて等張力に近い曲面形態を得ることが可能である。しかし、矩形要素は端部の要素分割内容により、解析上の内圧処理を工夫しなければならず、注意を要する。

5.2 試験結果と考察

内部点を持たない要素分割モデルに絞り、30 *mmAq* 作用時の膜面を図 11 に、解析値と計測値との比較を図 12 に示す。三角形及び矩形要素の裁断図により曲面を形成させた。30 *mmAq* で解析値と計測値は十分近い値を示した。圧力の増加によっても、境界部に緩み･弛み･重なりは見られない。以上の結果と他のモデルも含め、以上より、矩形要素が空気膜構造の形状･裁断図同時解析において優れていると判断した。

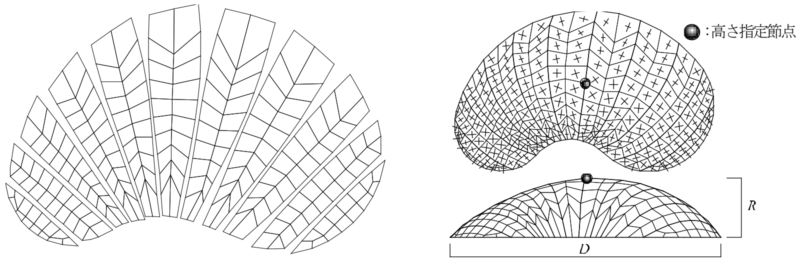


$R/D = 11000 / 65000$　　$2.3 \le t \cdot \sigma_e \le 3.3$ N/mm

図 13 最適裁断図と応力状態（Model-B；Case-1）

表 2 膜主応力状態（Model-B；Case-1）

	最適化後	
	$t\ \sigma_{max}(N/mm)$	$t\ \sigma_{min}(N/mm)$
目標値	$2.3 \le t\ \sigma_{min}$, $t\ \sigma_{max} \le 3.3$	
平均値	3.140	2.737
最大値	3.300	3.285
最小値	2.426	2.300
標準偏差	0.190	0.325

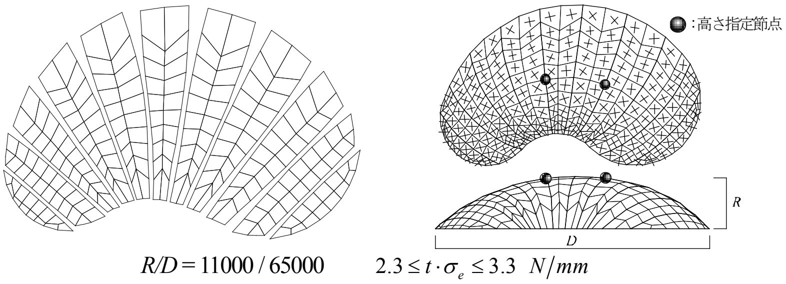


$R/D = 13000 / 65000$　　$1.0 \le t \cdot \sigma_e \le 3.0$ N/mm

図 14 最適裁断図と応力状態（Model-B；Case-2）

表 3 膜主応力状態（Model-B；Case-2）

	最適化後	
	$t\ \sigma_{max}(N/mm)$	$t\ \sigma_{min}(N/mm)$
目標値	$1.0 \le t\ \sigma_{min}$, $t\ \sigma_{max} \le 3.0$	
平均値	2.776	1.976
最大値	3.000	2.976
最小値	1.697	1.000
標準偏差	0.244	0.577



$R/D = 11000 / 65000$　　$2.3 \le t \cdot \sigma_e \le 3.3$ N/mm

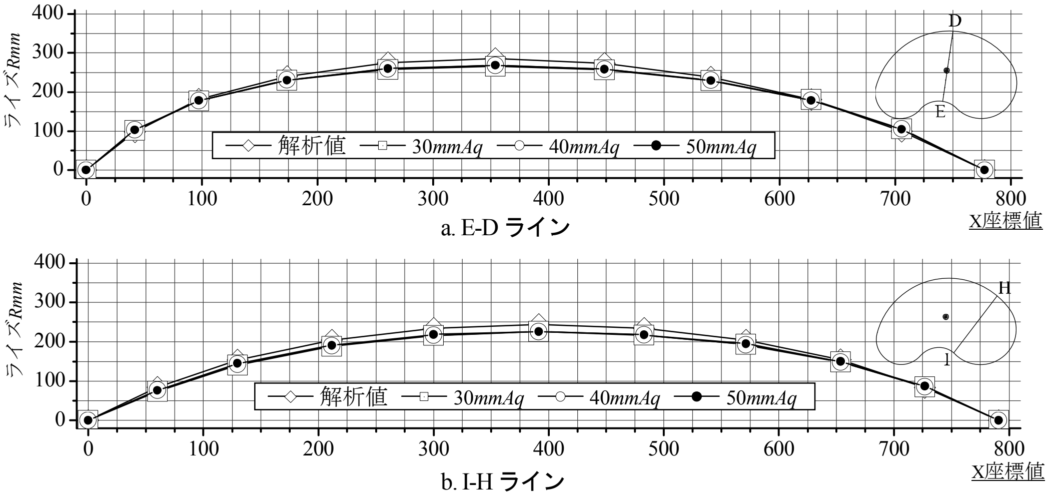
図 15 最適裁断図と応力状態（Model-B；Case-3）

表 4 膜主応力状態（Model-B；Case-3）

	最適化後	
	$t\ \sigma_{max}(N/mm)$	$t\ \sigma_{min}(N/mm)$
目標値	$2.3 \le t\ \sigma_{min}$, $t\ \sigma_{max} \le 3.3$	
平均値	3.076	2.666
最大値	3.300	3.288
最小値	2.302	2.300
標準偏差	0.244	0.302

a. 試験体全容　　b. CEGI 周辺の境界　　c. Y 軸負側より撮影　　d. X 軸正側より撮影

図 16 30*mmAq* 作用時の膜面（Model-B；Case-1）



a. E-D ライン

b. I-H ライン

図 17 解析値と計測値との比較（Model-B；Case-1）

6 MODEL-B と試験体 B の比較

6.1 数値結果

作用内圧 30*mmAq* を基準とし、各目標ライズを指定した解析を行った。膜応力状態及び最適裁断図を図 13 − 15 に示す。表 2 − 4 は膜主応力状態である。任意境界を有する空気膜構造モデルに対し、全ての膜主応力が目標応力を満たし、設定高さを維持した形態を得た。2 節点の高さ指定モデルに対しても収束解が得られ、1 節点の高さ指定した場合と異なる曲面形態を得ている。

6.2 試験結果と考察

30 *mmAq* 作用時の膜面及び解析値と計測値との比較を図 16 − 21 に示す。図 17, 19, 21 の比較対象は安定形態の裁断線高さ位置とし、グラフ右上に比較したラインと高さ指定節点位置を示す。任意境界を有する空気膜構造モデルの裁断図解析結果による試験体に対し、内圧作用後の形態は円形境界空気膜構造モデル同様、緩み･弛み･重なりのない十分滑らかな曲面を形成した。曲率変化が大きな境界周辺部も緩み･弛み･重なりのない曲面形状となる（図 16, 18, 20）。高さ指定をしていない曲面部ラインも、計測値は数値結果とよく一致した（図 17, 19, 21）。圧力の増加によっても、境界部に緩み･弛み･重なりは見られない。なお、任意境界を有する空気膜構造モデルの解析では、SQP 法における応力制約が膜主応力のばらつきをもたらし、それらの膜主応力がバランスよく配置されたため、想定曲面形態が形成されたと考えている。

7 まとめ

本論文では、座標仮定有限要素法を用いた矩形要素により円形境界と任意境界を有する 2 つの空気膜構造モデルを対象に形状･裁断図同時解析を行い、解析結果と試験体との定性的比較検討を行った。三角形と矩形要素の解析結果を比較し、初期要素分割の設定や複雑な曲面形状に対する適応性は矩形要素の方が高いことを確認した。さらに解析結果を用いた全試験体は滑らかな曲面を形成し、計測値は解析結果とよい一致を示した。以上より、座標仮定有限要素法を用いた矩形要素による形状･裁断図同時解析の有効性を定性的に示せたと考えている。

今後は、実際の膜材を用いた大規模な空気膜構造モデルによる定量的な形態確認実験へと展開する予定である。

参考文献

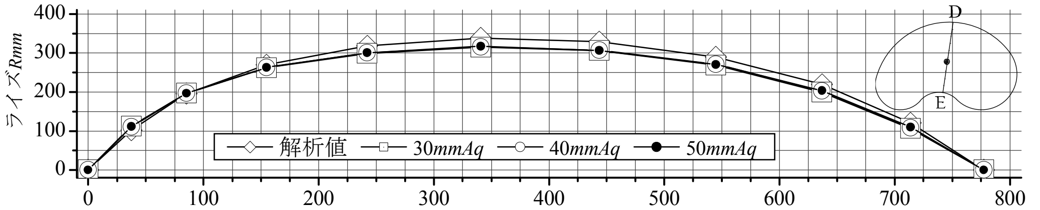
1) 日本建築学会：*空間構造の数値解析ガイドライン*, 丸善, 2001

2) 本間俊雄, 合田雄策, 安宅伸信行：座標値を未知量とした有限要素技術による張力構造の一方法, 日本建築学会構造系論文集, **602**, 161-169, 2006, 4

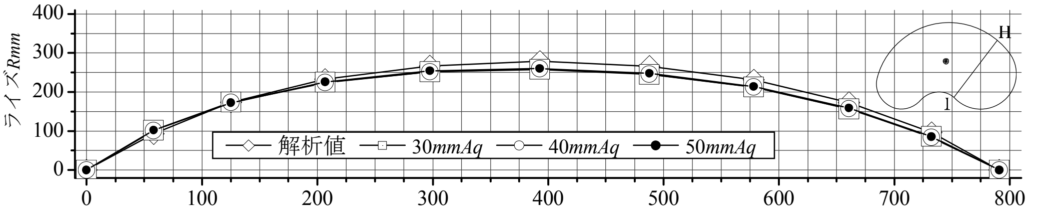
3) 本間俊雄, 福留正樹：膜構造における形状･応力指定の裁断図解析に関する考察及び試験体模型を用いた形態の定性的確認, 日本膜構造協会, 膜構造研究論文集, **24**, 9-16, 2011, 3

a. 試験体全容　　b. CEGI 周辺の境界　　c. Y 軸負側より撮影　　d. X 軸正側より撮影

図 18 30*mmAq* 作用時の膜面（Model-B；Case-2）



a. E-D ライン

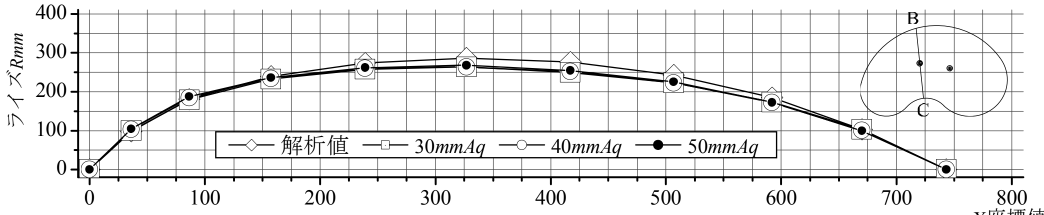


b. I-H ライン

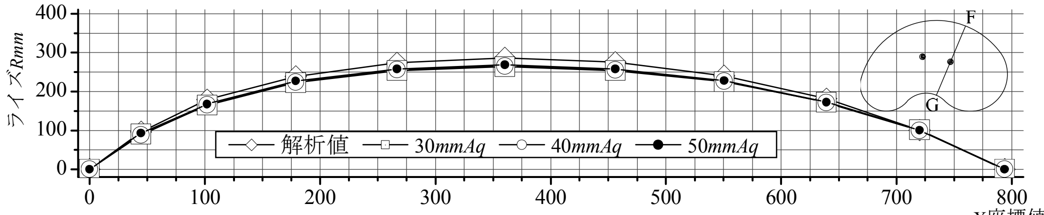
図 19 解析値と計測値との比較（Model-B；Case-2）

a. 試験体全容　　b. CEGI 周辺の境界　　c. Y 軸負側より撮影　　d. X 軸正側より撮影

図 20 30*mmAq* 作用時の膜面（Model-B；Case-3）



a. C-B ライン



b. G-F ライン

図 21 解析値と計測値との比較（Model-B；Case-3）

安定した風紋の形態に基づく構造形態の創生

－　一方向風に基づく場合　－

朝山　秀一[1]，高橋　清紀[2]
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
2) 東京電機大学大学院未来科学研究科建築学専攻，大学院生

1 はじめに

近年では力学的に合理的な新しい構造を求めて、最適化理論を用いた構造形態創生に関する研究が数多く行われ、その流れは、コンピュータで設計の概念や条件を満たす空間を生成するアルゴリズミック・デザインと共に新しい研究領域を構成している。紙面の都合上、多くの事例を挙げることはできないが、大森らの拡張ESO法による曲面構造形態創生[1]、構造形態創生法によるオフィスビルの設計、高田らによるグランドストラクチャ法[2]、新谷らによる構造最適化手法を用いたパヴィリオンの設計、本間らによる生物的アプローチを用いた空間構造の形態発想支援システムの開発などを始めとして、極めて多くの研究が行われている。これらの研究では、最適化計算を始める初期の形態に、球やベジェ曲面などユークリッド幾何学図形が用いられているが、自然界の形態を採用して合理的な構造を探求した例は、殆どない。これは、自然界の形態システムでは、変化や成長の過程から形成される形態が必ずしも力学的合理性を最優先しているとは限らないことに関係すると考えられる。

こうした研究の背景を踏まえた上で、筆者らは、自然界の形態に存在する何らかの合理性を建築構造に利用することを目標にして、風に対して砂が風紋を形成することで形を安定させることに着目した[3)4)]。ここでは、風に強い空間構造を開発することを目指して、その第一歩として、一方向風に対する風紋の安定性を調べ、その中から代表的な風紋のパターンを抽出して、鉛直荷重に対する力学的性質を検討した。

2 風紋の形成理論の概要

2-1 跳躍運動(saltation)

既に、参照した西森らの風紋の形成理論については述べているので[3)4)5)]ここではその概要を記す。風紋を形成する砂の運動は、跳躍運動(saltation)と転がり運動(creep)に分けることができるとされている[3)4)]。跳躍運動では、図1のように風により高さに比例した飛距離Lを一定量qの砂が飛ぶとしている[4)5)]。計算の1ステップに跳躍と転がり運動が含まれるので、計算のnと(n + 1)ステップの間において、跳躍が終了した時間ステップをn'とすれば、位置P(x,y)における跳躍後の高さHn' (x,y)は、ステップnにおける高さHn (x,y)を用いて、以下のように示される。

$$Hn'(x,y) = Hn(x,y) - q \quad \cdots\cdots\cdots (1)$$

$$Hn'(x + L(Hn(x,y)), y)$$
$$= Hn(x + L(Hn(x,y)), y) + q \quad \cdots\cdots\cdots (2),$$

$$L = L_0 + b\,Hn(x,y) \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

但し、

q：跳躍する砂の量、L_0：高さ0における砂の飛距離、

b：飛距離のパラメータ

である。

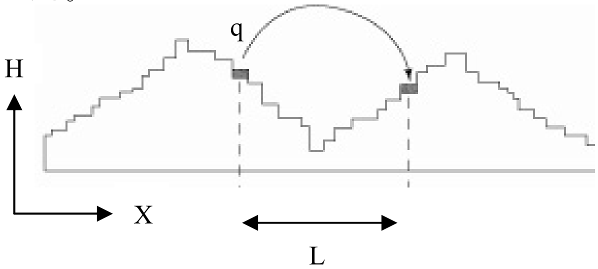


図1　跳躍運動

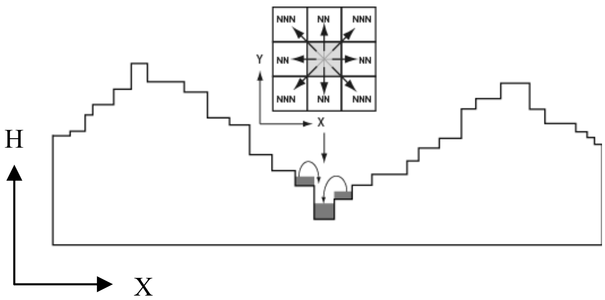


図2　転がり運動

2-2 転がり運動(creep)

転がり運動は、図2のように跳躍運動が起こった後に砂が転がり移動する現象で、次式のようにH(x,y)の各点P(x,y)における砂を、上下左右方向で2、斜め方向で1の重みを付けて等方的に分散させることで表わしている。

$$Hn+1(x,y) = Hn'(x,y) + D[1/6\sum_{NN} Hn'(x,y)$$
$$+ 1/12\sum_{NNN} Hn'(x,y) - Hn'(x,y)] \quad \cdots\cdots\cdots (4)$$

ここで、D は拡散係数、NN は P(x,y)に縦横に隣接した点、NNN は斜めに隣接した点を表す。この二つの計算をハイトフィールド全体について繰り返し適用することで風紋の動きの時間変化をシミュレーションしている。

2-3 境界条件

縦横 m×n 個の正方形メッシュから構成される 1 つのハイトフィールドに対して、同様なハイトフィールドな左右上下に連続的に存在すると仮定している。すなわち、あるメッシュから飛んだ砂がそのハイトフィールドの範囲を越えて隣のハイトフィールドに達した場合は、その飛砂量 q は失われるが、そのハイトフールドにおいて、隣のハイトフールにおける着地点に対応するメッシュに同様な砂が風上から飛来することを仮定している。この仮定により、ハイトフィールド内の砂の総量は保持されている。

3 風紋の安定性

風紋形成理論に基づく空間構造の形態創生システムを用い、一方向に風が吹く場合の空間構造モデルを、拡散係数 D と高さ 0 における砂の飛散距離 L_0をパラメータとして生成した。その他の風紋のパラメータは、文献に基づき [4]、q=0.6、b=2.0 とし、節点数は 31×31、メッシュ長さは 1m×1m、初期の砂の高さ 5m とした。

始めに、シミュレーションにより形成される風紋の安定性を調べるため、繰返し回数 n を 50、100、150、200、500、1000、2000、3000、4000、5000、6000、10000、20000、30000 と変化させて、風紋の形態モデルを生成した。図 3 は、D＝1.5、L_0＝5.0 とした場合の結果を図に示したもので、繰返し回数 n =50 以上で、風向と直交する方向に直線的な縞が形成されている。n=2000 以上では、縞がやや薄くなる傾向を示すが、形状は類似している。紙面上、図は割愛するが、図 3 同様の一覧を作成すると、L_0値が小さく D 値が大きいほど、風紋の形状は、繰返し回数 (n=50～n=30000)に対して、安定し、縞の形状にはあまり変化しない傾向を示した。図 4 は、D=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、L_0＝5.0、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0 の組合せに対し、同様にシミュレーションを繰返し、形態が安定した最小

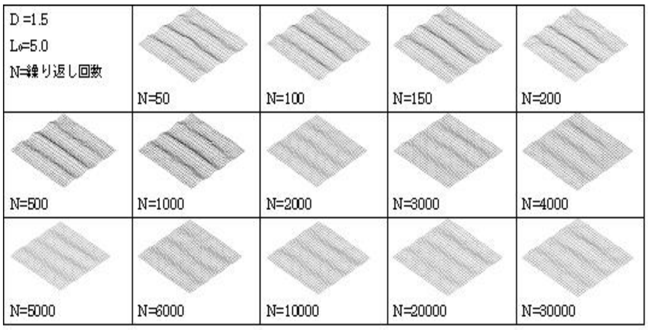


図 3 一方向風に対する風紋の形態変化 (D=1.5、L_0=5.0)

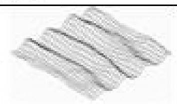
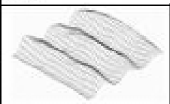
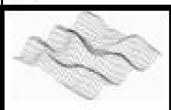
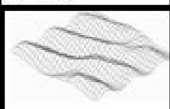
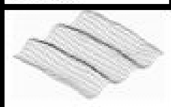
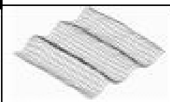
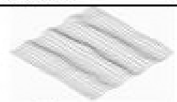
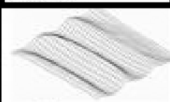
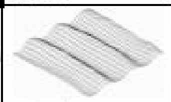
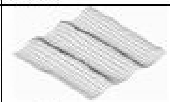
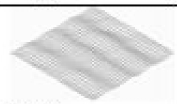
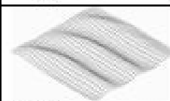
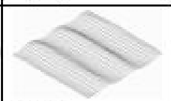
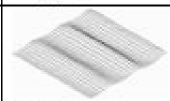
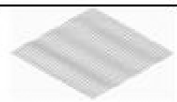
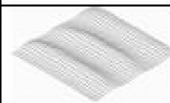
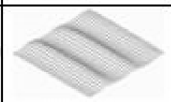
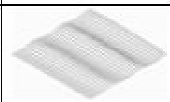
D＼L_0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
0.5	 ○(50)	 ○(150)	 ○(150)	△	△	△
1.0	 ○(150)	 ○(100)	 ○(50)	 ○(50)	△	△
1.5	 ○(50)	 ○(50)	 ○(50)	 ○(50)	△	△
2.0	 ○(50)	 ○(50)	 ○(50)	 ○(50)	×	×
2.5	 ○(50)	 ○(100)	 ○(50)	 ○(50)	 ○(5000)	×

図 4 安定した風紋のパターン

表1　D値、L_0値の組合せに対する初期の最高高さ

D＼L_0	5.0	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
0.5	2.899m	4.002m	5.610m	△	△	△
1.0	3.137m	3.715m	3.608m	3.635m	△	△
1.5	1.447m	2.656m	2.925m	2.571m	△	△
2.0	0.728m	2.111m	1.680m	1.688m	×	×
2.5	0.601m	1.710m	1.594m	1.151m	1.018m	×

のnの値に対応するモデルを示したものである。図の△印は、風紋の形状が生成できるものの、その形態は繰返し数nに対して安定しないことを示している。×印は、風紋が形成されなかったものを示している。安定したモデルの大半において、y方向に直線的な縞が2〜3本形成されている。係数Dが大きくなるにつれて、縞の高低差が小さくなった。表1は、縞の最高高さを、風紋のパラメータに対して示したもので、D=2.5、L_0＝5.0で最小となり、図4と同様な結果を示している。一方、D=0.5、L_0=6.5とD=1.0、L_0＝6.0のモデル(図中太線枠)では、それぞれ、縞の高さに変化が見られ、特に後者では、風向に対して直交せず、斜めの縞が形成された。

4 解析モデルの概要

ここでは、風紋の形態が安定したモデル(図4)から、特徴的なパターン(D=1.0・L_0＝6.0、D=0.5・L_0＝6.5、図4太枠)を選び、風向と直交する方向に直線的な縞が形成されるモデルと比較する。全20ケースの中では、D=2.5、L_0＝6.0のモデルが鉛直変位と応力において最も性能が良い結果となったので、これと上述の2例を比較する。風紋のシミュレーションから直接得られる3次元フレームを初期モデルとし、高さ方向の倍率を0.3ずつ増加させて15回繰返し3次元骨組構造解析プログラム（Multi Frame）をwindowsのCOMの機能を用いて呼び出し、鉛直荷重に対して解析を行うことにより、初期形態の縞のパターンを変えない範囲で、構造体としての最適形態を探査した。次頁の図6はその計算フローで、風紋の各種パラメータ、風紋のメッシュ長さとxy方向の節点数、梁に設ける節点の数、積載荷重、鋼材のF値、風紋の計算における繰返し数、構造体の高さを変化させる回数とその倍率などを指定して、計算を開始する。図6の①は、初期モデルの解析部分で、②は構造体の高さと部材断面を変更して局所的な最適形態を探査する部分である。

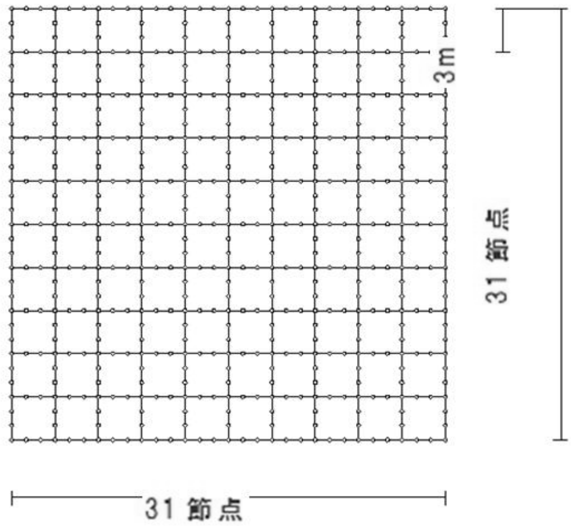


図5　30m×30m フレームモデル

今回の解析では、前章で示した一方向風による風紋の形態を用い、30m×30mの平面モデルを想定した。支点の拘束は、長手2方ピン支持・4方向ピン支持の条件の下、解析を行った。なお、風紋の解析モデルでは、滑らかな形状を得るために1mのメッシュを用いているが、フレームモデルでは3mメッシュとし、梁の中間2点に節点を設けて風紋のモデルと同じ屋根形態となるように工夫した(図5)。荷重は自重及び1kN/m^2の積載荷重とし、積載荷重は、フレームの支配面積に応じて節点に加わるようにプログラムを作成している。部材は初期モデルで、円形パイプ　φ300×30を使用している。各モデルにおいて、鋼材の量が一定となるように、高さ倍率を大きくするほど、使用する鋼管の径と厚さを小さくしている。なお、鋼材はSN400を用い、ヤング係数は205kN/mm²、せん断弾性率は80.8kN/mm^2、ポアソン比は0.3とした。

5 解析結果と考察

はじめに、鉛直変位と応力において最も性能が良い結

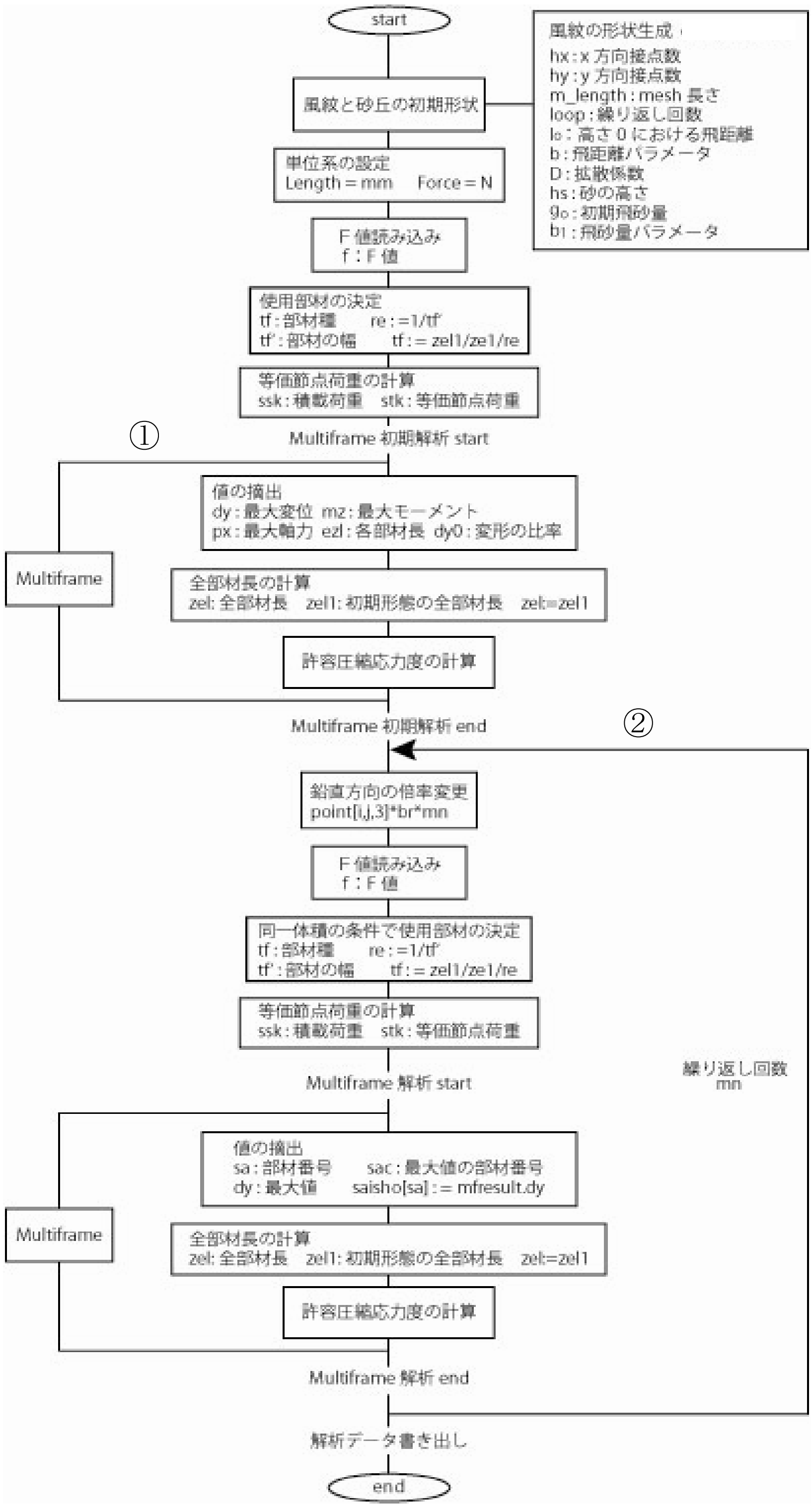


図 6　計算のフロー

果となった D=2.5、L_0=6.0 の構造モデルについて、支点を 2 方向拘束した解析の結果について述べる。風紋の生成理論に基づく初期形状の最高高さは 1.71 m である。図 6 は長手方向の軸組図で、表 2 は、x 方向風による風による風紋に基づく構造の各種解析データを初期形態の倍率に対して示したものである。初期形態を 2.2 倍したモデルで最大組合せ応力比(表中の最大比)が最小かつ、最大変形比が許容値の範囲となった。これをこの形状の最適な倍率として抽出した。最大モーメントは 14.95t・m、最大せん断力は 182.10kN、最大軸力は 900.01kN、最

表２　ｘ方向風によるD=2.5、L0＝6.0の風紋に基づく構造モデルの各種解析データ

倍率	最大変位 dy	最大モーメント mz	最大軸力 px	最大応力度 sgmmx	最大比 csgmx	最大変形比 dy0	各部材長 ezl	全部材長	部材種	最高高さスパン比
1	−13.7161	15.85004	2001992	146.3931	0.936433	1.371608	1001.916	675.784	300x30	0.057
1.3	−11.3177	15.43244	1514694	135.6661	0.867603	1.131768	1131.039	685.9933	299.5x295	0.0741
1.6	−9.91535	15.17521	1213275	129.9945	0.831211	0.991535	1048.258	698.231	299x29	0.0912
1.9	−9.00986	15.03107	1025642	127.1395	0.812886	0.900986	1247.593	712.2194	298.5x285	0.1083
2.2	−8.39156	14.95205	900074.3	125.9207	0.805058	0.839156	1162.293	727.7117	298x28	0.1254
2.5	−8.01631	14.74429	793246.6	126.4927	0.808707	0.801631	1180.096	744.496	297x27	0.1425
2.8	−7.70642	14.71154	740203.6	126.9097	0.811381	0.770642	1411.029	762.3933	296.5x265	0.1596
3.1	−7.48839	14.68381	696693.2	127.7471	0.81676	0.748839	1069.052	781.2538	296x26	0.1767
3.4	−7.33946	14.65544	665552.9	128.8761	0.824016	0.733946	1728.741	800.9522	295.5x255	0.1938
3.7	−7.3043	14.44776	630067.5	131.1307	0.838485	0.73043	1017.706	821.3838	294.5x245	0.2109
4	−7.25234	14.40685	604361.3	132.6601	0.848326	0.725234	2359.255	842.4608	294x24	0.228
4.3	−7.23529	14.35963	580502.5	134.3194	0.85901	0.723529	1002.361	864.109	293.5x235	0.2451
4.6	−7.24717	14.30565	558232.2	136.0865	0.870394	0.724717	1347.964	886.2654	293x23	0.2622
4.9	−7.28346	14.24471	538388.5	137.9467	0.882697	0.728346	1016.78	908.8766	292.5x225	0.2793
5.2	−7.41142	13.98422	513983.4	141.0307	0.903202	0.74142	1006.92	931.8964	291.5x21.5	0.2964
5.5	−7.48965	13.90582	497320.2	143.0988	0.917241	0.748965	1014.472	955.2852	291x21	0.3135

大変位は8.39cmとなった。図7はそのモデルの曲げ応力図、せん断応力図、軸力図および変形図で、最大値の値と位置を○印で示している。最大モーメント、最大せん断力は間口から離れた場所で得られ、最大軸力、変形図は間口付近で得られた。図8は、このモデルにおける最大応力比と最大変形比のグラフである。支点は、長手2方向ピン拘束、全周囲4方向ピン拘束の条件で解析している。最大応力比（許容応力度に対する最大応力度の比）、最大変形比（許容変形量に対する最大変形の比率）を間口に対する最高高さの比（以後最高高さスパン比と呼ぶ）に対して表示した。なお、許容変形量とは短手方向のスパンの1/300とした。長手2方向モデル（図中△、□印）の場合、x方向風による風紋のモデルにおける最高高さスパン比が9%～31%付近で、最大応力比と最大変形比の許容値を満たした。最大応力比が最小になるモデルの最高高さスパン比は12.5%、最大応力比が最小になるそれは80.5%、最大変形比が最小になるそれは83.9%となった。

