

コロキウム
構造形態の解析と創生
2006

開催日：2006年11月14, 15日

日本建築学会

主催：シェル・空間構造運営委員会 空間構造における計算機応用小委員会

共催：応用力学運営委員会 構造形態の創生と最適化小委員会

主 旨 説 明

1995年11月に行われた「コロキウム 構造形態の解析と創生」では、建築構造の最適化や構造形態創生に関する研究発表及び活発な討議が行われ、国内外におけるその後のこの分野の研究に大きな影響を与えた。以後10年の間、新しい理論の提案や計算手法の開発が精力的に行われている。特に21世紀に入り、構造形態創生の理論を構造デザインに応用した建築構造の実施施工例も現れ、基礎理論だけでなく応用研究も一斉に開花した感がある。本コロキウムでは建築関連の構造最適化や構造形態創生に関する最新の研究を手がける研究者、技術者が一堂に会し、研究発表、事例紹介、ソフトウェア紹介、形態模型の展示、形態創生コンテストなどの企画を行い、最新の情報交換を通して、将来に向けたこの分野の目指すべき方向性を探り、今後の研究のますますの発展に資することを目的としている。

2006年11月

シェル・空間構造運営委員会

主査 大森 博司 (名古屋大学)
幹事 大崎 純 (京都大学), 川口 健一 (東京大学)

空間構造における計算機応用小委員会

主査 元結 正次郎 (東京工業大学)
幹事 武藤 厚 (名城大学), 萩原 伸幸 (大同工業大学)

構造形態の解析と創生ワーキンググループ

主査 本間 俊雄 (鹿児島大学)
幹事 山本 憲司 (鹿児島大学)
委員 大崎 純 (京都大学), 大森 博司 (名古屋大学)
岡田 章 (日本大学), 川口 健一 (東京大学)
河村 拓昌 (トヨタ・コミュニケーションシステムズ), 熊谷 知彦 (東京工業大学)
藤井 大地 (近畿大学), 藤原 淳 (太陽工業)
松尾 智恵 (川口衛構造設計事務所), 水谷 太朗 (大成建設)
三井 和男 (日本大学)

構造形態の創生と最適化小委員会

主査 大崎 純 (京都大学)
幹事 萩原 伸幸 (大同工業大学), 高田 豊文 (三重大学)

「コロキウム 構造形態の解析と創生 2006」実施組織メンバー

広報・渉外・特別講演担当: 本間 俊雄 (鹿児島大学)
会計担当: 本間 俊雄 (鹿児島大学), 萩原 伸幸 (大同工業大学)
会場担当: 大森 博司 (名古屋大学), 河村 拓昌 (トヨタ・コミュニケーションシステムズ)
報告・論文集構成・プログラム編成担当: 山本 憲司 (鹿児島大学)
形態図書リスト作成担当: 大崎 純 (京都大学)
形態ソフトリスト作成担当: 三井 和男 (日本大学), 高田 豊文 (三重大学)
形態コンテスト担当: 松尾 智恵 (川口衛構造設計事務所), 水谷 太朗 (大成建設)
立道 郁生 (前田建設工業)
形態ソフトデモ担当: 藤井 大地 (近畿大学), 熊谷 知彦 (東京工業大学)
平田 裕一 (三井住友建設)
構造形態模型展示担当: 岡田 章 (日本大学), 藤原 淳 (太陽工業)
コロキウム HP 担当: 三井 和男 (日本大学), 熊谷 知彦 (東京工業大学)
山本 憲司 (鹿児島大学)

*本コロキウムの実施に際しては、財団法人大幸財団の助成を受けました。

目次

■特別講演

- (1)形態解析・創生は構造デザインにどのように寄与すべきか----- 3
川口 衛(川口衛構造設計事務所)
- (2)生物に学ぶ形態設計----- 13
山崎光悦(金沢大学)

■一般講演

- (1)アリの探索行動が見つけた構造形態----- 19
○三井和男(日本大学), 曾我部博之
- (2)RS 座屈荷重係数を目的関数とした単層ラチスドームの形状最適化 ----- 25
○山本憲司(鹿児島大学), 皆川洋一, 大森博司
- (3)NURBS 曲線を用いた建築屋根の形態創生に関する研究 ----- 33
○佐々木啓介(芝浦工大学), 堤 和敏
- (4)遺伝的アルゴリズムを用いた建築構成要素のライフサイクルデザインに関する研究 ----- 39
○小林春之(名古屋大学), 内藤雅子, 大森博司
- (5)スポーツネットのように極端に弛むネットの载荷実験と解析計算 ----- 45
○藤井文夫(岐阜大学), 大崎純, 瀬川信哉, 藤原淳, 小田憲史, 野口裕久
- (6)連続値ホップフィールドモデルによる連続体の形状最適化 ----- 51
○瀧圭佑(愛知工大学), 曾我部博之, 三井和男
- (7)拡張 ESO 法による曲面構造形態の創生 ----- 57
○石川敬一(名古屋大学), 大森博司, 梶田哲嗣
- (8)空間構造物における冗長性評価手法に関する基礎的研究 ----- 65
○船橋健吾(名古屋大学), 大森博司
- (9)張力構造の形態解析に関する一方法と設計支援システム ----- 71
○森哲也(鹿児島大学), 矢山正大, 本間俊雄
- (10)最適化における剛性感度テンソルの応用 ----- 79
陳 沛山(八戸工大学)
- (11)トラスのトポロジーおよび部材断面最適化問題に対する非線形計画法の大域探索に関する研究 ----- 87
○澤田樹一郎(広島大学), 松尾彰, Dai Qing Song, 松島光作
- (12)多目的遺伝的アルゴリズムを用いたリカレント建築設計支援システム ----- 93
○北村大輔(神戸大学), 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣
- (13)最適トラス・トポロジーの多様性・複雑性と設計領域・荷重条件に関する考察 ----- 99
○松岡貴士(三重大学), 高田豊文
- (14)Multi-stable テンセグリティ構造物 ----- 105
○張景耀(京都大学), 大崎純, S. D. Guest
- (15)フィルムクッションの形態創生と粘塑性について ----- 111
河端昌也(横浜国大学)
- (16)グリッドシステムを用いた遺伝的アルゴリズム最適制御部材探索法 ----- 115
○中澤祥二(豊橋技科大学), 加藤史郎, 柴田良一, 島岡俊輔
- (17)制約条件の操作によるテンション構造の形態解析 ----- 121
○古田寛生(大同工大学), 萩原伸幸

(18)位相最適化手法を用いた建築構造形態の創生-----	127
	藤井大地(近畿大学)
(19)GA系解法による解の多様性を考慮した構造形態の創生-----	135
	○堀切秀作(鹿児島大学), 本間俊雄
(20)ホメオスタシス法による曲面構造形態の創生に関する研究-----	143
	○木村俊明(名古屋大学), 大森博司
(21)拘束条件付きの極小曲面と膜構造形態に関する研究-----	149
	○柯宛伶(東京大学), 川口健一
(22)構造最適化手法を用いた建築構造創生支援ソフトウェアの開発-----	157
	○田村尚土(名古屋大学), 伊藤智幸, 大森博司
(23)異種接合部を有するブレース付き骨組の形状最適化-----	163
	○萩下敬雄(京都大学), 大崎純

■ソフト事例紹介(招待講演)

(1)平板の形態生成と補強を学ぶ教育用ソフトの開発-----	171
	石井恵三(くいと)
(2)製造業設計者向けCAEソフトを利用した最適化計算の事例-----	177
	○飯嶋保男(構造計画研究所), 森光寛
(3)製造性と評価のし易さを考慮したトポロジー最適化結果の生成-----	179
	由淵稔(アルテアエンジニアリング)
(4)遺伝的アルゴリズムを用いた構造物最適化-----	185
	○萩原あづみ, 古井佐土志(サイバネットシステム)

■形態コンテスト

□コンテスト概要-----	187
□講評-----	188
(1)ボロノイ分割を用いた形態創生-----	190
	○中村吉秀(大林組), 渡辺哲巳, 森洋一, 山中昌之
(2)カテナリーを基にした水平力に対抗しうる形態の模索-----	192
	○古田寛生(大同工大学), 増田卓朗
(3)「創」～進化による可能性～-----	194
	○坂中玲子(鹿児島大学), 堀切秀作, 工藤玲, ガ・レ・ビック・フ・オ
(4)ハニカムエアクション壁の形態創生について-----	196
	○平嵩雄(横浜国大学), 櫻井佑美
(5)セルオートマトンを利用した創発的形態創生-----	199
	佐藤俊介(東京農工大学)
(6)自然と調和するアーケード-----	201
	漆崎西仁(福井工業大学)

■文献・ソフトウェア リスト

□建築構造形態創生関係文献リスト-----	203
□建築構造形態創生関係ソフトウェアリスト-----	213

■特別講演

特別講演講師 川口 衛 (かわぐち まもる)