次に、D=1.0、L_0＝6.0の構造モデルについて、支点を2方向拘束した解析の結果について述べる。風紋の生成理論に基づく初期形態状の最高高さは3.72mである。表3は、同様な構造に関する各種解析データである。初期形状を1.0倍したモデルでは、最大応力比と最大変形比は許容値の範囲外で、部材断面を増す以外に方法がないことが分かる。この架構の最大モーメントは、32.30t･m、最大せん断力は303.54kN、最大軸力は1159.18kN、最大変位は20.29cmとなった。図9はそのモデルの曲げ応力図、せん断応力図、軸力図および変形図で、最大値の値と位置を示している。最大軸力は間口から離れた場所で得られ、最大モーメント、最大せん断力、変形図は間口付近で得られた。最大応力比が最小値1.52になるモデル

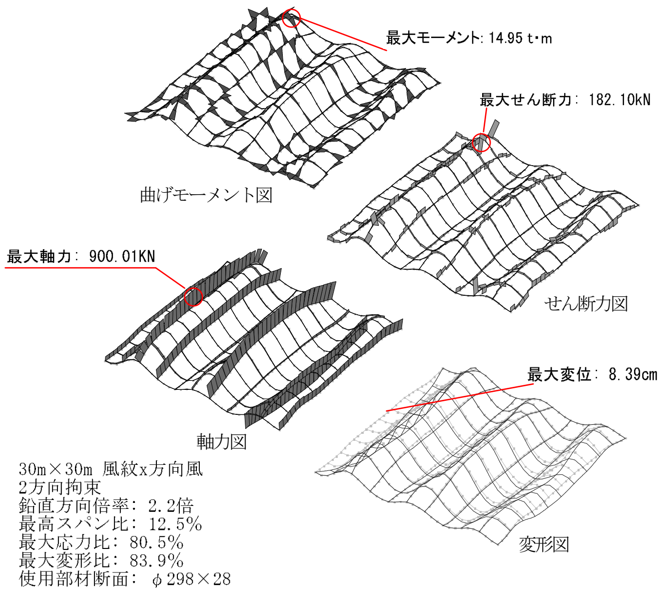


図７　ｘ方向風による風紋に基づく構造モデルの応力・変形

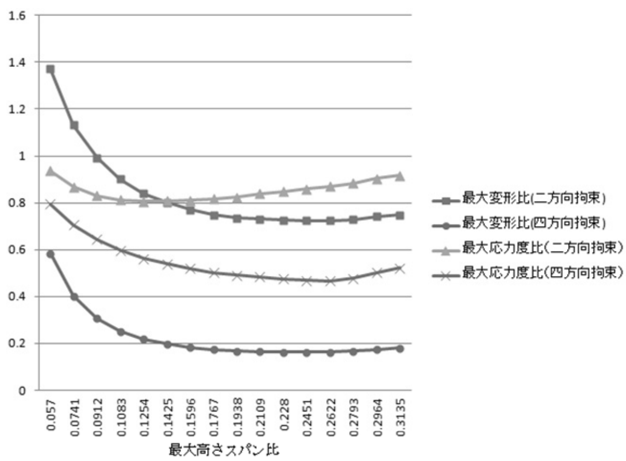


図８　最大応力比及び最大変形比と最大高さスパン比

の最高高さスパン比は 12.4%、最大変形比が最小値 1.81 になるそれは 19.8%となった。

さらに、D=0.5、L_0＝6.5 の構造モデルについて、支点を 2 方向拘束した解析の結果について述べる。風紋の生成理論に基づく初期形状の最高高さは 5.61m である。表 4 は、同様な構造の各種解析データである。初期形態を 1.0 倍したモデルでは､最大応力比が最小値 1.40 となり、最大変形比同様、許容値の範囲外となった。最大モーメントは 32.86t・m、最大せん断力は 281.87kN、最大軸力は 873.60kN、最大変位は 10.87cm となった。変形図は間口から離れた場所で得られ、最大モーメント、最大せん断力、最大軸力は間口付近で得られた。最大応力比が最小値 1.40 になるモデルの最高高さスパン比は 18.7%、最大応力比が最小値 1.05 になるそれは 24.3%となった。

6.結論

1) 一方向風を受けて生成される風紋の数値シミュレーションでは、拡散係数 D=0.5～2.5、高さ 0m における砂の飛散距離 L_0＝5.0～8.0 に対して、繰返し回数 n=50 回で、ある程度安定した形態を見出すことができた。
2) 風紋の形態は、上記パラメータの範囲で特徴的な 3 つのパターンとなったが、風向に直交する単純な縞から生成した構造体が、最も合理的で、本論文の鉛直荷重に対して、φ300×30 の鋼材で対応することができた。

謝辞：本研究を始めるに際し、ご教示を賜った広島大学西森拓教授に深く感謝申し上げます。

参考文献

1) 梶田 哲嗣 , 石川 敬一 , 大森 博司 : 拡張 ESO 法による曲面構造形態の創生 その 1 理論と計算例,日本建築学会学術講演梗概集. B-1,構造 I, pp.697-698, 2006 年
2) 藤井 大地 , 真鍋 匡利 , 高田 豊文:グランドストラクチャー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 73(633),2008 年 11 月
3) 尾上 耕一 , 西田 友是 : 風紋・砂丘を含む砂漠景観の表示法,電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理 J86-D-II(2), pp.282-289, 2003
4) Hiraku Nishimori,Noriyuki Ouchi:Formation of Ripple Patterns and Dunes by Wind-Blown Sand,PHYSICAL REVIEW LETTERS,pp.197-201,july 1993
5) 朝山秀一，橋本夏季：風紋と砂丘の形成理論に基づく構造体の生成システムの概要　その 1、その 2、その 3，2011 年度日本建築学会大会学術講演梗概集，情報システム技術，pp.459-464,

表 3　構造モデルの各種解析データ (D=1.0、L_0＝6.0)

倍率	最大変位 dy	最大モーメント mz	最大軸力 px	最大応力度 sgmmx	最大比 csgmx	最大変形比 dy0	部材種	最高高さスパン比
1	−20.2885	32.29914	1159177	237.7214	1.519426	2.028852	300x30	0.123833
1.3	−18.5669	34.02644	920263.4	252.4282	1.613117	1.85669	298x28	0.160983
1.6	−18.1604	34.73704	804051	268.6661	1.716712	1.816039	296x26	0.198133
1.9	−18.3637	35.19426	737593.4	284.909	1.820405	1.836372	294.5x24.5	0.235283

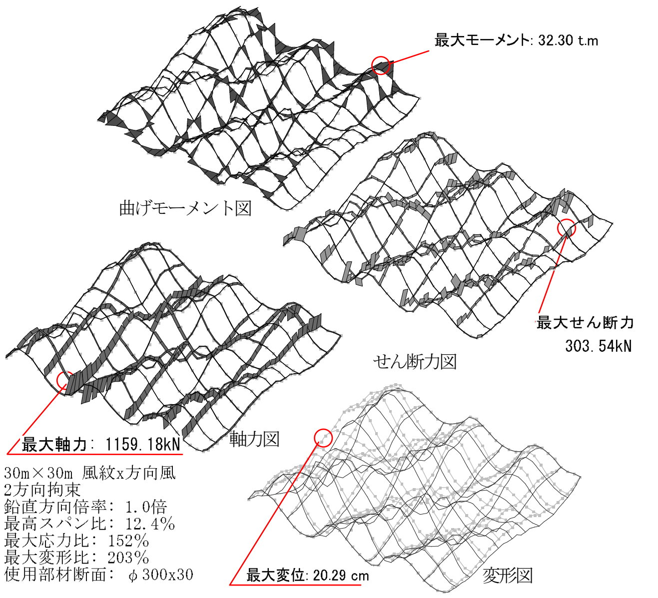


図 8　x 方向風に基づく風紋の構造モデルの応力・変形

表 3　構造モデルの各種解析データ (D=0.5、L_0＝6.5)

倍率	最大変位 dy	最大モーメント mz	最大軸力 px	最大応力度 sgmmx	最大比 csgmx	最大変形比 dy0	部材種	最高高さスパン比
1	−10.866	32.85804	873595.4	219.5896	1.402404	1.086597	300x30	0.187
1.3	−10.4859	32.92279	726103.6	234.2763	1.496094	1.048589	297.5x27.5	0.2431
1.6	−10.7803	32.85862	630942.9	247.7697	1.582183	1.078029	295.5x25.5	0.2992
1.9	−11.5204	32.51377	554774.1	262.2949	1.674869	1.152041	293.5x23.5	0.3553

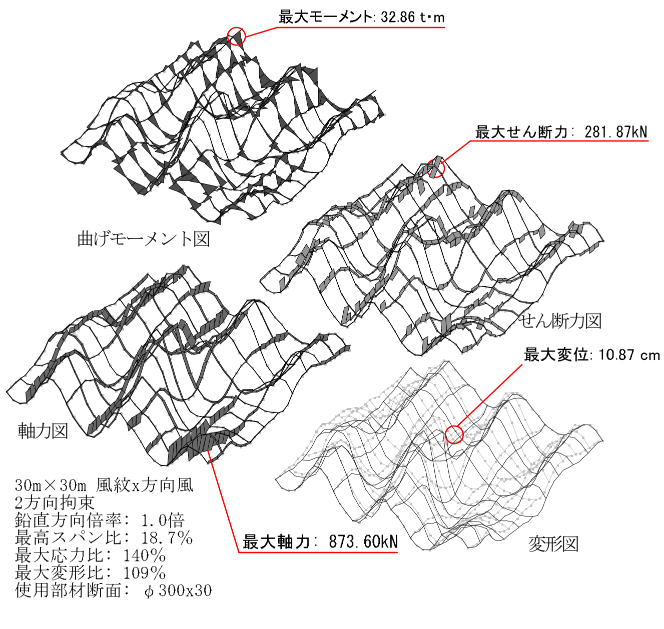


図 9　x 方向風に基づく風紋の構造モデルの応力・変形

「1.5 層スペースフレーム」と「立体組合せパネル」に関する基礎研究

陳　沛山[1)]
1) 八戸工業大学大学院工学研究科 教授 工博，chen@hi-tech.ac.jp

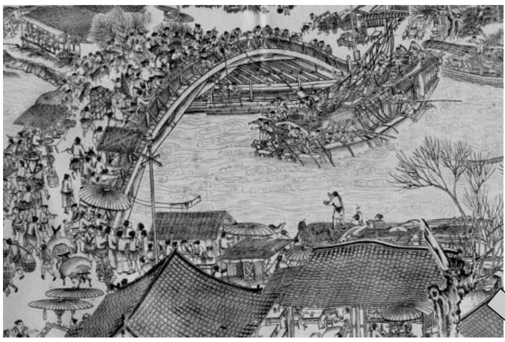
1 はじめに

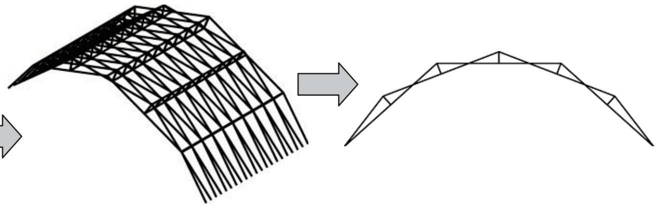
計算機を利用した形態創生手法が大いに研究されている現在において，歴史文化や人間のアイディアそして設計者の意志と感情を尊重し，力学美と構造美を追求する精神を忘れてはならない．また，古代建築物には優れたアイディアが隠れており，現代構造設計にとってその素晴らしいアイディアは新しい技術になる可能性もある．このような考え方に基づいて，筆者は中国の国宝「清明上河図」に描かれている虹橋の構造原理の現代構造設計への応用についての研究を行っている[1-4]．

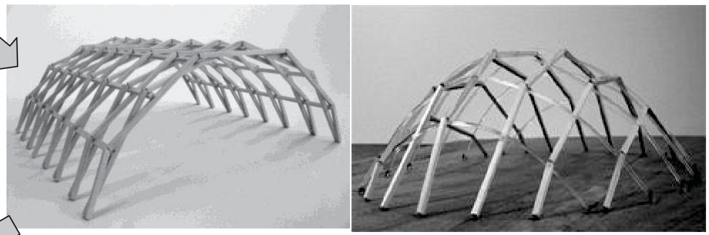
虹橋とは，中国北宋時代(A.D.960-1127)の都の開封(現在の中国河南省開封市)に造られたアーチ状の木造橋である．元朝の至元 27 年(A.D.1290)頃に起きた黄河の洪水の被害により虹橋が崩壊したため,「清明上河図」という画巻でしかこの橋の美しい姿を見ることができない．

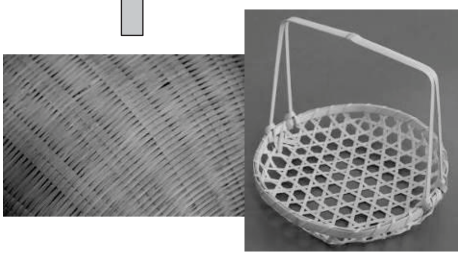
図 1(b)に示す力学解析モデルは虹橋の力学特性を分析するために用いられたものであり，筆者はその形状からスペースフレームを連想した．また，虹橋の構造原理を現代空間構造に応用する方法として，図 1(c)に示すLap-Beam システムを提案した．Lap-Beam の組み方は調理用具の笊や籠に類似しているため，宋代虹橋の構造原理は笊や籠からの発想であると推測できる[1-4]．そこで，図 1(d)のような籠の材芯線を参考して，図(e)のような立体構造物を構成し，その上に上弦材を加えてできたスペースフレーム（図(f)）は本研究で提案する「1.5 層スペースフレーム」の原型となる．その幾何学的特徴は，節点を２層の平面あるいは曲面に分布させ，節点の間は棒状部材でつなぎ，うちの１層においては節点同志を繋ぐ部材が存在しないことである．

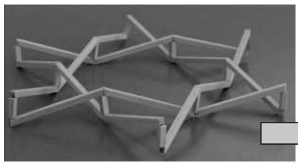
複層スペースフレームと比べて, 1.5 層スペースフレームは部材数が少なく，軽量的であり，生産性と経済性が期待できる．単層スペースフレームと比べて，1.5 層スペースフレームは斜材により架構面を補強することができ，低ライズ曲面や大スパン平面スペースフレームを実現で


(a)「清明上河図」に描かれている虹橋


(b) 虹橋力学解析モデル


(c) Lap-Beam 円筒と Lap-Beam ドーム


(d) 笊や籠より虹橋の構造原理を発想したの可能性


(e) 籠の材芯線を表現する構造

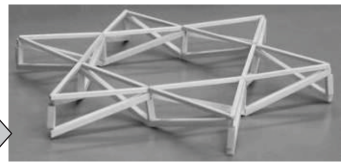
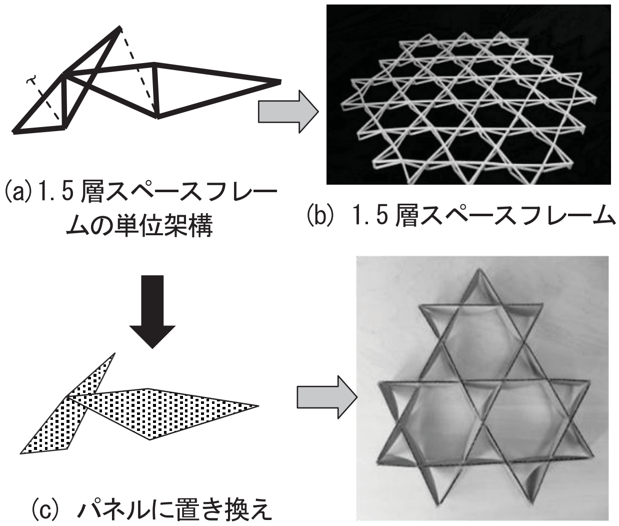

(f) 1.5 層スペースフレーム

図１ 1.5 層スペースフレームの発見

きる[4-6]．後述のように，1.5 層スペースフレームの形態デザインの自由性が優れているため，複層や単層スペースフレームでは実現困難な形態を構成できる．

さらに，図 2 のように，1.5 層スペースフレームの単位架構の平面部分をパネルに置き換えると，パネルの組合せによって構成された構造システムを創出でき，本研究ではこれを「立体組合せパネル」と称する[7,8]．



(a) 1.5 層スペースフレームの単位架構

(b) 1.5 層スペースフレーム

(c) パネルに置き換え

(d) 立体組合せパネル

図 2　立体組合せパネル成り立ち

立体組合せパネルは，他の構造システムと比べて部材の数が少なく，生産性や経済性が期待できる．また，後述のように，部材配置が自由であるため，多様なデザインに対応できる．

本論では, 1.5 層スペースフレーム及び立体組合せパネルについての初期段階の研究成果を報告し，その幾何学特徴，類似研究についての調査研究を報告する．また，これらの構造の幾何学構成のシステム化，デザインの多様性を検証する．

2 1.5 層スペースフレーム

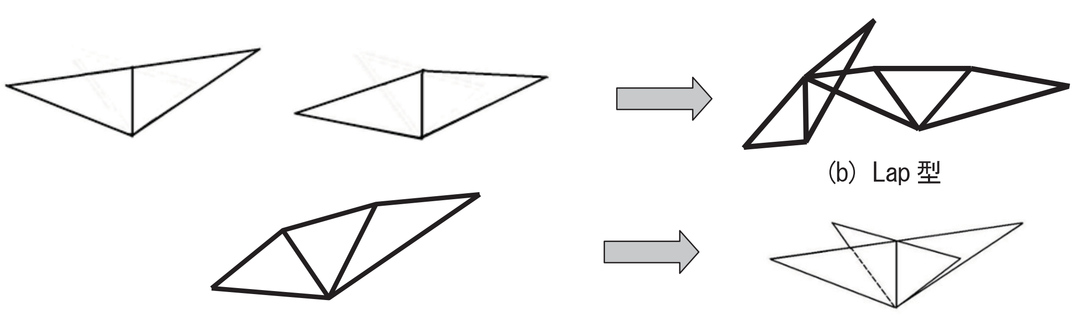
2.1　構成のシステム化

「節点を２層の平面あるいは曲面に分布させ，節点の間は棒状部材でつなぎ，うちの１層においては節点同志を繋ぐ部材が存在しない」という原則で，様々な組み方が存在すると考えられる．これらの組み方を分析して構造体の構成方法をシステム化することについての研究を行っており, ここにその初期段階の研究成果を報告する．

1.5 層スペースフレームは, 三角形からなる単純な単位架構で構成されている．図 3 に示すように，単位架構より「Lap 型」と「交差型」の 2 種類のユニットを構成することができる．Lap 型とは，図 3(b)のように単位架構の 1 つの端部節点を他の単位架構の上部節点と接合させることである．交差型とは，図 3(c)のように中央の束材を共用することである．これらのユニットを一定の法則で組み立てることによって，大規模 1.5 層スペースフレームを構成できる．

Lap 型で構成された大曲率の 1.5 層スペースフレームでは，ユニットの下端は水平方向に変形する可能性がある（図 4(b)）. 図 5 のように補助材を設けてユニット下端を拘束することが可能であるが，この方法では構造のデザイン性が悪くなる．よって，接合部の工夫によってユニットの変位を拘束し，原則として補助材を導入しないことを考えている．これゆえ，Lap 型は平面や緩やかな傾斜構造物に適用できると考えている．Lap 型の類似構造物として，2008 年に竣工されたフランスの Bibracte 考古博物館が挙げられ（図 6）[9,10]，Lap 型ユニットは勾配緩やかな空間構造に適用できることを証明できる．

交差型ユニットの下部中央節点は四方向で支えられるので，安定性を高めている．よって，交差型ユニットにより構成された 1.5 層スペースフレームは平面及び大曲率の持つ曲面構造にも適用できる（図 8,9）.

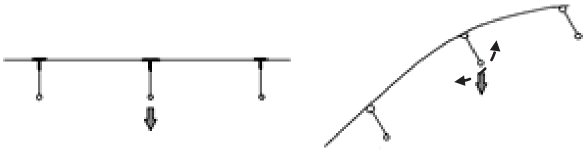


(a) 単位架構

(b) Lap 型

(c) 交差型

図 3 1.5 層スペースフレームの組み方



(a) 鉛直設置　　(b) 斜め設置

図 4　Lap 型ユニット設置の断面イメージ

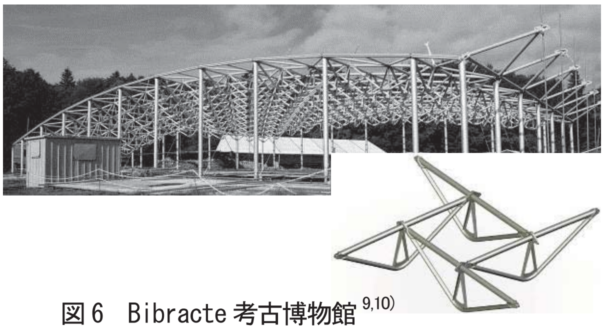
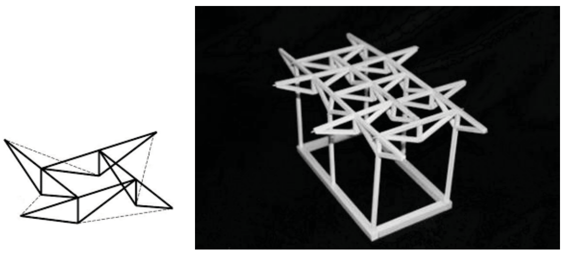


図 6　Bibracte 考古博物館[9,10)]

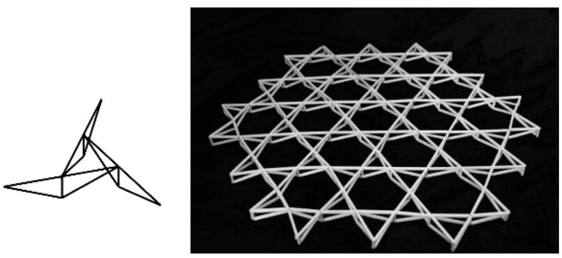
2.2　自由形態の可能性

1.5 層スペースフレームは平面や曲面, 多様なグリッド, 多彩な形態デザインに適用できる．ここに，幾つかのデザイン例を紹介し，そのデザインの自由性を紹介する．

まず，図 7 には四角形グリッド，三角形六角形グリッドの平面 1.5 層スペースフレームを示している. 図 8 と 9 は，交差型ユニットにより構成された円筒形及びドーム型の 1.5 層スペースフレームを示している．



(a)　四角形グリッド



(b) 三角形六角形グリッド

図 7　平面形状の 1.5 層スペースフレ

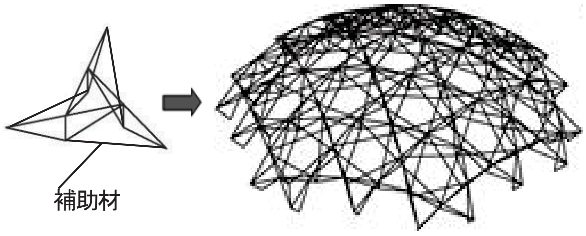


図 5　補助材を利用した場合の 1.5 層スペースフレーム

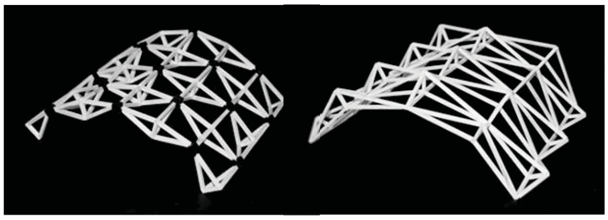


図 8　円筒形 1.5 層スペースフレーム

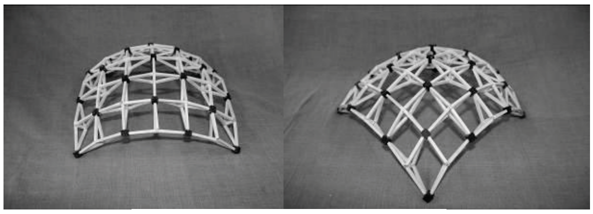


図 9　ドーム型モデル

図 10 には，直交グリッド（正方向配置）双曲放物面 1.5 層スペースフレームを示し, この構造体は交差型ユニットで構成されたものである．

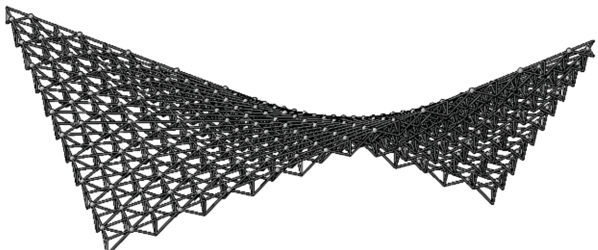
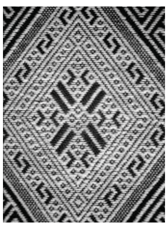
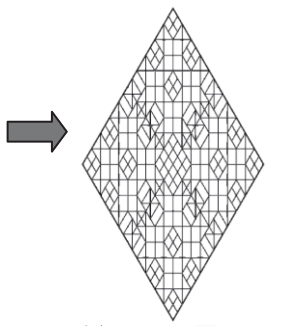


図 10　双曲放物面モデル

さらに，図 11 と 12 に示すように，青森県津軽地方に古くから伝わるこぎん刺しの図案を 1.5 層スペースフレームのグリッドで表現できる．



(a)　こぎん刺し



(b)　1.5 層スペースフレーム

図 11　こぎんしを表現する 1.5 層スペースフレーム

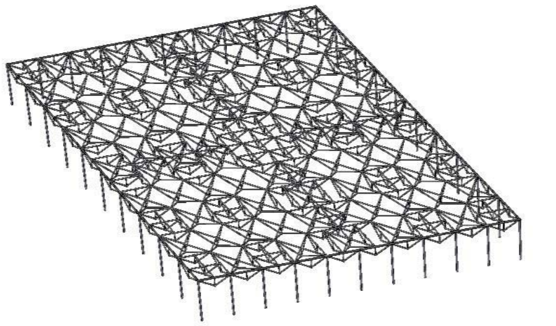
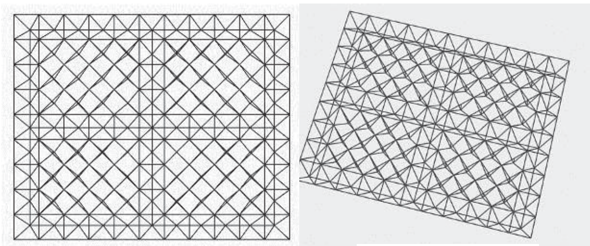


図 12　こぎん刺しグリッド取り入れた屋根

図 13 のように, 複層スペースフレームを大スパンのガーダーとして大規模格子を構築して，その間に 1.5 層スペースフレームをスラブのように充填することができる. 1.5 層スペースフレームを用いることによって, 構造全体の軽量化が実現できる.



(a)　平面図　　(b)　3D-CG

図 13　1.5 層と複層の併用

1.5 層スペースフレームは中国の窓や戸などに用いられる伝統格子のようなランダムグリッドをも表現できる（図 14）. このような複雑なグリッドは複層スペースフレームでは実現困難である.

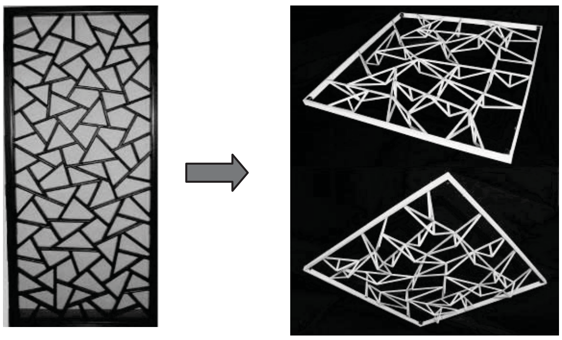


図 14　中国の窓格子を表現するランダムグリッド

3　立体組合せパネル

3.1　立体組合せパネルのシステム化

前述のように，1.5 層スペースフレームの単位架構は平面トラスのような架構である．図 2 のように，これらの単位架構を平面パネルに置き換えると,「立体組合せパネル」を得ることができる．このように，パネルを基本構成要素として，構造体の組み方のシステム化についての研究を行っており，ここに，その初期段階の研究成果を報告する.

現段階で提案された基本的な組み方は,「Lap 型」と「交差型」の 2 種類がある．Lap 型組合せ方法とは，一つの平面パネルの端部節点と他のパネル辺の中央とを接合することによってユニットを構成し，これらのユニットを複数組合せて立体組合せパネルを組み立てる（図 15）. 交差型組合せとは，2 枚のパネルが交わり，図 16(a)のようなユニットを構成し，これらのユニットを組合せることによって立体組合せパネルを組み立てる.

Lap 型組合せでは，接合部の工夫によってパネルの自転を止めることが必要であるが，これについての研究を行っている. 交差型ユニットは Lap 型ユニットと違って, パネルの回転は生じないので，ユニット同士の接合はピン接合にすることができる.

3.2　多彩なデザインの可能性

立体組合せパネルはデザイン性が優れているため, 様々なグリッドを用いて多彩な形態デザインが可能である．図 15 と 16 では，四角形，三角形・六角形グリッドで構成された立体組合せパネルを示している．図 17 は, 青森県津軽地方に伝わるこぎん刺しのデザインを表現したものである. 図 18 に示すように，中国の伝統的な窓格子のようなランダムグリッドを用いて立体組合せパネルをデザインすることが可能である.