特別講演題目

「形態解析・創生は構造デザインに どのように寄与すべきか」



株式会社 川口衛構造設計事務所主宰

資格 工学博士 建築構造士

略歴：1932年 福井市に生まれる。

1955年 福井大学工学部建築学科卒業

東京大学大学院入学、建築構造学専攻

1960年 法政大学工学部建築学科勤務（退官2002年）

1964年 株式会社 川口衛構造設計事務所を主宰

1966年 工学博士（東京大学）

1997年 ドイツ、シュツットガルト大学名誉工学博士

1998年 スロバキア、スロバキア工科大学名誉工学博士

2003年 法政大学名誉教授

研究活動：「立体構造に対する基礎理論の応用」を主眼に、RCシェル、テンション構造、スペース・フレーム、免振構造等の面で、新しい研究分野を開拓している。

設計活動：「建築構造と造形」、「新しい構造技術の開発」をテーマに設計活動をしている。主な作品（構造設計）としては、代々木オリンピック水泳場、西日本総合展示場、万国博お祭り広場大屋根、万国博富士グループ館、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、イナコスの橋、セラミックパークMINO等、多数。

主な著書：「スペース・ストラクチャの設計と実例」（鹿島出版会）、「建築概論」（彰国社）、「吊構造」（コロナ社）、「建築構造パースペクティブ」（日本建築学会）、「建築構造のしくみ」（彰国社）、「Felix Candela」（TOTO出版）、「エドゥアルド・トロハの構造デザイン」翻訳（相模書房）等

学会活動：日本建築学会、日本鋼構造協会、新日本建築家協会、日本建築構造技術者協会、国際シェル・空間構造学会、各正会員

- ・1981年-1982年 日本建築学会監事
- ・1987年-1988年 日本建築学会学術理事
- ・1987年-2000年 国際シェル・空間構造学会副会長
- ・2000年-現在 同上 会長

主な受賞：科学技術庁長官賞「管圧式空気構造建築技術の開発」（1970）、日本建築学会特別賞「日本万博博覧会お祭り広場大屋根の構造設計と施工技術」（1970）、日本建築学会・業績賞「大空間構造に関する一連の研究と業績」（1983）、QUATERNARIO VENEZIA (INTERNATIONAL AWARD FOR THE TECHNOLOGY IN ARCHITECTURE)、「サンジョルディパレスの構造設計」（1990）、松井源吾賞「サンジョルディパレスの構造設計」（1991）、IASS TSUBOI PRIZE「最優秀論文賞」（1993）、SPECIAL PIONEER'S AWARD (UNIVERSITY OF SURREY, U.K) (1993)、土木学会田中賞「イナコスの橋」（1995）、国際橋架構造学会 (IABSE) 賞「世界の大空間構造・設計思想への貢献」（1995）、ひろしま街づくりデザイン賞大賞「A・CITYヒルズ&タワーズ」（1995）、日本建築学会作品選奨賞「イナコスの橋」（1996）、日本建築学会賞（業績）「地域に密着したサンドーム福井の建設」（1997）、社団法人公共建築協会優秀賞「サンドーム福井」（2000）、IASS トロハ・メダル（2001）、JSCA賞「セラミックパークMINOの構造設計」（2003）、土木学会デザイン賞「イナコスの橋」（2005）

展覧会賞：*建築年鑑,1995.11

*Contemporary Development in Design Science Buckminster Fuller Centennial Exhibit, New York, 1995.11~1996.4

*Building for the Future, Istanbul, 1996.6

*Engineers of the Century, Pompidou Centre, Paris, 1997.7□1997.9

特別講演講師 山崎 光悦 (やまざき こうえつ)

特別講演題目

「生物に学ぶ形態設計」

略 歴：1951年 12月生まれ

1976年 金沢大学大学院工学研究科修士課程修了後、
金沢大学工学部助手、講師、助教授を経て、
現在同大学大学院自然科学研究科システム
創成科学専攻教授。



最近の研究課題：

- ・ 構造最適設計法に関する研究（複合領域設計と多目的最適化）、
- ・ 薄板殻構造の衝撃圧潰エネルギー吸収機構の解明とその最適設計法の開発、
- ・ 自然分岐網の工学的応用（バイオニックデザイン）に関する研究 など

特別講演講師 菊池 昇 (きくち のぼる)

特別講演題目

「微視構造の形態と材料特性」

略 歴：1951年 2月生まれ

1974年 東京工業大学土木工学科 卒業

1975年 テキサス大学 応用力学科修士課程 修了

1977年 テキサス大学 航空工学科博士課程 修了 Ph.D.取得

1979年 テキサス大学 航空工学科 助教授（～80）

1980年 ミシガン大学 機械工学科 助教授（～83）

1983年 ミシガン大学 機械工学科 準教授（～85）

1985年 ミシガン大学 機械工学科 教授（～04）

1999年 名古屋大学 工学部 客員教授（～00）

株式会社豊田中央研究所 客員研究員（客員特別研究室長）（～03）

2003年 株式会社豊田中央研究所 取締役（機械分野担当）（～04）

2004年 ミシガン大学 機械工学科 Roger L.MaCarthy Professor

株式会社豊田中央研究所 取締役（CAE推進室、車両・安全・ITSセンター担当）

2005年 同（CAE推進室、車両・安全・ITSセンター、シミュレーション室担当）

主な研究テーマ：有限要素法の数学理論、摩擦の力学、複合材の力学、構造物の最適設計 など

主な受賞：・Distinguished Research Award, 1991, Engineering College, The University of Michigan

・Outstanding Research Award, 1993, Department of Mechanical Engineering and Applied Mechanics,
The University of Michigan

・The Best Paper Award from ASME Design and Automation Conference in 1993

・日本機械学会「設計工学・システム部門 業績賞」等(2002)



A FEW THOUGHTS ON HOW WE DEFINE STRUCTURAL FORMS

Mamoru KAWAGUCHI

Member of JSCE, Professor Emeritus, Hosei University
President, KAWAGUCHI & ENGINEERS Co. Ltd.
(Yoyogi 3-2-7-601, Shibuya, Tokyo 151-0053, Japan)
E-mail:mk@kawa-struc.com

The first thing that an engineer should do in his structural design is somehow to define the form of his structure in its surroundings. The structural form that is thus defined should be as satisfactory as possible in terms of function, safety and esthetics, as Vitruvius demanded more than two thousand years ago. These requirements produced many classic forms for structures, and even today we often use such forms in design of our structures. However, thanks to the development in structural engineering and computer technology, we also have other means of defining the forms of our structures today. In the present paper a few examples of computer-aided designs are first presented to show how the structural forms are defined by use of computers. Some examples of “Structural Morphogenesis” on the basis of optimization technology are also exemplified in comparison with the results of ordinary design methods. Different design themes can also be very important motifs in defining our structural forms. This issue is discussed in the sections that follow. Structural themes which were pursued by A. Gaudi and H. Isler to define rational forms are very famous. A few examples of Kenzo Tange’s works in which traditional themes played very important roles to define the structural forms of his buildings are explained. The design themes can sometimes be expressed in implicit ways, as in the examples of Fuji Group Pavilion designed by Yutaka Murata, where he presented only the geometrical principles which govern every geometrical detail of the structural form. Social themes can also be motifs of structural forms, which is explained by way of examples of a footbridge of granite stone and a communication tower designed for a “science city” in the year of first understanding of human “genome”.

Key Words: structural forms, computer-aided design, structural morphogenesis, design themes

1. INTRODUCTION

One of the most important tasks in structural design has been to define such structural forms that are rational, often economical, and esthetically satisfactory for each given design project. In the long history of structural design this requirement has given birth to well known structural forms such as arches, domes, rigid frames, trusses, shells, funicular patterns with their innumerable variations

and combinations. In classical designs most of such forms have been defined as parts of basic geometrical shapes like circle, parabola, catenary, cylinder, cone, sphere, EP, HP, etc. for the sake of analysis, communication between engineers and architects, and transmission of design information to fabricators and contractors.

Today we still use this type of definition very often for design of our structures, but with

increasing use of computers we have also become able to define the forms of our structures in different ways from those described above, that is, computer-aided definition of structural forms. Another important issue in definition of structural forms is the Theme of design. A series of designs attempted by A. Gaudi and H. Isler, for instance, contain a theme that the structural systems should meet the natures of materials used in masonry and concrete structures.

Another example of theme incorporated in structural forms can be seen in the design of Architect Kenzo Tange who attempted to add something to flavorless architectural design of International Style. In the following a few examples of the recent trends in computer-aided form definitions are introduced, and then some other examples of definition of structural forms will be explained on the basis of the experience of the author.

2. COMPUTER-AIDED DEFINITION OF STRUCTURAL FORMS

(1) Tianjin monument

A few years ago the author was involved in the structural design of 50m high cast steel monument in Tianjin, China, designed by A. Isozaki. In this design most of defining work of the monument was done by operation with computer (Fig.1).

If an arbitrary curve is drawn on a plane including a vertical line, and the plane is rotated around the line, the curve makes an envelope of a

spindle shape. The intersection of the spindle and the horizontal plane draws a circle on the horizontal. If a spiral drawn on the horizontal starting from the center of the circle is projected upward on the surface of the envelope, a spatial curve is produced on the surface (a, b, c). If the phase of the spiral is shifted by some degrees on the horizontal, another spatial curve that is congruent with the previous one is obtained (d). Connecting the two spatial curves by a group of horizontal lines, a spatially curved surface may be resulted (e). By mirroring the spatial surface in respect to a vertical plane including the axis, a pair of symmetrical twins are produced (f). Finally the whole shape is cut out at a desired height to obtain the principal form of the monument (g).