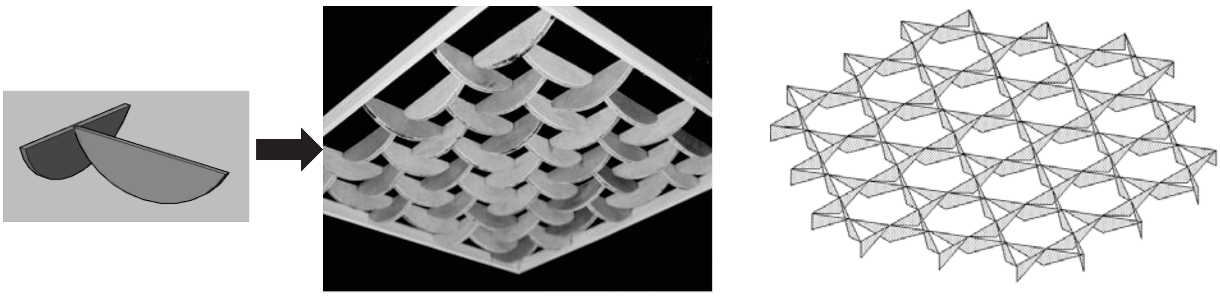
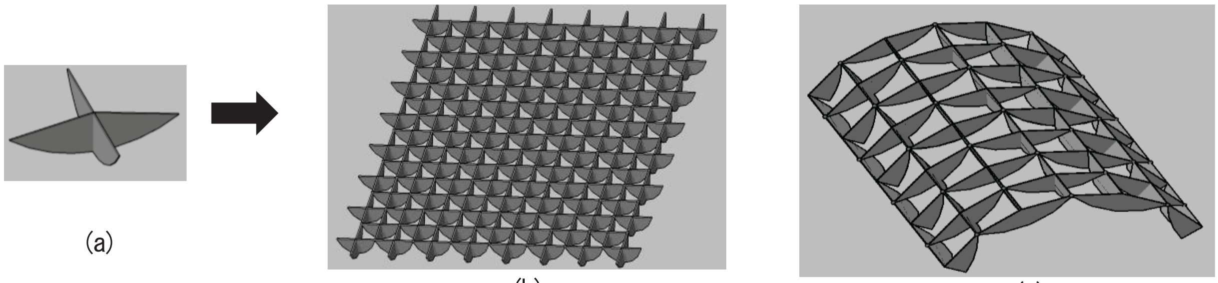


図 15：Lap 型立体組合せパネル



(a) (b) (c)

図 16: 交差型立体組合せパネル

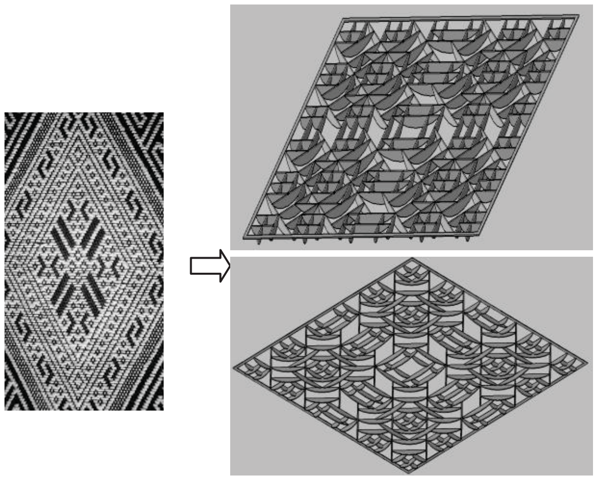


図 17　こぎん刺しを表現する立体組合せパネル

3.3　類似研究についての調査研究

立体組合せパネルに類似するアイディアとして，相互依存形式(principle of reciprocity)を基にした reciprocal structure や multi-reciprocal grid のようなアイディアが挙げられ，これは古くから，東洋，西洋のどちらでも研究・実用化されていたものと考えられている[11]．これらの構造方式は短い梁を用いて，隣梁同士が互いに支えあうことによって大スパンの構造物を作り出すことである．

東洋では，「清明上河図」に描かれる「虹橋」がその一つの例であると考えられている．その構造体の棒状部材をパネルに入りかえることによって，パネルにより構成された構造システムを創出できる（図 19）．

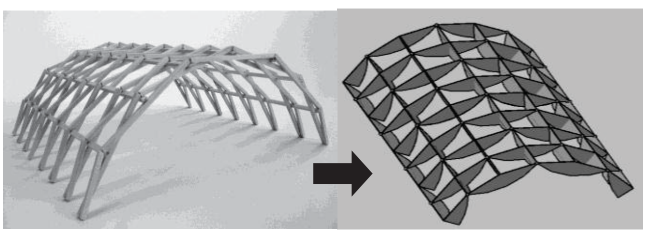


図 19　Lap-Beam と立体組合せパネ

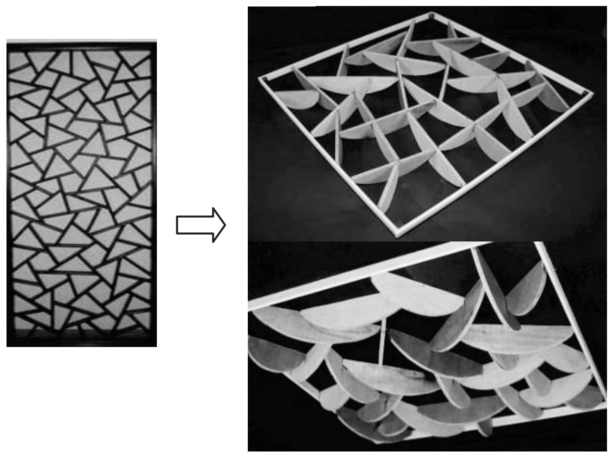


図 18 中国の窓格子を表現する立体組合せパネル（ランダムグリッド）

西洋では，天才芸術家科学者でもあるレオナルド・ダ・ヴィンチ(1452-1591)が 1478 年から 1518 年に書かれたとみられるアトランティコ手稿で相互依存形式に基づく自己保持型の橋を提案しており（図 20）[11,12]，その構造原理は中国宋代虹橋と同じであることがわかる．但し，虹橋の登場はダ・ヴィンチの発明より約 500 年も早く，イタリアにいたダ・ヴィンチは宋代虹橋から何かのヒントを得たことがあったかについては継続的に研究する価値がある．

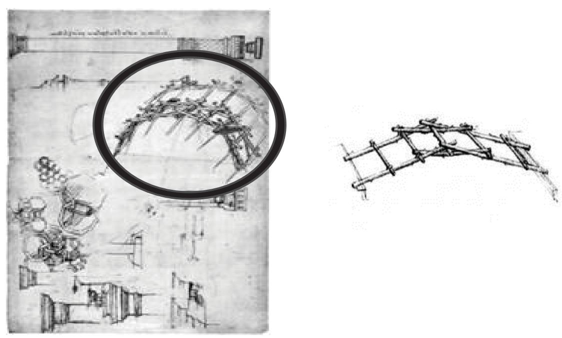


図 20　レオナルド・ダ・ヴィンチのアイディア[11,12]

現在の類似デザイン例としては，スイスのチューリッヒ工科大学(ETH)の作品(図 21)[13]，イタリアの建築家

図 21　スイスのチューリッヒ工科大学(ETH)の作品 [13]

BIAGIO DI CARLO や日本の村田弘志などの建築家が相互依存形式に基づく構造の研究を行っている．

しかし，これらの類似研究やデザインは主に棒状部材を互いに支え合うように組立て，小規模の作品として使用されている．これに対して，本研究は，多様な建造物に適用できる構造システムとして研究を進んでいる．本論の提案は，パネルを簡素な方法で接合することにより工法のシンプル化，実用化が期待でき，より自由な大空間の構造デザインを期待できる．

4 まとめ

本論では，「1.5 層スペースフレーム」の成り立ち及びその幾何学特性から派生された「立体組合せパネル」の組み方を紹介した．また，これらの提案構造の組み方のシステム化として，Lap 型ユニットと交差型ユニットを提案した．さらに，これらの組み方を用いて平面および曲面構造の構成方法を提示した．

1.5 層スペースフレームと立体組合せパネル構造は, デザインの自由性に優れ，伝統的な模様やランダムグリッドを表現する構造形態の創生が可能である．

本研究は初期研究であるため，今後の課題として，実用化に向けた力学特性の解明，接合方法の開発，その構造設計の理論などを継続的に研究していくことが必要である．今後の研究を重ねて，実用可能な構造システムを目指す．

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, “Configuration and Structural Principle of an Ancient Chinese Wood Bridge Hongqiao”, Proceeding of IASS2007, Venice, Italy, 2007.Dec..
3) PEI-SHAN CHEN, “A Study Report on an Ancient Wood Bridge Hongqiao”, Structural Engineering International, 2008.2, pp84-87.
4) PEI-SHAN CHEN, “A study on the geometrical configuration of an ancient wooden bridge in Qingming Shanghe Tu”, Proceeding of IASS2010, Shanghai, 2010.Nov.
5) PEI-SHAN CHEN, “A Report on the Innovation of 1.5-Layer Space Frames”, Proceeding of IABSE IASS 2011, London, 2011.Sep.
6) Pei-Shan CHEN, “Introduction to 1.5-Layer Space Frames”, Proceeding of IASS-APCS 2012, Seoul, 2012.May.
7) Pei-Shan CHEN, “A Report on the Innovation of Reciprocal Panel System”, Proceeding of IASS-APCS 2012, Seoul, 2012.May.
8) 陳沛山，工藤聖来，西野大貴：　立体組合せパネル構造に関する研究，日本建築学会東北支部研究報告集，2012 年，第 73 号　構造系, pp107-112.
9) Simon Gelez, Simon Aubry, Bernard Vaudeville, Nexorade or Reciprocal Frame System Applied to the Design and Construction of a 850 m2 Archaeological Shelter Archaeological Shelter, International Journal of Space Structures, Volume 26, No. 4/December 2011, pp303-311.
10) http://www.bibracte.fr/fr/entrez-dans-les-coulisses/experimenter/couverture-de-fouilles_04_02_04.html
11) Olga Popovic Larsen, “Reciprocal Frame Architecture”, Elsevier Ltd., 2088.
12) José Sánchez, Félix Escrig, Frames Designed by Leonardo with Short Pieces. An Analytical Approach, International Journal of Space Structures, Volume 26, No. 4/December 2011, pp303-311.
13) http://eat-a-bug.blogspot.jp/2011/08

力法による骨組構造の形状最適化

垣田　仁[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，1133850021k@hiro.kindai.ac.jp
2) 近畿大学工学部建築学科，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[6)]．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理計画法によって解く方法[7)]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[8)]．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で与える方法[9),10)]や，形状を基本変形モードの線形和で表し，その係数を設計変数に選ぶ方法[11)-13)]（ベーシスベクトル法）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[14)-16)]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．

最近，建築分野では，シェル構造のみならず，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，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．また，力法による形状最適化手法とSLP法（逐次線形計画法）およびCONLIN法（凸線形化法）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[17)]．

目的関数

$$C(\mathbf{q}) = \mathbf{f}^T\mathbf{d} = \mathbf{d}^T\mathbf{K}\mathbf{d}$$

を最小にする節点座標

$$\mathbf{q} = \{x_1, y_1, x_2, y_2, \cdots, x_i, y_i, \cdots, x_n, y_n\}$$

を求める．

ただし，要素総長さの制約条件

$$L = \sum_{i=1}^{m} l_i \le L^U \tag{1}$$

を満足するものとする．

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．ただし，荷重は節点への集中荷重のみとし，分布荷重は考慮しない．また，支持点の節点座標は変動しないものとする．

(1)式を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．

目的関数

$$\sum_{j=1}^{2n} \frac{\partial C^{(k)}}{\partial q_j} \Delta q_j$$

を最小にする節点座標の増分

$$\Delta\mathbf{q} = \{\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \cdots, \Delta x_i, \Delta y_i, \cdots, \Delta x_n, \Delta y_n\}$$

を求める．

ただし，要素総長さの制約条件

$$\sum_{j=1}^{2n} \frac{\partial L^{(k)}}{\partial q_j} \Delta q_j \le L^U - L^{(k)} \tag{2}$$

を満足するものとする．

ただし，$C^{(k)}, L^{(k)}$ は，繰り返し回数が k ステップ時のコンプライアンスと要素総長さを表す．(2)式の問題をシンプレックス法等の線形計画法で繰り返し解き，$\Delta\mathbf{q}$ が十分小

さくなる解を最適解とする．ただし，SLP 法では，設計変数の増分にムーブリミット（上下限値）を設定し，このムーブリミットを徐々に絞り込んで解を強制的に収束させる方法を用いる．

一方，CONLIN 法では，感度係数が正の場合は(2)式と同様にテーラー展開し，感度係数が負の場合は設計変数の逆数でテーラー展開する．そして，このように線形化された問題を双対法と SQP 法（逐次２次計画法）を用いて解く．SLP 法は解が発散しにくい反面，対称問題でも非対称な最適解が得られやすく，CONLIN 法では非線形性が強い問題では解が発散しやすいが，対称問題では対称な最適解が得られやすい特徴がある．なお，文献 18) に以上の CONLIN 法の詳しい定式化が示され，付属 CD に SLP 法および CONLIN 法の FORTRAN ソースプログラムが含まれているので参照されたい．

2.2　感度解析法

次に，(2)式のコンプライアンス C の節点座標に関する微分（感度係数）の計算法を示す．

まず，(1)式の目的関数の関係式より，

$$\frac{\partial C}{\partial q_j} = \mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial q_j}\mathbf{d} + 2\mathbf{d}^T\mathbf{K}\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial q_j} \tag{3}$$

また，次式の剛性方程式

$$\mathbf{Kd} = \mathbf{f} \tag{4}$$

の両辺を q_j で微分すると，

$$\frac{\partial \mathbf{K}}{\partial q_j}\mathbf{d} + \mathbf{K}\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial q_j} = \mathbf{0} \tag{5}$$

ここで，(5)式の関係を(3)式に代入すると，次式が得られる．

$$\frac{\partial C}{\partial q_j} = -\mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}}{\partial q_j}\mathbf{d} \tag{6}$$

ここで，全体剛性マトリクス $\mathbf{K}$ は，要素剛性マトリクスを用いて次のように表すことができる．

$$\mathbf{K} = \sum_{i=1}^{m} \mathbf{L}_i^T \mathbf{T}_i^T \mathbf{k}_i^e \mathbf{T}_i \mathbf{L}_i \tag{7}$$

ここに，$\mathbf{T}_i$ は i 番目要素の座標変換マトリクス，$\mathbf{k}_i^e$ は i 番目要素の要素固有の座標系における要素剛性マトリクスである．また，$\mathbf{L}_i$ は i 番目要素の剛性マトリクスを全体剛性マトリクスに割り当てる 0 と 1 の成分で構成される収集行列 19)で，次式の関係がある．

$$\mathbf{d}_i^e = \mathbf{L}_i \mathbf{d} \tag{8}$$

ただし，$\mathbf{d}_i^e$ は要素の全体座標系の節点変位ベクトルである．

図 1 に示すように s 番目節点の座標が変化すると，s 番目節点に接続する $s_1 \sim s_4$ 番目の要素のみが変化し，その他の要素は変化しない．したがって，この場合，s 番目節点の x, y 座標に関する(6)式の感度係数は，(7)，(8)式を考慮すると，

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial x_s} &= -\sum_{i=s_1}^{s_4}\left\{\mathbf{d}_i^{eT}\frac{\partial\left(\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\mathbf{T}_i\right)}{\partial x_s}\mathbf{d}_i^e\right\} \\ \frac{\partial C}{\partial y_s} &= -\sum_{i=s_1}^{s_4}\left\{\mathbf{d}_i^{eT}\frac{\partial\left(\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\mathbf{T}_i\right)}{\partial y_s}\mathbf{d}_i^e\right\} \end{aligned} \tag{9}$$

ただし，x_s, y_s は，s 番目節点の x, y 座標を示す．ここで，(9)式の右辺の括弧内の微分は次式から計算される．

$$\begin{aligned} \frac{\partial\left(\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\mathbf{T}_i\right)}{\partial x_s} &= \mathbf{T}_i^T\frac{\partial \mathbf{k}_i^e}{\partial x_s}\mathbf{T}_i + 2\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial x_s} \\ \frac{\partial\left(\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\mathbf{T}_i\right)}{\partial y_s} &= \mathbf{T}_i^T\frac{\partial \mathbf{k}_i^e}{\partial y_s}\mathbf{T}_i + 2\mathbf{T}_i^T\mathbf{k}_i^e\frac{\partial \mathbf{T}_i}{\partial y_s} \end{aligned} \tag{10}$$

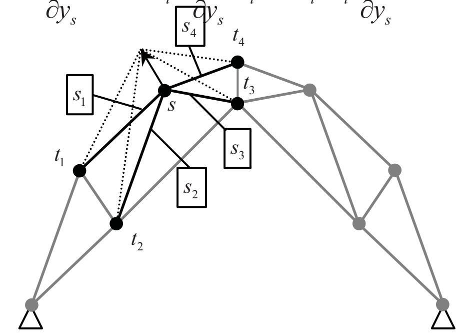


図 1　骨組構造における節点移動　(4)

2.3　2 次元骨組の感度係数計算法

次に，2 次元骨組について，(9)式の計算法を示す．いま，i 番目要素の両端の節点番号を s と t_r とする（図 1 の場合，$i = s_1 \sim s_4$， $r = 1 \sim 4$）．このとき，i 番目要素の剛性マトリクス，座標変換マトリクス，節点変位ベクトルは次式となる．

$$\mathbf{k}_i^e = \begin{bmatrix} \frac{E_iA_i}{l_i} & & & & & \text{Sym.} \\ 0 & \frac{12E_iI_i}{l_i^3} & & & & \\ 0 & \frac{6E_iI_i}{l_i^2} & \frac{4E_iI_i}{l_i} & & & \\ -\frac{E_iA_i}{l_i} & 0 & 0 & \frac{E_iA_i}{l_i} & & \\ 0 & -\frac{12E_iI_i}{l_i^3} & -\frac{6E_iI_i}{l_i^2} & 0 & \frac{12E_iI_i}{l_i^3} & \\ 0 & \frac{6E_iI_i}{l_i^2} & \frac{2E_iI_i}{l_i} & 0 & -\frac{6E_iI_i}{l_i^2} & \frac{4E_iI_i}{l_i} \end{bmatrix} \tag{11a}$$

$$\mathbf{d}_i^e = \left\{ u_s \quad v_s \quad \theta_s \quad u_{t_r} \quad v_{t_r} \quad \theta_{t_r} \right\}^T \tag{11b}$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos\alpha_i & \sin\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{11c}$$

ただし,

$$\begin{aligned} l_i &= \sqrt{\left(x_{t_r} - x_s\right)^2 + \left(y_{t_r} - y_s\right)^2} \\ \cos\alpha_i &= \frac{x_{t_r} - x_s}{l_i}, \quad \sin\alpha_i = \frac{y_{t_r} - y_s}{l_i} \end{aligned} \tag{12}$$

ここに, E_i, A_i, I_i は, i 番目要素のヤング係数, 断面積, 断面２次モーメントである.

したがって, (10)式を計算するために必要な微分計算は次式となる.

$$\begin{aligned} \frac{\partial l_i}{\partial x_s} &= -\frac{x_{t_r} - x_s}{l_i} = -\cos\alpha_i \\ \frac{\partial l_i}{\partial y_s} &= -\frac{y_{t_r} - y_s}{l_i} = -\sin\alpha_i \end{aligned} \tag{13a}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x_s}\left(\frac{1}{l_i}\right) = -\frac{1}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s}\left(\frac{1}{l_i}\right) = -\frac{1}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) \\ &\frac{\partial}{\partial x_s}\left(\frac{1}{l_i^2}\right) = -\frac{2}{l_i^3}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s}\left(\frac{1}{l_i^2}\right) = -\frac{2}{l_i^3}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) \\ &\frac{\partial}{\partial x_s}\left(\frac{1}{l_i^3}\right) = -\frac{3}{l_i^4}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right), \quad \frac{\partial}{\partial y_s}\left(\frac{1}{l_i^3}\right) = -\frac{3}{l_i^4}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) \end{aligned} \tag{13b}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \cos\alpha_i}{\partial x_s} &= -\frac{x_{t_r} - x_s}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right) - \frac{1}{l_i} \\ \frac{\partial \cos\alpha_i}{\partial y_s} &= -\frac{x_{t_r} - x_s}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) \\ \frac{\partial \sin\alpha_i}{\partial x_s} &= -\frac{y_{t_r} - y_s}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right) \\ \frac{\partial \sin\alpha_i}{\partial y_s} &= -\frac{y_{t_r} - y_s}{l_i^2}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) - \frac{1}{l_i} \end{aligned} \tag{13c}$$

以上の式から(11)式が計算され, これにより(10)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.

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial x_s} &= \sum_{i=s_1}^{s_4}\left(\frac{\partial l_i}{\partial x_s}\right) = -\sum_{r=1}^{4}\left(\frac{x_{t_r} - x_s}{l_i}\right) \\ \frac{\partial L}{\partial y_s} &= \sum_{i=s_1}^{s_4}\left(\frac{\partial l_i}{\partial y_s}\right) = -\sum_{r=1}^{4}\left(\frac{y_{t_r} - y_s}{l_i}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

以上により, (2)式の感度係数を効率よく計算できる.

3 力法による形状最適化

次に, 力法による形状最適化の方法を示す.

SLP 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, 力法では, 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. ただし, 該当する節点が x または y 方向のみの移動となる場合は, 移動可能方向のみの感度係数を求め, その方向のみの荷重を加えることになる. そして, 線形弾性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 になる解を最適解とする. なお, 力法は, 一種の勾配法であり [14)-16)], 局所解の可能性はあるにしても, 収束解は目的関数の最小解を与えると考えられる.

形状変更の倍率としては, 本論文では, 要素長さの平均値,

$$\bar{l} = \frac{L}{m} = \sum_{i=1}^{m} l_i \Big/ m \tag{15}$$

を基準とし, 初期 (第１ステップ) の節点座標増分の最大値 (絶対値) が $\alpha\bar{l}$ となるように変更倍率を設定する. また, 最適化の総計算ステップ数を N_{OP} とすると, N_{OP}/β までは, 変更倍率 ($\alpha\bar{l}$) の絞り込みは行わず, それ以降のステップでは $\alpha\bar{l}/\gamma^{(k-N_{OP}/\beta)}$ となるよう絞り込みを行う. ただし, k はステップ数, γ は 1〜1.1 の範囲で与えるものとする. なお, 本論文では, α は入力データとして与え, $\beta=3$, $\gamma=1.01$ としている. ただし, β と γ の値は, 基本的な例題で, 繰り返し計算回数を 50〜100 回とし, 安定的に最適解に収束する値を試行錯誤で求めたものである.

また, 力法においては, 要素総長さの制約条件は, 目的関数へのペナルティ関数として与えるものとする. すなわち, 第 k ステップの目的関数 $f_{obj}^{(k)}$ を次式のように置く.

$$\boxed{f_{obj}^{(k)} = C^{(k)} + wC^{(0)}\left(\frac{L^{(k)}}{L^U} - 1\right)^2 \quad ;\text{if} \quad \frac{L^{(k)}}{L^U} \le 1 \quad \text{then} \quad w = 0} \tag{16}$$

ここに, $C^{(0)}$ は初期形状のコンプライアンス, w は重み

係数である．なお，本論文では，w は入力データとして与えている．

図2は,力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 $t_1 \sim t_4$ ）を調べておくと計算効率が向上する．

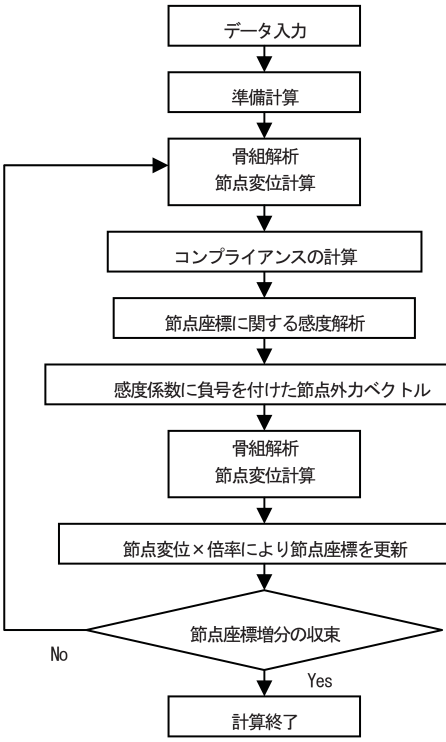


図2　力法の解析フロー

4 解析例

4.1　境界に波打ち現象が生じる解析例

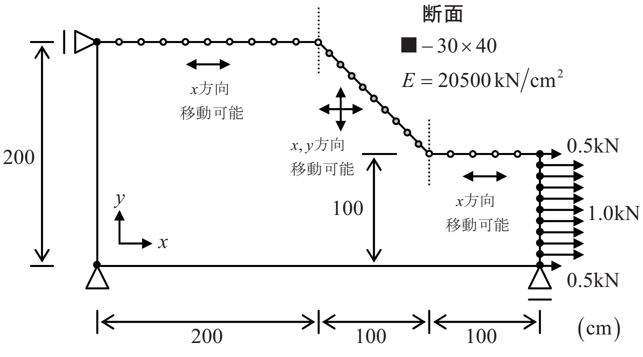
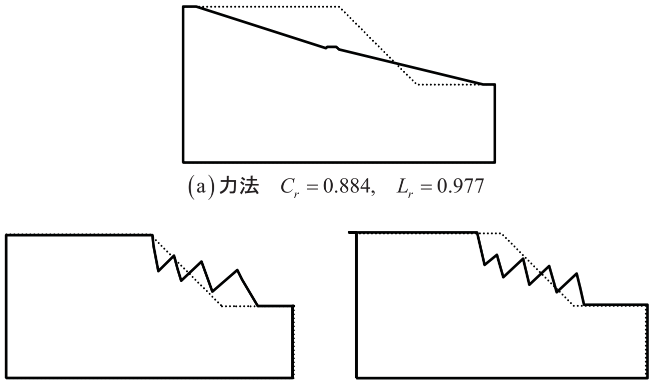


図4　境界に波打ち現象が生じる解析例

図4は，連続体を有限要素法で離散化し，境界形状の最適化を行った場合，境界に波打ち現象が生じるとされる例題[20]を参考に，骨組の形状最適化問題を作成したものである．図に示すように，本モデルでは，境界枠を梁材で構成するものとし,これを37要素で分割している．梁材は30cm×40cmの鋼材中実断面としている．また，構造上部の梁の形状を設計対象とし，水平材の節点は x 方向のみ移動でき，斜材の節点座標は x, y 方向に移動できるものとする．



(a)力法　$C_r = 0.884$,　$L_r = 0.977$

(b)SLP法　$C_r = 0.768$,　$L_r = 1.007$　(c)CONLIN法　$C_r = 0.914$,　$L_r = 1.149$

図5　解析結果の比較

図5は，力法，SLP法，CONLIN法の解析結果を示したものである．ただし，要素総長さ制約値は $L^U = 1.2L^{(0)}$ （$L^{(0)}$ ：初期形状の要素総長さ）で，最適化の繰り返し計算回数は3つの手法ともに100回としている．なお,SLP法，CONLIN法の方は40回程度で収束するが，ここでは条件を合わせている．また，力法の初期変更倍率係数 α は0.5，重み係数 w は0としている．なお，α の値は，試行錯誤の結果，コンプライアンスの最も小さくなる値を用いている．図中の C_r は収束解と初期形状のコンプライアンスの比を示し，L_r は収束解と初期形状の要素総長さの比を示す．図より，SLP法，CONLIN法では，連続体の有限要素解析の場合と同様に，境界形状が波打つ現象が見られる(最適性基準は満足しない)のに対し，力法では，そのような現象が生じないことがわかる．

4.2　フィーレンディールアーチ橋の解析例

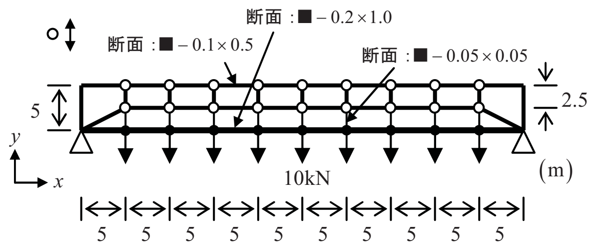
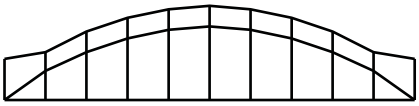
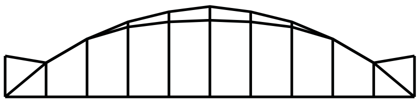


図6　解析モデルの初期形状

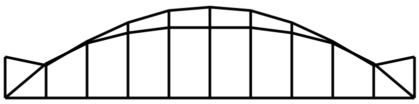
図6は，フィーレンディールアーチ橋の解析モデルを示す．本解析モデルでは，白丸の節点が y 方向に移動可能としている．ただし，梁材は鋼材中実断面（$E = 20500\,\mathrm{kN/cm^2}$）としている．



(a) 力法　$C_r = 0.211$,　$L_r = 1.201$

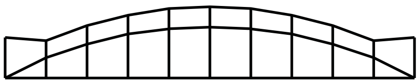


(b) SLP法　$C_r = 0.150$,　$L_r = 1.170$

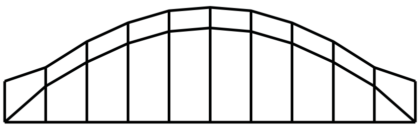


(c) CONLIN法　$C_r = 0.158$,　$L_r = 1.166$

図7　解析結果の比較



(a) $L_r = 1.103$



(b) $L_r = 1.301$

図8　要素総長さ制約値を変えた場合の結果（力法）

図7は，力法，SLP法，CONLIN法の解析結果を示したものである．ただし，要素総長さ制約値は $L^U = 1.2L^{(0)}$ で，最適化の繰り返し計算回数は3つの手法ともに100回としている．また，力法の初期変更倍率係数 α は1.3，重み係数 w は400としている．図中の C_r は収束解と初期形状のコンプライアンスの比を示し，L_r は収束解と初期形状の要素総長さの比を示す．図より，力法では，解析の意図どおりフィーレンディールアーチ橋となっているのに対し，SLP法，CONLIN法では，コンプライアンス比は力法に比較して小さいものの，解析者の意図とは異なる形状のアーチとなることがわかる．

次に，図8 (a), (b)は，力法における制約条件の有効性を示すために，L^U を $1.1L^{(0)}$ および $1.3L^{(0)}$ にした場合の解析結果を示している．図に示すように，力法においても制約値を変化させることによりアーチのライズを変化させることができる．

4.3　骨組シェル構造の解析例

図9は，岐阜県各務市の市営斎場「瞑想の森」の断面図を元に作成した骨組シェル構造の解析モデルを示す．本解析モデルでは，柱の上下端の節点の移動を固定し，それ以外の全節点が y 方向に移動可能としている．ただし，梁材は鋼材中実断面（$E = 20500\,\mathrm{kN/cm^2}$）としている．また，荷重は節点への集中荷重として与えている．

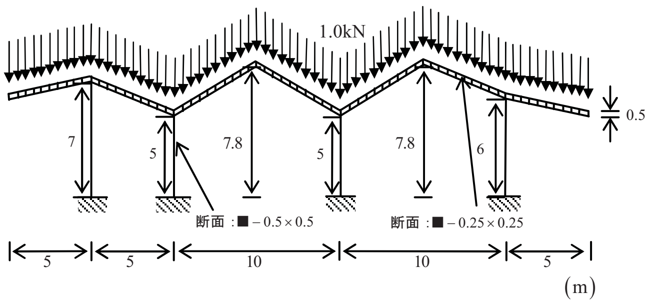
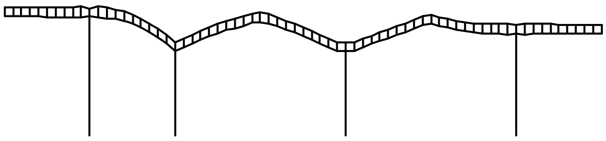
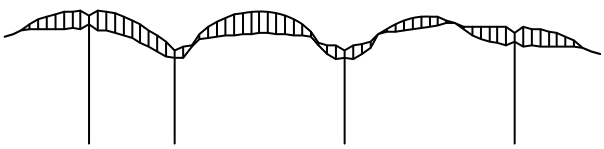


図9　解析モデルの初期形状

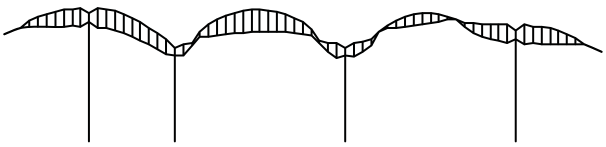
図10は，力法，SLP法，CONLIN法の解析結果を示したものである．ただし，要素総長さ制約値は $L^U = 1.1L^{(0)}$ で，最適化の繰り返し計算回数は100回としている．また，力法の初期変更倍率係数 α は0.7，重み係数 w は1.0としている．図中の C_r は収束解と初期形状のコンプライアンスの比を示し，L_r は収束解と初期形状の要素総長さの比を示す．図より，力法では初期形状の形態を崩さずに，形状修正を行うことができるのに対し，SLP法，CONLIN法では，コンプライアンス比は力法に比較して小さいものの，初期形状とは大きく異なる形態となってしまうことがわかる．これは，本論文で用いている力法が，制約条件をペナルティ法で与える勾配法であり，SLP法，CONLIN法に比較して制約条件の影響を受けにくいためではないかと考えられる．



(a) 力法　$C_r = 0.824$,　$L_r = 0.992$



(b) SLP法　$C_r = 0.595$,　$L_r = 1.100$



(c) CONLIN法　$C_r = 0.590$,　$L_r = 1.100$

図 10　解析結果の比較

5　まとめ

本論文では，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した．また，目的関数（コンプライアンス）の感度解析法は，位相最適化手法等で一般的に用いられている方法を採用し，2次元骨組を例に詳細な解析法を示した．

まず, 境界に波打ち現象が生じる例題を示し, SLP 法, CONLIN 法では境界に波打ち現象が生じるのに対して，力法では，このような現象が回避できることを示した．次に，フィーレンディールアーチ橋および骨組シェル構造の解析例により，力法では，初期形状の形態を保ちつつ形状変更がなされるのに対して，SLP 法，CONLIN 法では, 初期形状とは異なる形態に収束することを示した．これは，本論文に示した力法が感度係数を荷重とする骨組の弾性変形にしたがって形状変更を行うためである．したがって，どのような骨組に対しても，よりスムーズな最適形状を得ることができると考えられる．

以上の結果より，意匠設計者のデザインを初期形状として，形状変更を行う場合は，力法による骨組形状最適化手法が有効な手段となりえることがわかった．

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,
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) 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
7) 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
8) Iman, M.H. : Three-dimensional Shape Optimization, *Int. J. Num. Meth. Engrg*., Vol.18, pp.661-673, 1982
9) Braibant, V. and Fleury, C. : Shape optimal design using B-splines,　*Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*., Vol.44, pp.247-267, 1984
10) Braibant, V. and Fleury, C. : An approximation concepts approach to shape optimal design, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*., Vol.53,　pp.119-148, 1985
11) 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
12) 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
13) Vanderplaats, G.N. and Miura, H. : GENESYS-structural synthesis software using advanced approximation techniques, *AIAA Report*,　92-4839-CP, pp.180-190, 1992
14) 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
15) 下田昌利，呉志強，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
16) 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
17) 例えば，藤井大地：建築デザインと最適構造，丸善，2008.10
18) Fish, J. and Belytschko, T; 山田貴博監訳：有限要素法，丸善，2008.12
19) 例えば, 藤井大地：Excel で解く構造力学, 丸善, 20038
20) 山川宏：最適化デザイン，培風館，1993.4

部分剛接骨組による形態変化機構の解析と設計法

菊川　翔平[1)]，大崎　純[2)]，津田　勢太[3)]，寒野　善博[4)]
1)広島大学大学院工学研究科，大学院生，m124424@hiroshima-u.ac.jp
2)広島大学大学院工学研究院，教授，博士（工学）
3)岡山県立大学デザイン工学科，准教授，修士（工学）
4)東京大学大学院情報理工学系研究科，准教授，博士（工学）

1　はじめに

剛体としての運動の自由度を持ち，変形の大きさや方向を変化させることができる不安定な構造をメカニズムという．メカニズムは荷重支持能力がないため建築構造体として用いられることは稀であり，機械工学などの分野で機械の可動機構として用いられることが多い[1)]．ただし，建築の分野でも，折りたたみが可能な展開構造物や開閉屋根などのような形態変化機構として利用されており，力学特性の解析や設計に関する研究は多く存在する[2-6)]．

メカニズムを用いた可動建築は，その機構変化を利用し構造物全体の形態を変化させることにも利用される．川口によるパンタドーム構法[7-8)]は，ドーム構造のフープ効果を部分的に排除するとともに断面上の節点を1軸回転ヒンジとし，ドーム全体を一時的に自由度が1の不安定構造とすることで，地震力や風圧力などの横力に対する抵抗を持ちながらリフトアップすることができるドームの構築方法である．この構法では，地上に近い高さで屋根を施工してリフトアップするため，コストや工期のメリットが得られる．

剛な部材と節点で自由に回転可能なヒンジで構成されるリンク機構の1次（微小変形）の安定性は，釣合い行列のランクと変位の自由度から評価することができる[9-10)]．また，釣合い行列の特異値分解[11)]により得られる特異ベクトルから，独立な自己釣合い応力モードや剛体変位モードを導出することができる．

上記のような釣合い行列の特異値分解を用いた安定性評価は，ヒンジ接合された構造体が主な対象とされてきた．しかし，建築構造体の接合部をヒンジ接合とするためには，3 軸周りに回転可能な接合が必要となり，製作は容易ではない．またヒンジ接合された構造体は，平面的に配置した場合には荷重支持能力がないため，立体的あるいは複層状に配置する必要があり，平面形状から立体形状に形態変化するメカニズムを全て3軸周りに回転可能なヒンジ接合で実現することは困難である．

Ohsaki and Fujita[12)]は，三角形，四角形及び六角形格子を有するラチスシェルの部材長一様化とひずみエネルギー最小化を目的とした最適化を行い，部材密度の最も小さい六角形格子を用いると一様部材長で種々の形状を生成できることを示した．また Ohsaki *et al.*[13)]は，六角形格子で構成された骨組の部材端モーメントの一部を解放することにより，平面形状から曲面形状へと展開できる構造を提案し，さまざまな接合方式の安定性と施工可能性を検討した．ただし，釣合い行列のランクを用いた厳密な1次の安定性評価や，大変形メカニズムの解析の一般的手法は提案されていない．