The above procedure is quite appropriate to produce the form of a monument, since with this method we can obtain an unexpected, peculiar shape that can be a candidate for a new form for a monument. By changing the fundamental geometry of the envelope and the spiral, innumerable forms of the envelope are produced, until the architect selects one of them.

The above procedure is purely geometrical and it guarantees nothing about structural requirements. So the obtained form is subjected to structural examinations. It is convenient that the data for the geometrical information of the form can directly be inputted into computer for structural study. The distribution of the necessary thickness and the details of intersections are given in this process, but there are some important parts where increase in thickness cannot provide sufficient rigidity and

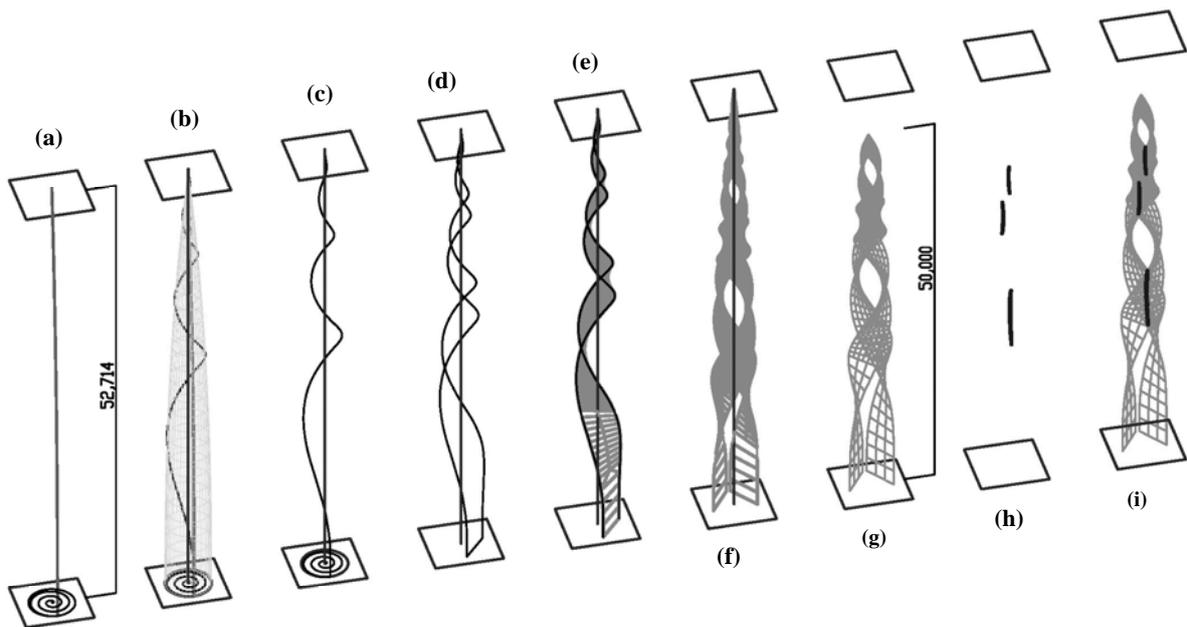


Fig. 1 Definition of form of monument

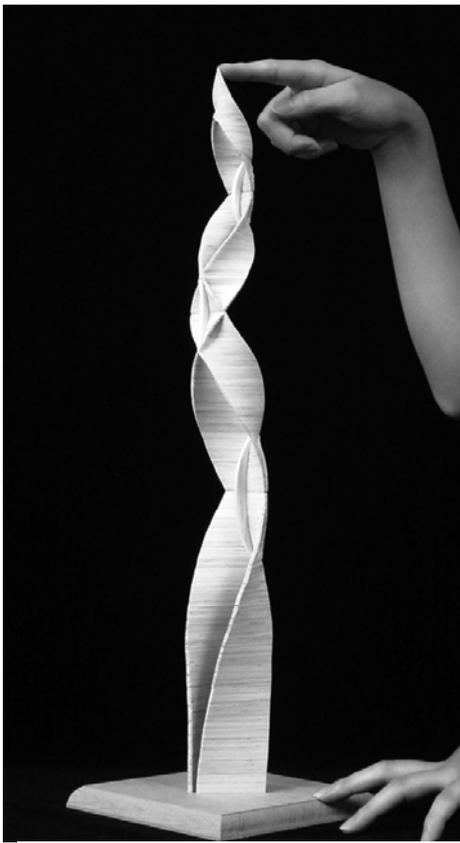


Fig. 2 “Touch & Feel” model



Fig. 3 Completed monument



Fig. 4 Monument, closer view

strength.

So the structural components which are most effective to stiffen such portions of the structure and do not reduce the esthetic value of the monument are sought for. By giving suitable thicknesses to every part of the geometrical “skeleton”, and incorporating necessary stiffeners into the structure, the final form of the monument is determined (h, i).

In the process of structural examination, a study on “touch and feel” model⁷⁾ (Fig. 2) is very useful to find out the places and dimensions of the stiffening components. The model is also used to understand the overall behaviors of the monument when it is under construction as well as after completion. Figs. 3 and 4 show the completed monument.

(2) Computer-aided definitions of “optimum” forms

A number of optimization methods can be used to find candidate forms of a structure. In 2005 the Committee on Morphogenesis and Optimization of AIJ (Architectural Institute of Japan) tried an interesting event of “designing” a bridge with four different optimization methods¹⁾. The bridge was virtually designed to span a valley in Kyushu which was already crossed by a pretty arch bridge (Fig. 5).

The given conditions for the virtual bridge design were as follows:

Possible Design domain: Length (Span) =260m,
Width=7m, Depth=35m
Material (Steel): Unit weight=78kN/m³, Young’s
Modulus=210Gpa, Poisson’s Ratio=0.3
Live Load: Uniform load of different intensities
(3.5 – 100 kN/m²)

The bridge designs obtained by different methods are shown in Fig.6.

It is interesting to note that different methods define different forms as optimum. Each of the above designs is optimum in a certain sense, and can be regarded as one of the alternative designs which will perhaps be of suggestion in the first stage of a bridge design, although nothing is guaranteed by them in terms of esthetic satisfaction or practicability. Of the above four designs one by Mitsui happens to be closest to the form of the



Fig.5 “Tensho Ohashi”, existing bridge



Ground structure method, Ohsaki, M.²⁾



Extended ESO method, Ohmori.H.³⁾



CA method, Mitsui, K.⁴⁾



Homogenization method, Fujii, D.⁵⁾

Fig.6 Virtual design projects for a bridge (CG by Futai,H.)

actual bridge. “Tensho-Ohashi”, the actual bridge of arch design which was awarded the JSCE Tanaka Prize in 2000, is no doubt rational and esthetically satisfactory.

3.FAÇADE DESIGNS BY OPTIMIZATION AND BY NORMAL METHODS

In this section two examples of façade design, one done by means of computational optimization and the other by a conventional method, are shown. The first example is a commercial building near Osaka designed by H. Ohmori et al.¹⁾ (Fig. 7).



Fig. 7 Façade design by XESO method¹⁾



Fig. 8 Façade design by normal method (Architects:EASTERN)(Phto: Y. Suzuki)

This five-storied building has two walls, facing the south and west, that are open to the sight, and the designers attempted application of their extended ESO method. The walls act as bearing as well as shear walls. In the process of computation the location and dimension of the openings for entrances are artificially controlled by the designers to meet the functional requirements. Different steps of computation give different possible structural forms of the walls, and the designers are in the position of selecting any one of them that they think most favorite from functional and esthetic viewpoints.

The second example is a three-storied apartment house in Kyoto designed by Eastern Design Office (Fig. 8). In this case the designers did not pursue “optimum” structural design, but they sought for a design that was “practicable” in all aspects, following quite a normal design procedure.

Namely, the architects made their wall design, taking into account all the functional requirements, tastes of the clients, possible structural requirements of the engineers and, of course, comfort of the tenants. Through ordinary communication with the structural engineer who thought much of the architects’ idea, they came to the final design (Fig. 8) which was satisfactory in all the architectural and structural aspects, and economical as well.

In the process of design the architects and engineers used computers to the maximum extent in mutual exchange of design data, drawing and computation, but they did not use them for “optimization”, since they were confident that by means of “normal” approach they could reach a free form design that they thought sufficiently practical, if not “optimum”.



Fig. 9 Kagawa Prefectural Office

4. DESIGN THEMES IN DEFINITION OF STRUCTURAL FORMS

(1) Structural themes

An example of the most popular themes in structural design may be that materials should be used in compression in masonry and concrete structures. This theme led A.Gaudi and H.Isler to such experimental definitions as inverted hanging arches and suspended mesh shells to obtain optimum forms. Another structural theme may be that longer metal components should be in tension to avoid buckling, which gave a good reason for definition of Pratt type truss girders. The theme of static clarity gave birth to the conceptual forms of Gerber girders and three-hinged arches.

Those examples are so well known that it may not be necessary to illustrate them here.

(2) Traditional themes

Local traditions can sometimes be very important themes in defining structural forms. A few of the most sophisticated examples may be found in the works of Kenzo Tange. Tange had been trying to incorporate the flavor of local tradition into so-called international style in which building forms were similar everywhere in the world and prosaic.

In design of Kagawa Prefectural Office (Fig. 9) which is today evaluated as one of his masterpieces, Tange attempted to define the form of his concrete structure in relation to the structural system of Japanese traditional buildings (Fig. 10). He designed deep balconies around the main body of the office, and made an attempt to express the cantilevering floor joists of the balconies like rafters in traditional temples. This design concept was

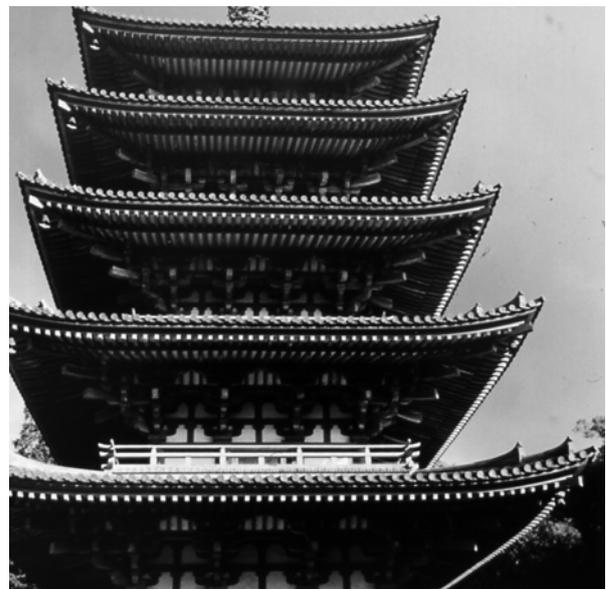


Fig. 10 Pagoda of Daigoji Temple



Fig.11 Gymnasium 1 of Yoyogi Stadiums



Fig.12 Toshodaiji in Nara

comprehensible to everybody, and it was jointly possessed by his structural engineers and builders, which led to a very successful result.

In Yoyogi Stadium (Fig. 11) for the Tokyo Olympics, another example of Tange's masterpiece, one of the most important design themes was expression of the grand roof. Although the structural system of the roof was a hanging one, Tange chose to express it like a solid grand roof rather than a more flexible cable network as seen in the works of other architects like Frei Otto. Expression of grand roofs has been an essential design effort in traditional buildings in Japan (Figs. 12, 13), and the theme presented by Tange was directly accepted by the structural designers and builders with sympathy, again leading to a great success.

(3) "Let it be" principles

Themes for structural forms need not always be described in an explicit way. It can be presented in an implicit way as well. The late architect Yutaka Murata sometimes took such a design policy. He specified his themes only in the form of geometrical principles, and thought that the structural shapes would be automatically resulted by natural law. Murata called this method "Let it be" principle. In

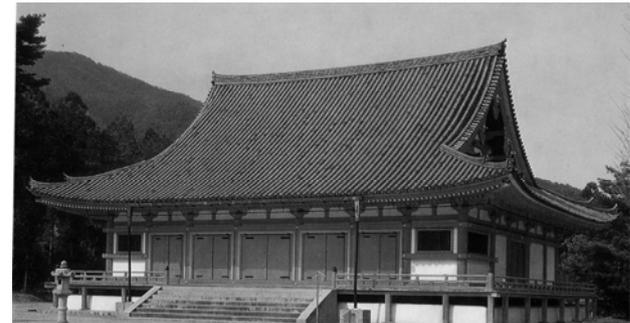


Fig.13 Daigoji in Kyoto

design of Fuji Group Pavilion for Expo'70 in Osaka⁶⁾ (Fig. 14), for instance, he defined the shape of his air-inflated structure as follows.

Draw a circle of 50m in diameter on a plan. The area shall be covered by sixteen air-inflated tubular fabric arches each having a diameter of 4m. The two central arches are semi-circular, standing parallel on the circle in plan. The remaining fourteen arches have the same length as the first two, and they also stand on the circle to form the structure from the center toward the edges of the

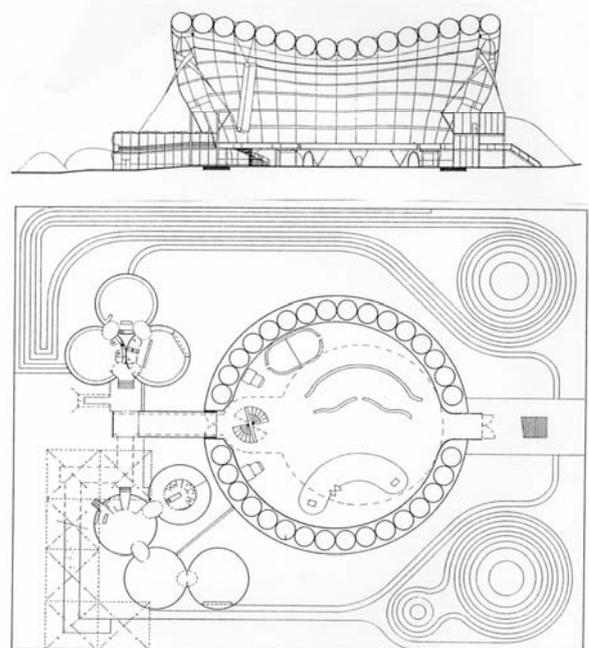


Fig. 14 Fuji Group Pavilion of Expo'70, Aerial view and drawings

building. The springing of every arch should be vertical, and they should keep the continuous contact with the adjacent arches. The above requirements perfectly define the form of the structure. Since the distance between the two legs of an arch becomes shorter when it goes further from the center, the height of the constituent arches having the same length becomes higher toward the ends of the building. The upper parts of the arches are also pushed outside by the foregoing ones, producing a controlled but unprecedented three-dimensional form.

Although the final geometry of the structure was not defined in an explicit way in the design documents (except very rough ones), the above principle is sufficient to define essential nature of the form, and the resulting forms of constituent arches and the whole structure can be obtained by computation.

(4) Social themes

Social themes can often be good motifs for defining structural forms. Social themes are normally rather arbitrary, and do not look to have anything to do with structural forms. However, it is often possible to find something that is particular to the place and time (historical) of the construction of the structure, and suggestive in defining the form of the structure. In the following a couple of such examples are explained.

a) “Inachus” bridge

Some ten years ago, the author was involved in design of a footbridge in Beppu. The City of Beppu is located at the north east coast of Kyushu. Beppu is famous for its hot springs and beautiful scenery.

In the west part of the city is located a spacious park named Minami-Tateishi-Koen. As an access to the park from the north, the Mayor of Beppu City wanted to have a pedestrian bridge which crosses a river running along the edge of the park. The span to be bridged was 34 m. Since the construction site of the bridge was a wonderful scenic point, commanding an open view of Beppu Bay to the east and a mountainous scene of Tsurumi Peak to the west, the Mayor asked the author to create a uniquely beautiful bridge there.

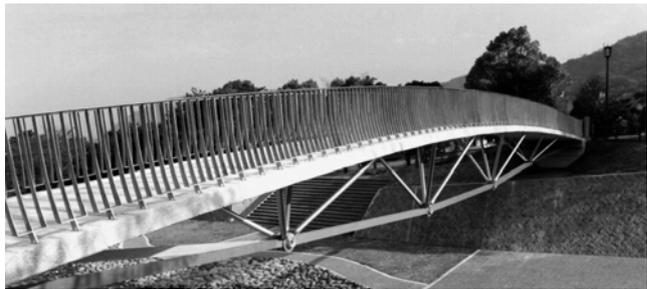
In the process of discussions with the Mayor and the staff of the construction division of the city, the author noticed that Beppu has a sister city in China named Yantai which exports granite of excellent quality. He also realized that the city of Beppu has been importing granite from Yantai for pavement of the sidewalk in the streets.

Then it occurred to the author that it might be worth-while to use the granite as a structural material of the bridge which he was to design, in

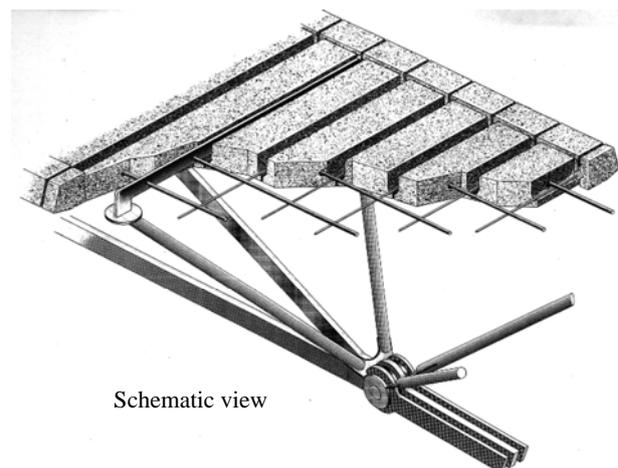
promotion of sisterhood between the two cities.