本研究では，剛接骨組の部材端モーメントを部分的に解放することができる任意の形状の骨組（以下，部分剛接骨組と呼ぶ）を対象として，釣合い行列を拡張した定式化を行い，1 次の安定性評価とメカニズムの導出を行う．さらに，極限解析の下界定理を用いてメカニズムとなるために必要な解放条件を求め，大変形解析を行うことにより解放条件を修正して，大変形メカニズムを求める．これらの手法を六角形格子で構成される部分剛接骨組に適用し，構造物全体の展開・収納可能性について検討する．

2　釣合い行列の定式化による安定性評価

2.1　剛接骨組

剛接合された節点 i, j $(i<j)$を結ぶ部材 k を考える．図1に示すように，部材座標軸を x, y, z 軸として各部材に対して固定する．ここで，x 軸は部材の節点 i から j に向かう方向，z 軸は部材軸を含む鉛直面内で x 軸と垂直な方向，y 軸は x 軸と z 軸の両方に垂直な方向とする．

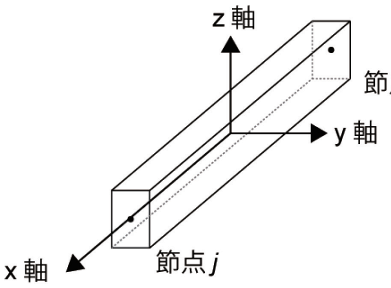


図１　部材座標の定義

1 つの軸力を N, x 軸周りのねじりモーメントを T, 部材端 i, j の y 軸および z 軸周りの曲げモーメントを M_{yi}, M_{zi}, M_{yj}, M_{zj} で表し，材端断面力ベクトルを

$$\mathbf{F}^k = \left[N, T, M_{yi}, M_{zi}, M_{yj}, M_{zj}\right]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

とする．ここに，T は転置を表す．部材の方向余弦を考慮して，各節点の力の釣合い式を立てることで，構造物全体の釣合い式が以下のように表現できる．

$$\mathbf{CF} = \mathbf{P} \tag{2}$$

ここで, $\mathbf{F}$ は全部材の材端断面力で構成されるベクトル, $\mathbf{P}$ は拘束されていない自由度に対応する外力ベクトルである．自由度数を n, 全材端断面力数を m とすると，$\mathbf{C}$ は釣合い行列と呼ばれる $n \times m$ の長方行列であり，以下の例では一般に $n < m$ である．

一方，拘束されていない全ての節点の自由度の変位を並べたベクトルを $\mathbf{U}$, 全部材の材端断面力に対応する変形量を並べたベクトルを $\mathbf{d}$ とすると，U と d の関係は次式で表すことができる．

$$\mathbf{DU} = \mathbf{d} \tag{3}$$

D は適合条件行列と呼ばれ, $m \times n$ 行列である．適合条件行列は，仮想仕事式により，釣合い行列の転置行列であること，つまり，

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

が成り立つことが導かれる．

行列 $\mathbf{C}$ のランクを r とする．行列 $\mathbf{C}$ は以下のように特異値分解することができる．

$$\mathbf{C} = \mathbf{S\Omega R}^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

ここで，$\mathbf{R}$ は右特異ベクトルを並べた $m \times m$ 行列，$\mathbf{S}$ は左特異ベクトルを並べた $n \times n$ 行列である．また，$n < m$ の場合，$\mathbf{\Omega}$ は最初の r 個の対角項が非零の特異値で，他のすべての項が 0 である $n \times m$ 行列である．$\mathbf{R}$, $\mathbf{S}$ は正規直交ベクトルを列ベクトルにもつことより次式が成り立つ．

$$\mathbf{CR} = \mathbf{S\Omega} \tag{6}$$

$$\mathbf{S}^{\mathrm{T}}\mathbf{C} = \mathbf{\Omega R}^{\mathrm{T}} \tag{7}$$

したがって，$r < n, r < m$ の場合，次式を満たすような $m - r$ 個の右特異ベクトル $\mathbf{R}_i (i = r+1, \dots, m)$ と $n-r$ 個の左特異ベクトル $\mathbf{S}_j (j = r+1, \dots, n)$ が存在する．

$$\mathbf{CR}_i = \mathbf{0} \tag{8}$$

$$\mathbf{C}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}_j = \mathbf{0} \tag{9}$$

式(2), (8)より，$\mathbf{R}_i$ は外力がない状態で存在する非ゼロの自己釣合い材端断面力モードであり, $m-r$ は不静定次数である．また式(3), (4), (9)より，$\mathbf{S}_j$ は非ゼロの剛体変位モードであり，$n-r$ は不安定次数である．

2.2　部分剛接骨組

前節で定義した釣合い行列 $\mathbf{C}$ に，モーメント解放条件を制約条件として加えた定式化を行う．一般に，部材端モーメントの指定条件をまとめて次式のように表現する．

$$\mathbf{HF} = \mathbf{M} \tag{10}$$

ここで，行列 $\mathbf{H}$ は指定する成分が 1，それ以外が 0 の行ベクトルを並べた行列であり, 解放総数を h とすると，$h \times m$ 行列である．また，$\mathbf{M}$ はモーメント指定値を並べたベクトルであり，以下ではモーメントをすべて解放するのですべての成分が 0 である．

式(2), (8)より，材端力が満たすべき条件は以下の通りとなる．

$$\begin{pmatrix} \mathbf{C} \\ \mathbf{H} \end{pmatrix} \mathbf{F} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{M} \end{pmatrix} \tag{11}$$

式(9)の左辺の行列を $\mathbf{B}$ とし，$\mathbf{B}$ の特異値分解を行う．$\mathbf{B}$ のランクを r とすると，$r < n+h, r < m$ の場合，次式を満たすような $m-r$ 個の右特異ベクトル $\mathbf{R}_i (i = r+1, \dots, m)$ と $n + h - r$ 個の左特異ベクトル $\mathbf{S}_j (j = r+1, \dots, n+h)$ が得られる．

$$\mathbf{BR}_i = \mathbf{0} \tag{12}$$

$$\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}_j = \mathbf{0} \tag{13}$$

式(11), (12)より，右特異ベクトル $\mathbf{R}_i$ は，外力ベクトル $\mathbf{P}$ および $\mathbf{M}$ のすべての成分が 0 の状態で存在する非ゼロの自己釣合い材端断面力モードであり, $m-r$ は不静定次数である．

次に，左特異ベクトル $\mathbf{S}_j$ について考察する．指定する部材端モーメントに対応するヒンジ回転角を θ とする．材端力に対応する部材変形ベクトル $\mathbf{d}$ が次式で表されるものとする．

$$\mathbf{d} = \mathbf{DU} + \mathbf{G}\theta \tag{14}$$

外力仕事と内力仕事を等値すると，式(14)より，

$$\mathbf{F}^{\mathrm{T}}\left(\mathbf{DU} + \mathbf{G}\theta\right) = \mathbf{P}^{\mathrm{T}}\mathbf{U} + \mathbf{M}^{\mathrm{T}}\theta \tag{15}$$

となる．ここで，$\mathbf{U}$ と θ を独立な仮想変位と考えることにより，

$$\mathbf{D}^{\mathrm{T}}\mathbf{F} = \mathbf{P}, \mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{F} = \mathbf{M} \tag{16}$$

が得られる．したがって，式(2), (10), (16)より，

$$\mathbf{D} = \mathbf{C}^{\mathrm{T}}, \mathbf{G} = \mathbf{H}^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

となる．$\mathbf{S}_j$ の $\mathbf{C}$，$\mathbf{H}$ に対応する成分を $\mathbf{S}_j^{\mathrm{C}}$，$\mathbf{S}_j^{\mathrm{H}}$ とすると，式(13)は，

$$\mathbf{DS}_j^{\mathrm{C}} + \mathbf{GS}_j^{\mathrm{H}} = \mathbf{0} \tag{18}$$

となり，式(14), (18)より $\mathbf{S}_j$ は $\mathbf{d} = \mathbf{0}$ を満たす．したがって，式(13)を満たす $\mathbf{S}_j$ は非ゼロの剛体変位モードであり，$n + h - r$ は不安定次数である．

剛接骨組の釣合い条件式において，材端モーメントの解放条件を考慮した定式化を行うことも可能であるが，本研究では，部材端がすべて剛接合された場合の釣合い行列と材端モーメントの解放を表す行列を別途作成する手法を用いた．これにより，安定性評価のための行列作成が容易になるうえ，材端部に任意の回転軸を有するヒンジ条件を考慮することができる．

3 極限解析

2 節で定義した行列 $\mathbf{B}$ のランクが行数より 1 だけ小さくなる部材端の拘束解放条件を定めれば，自由度が 1 の 1 次のメカニズムを持つ構造が得られる．しかし，そのような解放条件を求めるのは試行錯誤的となり困難であるため，極限解析の下界定理を用いて崩壊メカニズムを求め，全塑性モーメントに達した部材端の拘束を解放することとする．

材端断面力ベクトル $\mathbf{F}$ の各成分の上下限値で構成されるベクトルを $\mathbf{F}^{\mathrm{U}}$，$-\mathbf{F}^{\mathrm{U}}$ とする．ここで，各成分の上限値と下限値の絶対値は等しいものとする．また，軸力は解放しないため上限値を十分に大きい値とする．解放したくないモーメントについても同様に上限値を十分に大きく与える．

荷重係数をΛとすると，極限解析の下界定理より，下記の線形計画問題を解いて崩壊荷重係数を求めることができる．

$$\begin{aligned} &\text{maximize} && \Lambda \\ &\text{subject to} && \mathbf{CF} = \Lambda\mathbf{P} \\ &&& -\mathbf{F}^{\mathrm{U}} \le \mathbf{F} \le \mathbf{F}^{\mathrm{U}} \end{aligned}$$

ここで，1 つ目の制約は釣合い式であり，行列 $\mathbf{C}$ は 2 節で定義した釣合い行列，行列 $\mathbf{P}$ は仮想の荷重ベクトルである．仮想荷重は，想定するメカニズムにおいて強制変位を与える節点に，反力と同じ向きに与える．2 つ目の制約は降伏条件である. この線形計画問題の解において，降伏条件が等号で満たされるようなモーメントを解放すれば，微小変形のメカニズムが得られる．

なお，上記の極限解析で得られる 1 次（微小変形）のメカニズムは不静定次数が大きく，強制変位を与えた際に材端断面力が発生し大変形メカニズムとならない可能性が高いので，部材端の拘束解放箇所を追加する必要がある．その手法については，次節の例を通して示す．

4 六角形格子モデル

4.1 曲面屋根構造

六角形格子構造は図 2 に示す 24 節点 30 部材を有する剛接合されたモデルを対象とする．初期形状は XY 平面内にあり，すべての部材長は等しく 6 m である．中央の節点 1 ~ 6 に Z 軸正の方向に強制変位を与えた際に，平面形状から曲面屋根形状となるメカニズムを考える．なお，屋根形状のラチスシェルを想定するため，ライズスパン比が 0.2 となるように強制変位は 6.5 m とした. 上記の変形を達成させるため，図 2 における□で囲まれた支点の Z 軸方向変位を固定する．さらに，支点 14 は Y 軸方向，支点 23 は X，Y 軸方向変位も固定し，剛体変形を拘束する．

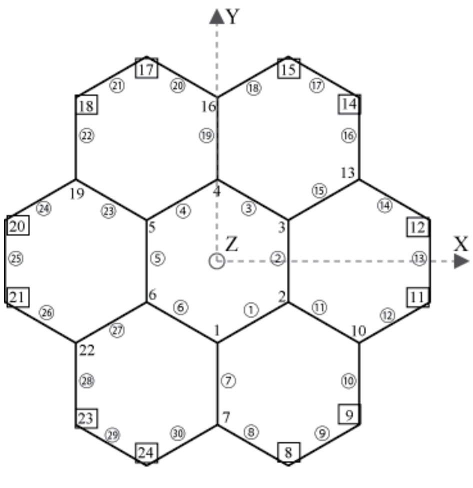


図 2　六角形格子モデル

前節で示した極限解析により，節点 1 ~ 6 の Z 軸正の方向に単位荷重を作用させて崩壊メカニズムを求める．以下, 極限解析の結果には単位は無関係なので省略する．軸力の上限値を 10000，曲げモーメント及びねじりモーメントの上限値を 1 として荷重係数を最大化する解を，最適化パッケージ SNOPT Ver. 7.2[14]を用いて求めた．これにより得られた解放条件を図 3 に示す．ここで，My は y 軸周りの曲げモーメントの解放を表す．図 3 の六角形格子構造に対して, MATLAB Ver. 7.7[15]を用いて行列 **B** の特異値分解を行った結果，この構造は 2 次不安定かつ 23 次不静定である．

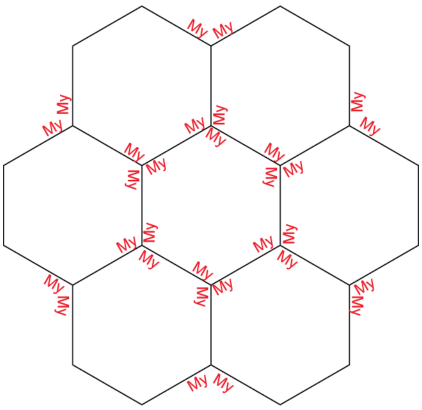


図 3　極限解析による解放条件

しかし，この解放条件では不静定次数が大きいため，大変形時に材端断面力が発生することが予想される．そこで，汎用有限要素解析ソフトウェアである ABAQUS Ver. 6.10.3[16]を用いて幾何学的非線形解析を行い，大変形時の安定性と，断面力発生の有無を確認する．ここで自重は考慮しない．すべての部材断面は外径 50 mm，板厚 5 mm の円筒断面であり，材料は鋼材とする．

解析の結果，多くの材端部で断面力が発生することが確認された．そこで，大きい曲げモーメントが発生している箇所の曲げ拘束を逐次解放することで，不静定次数を減少させていく．ここで，x 軸周りのねじりモーメントの解放を T，z 軸周りの曲げモーメントの解放を Mz で表す．なお，現実的な接合部による施工性を考慮し，同一材端において My と Mz を同時に解放させないこととする．

図 4 は My, Mz, T をそれぞれ 18 箇所ずつ解放し，解放総数 54 とした解放条件であり, 大変形時に断面力が発生しない大変形メカニズムが得られた．特異値分解の結果から，この構造の不安定次数は 6，不静定次数は 3 である．極限解析で得られたメカニズムと比べて不安定次数は 4 だけ増加しているのに対し, 不静定次数は 20 減少して静定構造に近くなっている. 不安定次数は 6 であるが, 6 個の左特異ベクトルから節点 1 ~ 6 の 6 点の Z 方向変位に対応する成分のみで構成された 6 行 6 列の正方行列は正則となっており，この 6 点の変位を同一量に拘束すれば，自由度が 1 のメカニズムが得られる．

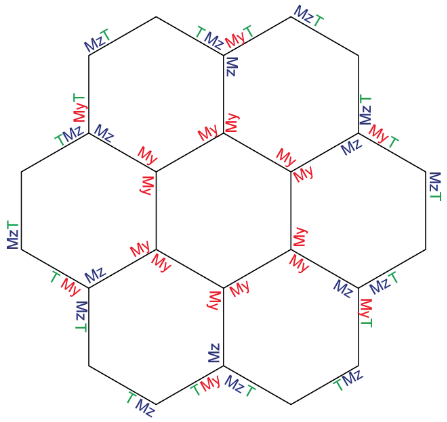


図 4　大変形メカニズムの解放条件

変形の過程を図 5 に示す．静定構造とはなっていないが，変形の過程において全部材に断面力は発生していないことを確認した．また，変形途中にランクが変わり不安定次数が増えることで分岐モードが生じる可能性も考えられるが, 本事例ではそのような現象は生じていない．なお，変形後の曲面屋根構造は，境界支持部や解放箇所を固定することにより安定化することができる．

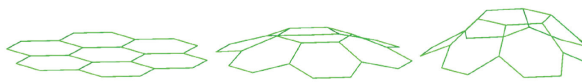


図 5　変形過程

4. 2　収納機構

前節と同じ節点数，部材数及び部材長を有する六角形格子モデルを用いて，中央の節点 1 ~ 6 に Z 軸負の方向に強制変位を与えた際に，周辺の節点が Z 軸正の方向に持ち上がるメカニズムを検討する．節点 7, 10, 13, 16, 19, 22 を高さ 18 m の柱で支持する．さらに，中央の 6 節点の X, Y 軸方向変位を固定する．なお，境界支持部は，六角形格子骨組の中心と支持点を結ぶ方向に垂直な水平軸まわりのモーメントを解放して 1 軸回転ヒンジとする．持ち上がった周辺の節点が中央の 6 節点を通る鉛直線上で重なり合うように, 強制変位は Z 軸方向に– 5.1 m とする．

また，このモデルでは仮設構造を想定し，仕上げ材としての膜材の追従性について確認する．膜のひずみについて検討するために，厚さ 200 μm の ETFE フィルム膜を想定する．ETFE フィルムは耐久性，透光性，軽量性に優れた材料で，近年，海外では建築膜材料としてスポーツ施設や植物園等に採用されている．ここで，ヤング係数は 600 N/mm^2，ポアソン比は 0.4 とし，六角形を頂点のみで接合された 6 枚の正三角形の膜に分割する．

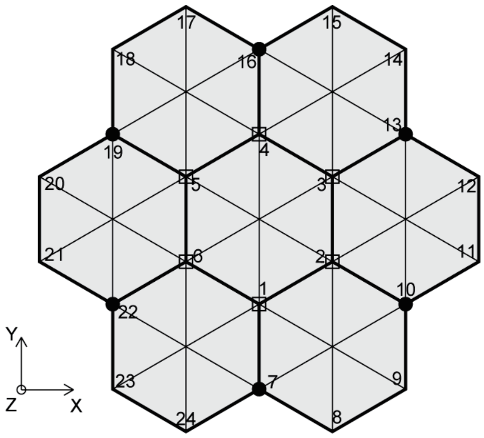


図 6　六角形格子モデル

前節と同様の節点に強制変位を与えるため，図 3 に示す解放条件を用いる．これより得られるメカニズムは微小変形のメカニズムであるので，大変形解析を行い，解放箇所を追加して不静定次数を減少させていく．なお，部材はすべて板厚 19 mm，幅 250 mm の鋼板とし，格子部材の弱軸は平面内，柱の弱軸は格子の中心に向かう方向に垂直な方向とする．

図 7 は My を 18 箇所，Mz を 6 箇所，T を 6 箇所解放し解放総数を 30 とした解放条件である．安定性の評価から，この構造は 3 次不安定，27 次不静定である．不静定次数が大きいと材端断面力が発生することが予想されるため，前節の屋根モデルでは，解放個数を増やしていき，できる限り静定構造に近づくようにした．しかし，収納機構の場合，解放総数が多くなると周辺の節点が持ち上がらなくなり，要求する形状へと変形しなくなるため，図 7 に示す解放条件が適当な解放総数であると判断した．

この解放条件による変形の過程を図 8 に示す．周辺の節点が持ち上がった際に中央の 6 個の節点とほぼ同じ XY 座標位置で重なり合い，Z 軸に関して回転対象に変形する立体機構を実現した．

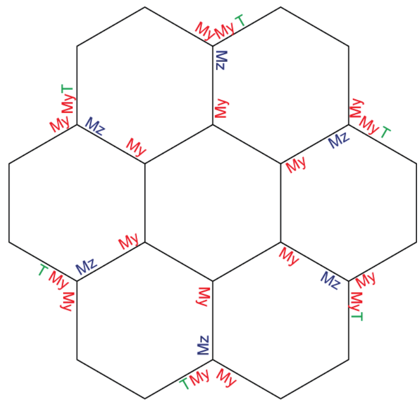


図 7　大変形メカニズムの解放条件

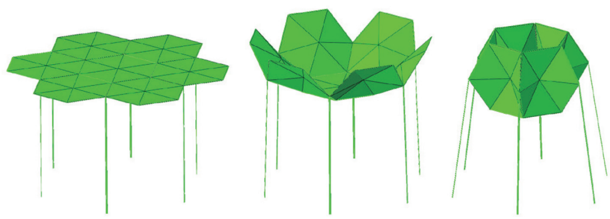


図 8　変形過程

対称性より，中心点から同じ距離に位置する節点同士は，変形過程において常に同一水平面内にあり，それぞれの節点間距離は均一に縮まっていく．図 9 に変形の過程における隣り合う境界支持点間の距離の変化を示す．ここで，横軸は中央の 6 節点の Z 軸方向変位である．これより，支点間は離れることなく変形するため，膜には弛む変形は生じても破断は生じないものと考えられる．

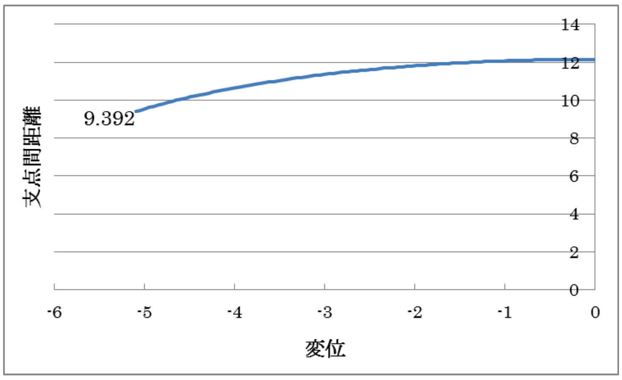


図 9　支点間距離の変化

図 10 に変形後の状態で最大及び最小の主ひずみを発生した膜要素の中心位置の主ひずみの変化を示す．ETFE フィルムの剛性変化点（折れ点）は 2 つ存在するが，ひずみの第 1 折れ点は 2~3%であり，発生した主ひずみはこれより十分に小さい値であることがわかる．最大の主ひずみは節点 23, 24 で接合された膜要素，最小の主ひずみは節点 8, 9 で接合された膜要素で発生した．

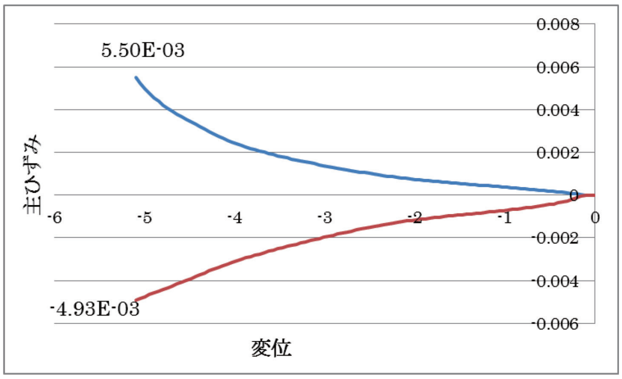


図 10　主ひずみの変化

なお，上記の収納機構は線材による幾何学的非線形解析で得られた大変形メカニズムに基づいており，実際に制作する際には，収納した際の部材の重なりや，形態変化を実現するための接合部等を検討する必要がある．

5 結論

以下に，本研究で得られた成果を示す．

1) 部材端モーメントを部分的に解放した骨組の安定性と微小変形メカニズムを，釣合い行列に拘束解放条件式を加えて拡張した行列の特異値分解によって求める方法を提案した．
2) 極限解析を用いて，メカニズムとなるために必要なモーメント解放箇所を導出する方法を提案した．さらに，極限解析で求めた微小変形メカニズムを基準に大変形解析を行い，材端モーメントの大きな箇所を逐次解放する手法により大変形メカニズムとなる解放条件を得た．
3) 六角形格子構造において，平面骨組から曲面屋根構造へと形態変化が可能となるモーメント解放条件を求めた．静定構造は得られなかったが，それに近い構造で変形後のすべての材端力が 0 となることを確認した．
4) 上記 3)と同様のモデルで，拘束条件や強制変位を変えて，平面的な広がりを持つ膜構造を立体的に折りたたむ収納機構を提案した．形態変化による膜のひずみは十分に小さい値であることを確認した．

参考文献

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，Vol. 73，No. 729，pp. 659-665, 2007.
2) Y. Akgüna, C.J. Gantes, W. Sobekd, K. Korkmaza and K. Kalochairetis: A novel adaptive spatial scissor-hinge structural mechanism for convertible roofs, Eng. Struct., Vol. 33, pp.1365-1376, 2011.
3) 半谷裕彦，川口健一：不安定リンク構造の形状決定解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 381 号, pp.56- 60, 1987.11.
4) 川口健一，那花謙二，半谷裕彦：骨組み構造の畳み込み解析，日本建築学会構造系論文集　第 498 号, 99-104, 1997.8.
5) 田中尚，半谷裕彦：不安定トラスの剛体変位と安定化条件, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 356 号, pp. 35-43, 1985.10.
6) 近藤慎輔, 川口健一：シザーズ型展開構造物の単層ラチスドームへの適用に関する研究, 生産研究, Vol. 52, No. 4, pp.197-200, 2000.
7) 川口衛:構造と感性―Ⅲ　つくり方をデザインする，法政大学建築学科同窓会，2008.
8) 三宗司郎：可動建築の予感，建築雑誌，Vol. 110, No. 1368, 1995 年 2 月号.
9) S. Pellegrino: Structural computations with the singular value decomposition of the equilibrium matrix, Int. J. Solids Structures, Vol.30, No.21, pp.3025-3035, 1993.
10) A.S.K. Kwan and S. Pellegrino: Matrix formulation of macro-elements for deployable structures, Computers & Structures, Vol.50, No.2, pp.237-254, 1994.
11) 川口健一：一般逆行列と構造工学への応用，コロナ社，2011.
12) M. Ohsaki and S. Fujita: Multiobjective shape optimization of latticed shells for elastic stiffness and uniform member lengths, Proc. ALGODE 2011, 2011.
13) M. Ohsaki, N. Ashiya, S. Matsumoto and S. Fujita: Stability of latticed shell with uniform-length hexagonal grid, Paper No. P-0221, Proc. IABSE-IASS Symposium, 2011.
14) P. E. Gill, W. Murray and M.A. Saunders: SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization, SIAM J. on Opt., Vol. 12, pp.979-1006, 2002.
15) MATLAB Ver.7.7 User's Guide, MathWorks, 2010.
16) ABAQUS Ver. 6.10.3 Documentation, SIMULIA, 2011.

建築構造物のライフサイクルデザイン手法の構築に関する研究
- 実構造物への適用 -

○徐 澎[1)]，吉田 英樹[2)]，平田 裕一[3)]，大森 博司[4)]
1)名古屋大学大学院環境学研究科都市環境学専攻M1，xu@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp
2)株式会社ディー・エヌ・エー 修士（工学）
3)三井住友建設（株）技術開発センター
4)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

本稿の目的は，遺伝的アルゴリズムを用いた建築構造物のライフサイクル最適化手法[1]を，設計支援ツールとして多くの設計現場で利用されるために，その足掛かりとして既存の建築構造物を対象モデルとした解析を行うことである。

2　ライフサイクルデザイン手法の実構造物への適用

本章の目的は，建築構造物のライフサイクルデザイン手法を既存の集合住宅を解析モデルとして最適化計算を行い，実構造物へ適用可能なツールとしての向上を目指すとともに，その利用法の検討を行うことである。

2.1　問題領域

2.1.1　問題領域の選定

本稿では，実在する集合住宅をモデル化して最適化問題の検討対象とする。その平面図を図 1 に示す。モデル物件は実際には 10 階建の集合住宅であり，1 階がエントランス階， 2 〜 8 階が同一の平面計画を有する各階 5 戸の住居階，9 〜 10 階が同一の平面計画を有する各階 4 戸の住居階となっている。このうち，本稿で解析対象とする範囲は 2 〜 10 階の住戸専有部とする。

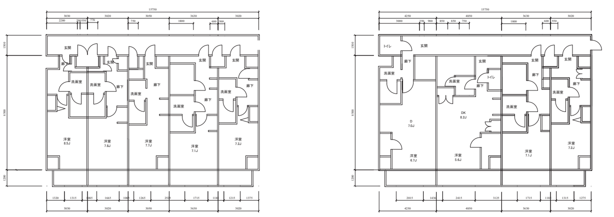


図1　問題領域

2.2　単一目的 LCC 最適化

2.2.1　概要

評価対象期間を50 〜 70 年を 1 年刻みとした計 21 ケースとし，各評価対象期間に対して単一目的ライフサイクルコスト最適化を行い，各評価対象期間で得られた最適解の設計内容を統計処理することで評価対象期間による影響を軽減した俯瞰的な評価を目指す。

表 1に計算に用いた GA パラメータを示す。

表 1　パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

2.2.2　統計結果

表 2より，ほぼ全ての部材において被選択率が 100 % となっており，同一の材料が選択されていることがわかる。躯体や床仕上げなど，一部の部材の被選択率が低いことに関しては，同一の部材に対する選択肢として原単位コードおよび体積の等しい物が存在しており，どちらを選択しても等しいコストが算出されるため，最適解としてどちらも選ばれ得る状況となっていることが原因である。

2.3　単一目的 LCCO$_2$ 最適化

2.3.1　概要

評価対象期間を50 〜 70 年を 1 年刻みとした計 21 ケースとし,，各評価対象期間に対して単一目的ライフサイクル CO$_2$ 最適化を行い，各評価対象期間で得られた最適解の設計内容を統計処理することで評価対象期間による影響を軽減した俯瞰的な評価を目指す。

表 1に計算に用いた GA パラメータを示す。

2.3.2　統計結果

表 3より，こちらも LCC 最適化の場合と同様に躯体の被選択率が他と比較して低い値を記録している。こ

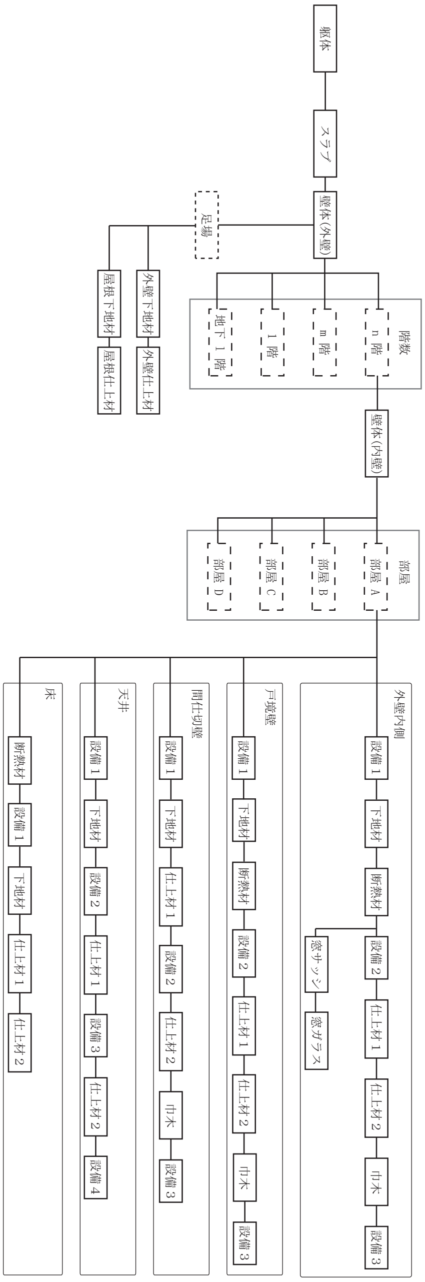


図2　実構造物を想定した構法的序列

の設計内容を見ると，半分以上の部材が表 2と同一の内容となっていることがわかる。このことから，どのような点がコスト最小化解と CO_2 最小化解の間で異なるのかという点について考察を深める必要がある。この点を検証するためにも，第 2.4.1節でコストと CO_2 の二目的最適化を行い，Pareto 解の両端の設計内容を比較し，どういった点が各評価値に影響を及ぼしているか考察を行う。

表 2　LCC 最小化解統計後設計内容

Part/Room	部位名	部材	選択部材	被選択率(%)
1 / -	躯体	構法	在来・両方向ラーメン＋非免震	52
	スラブ	構法	RC 造スラブ	100
	屋根	屋根下地材	露出アスファルト防水	100
		屋根仕上材	仕上塗装	100
	外壁	壁体	CON 躯体	100
	足場	足場	足場	100
	外壁	外壁仕上材	石貼	100
2-8 Floor / -	内壁	壁体	CON 躯体	100
2-8 Floor / 1	外壁内側	下地材	断熱 + GL	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
		窓サッシ	スチール製建具	100
		窓	窓ガラス	100
	戸境壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	間仕切壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	天井	下地材	プラスターボード	100
		仕上材 1	化粧ボード	100
	床	下地材	CON 下地	100
		仕上材 1	タイル貼	48
9-10 Floor / -	内壁	壁体	CON 躯体	100
9-10 Floor / 1	外壁内側	下地材	断熱 + GL	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
		窓サッシ	スチール製建具	100
		窓	窓ガラス	100
	戸境壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	間仕切壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	天井	下地材	プラスターボード	100
		仕上材 1	化粧ボード	100
	床	下地材	CON 下地	100
		仕上材 1	タイル貼	48

表 3　$LCCO_2$ 最小化解統計後設計内容

Part/Room	部位名	部材	選択部材	被選択率(%)
1 / -	躯体	構法	工業化・両方向ラーメン＋非免震	52
	スラブ	構法	RC 造スラブ	100
	屋根	屋根下地材	露出アスファルト防水	100
		屋根仕上材	仕上塗装	100
	外壁	壁体	CON 躯体	100
	足場	足場	足場	100
	外壁	外壁仕上材	石貼	100
2-8 Floor / -	内壁	壁体	CON 躯体	100
2-8 Floor / 1	外壁内側	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
		窓サッシ	ステンレス製建具	100
		窓	窓ガラス	100
	戸境壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	間仕切壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	天井	下地材	プラスターボード	100
		仕上材 1	化粧ボード	100
	床	下地材	CON 下地	100
		仕上材 1	塩ビシート	100
9-10 Floor / -	内壁	壁体	CON 躯体	100
9-10 Floor / 1	外壁内側	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
		窓サッシ	ステンレス製建具	100
		窓	窓ガラス	100
	戸境壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	間仕切壁	下地材	木軸	100
		仕上材 1	プラスターボード	100
		仕上材 2	ビニルクロス	100
	天井	下地材	プラスターボード	100
		仕上材 1	化粧ボード	100
	床	下地材	CON 下地	95
		仕上材 1	塩ビシート	100

2.4　二目的ライフサイクル最適化

2.4.1　概要

評価対象期間を 70 年とし，ライフサイクルコストおよびライフサイクル CO_2 の二目的ライフサイクル最適化を行う。

ここでは，第 2.2節，第 2.3節で得られた各指標の最適解の設計内容に一部の違いのみが生じていたことを受け，Pareto 解集合としてどのような差を持った個体が非劣解として選択されているかを把握する。また，

それにより得られた解集合を用いた実設計を想定した提案手法についても考察する。

表 4に計算に用いたパラメータを示す。

表 4 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	1000
Probability of Crossover	0.80
Probability of Mutation	0.01

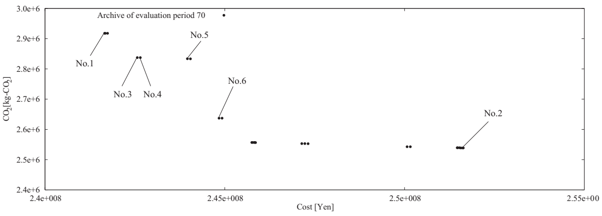


図3 Pareto 解集合（評価対象期間 70 年）

両端に位置している解（No.1，No.2） 表 5に，解 No.1，No.2 の設計内容を示す。

Pareto 解集合のうち，LCC の最小値を持つ解と $LCCO_2$ の最小値の比較であるが，各部材における修繕周期には大きな差異は見受けられず，選択材料に変化が見られる。各フロアにおける外壁内側の下地材，床仕上げ材が異なり，それぞれ材料単価の小さな材料，CO_2 排出原単位の小さな材料がそれぞれ選択されていることがわかる。この差により，LCC には約 1 千万円，$LCCO_2$ には約 400,000kg-CO_2 の差が生まれている。

このことから，躯体や壁体のような，修繕周期が比較的長く建築構造物のライフサイクル中に修繕が行われにくい部材だけでなく，構法的序列における下地材より下位の部材は修繕周期が短く，数回の修繕を必要とするためにライフサイクル全体で見た場合にはこれらの部材にどのような材料を採用するかという問題は重要なものであるといえる。

LCC・$LCCO_2$ ともに非常に近距離に位置している解（No.3, No.4） 表 6に，解 No.3，No.4 の設計内容を示す。

Pareto 解集合のうち，最も近接している解の組合せの一つであるこの二つの解についてその差異を考察する。これら二つの解のうち，差異が生じているのは各フロアの窓サッシの選択材料のみである。他の差異としては一部の修繕周期に差があるように見受けられるが，これらは実際には修繕シナリオ上では修繕回数は変化していないため，ごく小さな差が生じるのみである。したがって，この二つの解に生じている差の大きな原因となっている部分は窓サッシの選択材料であると判断でき，ステンレスとスチールの差によって LCC の若干低い解と $LCCO_2$ の若干低い解として両者ともに互いに非劣解として存在したと考えられる。

非常に細かな点ではあるが，この場合の窓サッシのような一部の部材のみを対象として，どのような材料を用いるとどのような結果が得られるかといった問題にも対応できるということがこの比較によって示されている。

3 結

本研究では，実構造物のモデルとして実在の集合住宅を採用し，その中でも住戸専有部を中心としたモデル化を行い，その空間内での単一目的ライフサイクルコスト最小化，単一目的ライフサイクル CO_2 最小化およびライフサイクルコストとライフサイクル CO_2 の二目的ライフサイクル最適化を行った。住戸専有部を中心としたモデル化は，意匠的な制約条件等の定量化の困難な条件による影響の比較的小さな範囲を解析対象とすべきだという判断のもとで設定された。

単一目的最適化による各解析結果より，設計内容の差は主に選択材料の差であることが判明し，二目的最適化によって Pareto 解集合の各解の設計内容の差も選択材料の違いが主となっていることが示された。本解析結果より，実設計の提案ツールとしての利用法を想定した場合には，選択材料の組合せを修繕周期の組合せより優先的に提案すべきであると考えられる。

建築物のライフサイクルデザイン手法における今後の展望としては，設計支援ツールとしての実用化，設備機器の考慮，原単位などのデータベースの整備，修繕見積もりの考慮や修繕効率性の考慮などといった実際の運用を想定した計算手法の構築が挙げられる。

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，No.601，pp181–188，2006.
2）建物の LCA 指針 環境適合設計・環境ラベリング・環境会計への応用に向けて. 日本建築学会，2003.