General view



Oblique view



Schematic view

Fig. 15 “Inachus” Bridge

Laboratory tests on the granite for the pavement proved that the stone was superbly strong and stiff (compressive strength: 130 N/mm², Young’s Modulus: 3.0 x 10⁴ N/mm²) for structural uses. The author decided to use the Yantai granite for the upper chord of his bridge.

The bridge was designed to have a lenticular shape with an arched upper chord and a suspended lower chord, which is sometimes called a “suspension-arch.” The author designed the granite upper chord not only as the principal structural member but also as the deck on which people directly step when they cross the bridge.

It consists of 78 blocks of granite 40cm wide and 25cm deep with a varying length from 2.6m to 3.6m. Through the holes drilled in the center of the depth of the granite blocks, 5 prestressed cables are

arranged in the longitudinal direction, parallel to the bridge axis. After the joints between the adjacent granite blocks are secured with filling mortar, the whole upper chord is prestressed to produce a literally “monolithic” structural member.

The lower chord has the longitudinal shape of a funicular polygon which is almost symmetrical with the upper chord. It consists of steel plates arranged into a chain. The upper and lower chords are connected to each other by means of web members consisting of steel tubes arranged to form inverted pyramids.

The web members are constituted in a manner which the author calls an “open-web truss” or “incomplete truss”, in which the web of a girder is not closed by a repetition of lattice members as in a normal truss. The author has been using open-web trusses in several designs of his recent works.

In open-web trusses bigger bending moments naturally occur in the upper chords especially under non-uniform load, compared to normal trusses, but in many cases the upper chords have a marginal capacity to accommodate these additional bending moments. Taking into account the savings in lattice members and connecting details and esthetic advantage of a simpler appearance, the author believes that the open-web truss has a good *raison d’être* in structural design.

The bridge was named “INACHUS” (the name of the God for the river in the Greek myth) through a naming competition among the citizens of Beppu.

b) Genome tower

In 2001 the author was asked to design a 20m

high wireless communication tower for the sake of disaster prevention in a city named Harima Scientific Garden City in Hyogo Prefecture. This new city was founded in 1986 with the purpose of establishing an ideal city where people would live in a good harmony with nature and science. The city was then developed by introducing excellent academic research facilities and high-tech industries in it.

One of the most important facilities of the city was “SPring 8”, a world-largest accelerator to produce electron beams of huge energy (8GeV). Using the strong beam produced in the facility researchers can investigate the structures of matters including protein to a great precision, of which the city is very proud.

In February of the same year the International Human Genome Sequencing Consortium published the first draft of the Human genome in the international scientific magazine “*Nature*”, which was regarded as the first complete understanding of the human genome.

The author thought that this social theme was very timely and suitable to the city for which he was going to design the tower. He thence decided to materialize in his tower design the molecular model of DNA which was constituted by two sugar phosphate backbones in the shape of helices which were connected with each other by base pairs (Fig. 16). Although a pair of helices alone are not capable of resisting lateral forces, he found that those backbones in a congruent twin helical shape with horizontal struts connecting them would act as

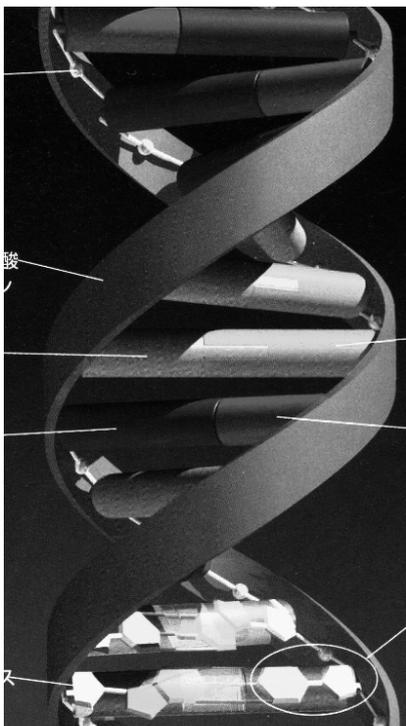


Fig. 16 DNA Model

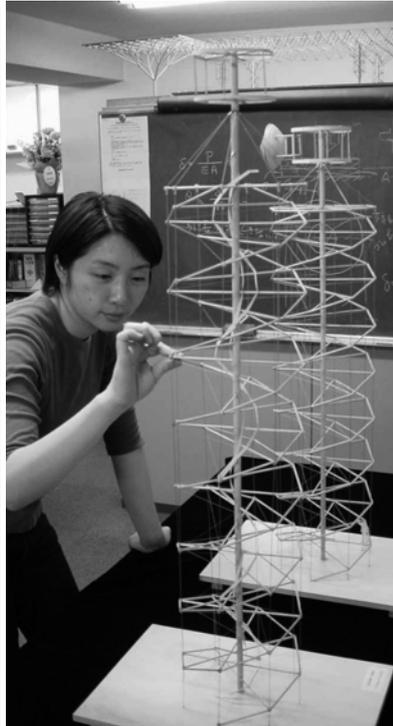


Fig.17 “Touch & feel” structural model⁷⁾

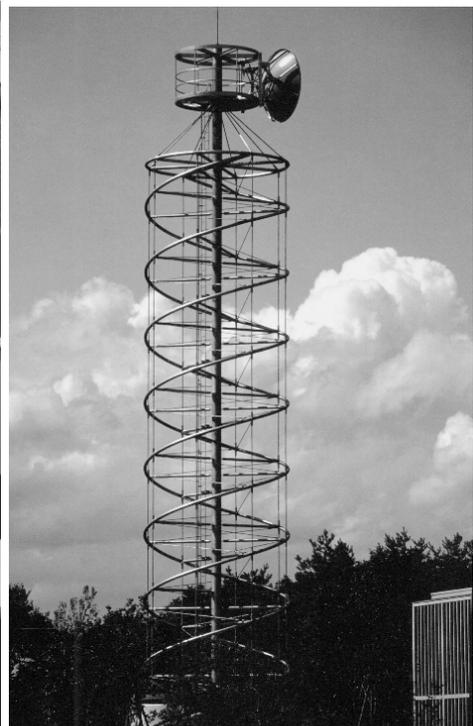


Fig. 18 Built “Genome” tower

effective shear members of the tower against lateral forces, when they were designed with subsidiary thin tension members connected to them. Bending of the tower can be absorbed by prestressed vertical outside cables and the central column as in usual structures.

Then scaled models⁷⁾ were made as the author often does to intuitively check the results of calculation (Fig. 17). They were “touch and feel models” as he had named to see if the human sense of touch coincides with the results obtained by computation. In the present case scaled models of 1/20 were produced⁷⁾. Fig. 18 shows the realized “Genome Tower”.

5. CONCLUSIVE REMARKS

In the present paper it has been first shown that computers are conveniently used to define the form of a structure as in the example of Tianjin monument, where the basic rule of producing a geometric form and the parameters involved are the defining factors of the form.

Optimization methods explained in the examples of virtual bridge design are also conveniently applied to obtain design alternatives which have certain kinds of optimum nature in them. In this case the proposed design forms themselves are the interfaces between architects and engineers, since these design alternatives can be the common clues for them to develop their ideas towards the final design.

Sometimes a normal design method gives freer form than a method based on an optimization principle as we have seen in the wall design examples.

When a clear “design theme” is jointly owned by an architect and his engineer, it will be the most reliable interface between them. Themes based on structural principles are examples of such interfaces.

A. Gaudi and H. Isler played the dual roles of architect and engineer in their design activities, but the theme that the structural forms should be suitable for the nature of materials was an essential interface between the two roles.

Traditional themes can also be important interfaces to be jointly owned by architects and engineers as seen in the examples of Kenzo Tange’s typical works like Kagawa Prefectural Office and Yoyogi Stadium.

Design themes can be presented in an implicit form as in the case of Fuji Group Pavilion in Expo ’70 where Y. Murata described only the basic idea of geometric requirements that completely specified the form of his air-inflated building.

Social themes can also be excellent motifs of structural forms. Two examples, “Inachus” Bridge and “Genome” Tower, have been explained in this connection.

To conclude the present paper it should be noted that no design methods can guarantee the esthetic quality of structures. With or without the aid of computers architects and engineers should always try hard to make the most of their abilities to examine if their structures are really rational and beautiful.