表 5　アーカイブ設計内容（No.1, No.2）

Part/Room	部位名	部材	No.1 選択部材	修繕周期	No.2 選択部材	修繕周期
1 / なし	躯体	構法	**在来・両方向ラーメン＋非免震**	**70**	**工業化・両方向ラーメン＋非免震**	**70**
	スラブ	構法	RC 造スラブ	70	RC 造スラブ	70
	屋根	屋根下地材	露出アスファルト防水	17	露出アスファルト防水	17
		屋根仕上材	仕上塗装	17	仕上塗装	17
	外壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
	足場	足場	足場	17	足場	17
	外壁	外壁仕上材	石貼	17	石貼	17
2-8 Floor / なし	内壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
2-8 Floor / 1	外壁内側	下地材	**断熱 ＋ GL**	**29**	**木軸**	**27**
		仕上材 1	プラスターボード	15	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	15	ビニルクロス	16
		窓サッシ	**スチール製建具**	**15**	**ステンレス製建具**	**16**
		窓	窓ガラス	15	窓ガラス	16
	戸境壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	間仕切壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	天井	下地材	プラスターボード	24	プラスターボード	24
		仕上材 1	化粧ボード	24	化粧ボード	24
	床	下地材	CON 下地	70	CON 下地	70
		仕上材 1	**シートフローリング**	**24**	**塩ビシート**	**14**
9-10 Floor / なし	内壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
9-10 Floor / 1	外壁内側	下地材	**断熱 ＋ GL**	**28**	**木軸**	**27**
		仕上材 1	プラスターボード	15	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	15	ビニルクロス	16
		窓サッシ	**スチール製建具**	**15**	**ステンレス製建具**	**16**
		窓	窓ガラス	15	窓ガラス	16
	戸境壁	下地材	木軸	25	木軸	26
		仕上材 1	プラスターボード	20	プラスターボード	18
		仕上材 2	ビニルクロス	20	ビニルクロス	18
	間仕切壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	天井	下地材	プラスターボード	24	プラスターボード	24
		仕上材 1	化粧ボード	24	化粧ボード	24
	床	下地材	CON 下地	24	CON 下地	70
		仕上材 1	**シートフローリング**	**24**	**塩ビシート**	**12**
		LCC（Yen）	241,657,000		251,635,000	
		$LCCO_2$（$kg\text{-}CO_2$）	2,917,710		2,538,640	

表 6　アーカイブ設計内容（No.3, No.4）

Part/Room	部位名	部材	No.3 選択部材	修繕周期	No.4 選択部材	修繕周期
1 / なし	躯体	構法	在来・両方向ラーメン＋非免震	70	在来・両方向ラーメン＋非免震	70
	スラブ	構法	RC 造スラブ	70	RC 造スラブ	70
	屋根	屋根下地材	露出アスファルト防水	17	露出アスファルト防水	17
		屋根仕上材	仕上塗装	17	仕上塗装	17
	外壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
	足場	足場	足場	17	足場	17
	外壁	外壁仕上材	石貼	17	石貼	17
2-8 Floor / なし	内壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
2-8 Floor / 1	外壁内側	下地材	断熱 ＋ GL	29	断熱 ＋ GL	30
		仕上材 1	プラスターボード	15	プラスターボード	15
		仕上材 2	ビニルクロス	15	ビニルクロス	15
		窓サッシ	**スチール製建具**	**15**	**ステンレス製建具**	**15**
		窓	窓ガラス	15	窓ガラス	15
	戸境壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	間仕切壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	天井	下地材	プラスターボード	24	プラスターボード	24
		仕上材 1	化粧ボード	24	化粧ボード	24
	床	下地材	CON 下地	70	CON 下地	70
		仕上材 1	シートフローリング	24	シートフローリング	24
9-10 Floor / なし	内壁	壁体	CON 躯体	70	CON 躯体	70
9-10 Floor / 1	外壁内側	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
		窓サッシ	**スチール製建具**	**16**	**ステンレス製建具**	**16**
		窓	窓ガラス	16	窓ガラス	16
	戸境壁	下地材	木軸	25	木軸	25
		仕上材 1	プラスターボード	20	プラスターボード	20
		仕上材 2	ビニルクロス	20	ビニルクロス	20
	間仕切壁	下地材	木軸	27	木軸	27
		仕上材 1	プラスターボード	16	プラスターボード	16
		仕上材 2	ビニルクロス	16	ビニルクロス	16
	天井	下地材	プラスターボード	24	プラスターボード	24
		仕上材 1	化粧ボード	24	化粧ボード	24
	床	下地材	CON 下地	70	CON 下地	70
		仕上材 1	シートフローリング	24	シートフローリング	24
		LCC（Yen）	242,569,000		242,652,000	
		$LCCO_2$（$kg\text{-}CO_2$）	2,837,370		2,837,300	

熱可塑性樹脂の伸び変形と曲げ剛性を利用したシェルの形状決定法に関する研究

吉中進 [1)]，谷口与史也 [2)]，渡邊祥 [3)]，三宅真彦 [4)]
1) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻，准教授，工博，yoshinaka@arch.eng.osaka-cu.ac.jp
2) 大阪市立大学大学院工学研究科都市系専攻，教授，工博
3) 株式会社安井建築設計事務所
4) 京都大学大学院工学研究科建築学専攻　大学院生

1．はじめに

実験的手法によるシェルの形状決定法として，Heinz Isler による懸垂曲面を用いた手法が有名である。Isler は伸び剛性のみを有する布を用いて懸垂曲面を作成し，RC 造のシェルにおいて理想的な応力状態である自重下で純圧縮応力状態となるシェルの形状を決定し，多数の美しいシェルを建設した [1)]。それに対して，本論文で提案する手法により得られた形状は，曲げが小さく，応力分布のばらつきと最大応力値が小さいことを特徴とするが，熱可塑性樹脂の持つ伸び変形に加えて曲げ剛性も有効に用いることによって，構成材料に汎用性があり力学性状に優れ，且つ曲面が滑らかで意匠的にも優れたシェルの形状決定への適用を目指すものである。

熱可塑性樹脂を用いた曲げモーメントが小さいシェルの形状決定に関する既往の研究としては，O.Andres らによる研究 [2), 3)]があるが，本研究では，設定温度を実験パラメータとして選択して最適なパラメータを求めるとともに，吊り下げ実験における支点反力に着目し，反力の方向や大きさの比率を調整することで，さらに力学性状に優れ，適用範囲の広い手法を提案する。さらに，H.Isler の手法により得られた形状と本論文の手法により得られた形状を関数曲面で近似し，形状と応力の関係に関して比較考察を行う。

2．実験方法

試験材料は，ポリメチルメタクリレート（PMMA）（以降の本論文中ではアクリル樹脂と記載）を用いた。製品名は，旭化成テクノプラス株式会社製のデラグラス A である。プラスチック材料の耐熱変形性を表す荷重たわみ温度は 100℃，ビカット軟化温度は 103℃である。以下に本実験の手順をまとめる。

Step1 : 荷重パッドを載せたアクリル平板を加熱装置内に設置する。支点の位置には紐が取り付けられている。（写真１参照）

Step2 : アクリル平板に取り付けられた紐が滑車を介して吊り下げられた錘と釣り合うように錘の重さを調整する。

Step3 : 設定温度までゆっくりとアクリル板を加熱させ，アクリル板の変形を確認する（写真２参照）。

Step4 : 加熱を止めて装置内の温度が低下したことを確認し，モデルを装置から取り出す（写真３参照）。

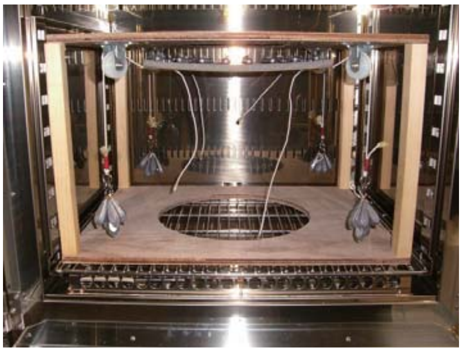


写真１　加熱前の状況

写真２　加熱後の状況

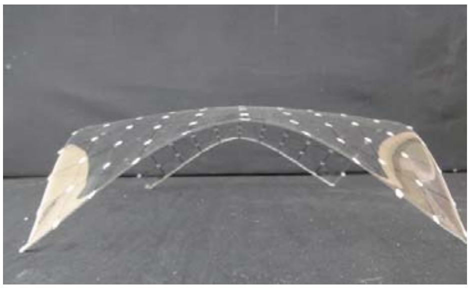


写真３　作成モデル（正方形板四点支持）の例

図１に 90℃まで加熱したときのアクリル板の表面温度と，アクリル板中央部と端部の歪みの関係の例を示す。

載荷荷重は一定であるが，温度の上昇に伴いアクリル樹脂の剛性が低下し，歪みが大きくなる。80℃付近から端部の歪みが大きくなり，温度を低下しても残留歪みが残るため形状が平板から曲面板へと変化する。

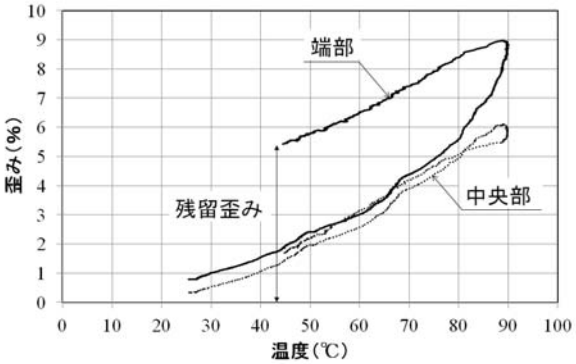


図１　温度と歪みの関係

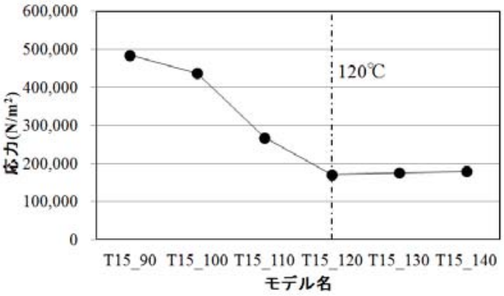
３．設定温度による形状と応力の比較

加熱装置の設定温度をパラメータとし，形状と応力に関して考察する。アクリル板の厚さと荷重の大きさの影響については既往の研究[4)]で述べた。板の厚さは1.5mm，平面形状は300×300mmの正方形，加熱装置内の温度は90℃から140℃まで10℃刻みで変化させた。実験の結果得られたモデルのスパンとライズ，ライズスパン比を表１に示す。モデルの名称は，T（厚さ mm）_（温度℃）で表している。温度が 120℃付近で形状がほぼ一定値に収束していることが分かる。

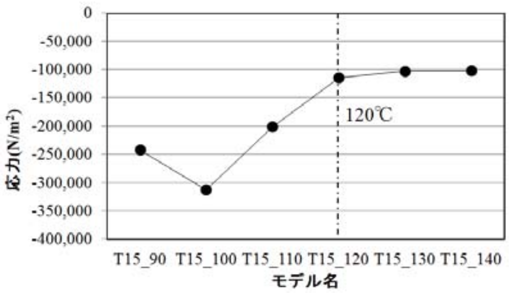
表１　モデル形状

モデル名	スパン（mm）	ライズ（mm）	ライズ スパン比
T15_90	294.2	30.75	0.105
T15_100	270.5	69.43	0.257
T15_110	252.7	84.30	0.334
T15_120	248.5	91.30	0.367
T15_130	251.2	91.30	0.363
T15_140	248.1	92.93	0.375

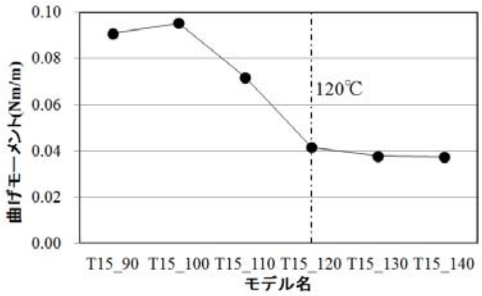
各モデルにおける吊り下げ時の主応力と曲げモーメントの最大値の変化を図２に示す。アクリルの材料物性値は，ヤング係数2,500MPa，ポアソン比0.4を用いた。単位面積あたりの荷重の大きさは，既往の研究[2)]を参考として 49.0N/m^{2}とした。モデル形状と同様に120℃付近で応力がほぼ一定となる。これは約 120℃でアクリル樹脂のヤング係数がほぼ一定値に収束するためである。引張試験片（応力度0.327N/mm^2）を用いた温度とヤング係数に関する試験結果を図３に示す。図２(c)に示すように本手法では 120℃を超えても曲げモーメントは小さくなるが 0 にはならない。これは H.Isler が用いた布と異なり，温度を上げても曲げ剛性が 0 にならないためである。以降では，加熱温度として 120℃を用いる。



(a) 最大主応力の変化



(b) 最小主応力の変化



(c) 最大曲げモーメントの変化

図２　主応力と曲げモーメントの変化

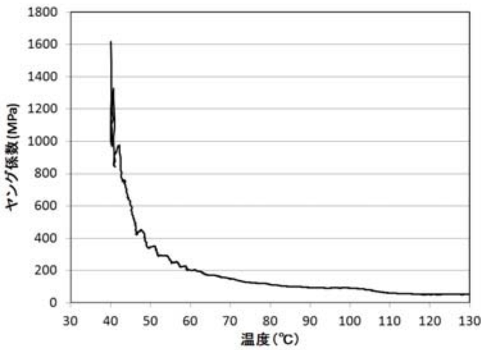


図３　温度の上昇によるヤング係数の変化

４．支点反力の操作

前章では，加熱時におけるアクリル板の支点反力の向きを鉛直方向とし，各支点の錘の重さは同じとした。本

章では，支点反力の向きと大きさを操作した実験を行う。

４．１　支点反力の角度の操作

図４に滑車の位置を動かすことによる支点反力の角度の操作方法を示す。前章の実験では，アクリル板の支点の真上に滑車が存在するため設定角度αが0度であった。本節では，滑車の位置をアクリル板の外側に移動することで，アクリル板にあらかじめ面内張力を導入する実験結果を述べる。その他の試験条件は，前章と同じである。

表２に設定角度αと実験で得られたモデルの形状を示す。表１のT15_120モデルと比較すると，設定角度が大きいほどライズスパン比が小さくなることが分かる。

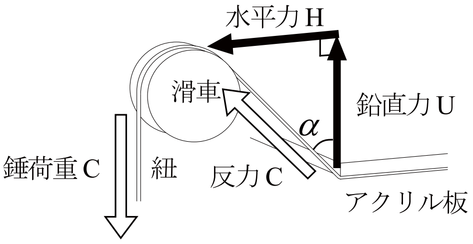


図４　支点反力角度の操作方法

表２　モデル形状

モデル名	設定角度 α	スパン (mm)	ライズ (mm)	ライズスパン比
H1_T15_120	25.7度	261.5	81.85	0.313
H2_T15_120	41.3度	272.7	68.93	0.253

図５に試験で得られたアクリルモデルの形状の寸法を100倍とし，普通コンクリートFc24の材料定数を用いて解析したときの自重時における最大主応力と最小主応力の大きさを比較する。図中の括弧内はライズスパン比を示す。比較対象は，表１のT15モデルにおけるライズスパン比が近いモデル，及び加熱温度が同じモデルとした。

図に示すようにアクリル板にあらかじめ面内張力を導入することにより，自重下で主応力の小さい形状を作成することが出来る。

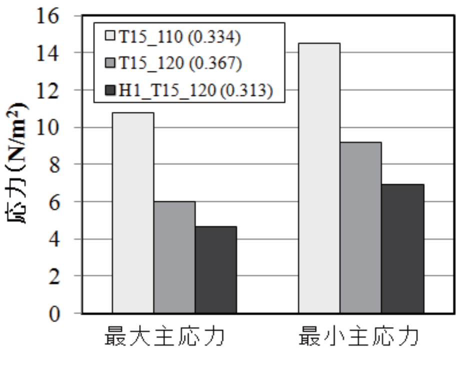
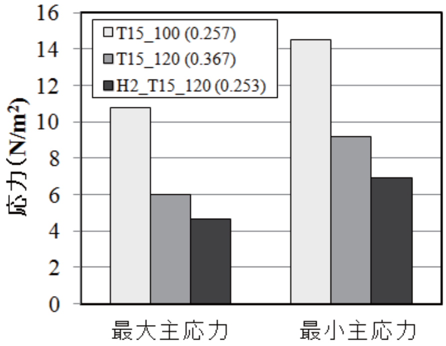


図５　(a) H1_T15_120モデル



(b) H2_T15_120モデル

図５　主応力の大きさの比較

この理由を以下に考察する。アクリル板に面内張力を導入することにより，導入しない場合と比較して，加熱の過程で面外剛性が大きく低下し，主に面内力で荷重を支持する形状へと変化する。その結果，得られたモデルの形状における曲げモーメントが減少することによりシェル表面の主応力が減少したのではないかと考えられる。

４．２　支点反力の大きさの操作

前節までに述べた実験は，全て正方形平板の四隅に同じ大きさの錘を吊り下げたものである。本節では支点反力の設定角度αは0度のままとし，大きさの比率を変えた実験の結果を述べる。正方形の四隅（時計回りにA点～D点）に吊り下げた錘の荷重，比率と，得られたモデルの形状を測定して応力解析の結果得られた支点反力の比率を表３と表４に示す。

表３　反力操作実験　その１

モデル名	C1_T15_120			
支点の位置	A	B	C	D
錘荷重	150g	200g	150g	200g
錘荷重比率	3	4	3	4
解析から得られた反力の比率	3.0	4.03	3.0	4.03

表４　反力操作実験　その２

モデル名	C2_T15_120			
支点の位置	A	B	C	D
錘荷重	150g	200g	100g	250g
錘荷重比率	3	4	2	5
解析から得られた反力の比率	2.71	2.91	2.0	3.51

表３に示すように，支点反力が対称性を有する実験から作成されたC1モデルは，得られたモデルの解析結果と反力の比率が良い一致を示した。一方，表４に示すように支点反力が対称でない実験から作成されたC2モデルは，得られたモデルの解析結果の反力の比率と精度は良くないが，大きさの関係は保たれている。精度が落ちた理由として，吊り下げた錘の荷重が対称でないため初

期状態でアクリル平板を水平に保つことが出来なかったこと，滑車と紐の摩擦の影響などが考えられる。

以上までに述べたように，本手法では支点反力の向きと大きさが操作可能であることが確認できた。

5．H. Isler の手法との比較

本章では，代表的なシェルの形状決定法である H.Isler による吊り下げ実験と本論文の実験を比較考察する。

5．１　実験方法の比較

（1）H.Isler による吊り下げ実験

H.Isler は，引張力のみ伝達可能な布を用いることで，自重下で圧縮力のみ生じるシェルの形状を決定した。写真４と写真５に布（ガーゼ）と石膏を用いた形状作成の様子を示す。布に石膏をムラなく塗りつけ，布にしわが生じないように留意しながら，木枠に吊り下げて曲面を作成する。石膏の重量によって布が伸縮するため，表面にしわが生じやすく，これを取り除いて滑らかな曲面を作成するためには数回の試行錯誤が必要となる。

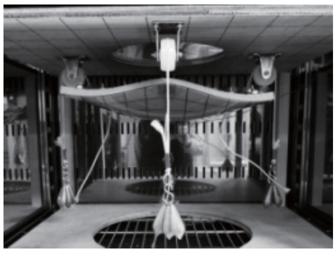
写真４　石膏を布に塗りつける

写真５　吊り下げて曲面を作成する

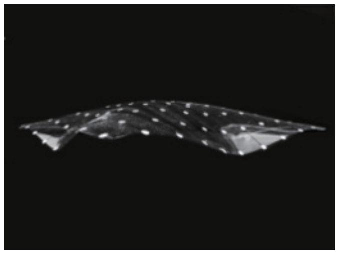
（2）アクリル板を用いた吊り下げ実験

前述のように，本実験は熱可塑性樹脂であるアクリル平板に荷重パッドを載せ，加熱させて変形させ，残留変形により曲面を作成する。そのためアクリル板を吊り下げた状態で応力が大きい箇所の変形量が大きくなる。アクリル樹脂には引張剛性のみでなく，圧縮剛性と曲げ剛性も存在する。そのため，逆転させたとき H.Isler の手法のように純圧縮応力状態とはならないが，様々な初期形状や境界条件，さらに前章で述べたような支点反力の設定下において，曲げの少ない滑らかな曲面を試行錯誤せずに安定的に作成することが可能である利点を有する。

写真６は正方形のアクリル板の四辺中央部を支点として作成したモデルの例である。写真７は六角形の六隅を支点とした実験の様子と，正方形のアクリル板の中央に円形の開口を設けて四隅を支点としたモデルの作成例である。



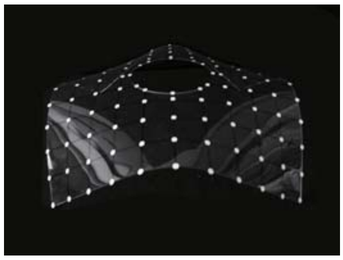
(a) 実験状況



(b) モデルの写真

写真６　正方形板四辺中央部四点支持

(a) 六角形モデルの実験状況



(b) 開口のあるモデル

写真７　様々なモデルの作成例

5．２　形状の比較

２種類の実験で得られたモデルの形状を比較考察するために，実験で得られたモデルを数学的に関数近似することを試みる。対象モデルは正方形の四隅を支持点とするモデルとした。関数の予測は，HULINKS 社のサーフェイスフィッティング汎用ソフトウェア TableCurve3D を用い，最小二乗法により関数の各係数を決定した。初期形状，境界条件，荷重条件が対称であることから，関数は偶関数のみ選択した。解析により得られた関数の候補を以下の①式～④式に示す。原点は中央で Z 軸が高さ方向である。各関数の係数を表５に示す。表６に各関数曲面と実験で得られたモデルの誤差をまとめた。表６に示すように，関数としては③式が最も精度が高い。

$$①\ z(x,y)=\{a+b(x^2+y^2)\}/\{1+c(x^2+y^2)\}$$

$$②\ z(x,y)=ax^2y^2+b(x^2+y^2)+c$$

$$③\ z(x,y)=ax^2y^2+b(x^4+y^4)+c(x^2+y^2)+d$$

$$④\ z(x,y)=a+(bx^2+c)\cos\frac{y}{100}+(by^2+c)\cos\frac{x}{100}$$

表５　関数の係数

実験方法	式	係数			
		a	b	c	d
H. Isler	①	95.1	-2.37×10^{-3}	1.29×10^{-5}	
	②	8.26×10^{-8}	-3.15×10^{-3}	94.4	
	③	8.49×10^{-8}	-1.90×10^{-8}	-2.88×10^{-3}	93.4
	④	-7.29	-9.07×10^{-4}	51.4	
アクリル	①	96.3	-3.03×10^{-3}	-2.36×10^{-5}	
	②	-2.81×10^{-7}	-8.54×10^{-4}	96.9	
	③	-2.70×10^{-7}	1.18×10^{-8}	-1.13×10^{-3}	98.2
	④	-79.0	2.82×10^{-3}	89.9	

表６　各関数の近似精度

実験方法	式	二乗和(mm^2)	平均残差(mm)
H.Isler	①	755.2	±2.50
	②	451.3	±1.93
	③	430.2	±1.89
	④	544.6	±2.12
アクリル	①	7848.3	±8.05
	②	369.9	±1.75
	③	327.7	±1.65
	④	520.3	±2.07

H.Isler モデルとアクリルモデルの③式における関数の重ね合わせの様子を図６と図７に示す。両モデルともに③式中の $b(x^4+y^4)$ の成分は小さく，ほぼ ax^2y^2 と $c(x^2+y^2)$ の和で曲面が構成されている。H.Isler モデルは $c(x^2+y^2)$ の２次曲面に近いが，アクリルモデルは ax^2y^2 の４次曲面で特徴付けられる形になっていることが分かる。

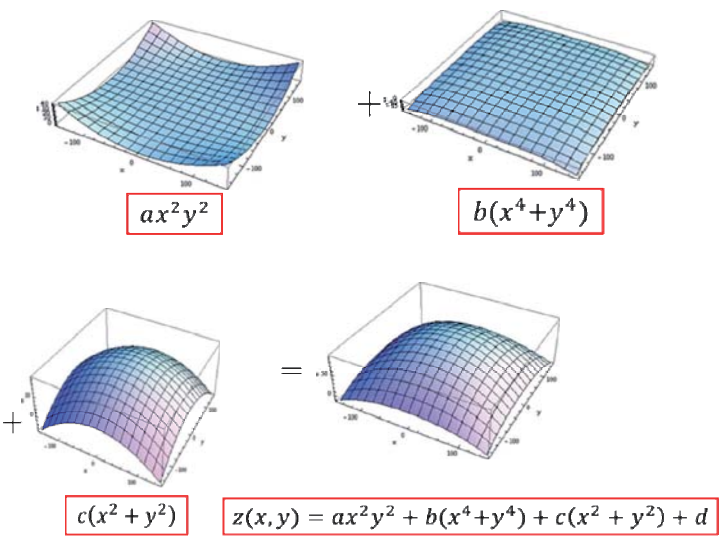


図６　H. Isler モデルの③式における関数の重ね合わせ

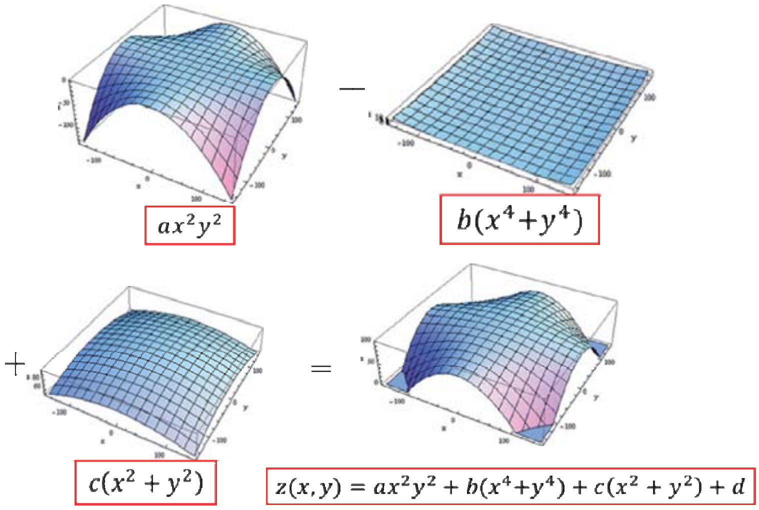


図７　アクリルモデルの③式における関数の重ね合わせ

５．３　応力性状の比較

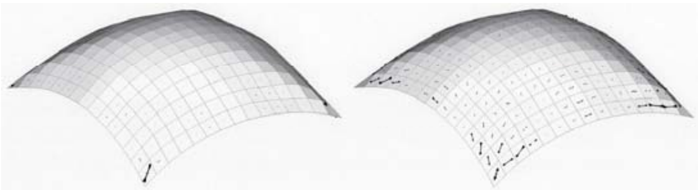
２種類の実験による応力性状を比較するために，シェルの厚さを 15cm, 曲面の形状の寸法を実験で得られたモデルの 100 倍として自重時における応力解析を行った。材料定数は普通コンクリート Fc24 を用い，境界条件は四隅をピン支持とした。図８と図９に H.Isler モデルとアクリルモデルの主応力図を示す。図１０に Y 軸回りの曲げモーメントに関するコンター図を示す。色が濃い箇所が曲げモーメントが大きい部分である。アクリルモデルは主応力が曲面全体にばらついているのに対して，H.Isler モデルは支持点近傍で主応力が局部的に大きくなるがそれ以外の箇所の応力は小さい。曲げモーメントもアクリルモデルは支持点近傍のみでなく，二辺の中央部でも大きな曲げモーメントが生じている。一方，H.Isler モデルは支持点近傍以外では曲げモーメントが非常に小さい。

表７に H.Isler モデルとアクリルモデルの最大主応力と最小主応力の値を示す。値は，実験で得られたモデルと③式のモデルの両方の値を示している。表中の③式のモデルにおける括弧内の値は，実験モデルの主応力値に対する比である。実験モデルに関して，引張の最大主応力は H.Isler モデルの方がアクリルモデルよりも小さい。実験モデルと③式のモデルを比較すると，アクリルモデルは，実験モデルが③式のモデルよりも主応力の大きさが全て小さく，主応力の比は約 1.3～2.2 である。一方，H.Isler モデルは，上面に関しては実験モデルよりも③式のモデルの方が主応力の大きさが小さくなっている。さらに，主応力の比は約 0.18～2.6 とばらつきが大きい。