REFERENCES

- 1) Ohsaki, M., Mitsui, K. (editors): “Seminar on Generation and Optimization of Structural Shapes” (in Japanese), AIJ Committee of Generation and Optimization of Structural Shapes” Jan. 2005
- 2) Ohsaki, M., Swan, C.: “Topology and Geometry Optimization of Trusses and Frames”, in Recent Advances in Optimal Structural Design, S. Burns (Ed.), ASCE, pp. 97-123, 2002
- 3) Cui, C., Ohmori, H., Sasaki, M.: “Computational Morphogenesis of 3D Structures by Extended ESO Method”, IASS Journal, Vol. 44, n.1, pp.51-61, 2003
- 4) Mitsui, K., Sogabe, H.: “Autonomous Generation of Three-Dimensional Structural Systems by Cellular Automata”, WCCM VI in conjunction with APCOM’04, Beijing, Vol.1, pp.327-332 (2004)
- 5) Fujii, D., Chen, B.C., N. Kikuchi: “Composite Material Design of Two Dimensional Structures Using the Homogenization Method”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.50, pp.2031-2051, 2001
- 6) Kawaguchi, M.: “Pneumatische Konstruktionen”, in “Der Umgekehrte Weg”, Rudolf Müller GmbH, pp. 7-27, (arcus 10) 1990
- 7) Kawaguchi, M.: “Physical Models as Powerful Weapons in Structural Design”, (keynote lecture, KL-01, pp. 1-8) Proc. IASS Symposium on Shell and Spatial Structures from Models to Realization, Montpellier, 2004

生物に学ぶ形態設計

山崎光悦

金沢大学大学院自然科学研究科システム創成科学専攻，教授，工学博士，

yamazaki@t.kanazawa-u.ac.jp

1 はじめに - バイオニック・デザイン -

生物や自然の巧みさを取り入れて人工物の設計に役立てる分野をバイオニック・デザインという。生物の構造，組織はもちろん，その発生，進化，消滅の全プロセスに注目し，それらから人工物設計上の各種ヒントを引き出し，これを完成させる設計全般にわたる技術を指す。何も人間が生物や自然の素晴らしさに感心し，設計に利用しようと注目するようになったのは最近のことではない。空を飛ぶ鳥をみて，人力飛行を考えた古代ギリシャのイカロスの話が有名なように，人類すべてが有する本能に近い願望であろう。しかし，人間が空を飛べるようになるには，20世紀初頭のライト兄弟の二枚翼グライダーの出現まで待たねばならず，また実現した飛行機の形態はイカロスが考えた鳥の羽とまるで異なる。直接，外見だけを真似たのでは失敗することが多い。それは，自然界の柔軟軽量かつ巧みな構造やアクチュエータの性能を，人工材料，製作法で実現することが極めて困難なことの理由による。

バイオニック・デザインの分野が多くの技術者や研究者にきわめて強い関心を持たれるのは，一つには，従来の科学技術の枠組みにとらわれずに，広くその解決策を見い出せる可能性を秘めている点にある。その一例として，ニューロ・コンピュータが挙げられる。従来のノイマン型コンピュータでは，現在のスーパー・コンピュータでも，相変わらずパターン認識や学習機能は不得意である。この問題を解決するのに，人間の脳の情報処理機能を模倣したニューロ・コンピュータがきわめて有望視され，活発に研究されている。

工学における従来の設計・生産から流通・廃棄に至る技術は，少なからず常に自然環境破壊を伴い，人類はもとより，地球上のあらゆる生物の存在に大きく影響する状況となっている。従ってこのような問題点を解決するためにも，生物を含めた自然環境や，それら生態系と調和した設計の方法論でなければならない。現状でのバイオニック・デザインの主たる分野は，材料開発，機器・構造開発，システム・アルゴリズムの開発などに分けることができる。以下では，主に構造形態創成の視点を中心に，その材料構成も含めて，生物の巧みな形態を概観し，工学設計への応用について考えてみることにする。

2. バイオニック・デザインと形態設計 2.1

2.1 骨格と腱はテンセグリティ

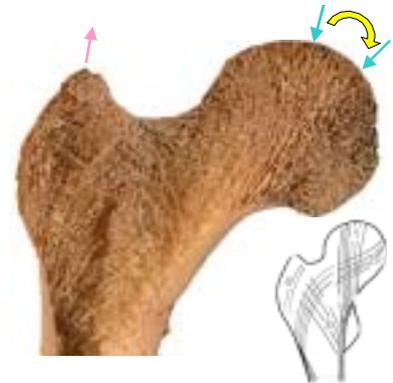
人体に限らず動物の骨格と腱，筋肉の構造は，建築構造におけるテンセグリティ構造と酷似している。つまり，骨格は剛な圧縮部材に，また腱は収縮時のみ部材として機能する張力部材に対応し，剛性と自己安定性を保ちながら運動機能や成長といったダイナミックな形態変化を可能としている。206個の骨で構成される人体骨格がバラバラにならずに垂直に立って安定しているのは，約500の筋肉や腱，靭帯による張力があるからで，これらの張力を圧縮力に耐える骨が受け止め，全体として複雑なテンセグリティ構造を作って身体を支えていると解釈できる。複数の腱の収縮を同時に制御することで，手足や体の屈伸などの複雑で精巧な動作が実現している。

細胞レベルの構造でもテンセグリティ構造としての解釈が可能である。細胞骨格としてのマイクロフィラメント，中間径フィラメント，微小管という3種類の繊維がある。その内，張力性素材として，

収縮性のあるマイクロフィラメントがクモの巣のように細胞内に網目を広げ、細胞膜と全ての細胞内構成部分を核の中心部分に向かって引張っている。微小管、互いに交差して繋がっているマイクロフィラメントが、圧縮部材の役割をする。中間フィラメントが微小管と収縮性マイクロフィラメントを相互に結び付け、それらを表面膜や核と結合して、核を適切な位置に固定する働きをしている。このような構造の細胞は、上から押しつぶすと平たくなるけれど、押さえる力を解除するとほぼ球状に戻ることが可能となっている。

2.2 骨の内部は海綿状

次に、骨自身の内部構造、材料組成をみてみよう。骨はリン酸カルシウムを主成分とする骨細胞とそれが石灰化した骨基質からできており、その表面は骨膜で覆われている。内部構造をみると、外部を覆って主に負荷を受け持つ、骨基質密度の高い皮質骨と、空孔が多く密度の低い内部の海綿骨とに大別できる。骨の長手方向の分布をみると、単に圧縮力を受け持つ骨端に比較して、中央部は曲げ荷重にも耐えるよう皮質骨の厚さが厚くなっている。骨の内側にある網目状に並ぶ海綿骨も力学的にみて力を伝達するのに有利で特異な配列となっている。図1は人大腿骨近位部の断面写真の例である¹⁾。ヒップジョイント部には骨盤を通して姿勢に応じて向きが変化する圧縮負荷が、一方、大転子と呼ばれる部位には大腿筋等を介して骨盤からの



1：骨頭縦走骨梁，2：骨頭斜走骨梁，
3：転子部骨梁，4：大転子骨梁

図1 大腿骨骨頭近位部断面と骨梁分布（文献1をもとに作成）

引張負荷がかかる。骨頭部の海綿骨はこれらの力を分散して巧みに下方部皮質骨に伝達するよう、骨梁と呼ばれる直交立体格子構造を形成している。骨梁構造は、主応力に沿って骨頭頂から内側皮質骨に向かう縦走骨梁と、大転子から同じく内側皮質骨に伸びる転子部骨梁、そしてそれらと直交して形成される骨頭斜走骨梁、大転子骨梁などで構成される。これらの力の伝達メカニズムは、“引張部材と圧縮部材が相互に直交し、梁の外周縁部ではその面に対して直角になる構造形態をとることで、最小の材料で最大の強度を得ることができる”とする Wolff の法則によって古くから説明されてきた。そのことを裏付けるため、複雑な骨梁をボクセル要素で精緻にモデル化したコンピュータシミュレーションによって、骨の再構築過程と共に説明を試みる研究も最近では数多く行われている。

3. 生体材料の成長と退化

一方、人工材料と大きく異なって、生体材料は常に成長と退化が進行し、やがては死滅して自然に還る。例えば、骨の例でみると、骨の主な構成細胞である骨細胞は骨のカルシウムや血液へのリンの移動を調整しており、常に破骨細胞によって古い骨細胞が吸収され（骨吸収）、その一方で骨芽細胞が自ら形成したコラーゲン線維を骨基質に埋め込み、やがては周囲が石灰化して骨細胞に変化（骨形成）するカルシウム代謝を繰返し、常に新しい組織を維持していると考えられている。骨細胞にはあるレベル以上の負荷応力を感知するメカノセンサーの機能が備わっており、応力が作用するところは骨形成が促進され、無負荷の部分では骨吸収が進むと理解されている。したがって骨折の治療にも、適切な負荷を与えることで骨の再生が促進されるとする実験結果もある。このように生体材料には、代謝と再生、自己修復という、現状の人工材料では到底、到達できそうにない機能が備わっている。しかし、自己修復まではできないにしても、破損や破壊の恐れのある箇所にセンサーを張り巡らして、構造の健全性診断、モニタリング機能を持たせようとする、最新栄の飛行機主翼などの構造設計に関する研究も進められている。