５．３　本章のまとめ

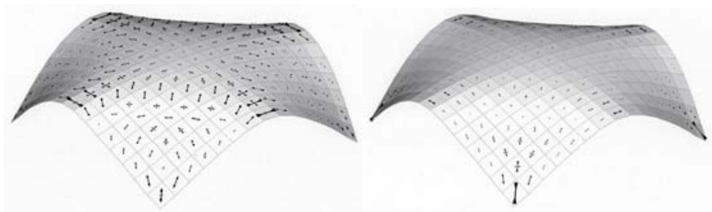
以上までに述べたように，シェル全体における曲げモ

ーメントと引張応力が小さいという点で比較すると，H.Isler モデルの方が優れている。しかし，H.Isler の手法は応力性状の優れた局所的な形状を試行錯誤の繰り返しにより探索しているのに対して，アクリルモデルの方は与えられた諸条件に対して必ずしも最適解ではないかもしれないが，様々な形状や境界条件，支点反力の設定に対する適用性が高く，主応力の大きさのばらつきが小さく全体的に曲げモーメントの小さい形状を容易に探索することができる。さらに，アクリルモデルはH.Isler モデルと比較して応力が曲面全体に均等にばらついており，形状の変化に対する主応力の最大値と最小値の変動が小さいことから，主応力全体としても形状の変化に対するロバスト性に優れることが予想される。



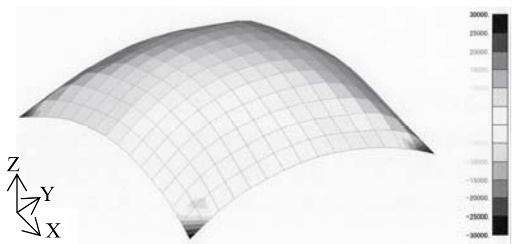
(a) 上面　　　(b) 下面

図８　H.Isler モデル主応力図

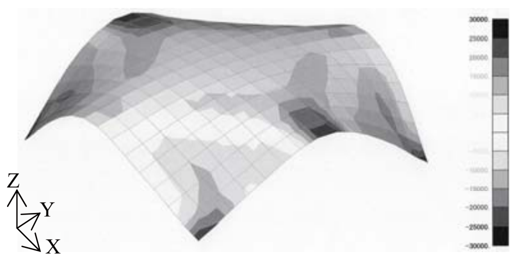


(a) 上面　　　(b) 下面

図９　アクリルモデル主応力図



(a) H.Isler モデル



(b) アクリルモデル

図１０　曲げモーメント図（Y 軸回り）

表７　モデル主応力値

実験方法	モデル形状		最大主応力 (N/m^2)	最小主応力 (N/m^2)
H.Isler	実験	上面	2,072,000	-10,833,000
		下面	909,000	-3,857,000
	③式	上面	1,345,000 (0.6491)	-1,899,000 (0.1753)
		下面	1,344,000 (1.479)	-9,925,000 (2.573)
アクリル	実験	上面	3,848,000	-6,134,000
		下面	6,661,000	-10,516,000
	③式	上面	8,272,000 (2.150)	-8,284,000 (1.351)
		下面	9,211,000 (1.383)	-15,205,000 (1.446)

６．まとめ

本論文では，熱可塑性樹脂の持つ伸び変形に加えて曲げ剛性も有効に用いることによって，様々な形状や境界条件，支点反力の設定に対する適用性が高く，曲げモーメントが小さいシェルの形状決定法を提案した。５．３節で述べた形状の変化に対する応力のロバスト性に関しては，今後さらに検討する必要がある。さらに，得られたモデルの曲面形状も滑らかで意匠的にも優れていることから，シェル曲面の実験的形状決定法として様々な利点を有していると考えられる。

参考文献

1) John Chilton : The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture, Thomas Telford, 2000
2) P.Belles, N.Ortega, M.Rosales and O.Andres : Shell Form-Finding : Physical and Numerical Design Tools, Engineering Structures, Vol.31, pp.2656-2666, 2009
3) O.A.Andres, N.F.Ortega and J.C.Paloto : The homeostatic model as a tool for the design and analysis of shell structures, Nature and Design, WIT Press, 2005
4) Sho WATANABE, Kouichi WADA, Susumu YOSHINAKA and Yoshiya TANIGUCHI : Experimental Form-Finding Using Thermoplastic Resin, Proceedings of IABSE-IASS2011, CD-ROM 0430 (pp.1-6), 2011

空間構造物の冗長性評価手法に関する研究

中井 悠貴[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，y-nakai@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

空間構造物は，脆性的な崩壊に陥り易い。一般的に伝達効率の高い軸力抵抗による形態の構造物であり，最小限の使用材料で最大限の空間を獲得することが求められるため，結果として冗長性のない構造物となる可能性が高い。構造物の崩壊はさまざまな要因が重なり合って生じたものであるため，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，損傷を受けた状態においても尚，ある一定の余裕度が確保できるような設計を予め行うことができれば，万が一の事態が生じたと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。また，損傷を受けた際に，どの部分が損傷が大きいかを把握することも，修復するという観点から重要であると考えられる。

したがって，構造物の安全性を保障するという観点で，冗長性を十分に付与した設計を行うことは重要である。本研究では，構造物に冗長性を付与する手法として，崩壊性能設計法の提案を行う。

2　空間構造物の崩壊荷重算出手法

2.1　荷重増分法の空間構造物への適用

空間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，以下に示す手法を導入する。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●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過程は図1の(A)~(D)を用いることで，以下のように説明される。

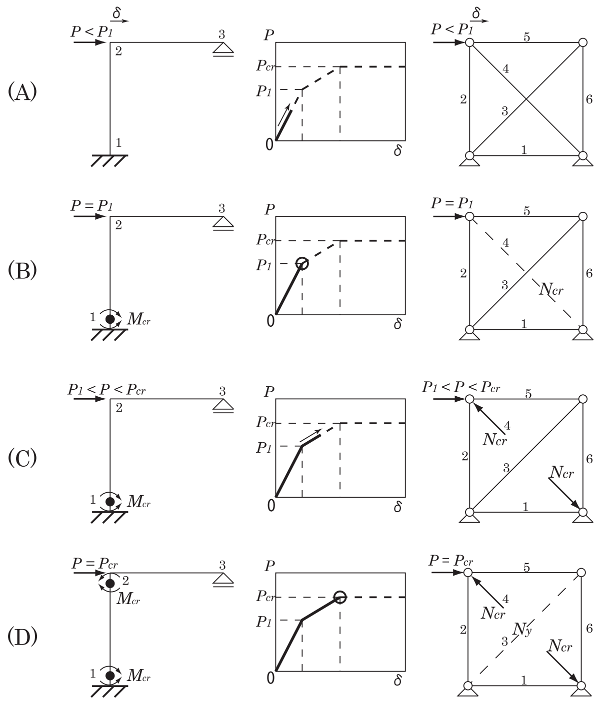


図1　骨組構造物とトラス構造物における荷重増分解析の過程

(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，軸力抵抗型の空間構造物に適用する原理である。ただし，荷重を維持する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。

2.2 区分的線形問題の概念を用いた算出手法

空間構造物の崩壊過程を追跡し，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い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 $\boldsymbol{p}$ を与えたときの各軸力 $\boldsymbol{N}'_m$ 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 $\lambda_m = \min \lambda^{(i)}_{mcr}$ を求める。

Step 3 m-th Phase Model における部材軸力 $\boldsymbol{N}_m$ を求め，m-th Phase までの累積軸力 $\boldsymbol{N}_m^{accumulate}$ 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。

$$\lambda_{cr}\boldsymbol{p} = \left(\sum_{m=1}^{R} \lambda_m\right)\boldsymbol{p} \tag{1}$$

本節で提案した算出方法を空間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 崩壊性能設計法の提案

3.1 崩壊性能設計法の定式化

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。

$$\text{maximize} \quad f(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{W}\prod \boldsymbol{\gamma}_j \tag{2}$$

$$\text{subject to} \quad -\boldsymbol{N}_{cr} \leq \boldsymbol{N} \leq \boldsymbol{N}_y \tag{3}$$

$$(\boldsymbol{N}_{cr} \geq \boldsymbol{0}, \quad \boldsymbol{N}_y \geq \boldsymbol{0}) \tag{4}$$

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

解析において，各 Phase における荷重係数 λ は Piecewise-Linear Method により計算される。

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 $N^{(i)}_{cr}$ ，降伏軸力を $N^{(i)}_y$ 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。

$$r^{(i)} = \begin{cases} -\dfrac{N^{(i)}}{N^{(i)}_y} & \text{if} \quad (N^{(i)} < 0) \\ \dfrac{N^{(i)}}{N^{(i)}_{cr}} & \text{if} \quad (0 < N^{(i)}) \end{cases} \tag{5}$$

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。

$$r_{\max} = \max \; r^{(i)} \tag{6}$$

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。

$$\gamma_1 = \begin{cases} 1 & \text{if} \quad r_{\max} \leq 1 \\ \dfrac{1}{r_{\max}} & \text{if} \quad \text{otherwise} \end{cases} \tag{7}$$

3.3 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，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 $\lambda_{\mathrm{buckle}(m-1)}$ 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。

$$\gamma_{sm} = \begin{cases} \dfrac{\lambda_{\mathrm{buckle}(m-1)}}{\Lambda} & \text{if} \quad \lambda_{\mathrm{buckle}(m-1)} < \Lambda \\ 1 & \text{if} \quad \Lambda \leq \lambda_{\mathrm{buckle}(m-1)} \end{cases} \tag{8}$$

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，座屈部材の細長比によるペナルティ関数 γ_2 と扱い，次式で表す。

$$\gamma_2 = \prod_{m=2}^{R} \gamma_{sm} \tag{9}$$

3.4 荷重係数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 の部分崩壊時までに増分された累積荷重係数 $\lambda_m^{accumulate}$ として定義する。このとき，解析によって得られる m-th Phase ($m = 1, 2, \cdots R$) における荷重係数 $\lambda_m^{accumulate}$ に対して設計耐力範囲を設定し，荷重係数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，荷重係数が設計耐力範囲内に収まらなかった場合，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。以上の考え方を用いて，m-th Phase の荷重係数に関するペナルティ関数 γ_{bm} を以下のように定義する。

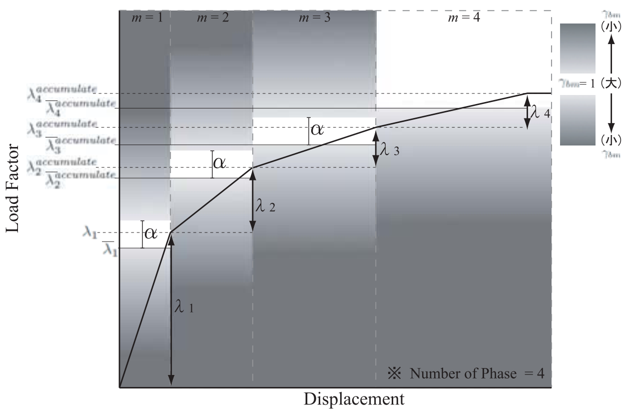


図2　m-th Phase の耐力に関するペナルティの概念図

■ ($m < R$) のとき

$$\gamma_{bm} = \begin{cases} 1 \\ (\text{if } \bar{\lambda}_m^{accumulate} \leq \lambda_m^{accumulate} \leq \bar{\lambda}_m^{accumulate} + \alpha) \\ \dfrac{\alpha}{\alpha + |\lambda_m^{accumulate} - \bar{\lambda}_m^{accumulate}|} \\ (\text{if otherwise}) \end{cases} \tag{10}$$

■ ($m = R$) のとき

$$\gamma_{bm} = \begin{cases} 1 \\ (\text{if } \bar{\lambda}_m^{accumulate} \leq \lambda_m^{accumulate}) \\ \dfrac{\alpha}{\alpha + |\lambda_m^{accumulate} - \bar{\lambda}_m^{accumulate}|} \\ (\text{if otherwise}) \end{cases} \tag{11}$$

$\lambda_m^{accumulate}$: m-th Phase における荷重係数
$\bar{\lambda}_m^{accumulate}$: m-th Phase の設計耐力範囲の下限値
α : 設計耐力範囲幅
$\bar{\lambda}_m^{accumulate} + \alpha$: 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，荷重係数を R-th Phase まで制御すると考えたとき，m-th Phase の荷重係数に関するペナルティ関数を R-th Phase を用いて，荷重係数に関するペナルティ関数 γ_3 を次式で定義する。

$$\gamma_3 = \prod_{m=1}^{R} \gamma_{bm} \tag{12}$$

3.5 座屈・降伏部材指定に関するペナルティ

最初に座屈・降伏する部材を指定し，指定した部材が座屈・降伏しなかった場合にはペナルティを与える。そこで，座屈・降伏部材指定に関するペナルティ関数 γ_4 を次式で定義する。

$$\gamma_4 = \begin{cases} 3 & \text{if 指定した部材が座屈・降伏} \\ 0.3 & \text{if } \mathit{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

この制約は厳しいものと予想されるため，指定した部材が座屈・降伏した場合には適合度が上がるようなペナルティとする。

4　数値解析

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，設計変数の範囲を表3に示す。支持条件は四隅をピン支持とし，ピン支持の中点に位置する 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。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，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。荷重係数に関するペナルティ関数の諸量を表2に示す。また，数値解析例では，座屈・降伏指定部材を変え解析を行う。

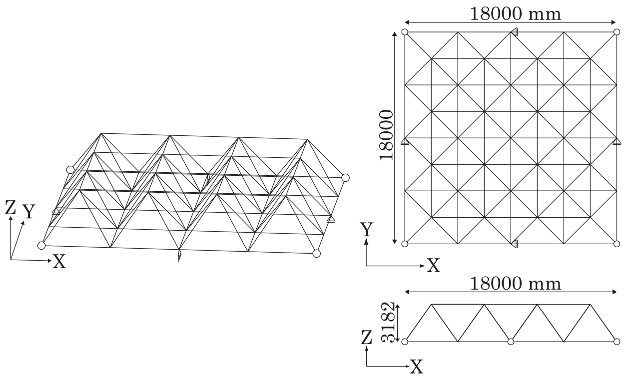


図3　数値解析モデル

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	1000
交叉率	0.7
突然変異率	0.3
エリート数	1

表 2　設計荷重係数

$\bar{\lambda}_1^{accumulate}$	=	1.0
$\bar{\lambda}_2^{accumulate}$	=	1.8
$\bar{\lambda}_3^{accumulate}$	=	2.2
$\bar{\lambda}_4^{accumulate}$	=	2.4

表 3　設計変数の範囲

部材番号	ϕ - 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

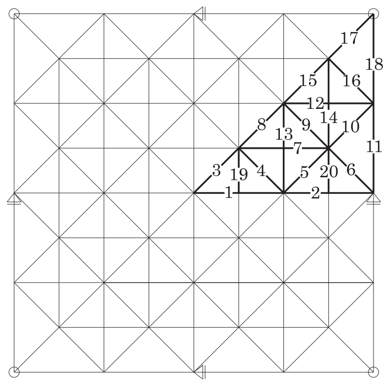


図4　座屈・降伏指定部材番号

4.1　数値解析例

座屈・降伏部材指定を図4に示す部材番号1〜20の全ての部材に適用し，20パターンの解析を行う。

4.2　解析結果

結果をまとめたものを表4に示す。左から座屈・降伏指定部材の番号，指定した部材が最初に座屈するかどうか，荷重係数に関する制約条件を満たしているかどうかとなっている。

表 4　解析結果

部材番号	座屈・降伏部材指定	荷重係数指定
部材1	○	×
部材2	○	×
部材3	×	○
部材4	○	○
部材5	○	○
部材6	○	○
部材7	○	○
部材8	○	○
部材9	○	○
部材10	○	○
部材11	○	○
部材12	×	○
部材13	○	○
部材14	○	○
部材15	×	○
部材16	×	○
部材17	○	○
部材18	○	○
部材19	○	○
部材20	○	○

具体例として，座屈・降伏部材指定を部材2,3,4に適用した解析結果を示す。

4.2.1　座屈・降伏部材指定 = 部材2

各Phaseにおける累積荷重係数の推移を図5 に示す。また，1st Phase～4th Phaseで座屈荷重N_{cr}(降伏軸力N_y)に達する部材を図6～9に示す。

4.2.2　座屈・降伏部材指定 = 部材3

各Phaseにおける累積荷重係数の推移を図10 に示す。また，1st Phase～4th Phaseで座屈荷重N_{cr}(降伏軸力N_y)に達する部材を図11～14に示す。

4.2.3　座屈・降伏部材指定 = 部材4

各Phaseにおける累積荷重係数の推移を図15 に示す。また，1st Phase～4th Phaseで座屈荷重N_{cr}(降伏軸力

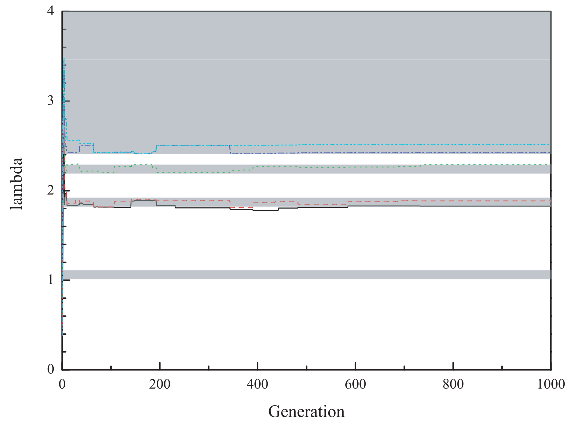


図5　各 Phase における累積荷重係数の推移

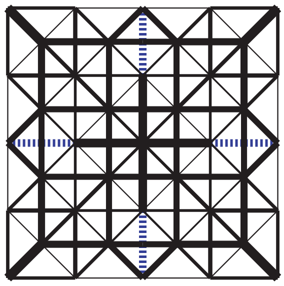


図6　1st Phase

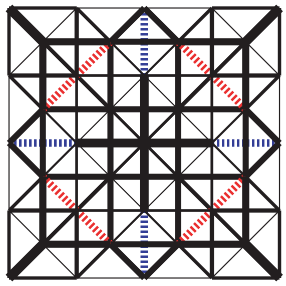


図7　2nd Phase

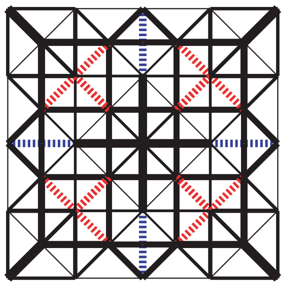


図8　3rd Phase

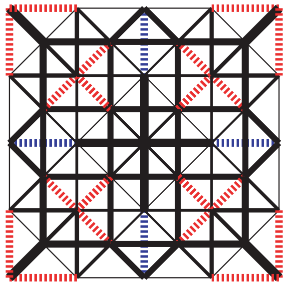


図9　4th Phase

N_y)に達する部材を図16～19に示す。

図6～9,11～14,16～19では，Phase毎における座屈・降伏部材を点線で示す。また，図5,10,15において，灰色で描かれた領域は荷重係数に関する制約条件を満たす領域である。

図6から，図4の部材番号2が最初に降伏していることが分かる。しかし，図5では，$\lambda_1^{accumulate}$が設計耐力範囲内に収まらなかった。

図11から，図4の部材番号3が最初に座屈していないことが分かる。しかし，図10では，荷重係数全てが設計耐力範囲内に収まっており，荷重係数に関する制約条件を満たしている。

図16から，図4の部材番号4が最初に座屈していることが分かる。また，図15では，荷重係数全てが設計耐力範囲内に収まっている。この時，指定した荷重係数の範囲で部材が座屈あるいは降伏するため，荷重係数

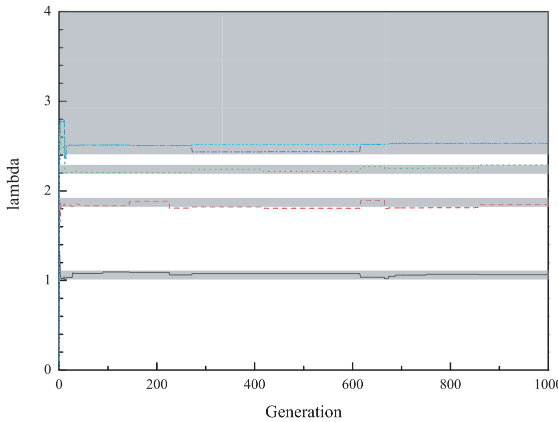


図10　各 Phase における累積荷重係数の推移

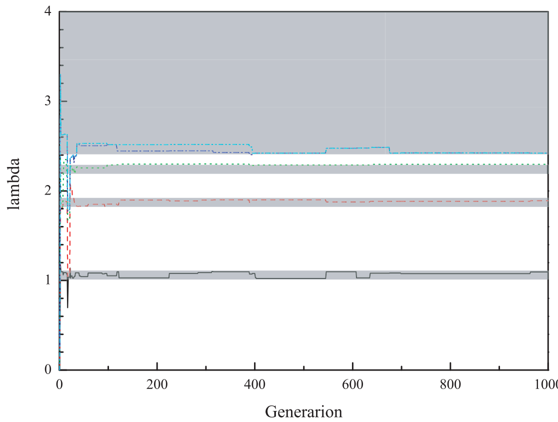


図15　各 Phase における累積荷重係数の推移

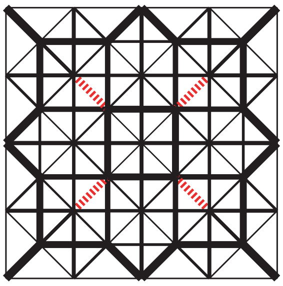


図11　1st Phase

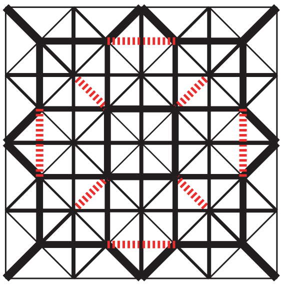


図12　2nd Phase

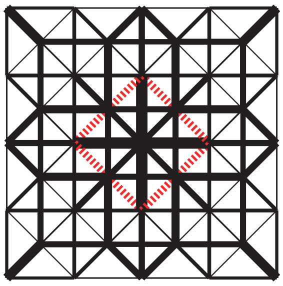


図16　1st Phase

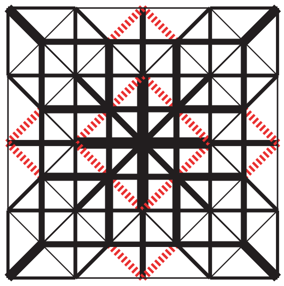


図17　2nd Phase

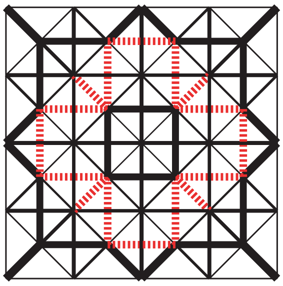


図13　3rd Phase

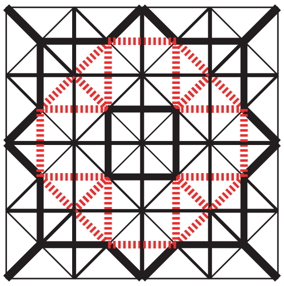


図14　4th Phase

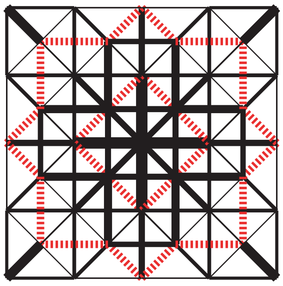


図18　3rd Phase

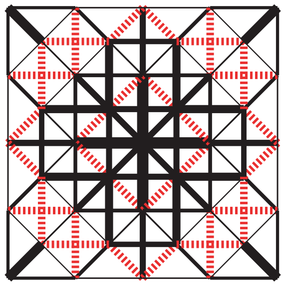


図19　4th Phase

の範囲と最初に座屈・降伏する部材を設計できたと言える。

5　結

本研究では，部材が座屈・降伏するときの荷重係数を設計し，最初に座屈･降伏する部材を指定する崩壊性能設計法の提案を行った。本手法を用いることで，構造物に損傷が生じた後の耐力，つまり，冗長性を定量的に評価することができ，冗長性を有した構造物を創生することができると考えられる。また，最初に座屈する部材を指定することにより，どの部材が最初に損傷するかを把握することで，修復のしやすさを測る指標になるのではないかと考えられる。そして，座屈させる部材に荷重が集中することで，他の箇所の損傷を軽減することができ，この部材が座屈荷重もしくは降伏軸力に達した後，この部材だけを新しいものと取り替えることで，構造物の性能を復元することができる損傷制御の概念に通じると考えられる。今後は，座屈・降伏指定部材の選択により修復のしやすさが変わるかどうか，また，変わるのであれば，修復のしやすい部材選択について考えなければならない。

参考文献

1）山崎 康太，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. 名古屋大学大学院，2010.3
2）北野 宏明. 遺伝的アルゴリズム. 産業図書，1993.6
3）和田 章，岩田 衛，清水 敬三，安部 重孝，川合 廣樹. 建築物の損傷制御設計. 丸善，1998
4）道上 勉，向殿 政男. 信頼性・安全性工学. オーム社，2009

降伏した材料の塑性挙動に対する最適制御

石井 慶一郎[1)]，加藤 準治[2)]
1)東北大学大学院土木工学研究科大学院生，k.ishii@mm.civil.tohoku.ac.jp
2)東北大学大学院工学研究科，助教，工博，jkato@civil.tohoku.ac.jp

1　はじめに

近年，低降伏点鋼ダンパーという，低強度高靭性材料の塑性変形性能を利用した制震架構により，地震エネルギーを吸収しようとする流れがある．しかし，低降伏点鋼は低強度高靭性材料であるため，強度や耐荷力を期待することができない．

そのため，延性と強度の両方，すなわちエネルギー吸収性能を向上させることが望まれるが，これまでの経験的手法では，塑性化領域にある複雑な材料挙動を制御することは不可能である．本研究では，その制震架構の材料配置を最適化することで，そのエネルギー吸収性能を最大化することを目的とする．ここでは，簡単のため単一材料を想定したトポロジー最適化を対象とし，von Misesの塑性モデルを前提とした最適化問題を取り扱う．

2　最適化問題の設定

ここでは，固体と空隙からなる各要素の材料配置に対する等式制約条件付きの最適化問題を定式化する．その目的関数を$f(\boldsymbol{s})$，等式制約条件を$h(\boldsymbol{s})$と表し，設計変数ベクトルを$\boldsymbol{s}$と表す．この$\boldsymbol{s}$は，各要素における材料密度に関する設計変数ベクトルである．本研究では，構造全体での使用材料体積が一定の下で，そのエネルギー吸収性能を最大にする最適化問題を設定する．

$$\text{minimize} \quad f(\boldsymbol{s}) = -\int_{\Omega}\int_{\hat{\varepsilon}} \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon}\, \mathrm{d}\Omega \tag{1}$$

$$\text{subject to} \quad h(\boldsymbol{s}) = \int_{\Omega} \rho_i \, \mathrm{d}\Omega - \hat{\mathrm{V}} = 0 \tag{2}$$

$$s_i = \frac{\rho_i}{\rho_0} \qquad 0 < s_i < 1 \tag{3}$$

ここでρ_i, ρ_0はそれぞれi番目の要素の密度および基質材料の密度を表す．$\boldsymbol{\sigma}$と$\boldsymbol{\varepsilon}$はコーシー応力および線形のひずみテンソルである，また$\hat{\mathrm{V}}$は構造全体の体積量を指す．

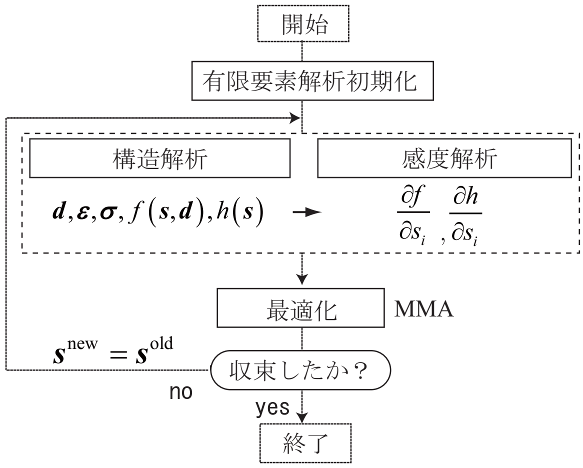


図1　当該最適化問題の解法手順

なお，最適化問題は一般に目的関数を最小化するように設定するため，式(1)では目的関数にマイナスを乗じることで最小化問題に変換している．

ここで参考として本研究で扱う最適化問題の解法手順を図1に示す．本研究では勾配法による最適化アルゴリズムを用いるため，構造解析後に目的関数と制約関数の設計変数$\boldsymbol{s}$に関する感度$\partial f/\partial s_i$，$\partial h/\partial s_i$を求める必要がある．ここで得られた感度を最適化アルゴリズム Method of Moving Asymptotes (Svanberg 1987, 以下MMAと略す）へ組み込み，その時点での最適解を求め，その解が収束するまで繰り返し計算を行う．

3　使用材料モデル

3.1　基本材料モデル

本研究では塑性モデルとしてvon Misesの塑性モデル(等方性線形硬化則)を用いた．その降伏関数$\Phi\left(\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}, k\right)$は以下のように表される．

$$\Phi\left(\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}, k\right) = \left|\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}\right| - \sqrt{\frac{2}{3}}k \quad \text{with} \quad \boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}} = \mathrm{P}\boldsymbol{\sigma} \tag{4}$$

ここで，$\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}$はコーシー応力$\boldsymbol{\sigma}$の偏差応力テンソル，$\boldsymbol{P}$は射影行列である．等方性線形硬化則の場合，硬化則$k$は，以下のように一つの内部変数$\kappa$のみで表される．

$$k(\kappa) = \sigma_{\mathrm{y}} + E^{\mathrm{h}}\kappa \quad \text{with } \kappa = \sqrt{\frac{2}{3}}\gamma \tag{5}$$

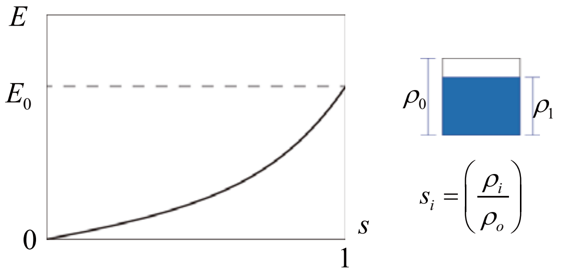


図2　SIMP法

ここで，γは塑性乗数,E^{h}は硬化係数，σ_{y}は初期降伏応力である．さらに，関連流れ則Fは

$$F(\boldsymbol{\sigma}, k) = \boldsymbol{n} \ \text{ with } \ \boldsymbol{n} = \frac{\partial \Phi}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}}{\left|\boldsymbol{\sigma}^{\mathrm{dev}}\right|} \tag{6}$$

と表される．ここで，$\boldsymbol{n}$は流れベクトルである．なお，弾塑性コンプライアンステンソルはニュートンラプソン法を用いるために，調和線形化によって導かなければならない．

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{D}^{-1} + \mathrm{d}\gamma \frac{\partial \boldsymbol{n}}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \tag{7}$$

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{D}^{\mathrm{ep}}\, \mathrm{d}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{8}$$

$$\boldsymbol{D}^{\mathrm{ep}} = \boldsymbol{H}^{-1} - \omega \boldsymbol{H}^{-1} \boldsymbol{n}\boldsymbol{n}^{T} \boldsymbol{H}^{-1} \ \text{ with } \ \omega = \left(\frac{2}{3}E^{\mathrm{h}} + \boldsymbol{n}^{T}\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{n}\right)^{-1} \tag{9}$$

$\boldsymbol{D}^{\mathrm{ep}}$は調和弾性材料剛性テンソルである．

3.2　SIMP法

材料表現法を用いたトポロジー最適化では，不良設定問題を良設定問題に置き換えるために正則化が必要であり，本研究では正則化にSIMP法[3]（*Solid Isotropic Microstructure with Penalization of intermediate densities*）を採用した．SIMP法は，等方性多孔質材料の密度を変数として，要素毎の弾性材料剛性Eを式(10)のようにべき乗数pを用いたべき関数で内挿するものである(図2).

$$E(s) = (s_i)^p E_0\,, \qquad p > 1\,, \qquad 0 < s_i < 1 \tag{10}$$

3.3　SIMP法の塑性材料への適用

弾性材料では弾性材料剛性のみにSIMP法を適用すれば良いが，von Misesの塑性モデルでは，3つの材料パラメータ，塑性材料テンソル$\boldsymbol{D}^{\mathrm{ep}}$,硬化係数$E^h$,初期降伏応力$\sigma_y$があるため，Maute[1], Schwarz[2]らに従い，これらの材料パラメータについても以下のようにSIMP法を適用する．

$$\boldsymbol{D} = (s_i)^p\, \boldsymbol{D}_0 \tag{11}$$

$$E^h = (s_i)^p\, E_0^h \tag{12}$$

$$\sigma_y = (s_i)^p\, \sigma_{y0} \tag{13}$$

ここで，$\boldsymbol{D}_0, E_0^h, \sigma_{y0}$はそれぞれ，基質材料の塑性材料テンソル，硬化係数，初期降伏応力である．

4　感度解析手法

目的関数は一般的に，設計変数$\boldsymbol{s}$，変位$\boldsymbol{d}$に依存する．また，変位も設計変数に依存するため，例えば目的関数$f = f(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{d}(\boldsymbol{s}))$と記すとその微分は以下のように表される．

$$\frac{\partial f}{\partial s_i} = \frac{\partial f(\boldsymbol{s})}{\partial s_i} + \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{d}}\frac{\partial \boldsymbol{d}}{\partial s_i} \tag{14}$$

解析的手法の一般形は式(14)であるが，この解析的手法は取り扱う最適化問題毎に従って，個別に定式化をする必要がある．本研究では，Maute[1]の提案する以下の解析的手法に従い感度解析を実施する．

$$\frac{\partial f}{\partial s_i} = -\frac{\partial}{\partial s_i}\int_{\Omega_i}\int_{\hat{\varepsilon}} \sigma^{\mathrm{T}} \mathrm{d}\varepsilon \mathrm{d}\Omega$$

$$= \int_{\Omega}\int_{\hat{\varepsilon}}\int_{\varepsilon} \mathrm{d}\varepsilon^{\mathrm{T}} \frac{\partial \mathrm{D}^{\mathrm{ep}}}{\partial s_i}\, \mathrm{d}\varepsilon\, \mathrm{d}\Omega - 2\int_{\Gamma}\int_{\hat{\lambda}}\int_{\hat{u}} \frac{\partial \mathrm{d}\lambda}{\partial s_i}\hat{t}^{\mathrm{T}}\, \mathrm{d}u\, \mathrm{d}\Gamma \tag{15}$$

式(15)下段の第1項，第2項は式(14)の第1項，第2項に対応している．第1項は設計変数による陽的な微分を表し，直接求めることのできる項である．しかし，第2項は陰的な微分項であり，仮想仕事の原理のようなエネルギーに基づいた力のつり合い式から求めることができる．

5　結語

本研究では単一材料を想定したトポロジー最適化を対象とし，von Misesの塑性モデルを念頭においた最適化問題を取り扱う．

参考文献

1）Maute K., Schwarz S. and Ramm E.: *Adaptive topology optimization of elastoplastic structures*, Structural Optimization 15,81-91 Springer-Verlag 1998.