4. 竹は自然が創った最適構造

次に植物の形状や形態，材料組織の，構造力学的な巧みさをみてみよう．竹材や木材は身近かで手軽な柔軟軽量構造のお手本であり，建築部材から団扇や茶せんまで日本の生活文化に深く入りこんでいる．その形状や材料，強度分布などは古くから調べられており，樹木のあてによる強度向上や竹材，真筴部の一方向繊維強化特性は有名である．代表的な孟宗竹の横断面は，柔組織を形成する基部と硬組織の維管束・維管束鞘で構成され，硬い維管束・維管束鞘がFRP（繊維強化複合材料）のファイバーの役割を果たしている．しかも円筒形の横断面内のその半径方向分布を観察すると，外周に近いほど維管束・維管束鞘の密度が高い，強度的に有利な分布となっている²⁾．もちろん，真筴部は根元が太くて肉厚で，先端にゆくほど細くて薄い寸法分布をなし，自重や風雪による曲げ荷重に耐えるに好都合な設計を自然に実現している．また竹の節部（隔壁）は，円筒の座屈破壊を防ぐ上で実に巧妙な形態であることは誰しも予想することであるが，太い根元でその間隔が短く，中間部では長く，細い先端部では再び短いという形態は，曲げ座屈と関係付けても未だ十分に説明ができていないなど，まだまだ不思議なことも多い．いずれにしても，竹に限らず多くの生体構造や材料分布は，多面的な合理性を備えており，自然に多目的最適化を実現しているように見える．

一般に生体は成長を続けながらその材料分布や微細構造を徐々に改変して成熟するが，その点で竹は多年性でありながら筴から半年ぐらいで急速に成長を遂げ，後はその構造を維持するという樹木などとは全く異なった成長過程をたどる．生体材料は水分を多く含むがゆえ，柔軟で振動減衰性や衝撃吸収特性にも優れている．竹材はその代表として，また乾燥竹は軽量構造部材の代表として古くから利用されてきた．15年以上の昔に，ビル建築ラッシュの中国を訪れた折に目にした，高層ビル建築現場の波打った竹の足場の強い印象は未だに忘れられない．

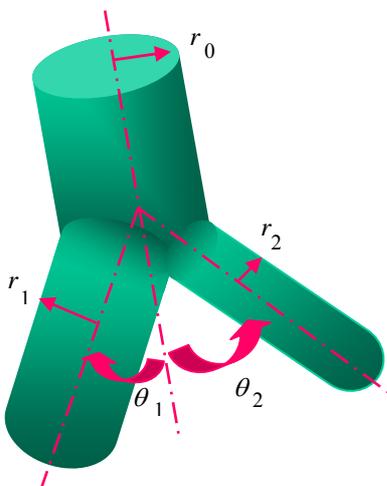


図2 マーレイの分岐網モデル

5. 動植物の分岐網形態と工学設計への応用

5.1 分岐網を支配する法則

樹木の枝分かれや根の主根から毛根への分岐，生体内の血管網の分岐，合流など生物の分岐網形態は非常に精巧かつ巧みにできている．これらの分岐網は，規定された三次元空間や三次元物体の各領域へのエネルギーや物質の配送，収集システムとみなすことができる．例えば，動物の動脈・静脈血管網は摂取した栄養分や酸素を，毛細血管を通して末端の細胞に配送し，不要となった廃棄物質や熱交換によって発生したCO₂を静脈網を通して回収するシステムとみなせよう．物質などの粘性と摩擦を考慮しながら，巧みな枝分かれ・合流によって分岐網の末端は領域内の全域をくまなく網羅し，圧力や配送量を均一にする形態を実現している．同様に樹木の

枝分かれや根の分岐網を，荷重を支える構造とみなすとき，自重や風雪の分布荷重を分岐網末端で支え，徐々に統合して最終的に太い幹や主根で集中的に支持する巧みな構造とみなせる．もちろん，枝の先には葉を付けて光合成により糖分を生成し，根からは養分や水分を吸収して，分岐網は生物本来の生命維持活動を担っている．つまり，環境に適応しながら複数の目的に関して自然かつ巧妙に最適化が図られていると考えられる．

生物の分岐網形態は，ほとんどが1箇所で二股に分岐する二分岐網で，予め定められた領域内をできるだけくまなく網羅するように，分岐末端での流量や圧力低下などの条件のもとに分岐網は発達する．これら動植物の分岐網形態を決定するパラメータには，分岐前後の枝や管の太さ変化，分岐角度

と方向，末端の細かさ，網羅する三次元分布領域の大きさなど多くの量が考えられる．さらには分岐網が関与している外界の環境の影響も受けながら，生命体全体の成長と共にその分岐網形態もどんどん変化し，必ずしも先に生成した枝や管が常に太く成長しない場合など，成長の度合いにも局所的な分布がみられ，支配則も厳密には不明である．

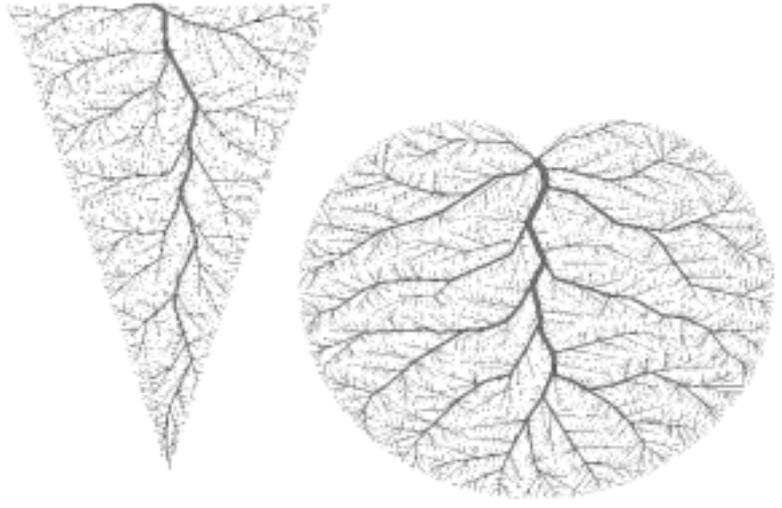
しかし，分岐網の成長過程や成熟した分岐網の形態は，図2に示す有名なマーレイ（Murray）のモデルによってある程度の説明が可能である^{3),4)}．分岐則は，図のような円筒形の親枝から2本の小枝への分岐を考えると，流量一定や重量一定の連続条件と，場に応じた最小化の条件から分岐則として， $r_0^\gamma = r_1^\gamma + r_2^\gamma$ （ r_0 と r_1, r_2 は親枝の半径及び，2つの小枝の半径）が成立することが導かれる．物理的な考察や実験観察から，べき乗指数 γ は $2 \leq \gamma \leq 3$ の間にある． $\gamma = 3$ は血管など流体の輸送分岐網の流体粘性と，管壁との摩擦損失最小の条件から導かれる有名なマーレイの法則に対応する．つまり，分岐前の断面積よりも分岐後の小枝の断面積の和は常に大きくなる．実際の血管分岐の観察から $\gamma = 2.7 \sim 2.9$ という報告がある．また分岐角に関して，体積最小条件から $r_0^2 / \sin(\theta_1 + \theta_2) = r_1^2 / \sin \theta_1 = r_2^2 / \sin \theta_2$ が成立する．すなわち，二分岐するとき，太い小枝は親枝からの角度変化が小さく，逆に細い小枝は方向が大きく変わることが説明でき，自然の分岐網の観察結果とも符合する．一方，樹木の枝分かれても自重による曲げ応力一定と枝長さが断面寸法の二乗に比例するとの仮定のもとに， $\gamma = 2.5$ が導かれる⁵⁾．分岐が繰返されると，末端の小枝はどんどんその径が小さくなるが，最終的な末端の細かさは，網羅する場の物質交換や浸透圧を利用した養分の吸収など，物理的な影響が及ぶ範囲や距離と密接に関係している．

5.2 動植物の分岐網で究極の設計をめざす

こうした分岐則や成長則などの基本法則のもとに，生物の形態やその自己構築などをコンピュータ・シミュレーション技術を駆使して説明しようとする，物理生物学的な手法が分岐網の説明に有用で，最近特にその発展が著しい．単純な法則関係と分岐角のランダム性のみによって肺動脈の血管網分布を再現するシミュレーションをしたり⁴⁾，樹木の分岐・生長過程，森林の繁茂・衰退過程を説明する試み⁶⁾がなされている．また環境影響因子として，分岐網を成長させる領域内の物理量の濃度分布を考えると，より合理的な分岐網生成が可能となる．例えば根系分岐網では，個々の根が養分や水分を吸収できる範囲は根冠周辺のわずかな土壌範囲に限られる．複数の根が隣接していれば吸収機能に競争が生じることから，根密度が粗くて他の根系との干渉が少ない方向に選択的に分岐，成長する



図3 球形領域を網羅する三次元分岐網



(a) 三角領域

(b) 円形領域

図4 分岐に最適性を考慮した二次元領域の分岐網

傾向がみられる。さらに根密度は普通各部分によって異なるが、本数密度が大きくなると根密度が平均化されてほぼ一定になるとする報告もある。これらより根系分岐網に関しても領域に制限がある場合、その領域をくまなく網羅するよう成長することが観察によって分かっている。