2）Schwarz S., Maute K. and Ramm E.: *Topology and shape optimization for elastoplastic structural response*, Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 190(2001)2135-2155.

3）Zhou, M., Rozvany, G.I.N.: The COC algorithm, part II : Topological, geometrical and generalized shape optimization, *Comp. Meths. Appl. Mech. Eng.*, 89, pp. 309–336, 1991.

■形態創生コンテスト 2012

■形態創生コンテスト2012

□ コンテスト概要

1.　コンテストの趣旨

　建築の空間や工芸品の形は作者が審美や思想を満たしながら、求められる機能や役割の実現を図るべきであることは言うまでもありません。「形態創生」は空間あるいは形に求められている課題あるいは意図を理解した上で、力学上、構法上、効果的にそれを実現する方法を志向し、それを科学的に定義することで、結果として設計者の想像力を越えた形態の可能性が創造されると考えています。

　本コンテストは、このような「形態創生」の考え方に可能性を見出す様々な分野からの参加を期待し、独創的でありながら実現性も視野にいれた「形態創生」の考え方に基づいたアルゴリズムや、建築構法とその産み出す形態を総合的に競うことを趣旨として開催されています。過去 6 回を経て、本コンテストは、実体的に構造物を造る方法の合理性とその構造物が実現する空間利用の合理性を融合した問題として捉えたレベルの高い催しとして注目されてきました。

2.　課題（テーマ）

課題は以下のテーマとしました。

「歴史ある地域の固有性に学び『再生する』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 2012 ホームページ http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s17/に掲載しました。

3.　審査委員（敬称略、50 音順）

審査委員長：　新谷眞人（早稲田大学教授/オーク構造設計）
審査員：　坂口紀代美（日本美術家連盟会員/彫刻家）
　　　　　本間俊雄（鹿児島大学）
　　　　　松川昌平（000studio）
特別審査員：　上野邦一（奈良女子大学名誉教授）
　　　　　川口　衞（川口衞構造設計事務所/法政大学名誉教授）

4.　コンテストの経緯

2012 年 4 月 20 日；建築雑誌 2012 年 4 月号に応募要項掲載
2012 年 6 月 15 日；応募要項に関する質疑締め切り
2012 年 7 月 27 日；応募エントリー締め切り
2012 年 8 月 31 日；作品応募締め切り
2012 年 9 月 5 日　；一次審査（日本建築学会会議室にて）
2012 年 9 月 6 日　；一次審査結果の通知
2012 年 10 月 25 日；コロキウム構造形態の解析と創生 2012 にて 二次審査および表彰


1 次審査風景

5.　審査の方法

　一次審査は特別審査員を除く審査委員会で行いました。作品は匿名とし、評価は、課題（テーマ）に対する作品の満足度の他、創生された形態（かたち）そのものの独創性や、用いている形態創生プロセスのアイデア性などを総合的に勘案しました。

　なお、二次審査においては、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つこととします。

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　　；23 件
応募総数　　　　；15 作品
入選作品数　　　；　5 作品
佳作作品数　　　；　1 作品

－入選作品－

ｴﾝﾄﾘｰ No	タイトル	氏名（所属）（○は代表者）
1	観性の建築	○本田 司（Geocreates）
9	Slip Frustum	○佐藤 慶太（日本設計）、江面 太基（同）、大木 崇人（同）
10	Jenga Automaton	○永田 洸大（鹿児島大学）、佐々木 亜衣（同） 沖田 裕介（同）、土持 挙（同）
12	WARABOCCHI STRUCTURE	○奥井 竜太（東京理科大学）、廣瀬 大祐（同） ジェレフアタナス（同）、後藤 洋子（同） 永井 智裕（同）、西村 明洋（同）
18	故を温ずねて新しきを知る	○高橋 清紀（東京電機大学）、綾部 将平（同）

－佳作－

ｴﾝﾄﾘｰ No	タイトル	氏名（所属）（○は代表者）
15	AWA～歴史と風景を紡ぐかたち～	○寺井 亮（大林組）、南 尚孝（同）、齋藤 元嗣（同） 寺井 千絵（同）、馬場 敏光（同）、助川 知洋（同）

□応募全作品の講評

本年のコンテストのテーマには 3 つのキーワードが含まれている。『地域の固有性』、『再生する』そして、『かたちを創生する』である。1 次審査では、この 3 つの要求項目に対する解答がバランスよく説明されているかに注目して行われた。このハードルはかなり高かったようで、キーワードのうち 2 つは説明されているが、例えば「形態創生プロセス」の説明が希薄なものなど、苦戦されている様子がうかがえた。例年に比べいくぶん難題であるかもしれない今年のテーマに、ひるまず果敢に取り組まれた応募者各位に心より敬意を表したい。

メインのキーワードである「再生する」という言葉の捉え方については、応募案は 2 つに大別された。ひとつは歴史的な技術や考え方へのオマージュであり、もう一つは文字通り、材料や部材などの再利用・リサイクルである。出題意図はともかく、いずれもユニークな提案は評価されている。

本年度の入選作は前記の評価観点とともに、その上で、もっと詳しい説明が聞きたくなるような作品が選定されていることも付け加えたい。本コンテストに参加されたすべての応募者の方々に再度感謝を表すとともに、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]　観性の建築 ＜入選作＞

利用者の心的トポロジーを設計に援用した作品である。消失点に着目した点はアイデアとして新しいが、補助線の引き方次第で、風景をいかようにも解釈できそうである。大仏を消失点から開放する風景としてあげている点もおもしろい。レストスペースの具体例を提案しているが、観性のダイヤグラムからやや飛躍している印象を受け、もう少し明快な説明があると良かった。

[2]　かやてん

茅葺屋根を発想の原点とし、茅を再生可能な生分解性材料に代えて壁面に利用する作品である。カーテンと茅を懸けて「かやてん」としたネーミングは面白い。コンテストが形態のつくり方にも重きを置いているため、形を生み出すプロセスが見出せないのは残念である。建物の内部空間のイメージ図があると良かった。切妻屋根にこの「かやてん」を利用し、透けて見える空間はきれいなのではと想像される。

［3］ paRallelogRam
発砲スチロールでできた平行四辺形のピースを組み合わせて形態をつくる提案である。ほほえましい作品であるが、形の具体例が結局、塀となってしまうのは残念である。文中にアーチやトラスもできるとあるが、ルール①、②に基づいて模型を製作し、具体的な形として見せてほしかった。1：√２という白銀比に着目した点はよいが、白銀比の性質を活かせていない点も惜しまれる。応用すると進展性がありそうな提案であった。

［5］ Rebirth Of Nature
RC 造の構造体に交換可能な木造の床を組み合わせたシェルターの提案である。津波の防災ビルとして利用できることを示唆する内容であった。RC 造の柱と木造の床がどのように取り合うのか、間伐材の分割方法がなぜ複雑な形状となっているのかなど、説明不足で内容が読み取れない部分があり、惜しい。

［8］ 無題
津波での建物の倒壊を防ぐために、浮力を利用して人工地盤を持ち上げる提案である。原理模型を作成している点や、建物重量から柱本数を検討している点などは良い。ただ、この仕組みは既往の流れ橋と同様であり、既往に優る工夫があるとさらに良かった。

［9］ Slip Frustum ＜入選作＞
日本の伝統建築の継手におけるすべり勾配に着想を得た作品である。プレゼンが非常に上手で、模型を作っている点も評価できる。ユニットの交換や追加をすることで、建物利用の変化に応じた増改築が可能とのことであるが、ユニットの交換は３次元的にも可能なのか、やや疑問が残る。ユニット同士のかみあい方として、すべるだけではなく＋αの工夫があるとさらに良い。ユニットを小さくしたバージョンでの利用例も見てみたい。

［10］ Jenga Automaton ＜入選作＞
ジェンガというゲームに着目し、CA(セル・オートマトン) を利用して形をつくる提案である。CA のルール設定は明快であるが、生成された形は重苦しく、きれいではない。空間を設けたり、形がきれいに見えるよう部材を積む方向を決められるなど恣意的な部分もあってよかったのでは。モニュメントとしては面白い。同じルールでできた多様な魅力的な形を、探求するとさらに良かった。

［11］ 技術の再生
奈良駅のホーム上屋の架構の提案である。奈良駅に着目した点は良く、本コロキウムの開催地の地域活性化をうながす提案はありがたい。解析を行っている点も、まじめに取り組んでいて良いが、CG と解析モデルの骨組形状が異なっており、アイデアに一貫性を持たせてほしかった。また、モチーフをそのまま形として用いてしまった点も、本コンテストの主旨からはずれており、残念である。

［12］ WARABOCCHI STRUCTURE ＜入選作＞
稲藁をまとめて組積んだ「わらぼっち」の仕組みを利用した構造体の提案である。どのくらいのスケールの構築物と見るかによるが、四角錐の中に人が入れるぐらいの大きさがあればよいと思う。これだけのプログラミングをしているので、ピラミッド以外の形に踏み込めるとすごく面白かった。素材、形、継ぎ手における面白さが評価できる。

［15］ AWA ～歴史と風景を紡ぐかたち～ ＜佳作＞
自然発生的で有機的な形状である泡に着目した作品。地域の固有性という点には欠ける。また、泡というには多少重い印象を受ける。模型を説明のようにグラウトを吸い出し薄いシェルを作るプロセスで作ってくれると面白かった。3Dsystem の形状はおかしいが、2D のロッカー等は面白い。形態創生という意味では、ランダムにセルを配置して吸い出してできる形状には、偶然性があり、重量も最小化され、面白いと思う。また、実際に作ってみたくなる魅力がある。

［16］　　重ねて　ズラして　積み上げて
モアレ縞を積み上げることで三次元化した作品。モアレ縞に着目した着想は面白いと思うが、建築の形の提案としては弱さがあり、用途が何かがわからない。また、ピッチの異なる木造格子に着目した点に歴史は感じることができる。木造格子を全てダブルスキンにして、それがファサードになっていたら、綺麗だったと思う。

［18］　　故を温ずねて新しきを知る　＜入選作＞
奈良駅から東大寺への通りの活性化がテーマの作品。折り紙でできたこの空間の中に光が入ると綺麗だと思うので、中に入ることができたら一層よかった。実現可能そうなプランであり、このような建築が町にあっても綺麗だと思う。しかし、ユニットを重ねていく方法にはわからない点もあった。

［20］　　てりむくり
古来から神社建築等に用いられてきた「照り」と「起くり」に着目し、簾を使って形態創生を試みた作品。もう少し具体性を持った提案があるとよかった。形態は非常に美しいと思うが、もう一つ工夫が足りない。さらに一つ重ねるなどして作品の中に空間ができるとよかったと思う。なお、この構造では図の説明にある力（圧縮、引張）は働かないであろう。

［21］　　再生する街道
CA(セル・オートマトン）を用いて歴史ある地域における石畳の創生を試みた作品である。石畳に着目した点は面白いと思うが、出来上がった石畳には古い町並みの伝統的な感じが消えてしまっている印象を受ける。作品はすべて矩形の石でできており、かたち、敷き方・施工法などをもっと取り入れると良かったと思う。一方で、パターンを作るためだけに CA を使う意味がわかりにくい。どのように要素を抽出しているか、プログラムがもっと見えるとよかった。

［23］　　Hillock Park
仮設建築を対象に、竹細工という伝統技術を参照し、撤去時の地形の復元も考慮した作品である。仕口や杭地業の提案もあり、リアリティの観点からは評価できる。しかし、仕口が相欠きになっており、施工は大変そうである。形状決定のプロセスについての説明があるとよかった。作品の形状は古墳を模したものなのか。また、屋上テラスを別に設けずに、直接上に上がれるとよかった。

形態創生コンテスト 2012
「歴史ある地域の固有性に学び『再生する』かたちを創生する」

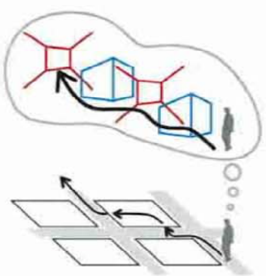
観性の建築 ―心的トポロジーにより再生するかたちを共有するための形態―

1.利用者の感情により「再生する」

我々は、歴史ある地域の人々の営みが、空間性を持つ風景と共に連綿と繋がり、感情と共に存在していることを、多くの災害や、その復興を通して学んでいる。再生するかたちとは、利用者の形而上に位置する、時空を超えるものと考える。本計画は建築を、設計者の理論のみでなく、利用者の理論からも構想することで、人の感情･空間と形態の関係性を探求し、再生するかたちをつくる提案を行う。

2.建築の境界と心的トポロジー

日本建築は、風土に拠り曖昧な境界を築いた。その境界がつくる風景と図面(地図)で、利用者は、建築・都市を知覚し生活している。その知覚上優先されるのは、抽象化を経ず現前する風景であるが、現代の建築設計は主に、計算・体系化し易い図面が使用されて来たため、図面（地図）で表記できる単調な境界が多くなり、その結果、建築と都市の感情が、分断され易くなっている。そこで、利用者に自然発生する心的トポロジー(人が風景で感情の抑揚を得る心理位相幾何学)を設計に援用し、空間の境界の制御を試みる。利用者の感情の連続性を獲得することによって、建築の物理的な境界を超えた形而上の連続体として粘り強く繋がる再生するかたちを構想する。



＜再生するかたちをつくる心的トポロジー＞
設計者の図面による明確な境界で不連続な都市を、利用者の風景から得る心的トポロジーを考慮することで形而上の連続体にし、再生するかたちを得る。

3.観性：歴史ある地域の固有性から類推する心的トポロジーを持つ形態の性質

風景による心的トポロジーを含む空間の性質を「観性」と名付けた。建築物は、その境界面の性質上、外観は開放感のある二点透視、内観は安定感のある一点透視の風景として、記述・知覚される傾向にある。しかし、特に都市には、図面(地図)の内外の区分と、構図や感情が同期しない様に感じる空間がある。このことは、図面（地図）で知覚する外部か内部かに拠るもの以上に、風景で知覚する二点透視や一点透視等の構図の方が、開放感や安定感等の感情に、より強く影響していることを示唆しているが、私はその原因は、消失点の数に拠る視線の誘引が、先天的・後天的な感情と結びつくことにあると推論する。本計画は、歴史ある地域から抽出した観性を得る要素を用いて形態生成し、利用者に心的トポロジーを意識付け、都市に再生するかたちを共有することを提案する。

＜街道：一点透視の風景＞
街道は、直線の通りで一点透視を強調し、それを妨げない範囲で風土を考慮した建物の細部が制御され、曖昧な境界を得ている。

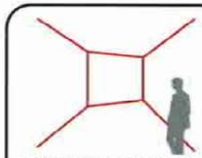
＜境内：一点透視の風景＞
境内は、一点透視のガイドに成得る要素が明示的暗示的に点在し、全体として、外部が内部的に感じられ得る空間になっている。

＜通庭：二点透視の風景＞
伝統建築は、柱梁の表象でガイドが多重に発生するが、特に通庭は、高い天井と凹凸に拠り、二点透視が発生し易くなっている。

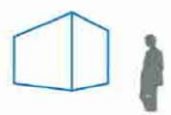
＜大仏：消失点から開放する風景＞
大仏は、荘厳な造形で消失点を霧散させ、建物の内外を超えて座標に拘束されない、開放的な形而上の世界へと人を誘い得る。

抽出 →

← 共有
利用者の認知で再生基盤の共有

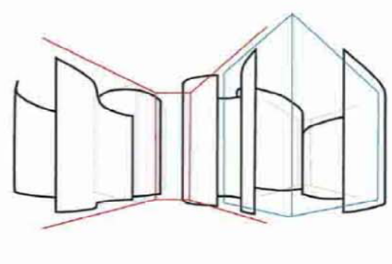


＜安定的観性：一点透視の風景＞
視覚的に安定感を抱く要因は、内部に居るからでも内観だからでもなく、単数焦点で見回しが起き難い構図に拠ると推論する。



＜開放的観性：二点透視の風景＞
視覚的に開放感を抱く要因は、外部に居るからでも外観だからでもなく、複数焦点で見回しが起き易い構図に拠ると推論する。

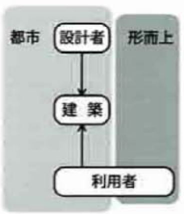
実装 →



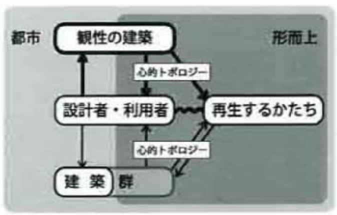
＜多重な観性：一点透視・二点透視が混在する風景＞
建築物の各要素は、物理的な拘束を超え一体化し、感情を伴いながら抽象化され、知覚される。その抽象度を維持して様々な心的トポロジーを生み出す形態を、多角的に検討し、まとめた。形態で知覚された心的トポロジーにより、利用者の深層で、都市の再生するかたちを共有する。

4. 建築の起源に鑑みる合理性と「再生する」かたち

観性の発想元の遠近法は、大陸を越えて日本に渡来し、各地域の風土と関係した上で、固有な再生するかたちを築いている。ブルネレスキは、ルネサンス時代に彫刻と建築とが分化する只中で、遠近法による空間性を一般化した一方で、工法に対しても大きな業績を残している。これは、建築・空間の設計者と利用者が、本質的に不可分な存在であることの表れではないだろうか。人の感情・空間と形態の関係性は、確率論的に理論化可能で、人間の共通な体験のため、合理化・主義の共有への基盤を持ち得る。そこで、設計者と利用者の関係を下図の様に整理する。その上で、帰納の立場を明示して実験・検証も援用し、提案の合理性を高める。



>



＜設計者・利用者が分離された設計プロセス＞ ＜提案：設計者・利用者が不可分の非線形な設計プロセス＞

BIM等は現在、主に設計者の施工合理仕様のため、本質的に製造業のCAD/CAMの応用に留まり、建築独自の形態への寄与が弱い。本提案では、設計者と利用者を考慮してﾃﾞｻﾞｲﾝとｺﾝｽﾄﾗｸｼｮﾝを融合し、建築独自の形態を得るための主題・手法を得る建築をつくる。建築は、利用者の感情を伴い形而上に位置した時、設計者の想像を超えた再生するかたちとして都市に共有され、主題の源泉となる。

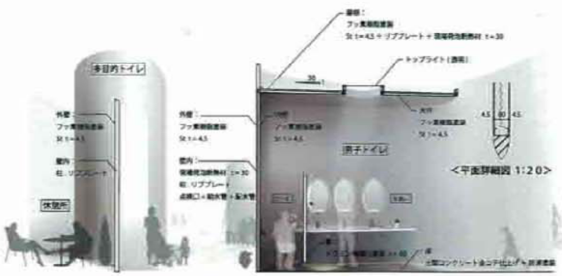
観性を伴う認知設計

地域の人々が集まる公園に、心的トポロジーが抑揚する、レストスペースを計画する。利用者の構図の基となる建物の輪郭を、曲面の壁の群造形とした。視点の移動に伴い、一点透視・二点透視が動的に混じる移動位相空間とし、利用者の感情に働きかける。各トイレへは、利用者の視線と性別による感情の傾向を考慮した構図の組合わせとし、その上で、動的な屋根の反りを決める様に全体を制御・審美の判断を行い設計した。

＜平面図 1:300＞

観性を伴う工法設計

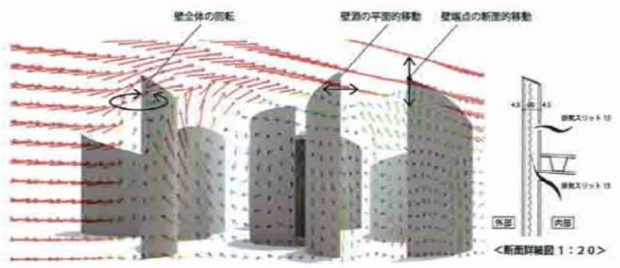
利用者の心的トポロジーが軽やかに移ろぐ構図となるように、工法の検討を行う。壁の小口を薄く納めることで、知覚する小口の線と建物の輪郭の線の差を無くし、空間の内外が強く攪拌される体験を、利用者の深層心理に経験させることができる。主に絶対的指標を扱う設計者の構造が、相対的指標を扱う利用者と不可分なことを考慮して、曲面化・材料最適化した壁で、観性を持つかたちを設計した。



＜断面図 1:100＞

観性を伴う流体設計

利用者の心的トポロジーにセベラルネスを与えられるように、流体の検討を行う。北西と南西からの風で計算し、壁の向き・高さを制御することで、風を建物中心方向に導き、気流や匂いが攪拌・臭いが排気され、空間体験を抑揚ある快適なものにする。環境要素は、意識的に感覚を澄ませる・無意識で順応することにより、相対的に知覚される。この様な環境要素の相対的指標と絶対的指標を連動させ、観性を整える。



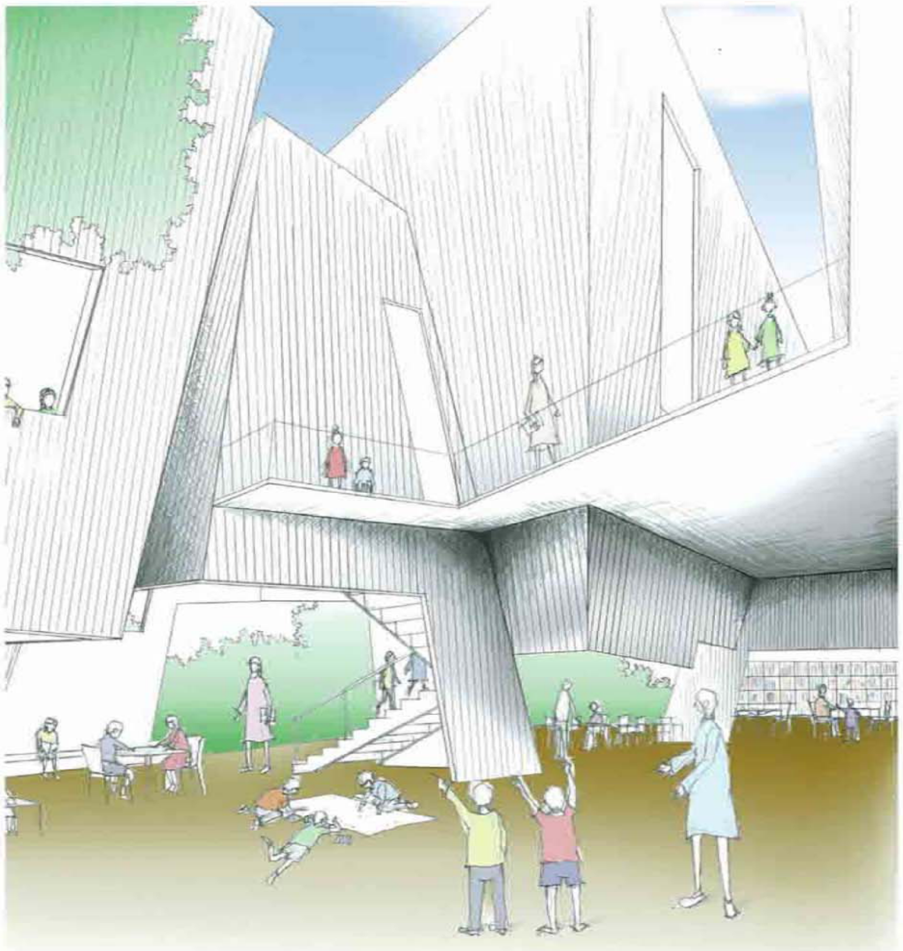
＜流体解析図＞

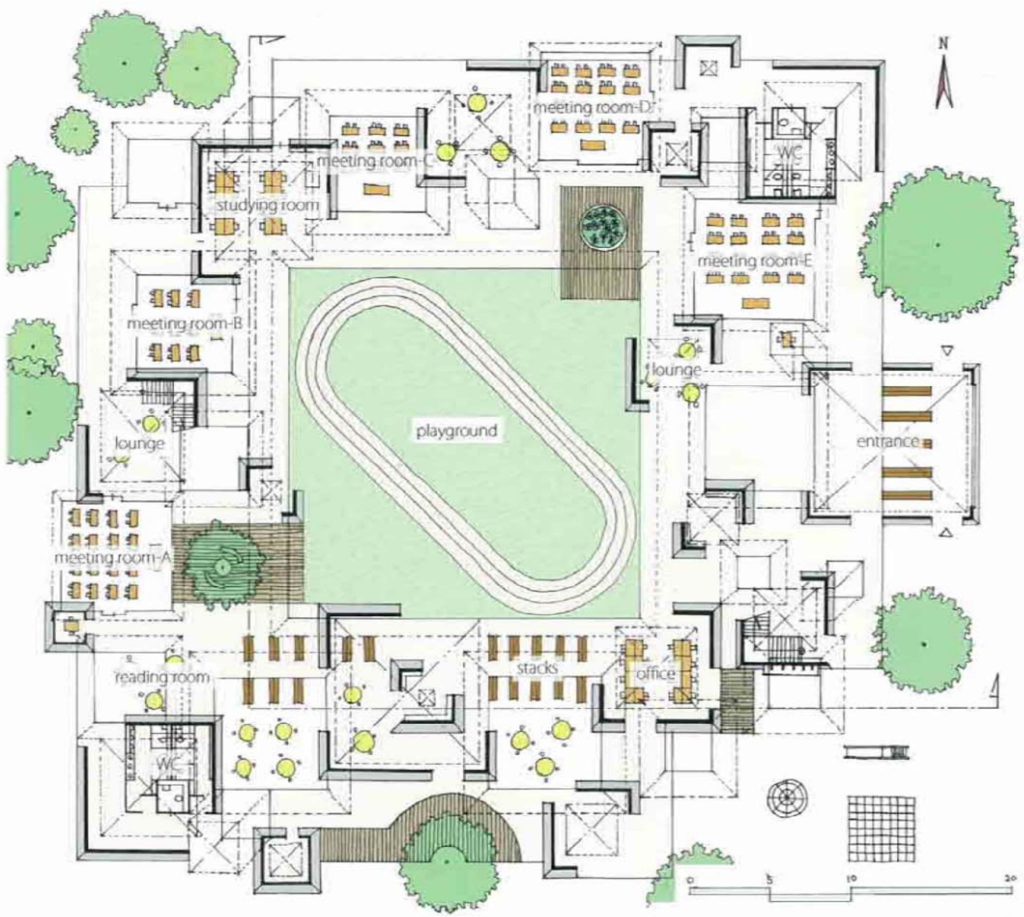
Slip Frustum

古都奈良に現存する寺社建築は、日本の歴史上重要な価値を持ち、造型物としても魅力的である。

その工法は歴史と共に少しずつ発展してきたが、現代の木造建築にはあまり見ることのできない多種多様な組み物の形式が採用されている。一見複雑に絡み合っているように見える継手・仕口ではあるが、一つ一つの形態はシンプルであり、単体の接合部のみでは不安定なものも多い。しかし、複数の部材の立体的な組み合わせと、重力により生じる力の流れを利用することで、構造的な強度・剛性を生み出し、現代まで建ち続けることを可能にする架構形式として成立する。組み物による接合方式は、組立とは逆の手順を追うことで、部材に損傷を与えることなく解体が可能であり、再び組み直すこともできる。

この技術をモチーフとし、再生・修復を繰り返すことのできる新しい形態創生手法の提案を行う。





plan

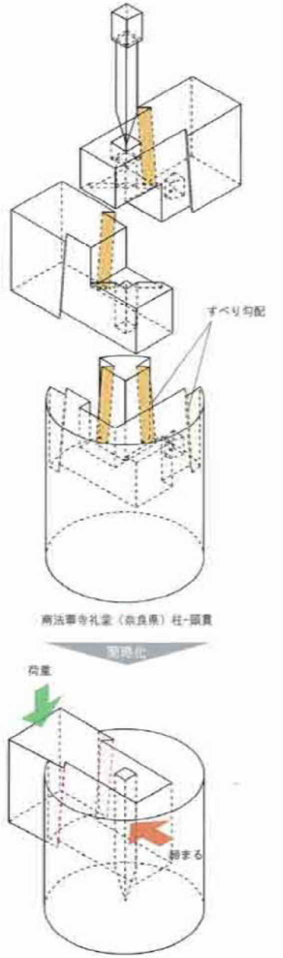
section

本提案を利用し、図書館と幼稚園を併設した建物を考案した。この例の場合、図書館の書架の増設や幼稚園の園児数の増減、施設内のレイアウト変更の際に有効に活用できる。スケルトン・インフィルの様な従来の方法にとらわれない、自由度の高い建物の更新手法にもなり得る。

Concept

1 日本建築の継手・仕口

日本建築の柱ー頭貫の仕口の一例を示す。
日本の伝統木造建築の多くは、一方の部材をもう一方の部材の上部より落とし込むことで部材同士を連結している。中でも、『すべり勾配』と呼ばれる巧妙な加工が施されている接合部は、梁や貫などに鉛直荷重が加わるにつれ引き締まる仕組みである。接合部の剛性が増し、より安定感を生み出す技法である。



形態に工夫を凝らすことで、接合金物等が不要となれば、母材を傷めずに接合が可能で、再生・修復という観点からも多くの可能性を感じる。

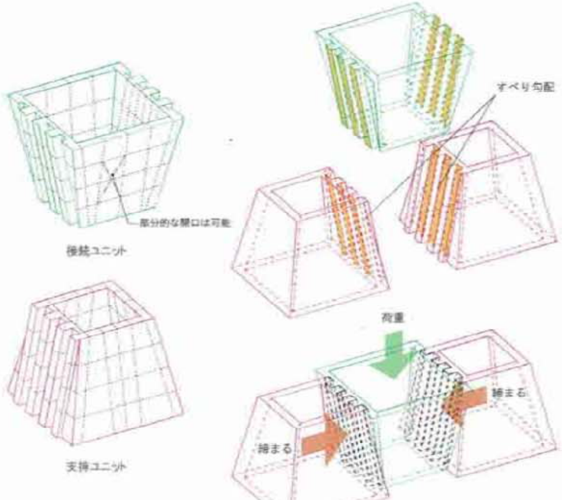
本提案では、この接合部の仕組みを積極的に利用する。

2 荷重伝達ユニットの提案

すべり勾配の原理を利用した錐台形のユニットを提案する。
以下に2つの方法を示すが、どちらの形式も接続ユニットを取り外し、修復・更新を行えるシステムである。また、各ユニットは分割されたピースで構成し、ピースごとの更新も可能にする。
ブロックユニットを組み合わせることで建築から家具まで、多様なスケールでの展開が可能である。

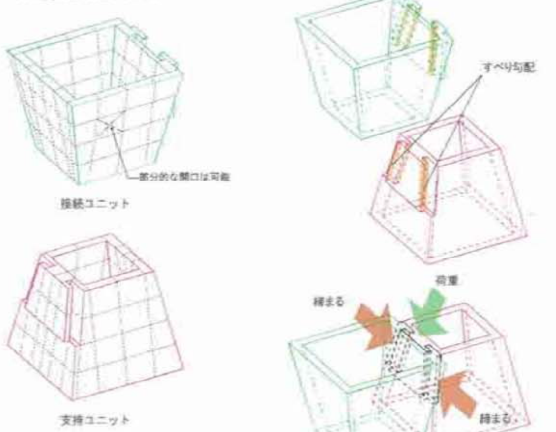
Ⅰ．基本ユニット

2つの支持ユニットの間に、上から接続ユニットをはめ込むことで安定させる。
台形の形状そのものをすべり勾配として利用する。



Ⅱ．片持ちユニット

2つのユニットの接合面内に勾配をつくり、すべり勾配の原理を用いることにより、片持ち形式でのユニット連結を可能にする。



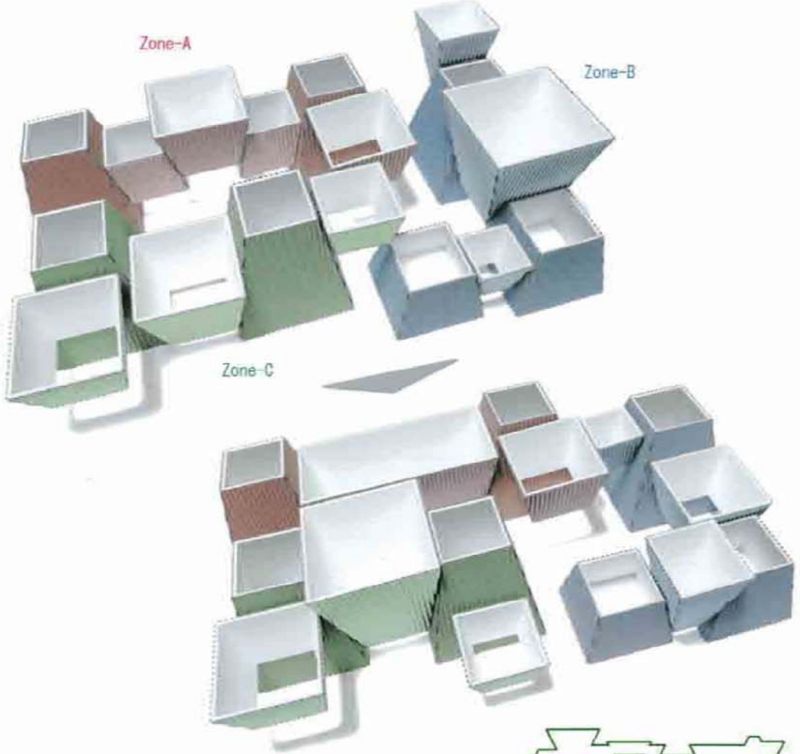
3 修復・更新・再生

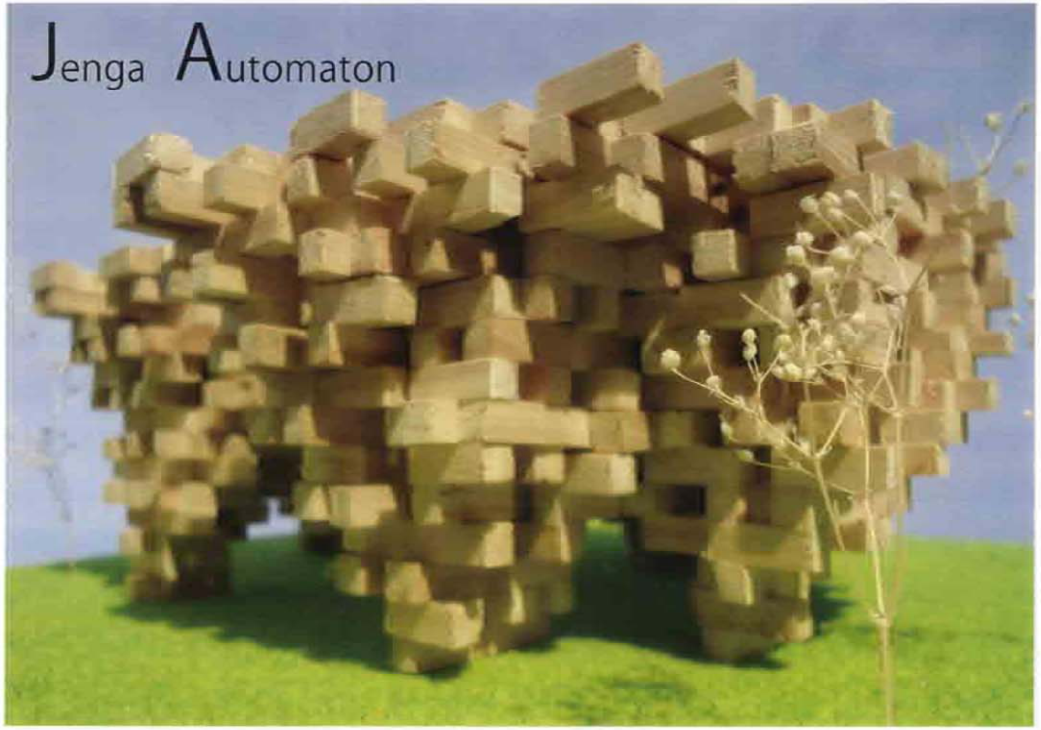
～ユニットの更新～

各ユニットは、用途の変更や老朽化などにより部分的な更新が必要となった際、取り外して交換、または別の位置に追加することのできるシステムとする。
支持ユニットの耐荷重を予め設定し、その範囲内で増・減築を行う。
同じ接合方法であれば、ユニットの形状や接続位置を変更することが可能となる。

～ゾーンごとの更新～

2～3個の支持ユニットで1つのゾーンを形成し、構造的なまとまりをつくる。
地震などにより損傷が生じ、支持ユニットの更新が要求される場合は、該当するゾーンのみの修復を行う。
その際、他のゾーンの機能は正常に保つことができる。





Sheet-1

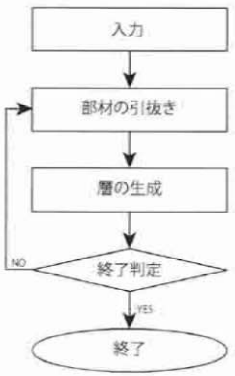
従来、構造物は大規模な改修がない限り時間が経てば解体され、その材料も基本的に捨てられている。このように構造物は『再生する』ことができないという状況にある。

そこで、ブロックを抜く・積むを繰り返して遊ぶ玩具として有名な「ジェンガ」に着目する。多数のブロックで構成されるジェンガは 1 部材を引き抜いても、問題なく新たに積み上げることができる。その積み上げ方次第で異なるかたちや空間を『再生する』ことができると考える。

しかし、空間を構成するほどの膨大なジェンガブロックを人の意思により効率的に積み上げることは極めて困難である。そこで、コンピュータプログラミングを用いて配置を決定する。ここでは、入力情報から規則に従い、新たな情報 (セル) を出力する CA (セル・オートマトン：Cell Automaton) の規則に、ジェンガの抜く・積む操作を対応させた手法を提案し、『再生する』かたちを創生する。

また、構造物においてブロックを単純に抜く・積む操作により出来たかたちは不安定である。この問題に対しては日本古来の建築物の固有性である伝統工法に着目する。伝統工法は木材を加工することで、接合用部材がなくとも部材同士を接合することができるというメリットを持つ。この伝統工法によってブロック同士を接合し、安定したかたちを造る。使われることが少なくなった伝統工法を用いることで、技術の『再生する』にもつながると考えている。

形態創生方法 …… 一定の規則に基づき「かたち」を形成する CA を基本としたアルゴリズムの提案



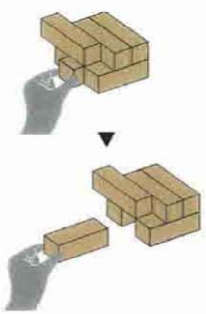
入力データの読込み

- 設計領域
- 初期状態の設定
- 材料情報 (大きさ・個数)
- CA 規則
- 制約条件 (空間確保など)

指定材料数に達したか

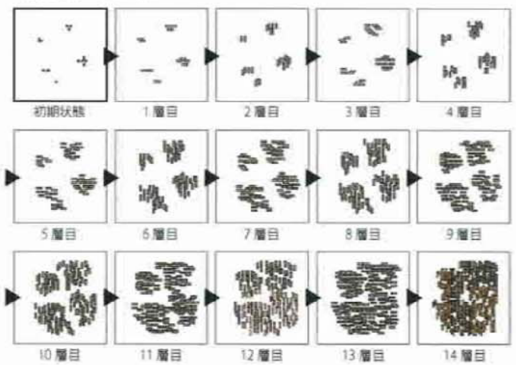
部材の引抜き

積み上げに支障のない部材を引抜く



層の生成

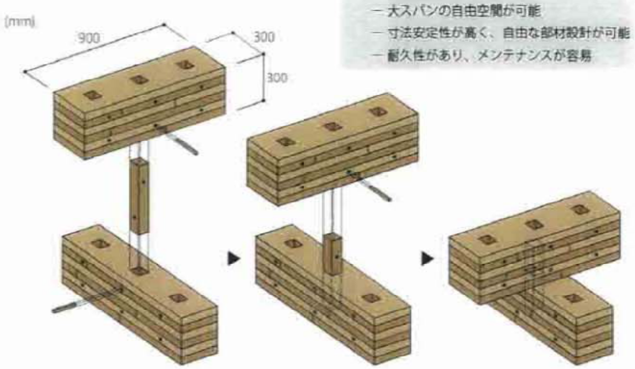
設計領域：12m×12m



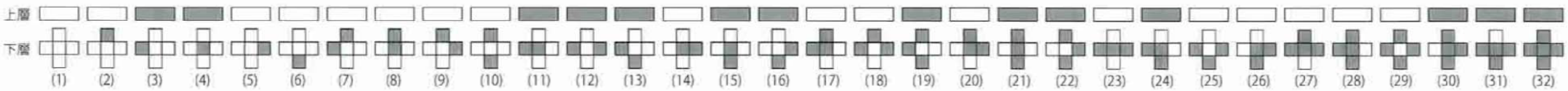
伝統工法 …… 長ほぞ差し込栓打ち

構造集成材の特徴

- 強度性能が高い
- 大スパンの自由空間が可能
- 寸法安定性が高く、自由な部材設計が可能
- 耐久性があり、メンテナンスが容易

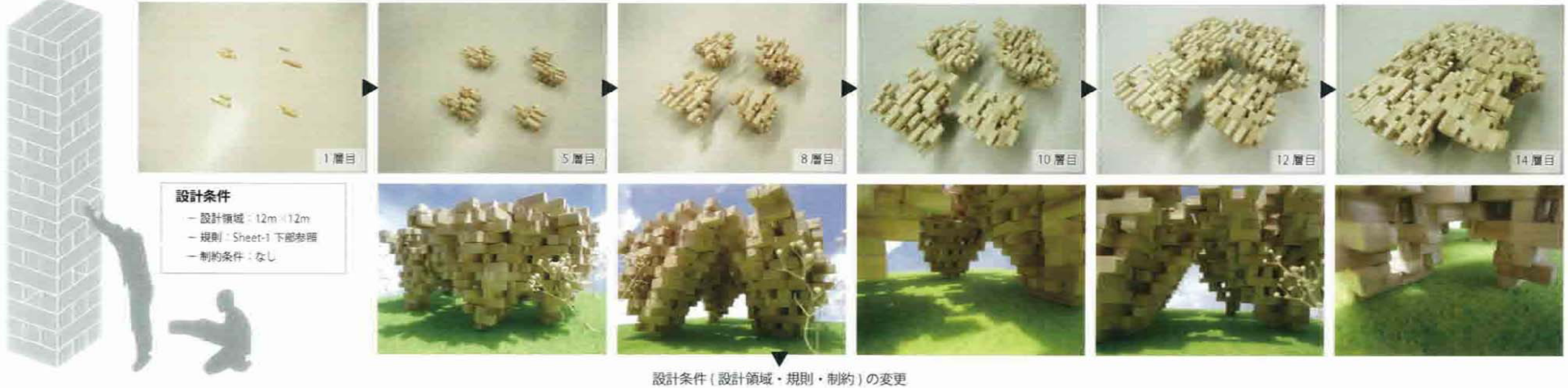


規則



積み上げ過程

Sheet- 2



設計条件（設計領域・規則・制約）の変更

1. 設計領域の変更 … 用途に応じた規模に拡大

2. 規則の変更 … 多様なかたちに再生

3. 規則の変更＋制約条件（空間確保）の導入 … 目的に合わせた空間制御

空間確保…制約領域内にはブロックを配置しない。
制約領域：3m×2m×2m

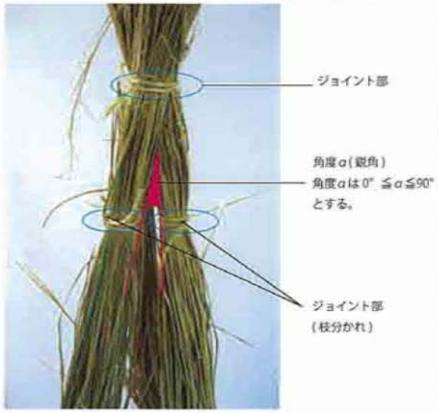
4. 様々なかたちを組み合わせる … 新たな空間の創生

WARABOCCHI STRUCTURE

形態創生コンテスト2012

歴史ある地域の固有性に学び「再生する」かたちを創生する

わらぼっち



ジョイント部は縄を締め3つに枝分かれする部分も同様に縛る。角度は常に鋭角で小さくなるほど強度が増す。

■円を２つ作る

■できた円を重ねる

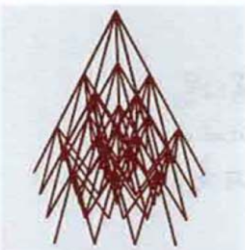
■円に藁を入れる

■端をしばる

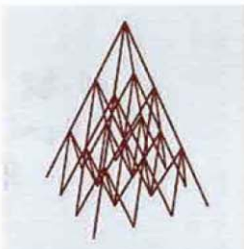
わらぼっちは稲藁をまとめて組み積んだもので、藁の保存のため米の収穫後に脱穀した後の藁束から作られる。わらぼっちの名の由来は俵の両側の放射状の部分（桟俵）や帽子が訛った言葉を『ぼっち』という事から『藁帽子』の意味をもつ。地域ごとに呼び名が異なり，また突起物の事を『ぼっち』とも呼ぶ。わらぼっちは主に福島・神奈川・静岡で呼ばれ、宮城ではわらみよ、茨城県久慈郡ではわらぼっちと異なった呼び名をもつ。

一方『ぼっち』は漢字で「法師」と書かれる説もある。加えて『ぼっち』はアイヌ語で「巨人」、「巨大」という意味をもち、且つ「高い山」「大きな山」を表すという説も存在する。藁は草履やむしろなど日常生活に用いられ、昔の日本文化に欠かせないものであり古くから日本各地で米の収穫後に藁を乾燥させるために使われてきた。各々の農家が編み方や束ね方にこだわりをもち、地域によって多様性が生まれた。近年ではエコロジーの観点から環境にやさしい素材として見直されている。

The number of branching



■5股に枝分かれしたもの



■4股に枝分かれしたもの

わらぼっちの形態は地域や農夫によって異なるので、何本に枝分かれするか、何股に分かれるか、という部分でも違いが見られる。多くのわらぼっちは3股､4股､5股に分かれるのが一般的である。

我々が構造体に適用する際にもその点を検討したが、材料の量、施工性などの点から枝分かれの数はより少ない方が優れた構造体になると考えられる為、3股に分かれるわらぼっちを採用した。また、三角形が最も安定した幾何学である事は周知の事実である為、構造体としての強度も担保されている。

Concept

わらぼっちの簡素な仕組みを利用した構造体を提案する。わらぼっちを１ユニットとし構造体は藁のような繊維状の素材から構成され、それらが上層から下層に枝分かれする。トラス構造や二次元ラティス構造でない三次元ラティス構造をとる構造体を形成する。セミラティス構造は引張に弱いが、素材を下層に伴い重ね掛ける事で強度が増し且つ自重にも対応する。各層三本の柱の間の角度、素材を補う規則と本数の調整から適正な値を導き、水平方向の引張力に適応させる。柱間は空気が通り抜ける様、板を張らず風圧に耐える。

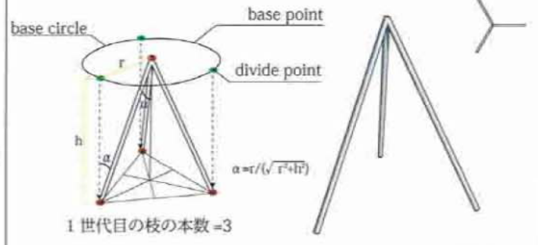
任意に選んだ三点が同一平面上に存在するように三角形の安定性は明らかである。安定な状態を好む原子は三角形を持つ形態になりやすく、テトラポッドにも応用される。四角形をもつ平面でも対角に梁を通し平面には三角形があらわれる。

Form generation

この構造体の形態を決定するアルゴリズムは、全て以下のプログラミング言語内に示されている。以下の記述をコンピュータに読み込ませる事で自動的に形態が生成される。パラメータを調整することで様々な形態を生み出す事ができる設計図である。

形態生成のアルゴリズム。base point、base circle、divide point によって構造体の概形が決定される。r と h というパラメータを調整することで構造体の半径・高さが決まる。

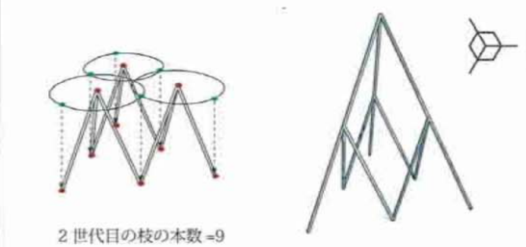
1



1 世代目の枝の本数 =3

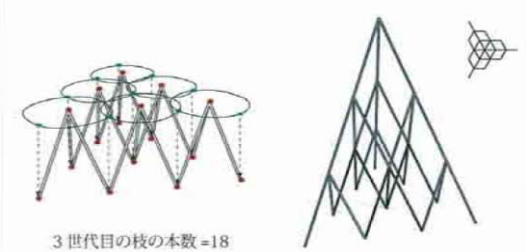
r：構造体の開き具合を決定する　base circle：r から決定される
α：構造体の開き具合　divide point：base circle を等分割した点
h：各世代の高さを決定する　base point：形態生成の基点

2



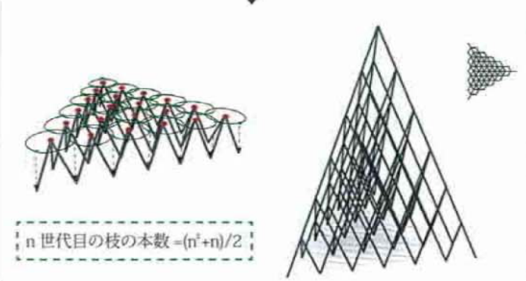
2 世代目の枝の本数 =9

3



3 世代目の枝の本数 =18

n

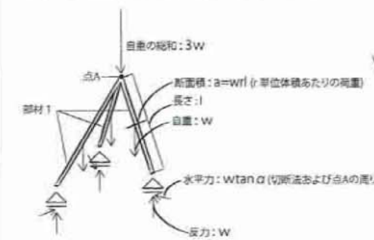


n 世代目の枝の本数 =$(n^2+n)/2$

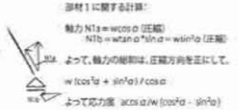
Structual analysis

構造体をもっとも安定的に自立させるため、構造体の各部材においける応力度が一定になるように各層における各部材に対して、圧縮方向と引張方向の軸力の総和から、その総和を受け止めるのに必要な断面積を求めていく。

1段目における垂直方向、水平方向の力による応力度計算

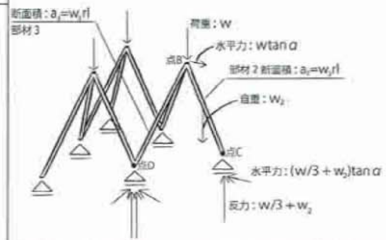


部材 1 に関する計算：



よって応力度 acos α/w (cos²α - sin²α)

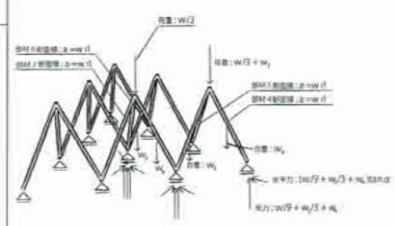
2段目における垂直方向、水平方向の力による応力度計算（各段の応力度が均等になるように部材に求められる太さを計算していく）



部材 2 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_2を求める

部材 3 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_3を求める

3段目における垂直方向、水平方向の力による応力度計算（各段の応力度が均等になるように部材に求められる太さを計算していく）



部材 4 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_4を求める

部材 5 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_5を求める

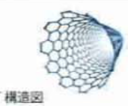
部材 6 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_6を求める

部材 7 に関する計算：
部材 1 に関する計算と同様に求め、応力度が各部材に対して均等になるようにW_7を求める

Joint

・部材のジョイント
各世代の部材のジョイントは、繊維という構造材の特性を生かし、図の様に互いの材を絡み合わせる事で行う。
また、わらぼっちが結び目で補強されている様に、各世代の枝分かれの部分を補強する事も可能である。

Material



■CNT 構造図

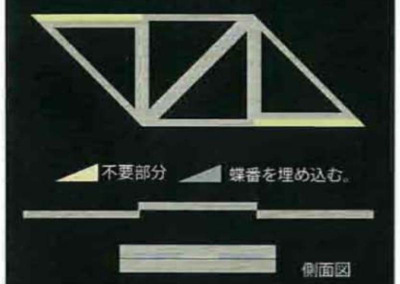
■カーボンファイバー製ロボットアーム

・カーボンナノチューブ (CNT)
カーボンナノチューブは炭素原子からなる六員環構造の管状ナノ材料である。太さは髪の毛の 1/50000 で構造として曲げ、引っ張りに強く鋼鉄の 1/10 以下の比重、20 倍の強度を持つ。

・カーボンファイバー
繊維材のひとつであるカーボンファイバーはアクリル繊維またはピッチを原料に高温で炭化して作った繊維である。軽量で強度が高いという特徴を持つ。


故を温ずねて新しきを知る
現在、伝統のある地域や地方都市で過疎化や伝統建築と新しく造られた建築との共存現在、伝統のある地域や地方都市で過疎化や伝統建築と新しく造られた建築との共存が問題となっている。このような地域では、箱形のビルが無造作に昔ながらの家の間が問題となっている。このような地域では、箱形のビルが無造作に昔ながらの家の間が散らばっており、日本古来の街並みや風景が失われていると感じる。この問題を考えたとき、伝統のある日本の思想、様式、技法、技能に学んだ新しい建築を考え、地域の要所に建てることで伝統的な建築と共存させて地域の活性化問題を解決する。日本古来の知恵や物の中から、日本独自の折り紙を建築に取り入れ、空間をつくる。
このプロジェクトではユニット折り紙という考え方を用いる。ユニット折り紙とは「何枚もの紙を同じ形に折って、それらを組み合わせ、一つの作品を作りあげる」というものでユニットを木材でつくり、フレームを自由に組み合わせて空間をつくることで日本の伝統的あり新しい建築がうまれると考えた。また、ユニットを容易に外すことができ再利用にも適している。

Detail Design



部材の不要部により、組み合わせたときに隙間をなくすことができる。

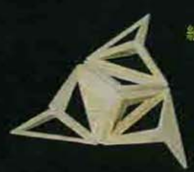
↓

蝶つがいを付けることで三角形の部材が自由に動く。

↓

部材の重ねた部分にボルトをはめ固定する。

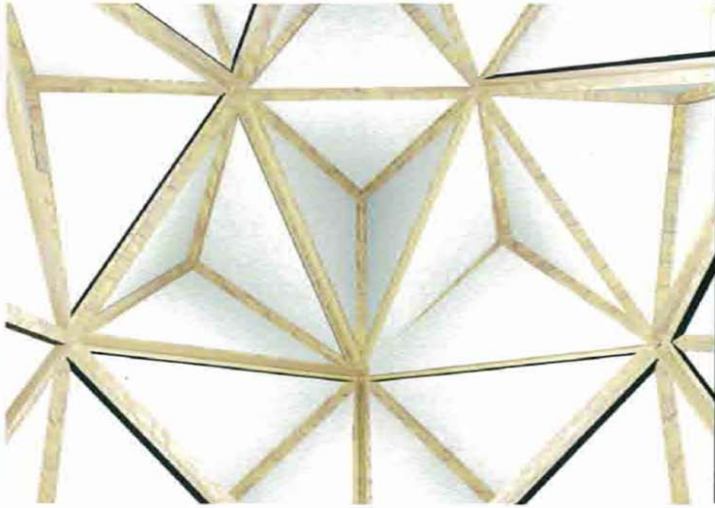
↓



この一連の作業で多種多様の形態が可能になる。
形態ができたら表面に和紙を貼る。

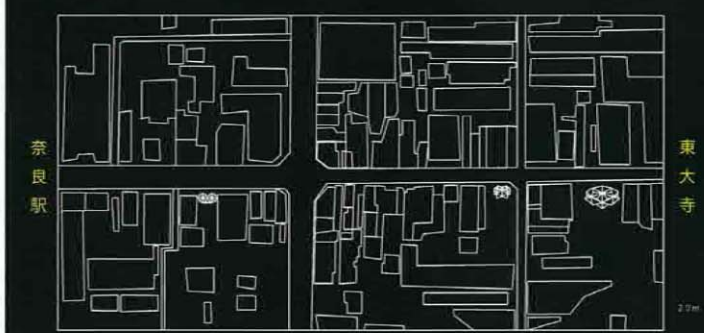
Reproduction Mechanism

日本の個性的な伝統工芸
↓
折り紙
↓
ユニットを組み合わせて空間構成
↓
——————→ユニット形成の提案
↓
和紙とフレーム組み合わせることで、日本独自の建築になる
↓
日本特有の空間と新しい建築における共存の起爆剤
↓
地域の活性化
↓
——————ユニットを取り外し再利用

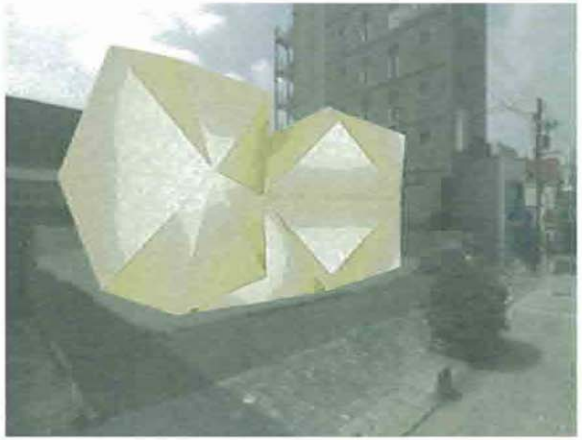


カフェテリアとして提案する通りで最も伝統と現在が複雑に絡み合っている場所。オープンカフェを配置することによって地域の住民や観光者などを融合により街がにぎわう。

左図は、建物の内部空間から上部を見上げたCGパースである。
ユニット数：48



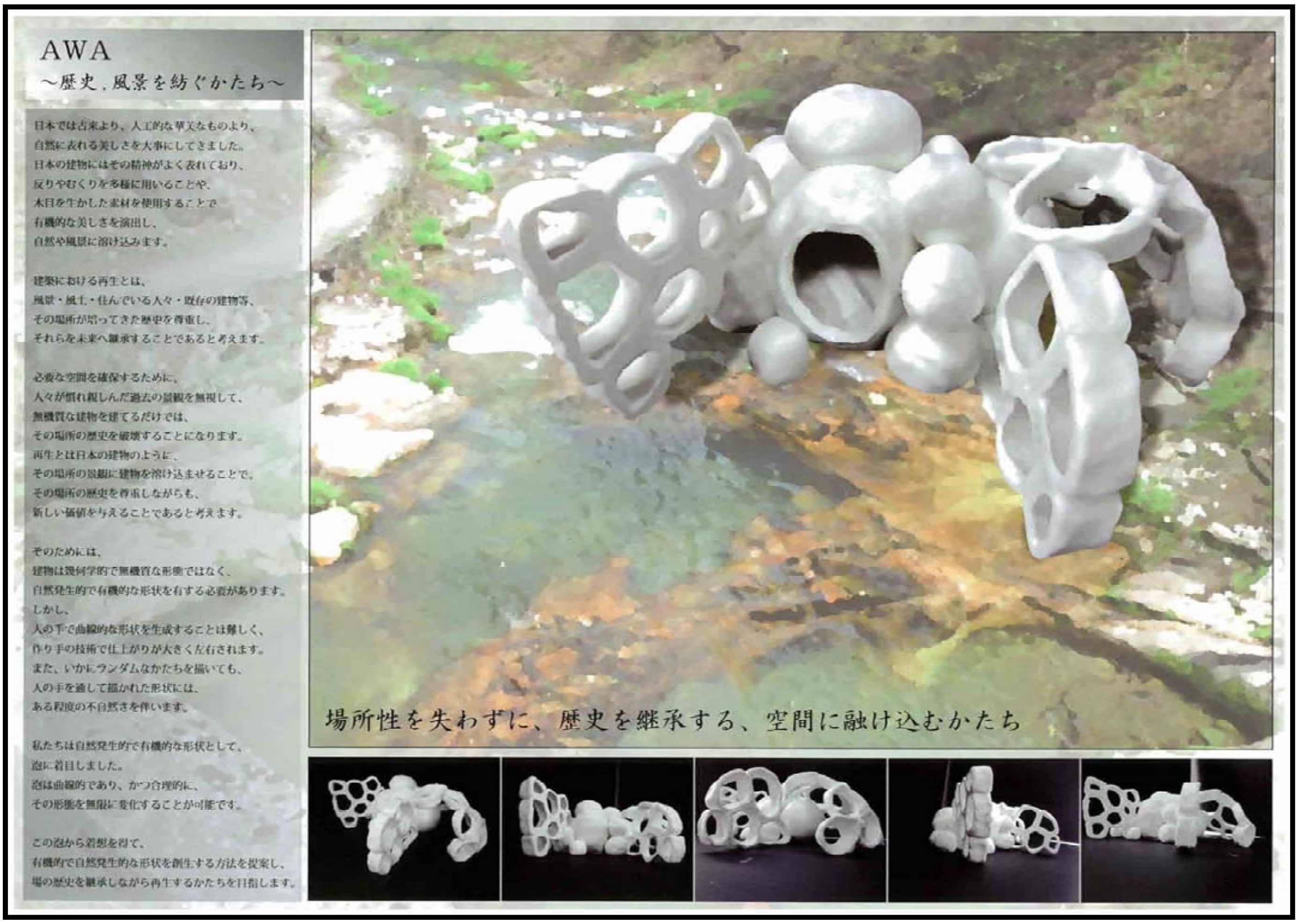
この地位域は奈良駅と東大寺の中間にあたる伝統のある場所である。通りに今回提案した建築を配置する。配置場所は、伝統的建築が近くにあり２区画に一つとする。建築の用途は、カフェ、コンビニ、お土産やとし、多くの人が立ち寄る空間とする。地域の人や、観光客が集まり日本の伝統的であり、モダンな雰囲気を感じる空間とする。夜中は、建物から漏れる和紙の暖かい光が街を包む。

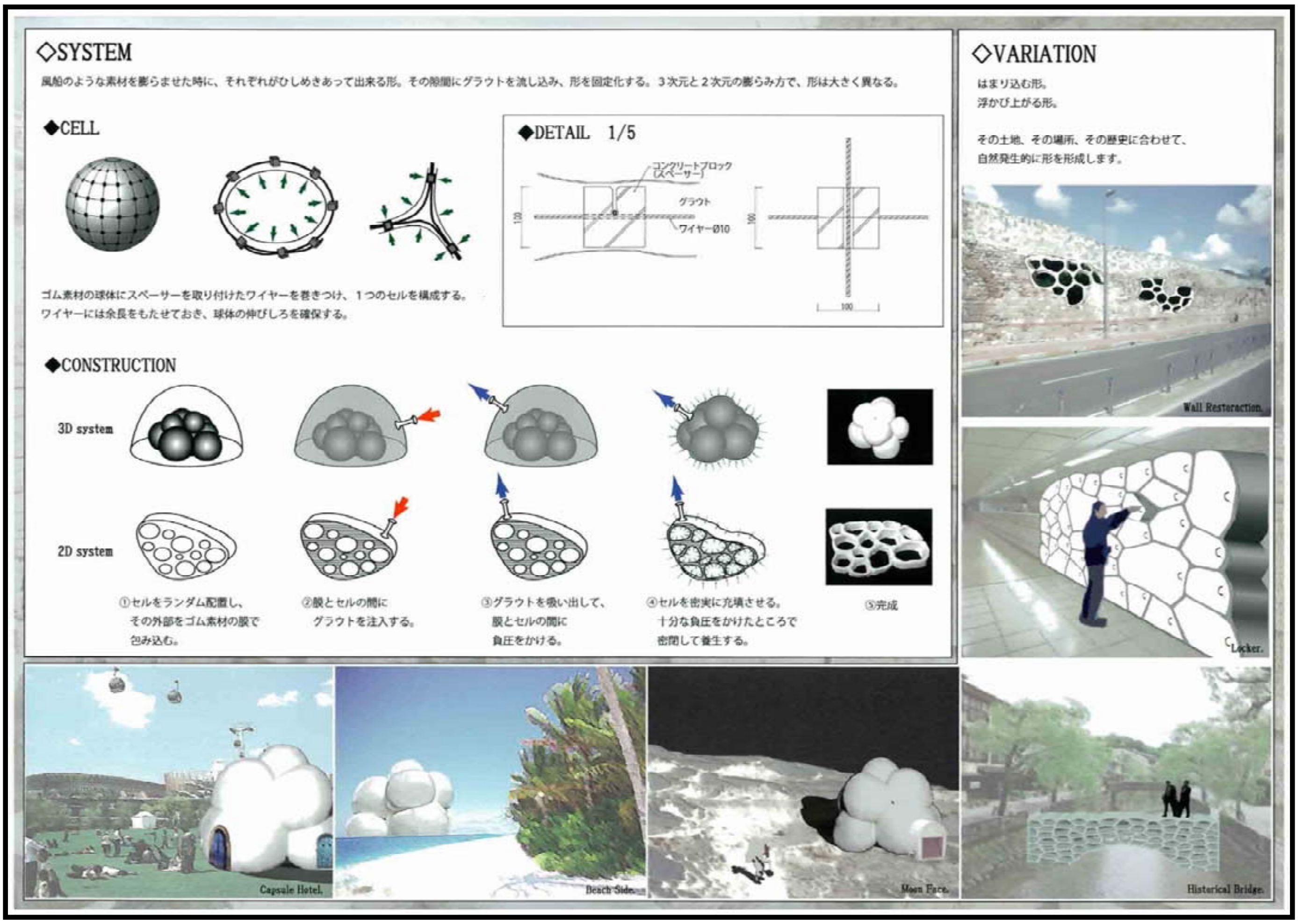


← コンビニとして提案する
二つの内部空間で、フードコートと売り場に分けることが出来る。
ユニット数：28

お土産屋として提案する。 →
東大寺から近いので、観光客などが立ち寄ること目的にしている。
ユニット数：28

佳作「AWA～歴史と風景を紡ぐかたち～」, ｴﾝﾄﾘｰ No.15, 寺井亮, 南尚孝, 齋藤元嗣, 寺井千絵, 馬場敏光, 助川 知洋





コロキウム構造形態の解析と創生 2012

2012 年 10 月

編　集

著作人　一般社団法人 日 本 建 築 学 会

〒108-8414 東京都港区芝 5 丁目 26 番 20 号

TEL 03-3456-2051

FAX 03-3456-2058

http://www.aij.or.jp

印刷所　■■■■■■■■■■■■

コロキウム資料　AIJ-1210-03000