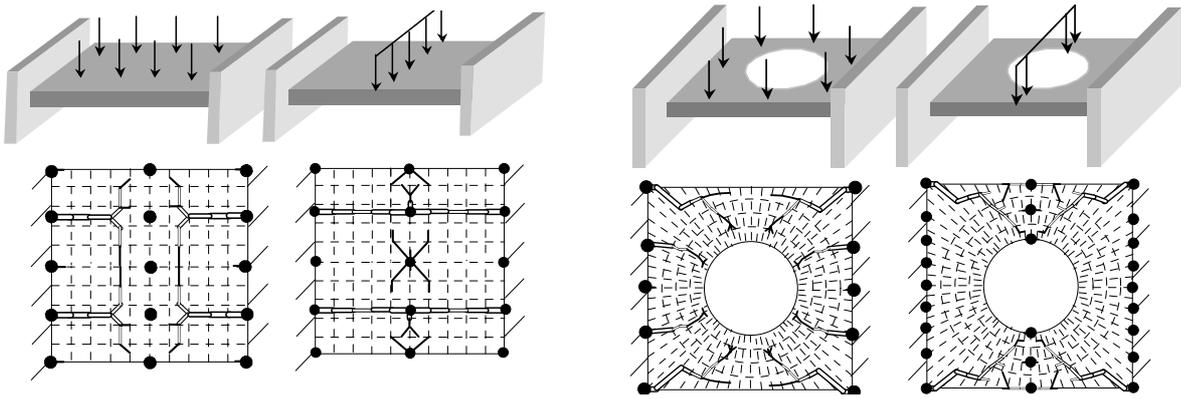
そこで著者らも以下のようなシミュレーション・アルゴリズムを開発している。最初に成長開始点、分岐網生成領域とその領域内の栄養分濃度分布などの初期値を設定し、成長を開始する。成長開始点周囲の領域の濃度を調べ、濃度の高い領域を選択して成長方向を決定する。また末端周囲の濃度に依存するよう成長パラメータおよび成長速度（成長則）を決定する。選択した分岐方向へ初期枝は分岐して、単位時間ごとに成長パラメータの値を加算しながら枝長さを、また分岐則にしたがって枝太さを更新していく。成長パラメータの加算値が成長パラメータの臨界値に達したところで枝を再び分岐させる。これらの過程をすべての枝で同時進行させ、単位時間ごとに連続的に成長・分岐を繰り返し、領域濃度の平均値が臨界値に達するまで成長させる。成長パラメータと領域濃度の臨界値によって末端の分岐網密度も制御することができる。

図3に球形領域（濃度一様）における三次元分岐網モデルのシミュレーション結果の例を示す。成長の過程で分岐網密度の一様でない領域も発生するが、時間の経過とともに球形領域を枝どおしが重なることなく、くまなく領域を一様に網羅するよう成長させることができる。初期濃度分布に偏りをもたせることで、最終的な分岐網密度に分布を持たせた、繁茂の度合いが異なる分岐網の生成も可能である。一方、図4は分岐点の選択に局所的な最適性を導入した二次元領域の分岐網生成例である。領域の形状に応じた生成もできる。これらの分岐網生成シミュレーションは、目的関数や考慮する条件を少し変えるだけで樹木の枝分かれ分岐網の生成にも利用できる。生成された分岐網の合目的性や根分岐や枝分かれ分岐網の構造力学的な最適性の検討はようやく緒についたところで、その詳細や工学設計への応用は今後の研究課題である。著者らも、分岐網の薄板補強リブの形態設計や金型の冷却管路網の設計などへの応用を試みている。図5は各種荷重条件の補強リブ形態の設計例である。複数の開始点から出発し、成長と分岐を繰り返してリブ網を生成する。分岐網の退化も取り入れられている。また図6は、発熱分布が不均一な矩形領域に生成した廃熱チャンネル分岐網とその熱分布の呈上解析例である。人工的な設計では到達できない冷却効率の実現されている。

一方、樹木の根の分岐網に関して、Mattheck は純粋な連続体力学による解釈を試みている。“土中の根は土との摩擦によるせん断応力が一樣になる”という仮説のもとに自重や風荷重による根の成長、斜面の根の成長を、構造力学的に予測する試みが行われている⁷⁾。

6. おわりにかえて - 夢の構造形態実現に期待するバイオニック・デザイン -

今まで構造設計は主に剛な部材を組み立てて構造を構成してきた。しかし、軽量化・効率化を追求すると宇宙構造物のように柔軟な軽量構造物とならざるを得ない。生物は効率的に硬組織を随所に配置したり、二重、三重の階層的ミクロ構造の材料組織を形成して、柔軟でその組織の強度からすると巨大構造物とみなせる程の構造を巧みに達成し、生命体を維持している。さらに、生物は発生、成長、死滅の過程で、常に細胞の死滅、発生を繰り返しながら生命体を維持している。生体のような組織再構築や自己修復機能を人工構造物に付加することができれば、メンテナンス・フリーの生きた永久構造が実現する。そのために必要な構造材料や部材の製造条件、修復方法とその実現の可能性が、今後、検討される必要があると考えている。生体材料は有機物で構成されるため、死滅後は分解して土に還る。生分解性人工材料による構造物構築の可能性や、資源回収を前提とした構造設計法、製造法の研究も重要であろう。バイオニック・デザインの研究によって、形態や材料と機能、強度の関係解明が格段に推進され、我々の地球への負荷を最小限に抑えた資源循環型社会に適応した人工材料、理想的な構造を実現するための構造設計法、製造法の実現を夢みている。



(a) 一様分布荷重. (b) 中央線荷重. (c) 有孔平板・一様分布荷重 (d) 有孔平板・中央線荷重

図5 分岐網を利用した両端固定平板の補強リブ形態設計例

(図中の黒点は設定した初期出発点を表す)

参考文献

- 1) NHK サイエンススペシャル 驚異の小宇宙・人体5 なめらかな連携プレー(骨・筋肉), 日本放送出版協会, 1999.
- 2) 例えば, 尾田十八, テクノライフ選書 形と強さのひみつ, オーム社, 1997.
- 3) 高木隆司, 形の数理, 朝倉書店, 1992.
- 4) J.H. Brown & G.B. West 編, Scaling in Biology, Oxford University Press, 2000.
- 5) 戸川達男編, 自律適応する素材, オーム社, 1995.
- 6) 本多久夫編, 生物の形づくりの数理と物理, 共立出版, 2000.
- 7) C. Mattheck, Design in Nature, Learning from Trees, Springer, 1998.

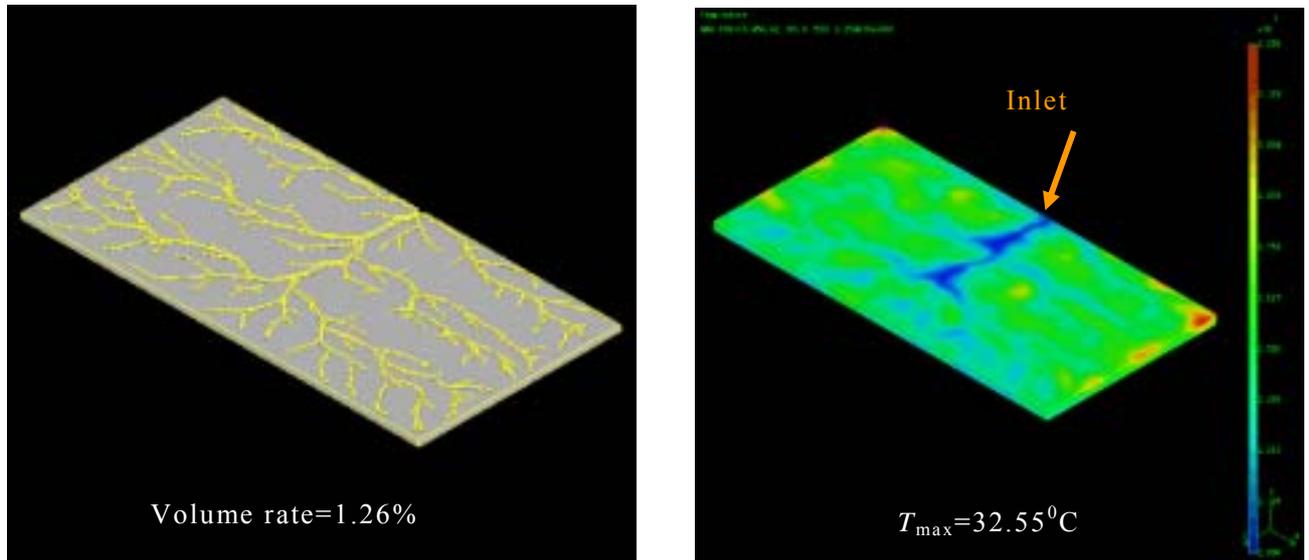


図6 濃度の異なる分岐網生成例と廃熱冷却チャンネル網への応用

■一般講演

アリの探索行動が見つけた構造形態

三井 和男¹⁾, 曾我部 博之²⁾

1) 日本大学生産工学部数理工学学科, 助教授, 工博, k7mitsui@cit.nihon-u.ac.jp

2) 愛知工業大学建築工学科, 教授, 工博, sogabe@aitech.ac.jp

1 はじめに

構造の形状決定問題は, 大きさ, 形状, トポロジーの3つの最適化問題に分類できる。大きさを決定する問題では, 決定しなければならない大きさそのものが設計変数となるため比較的少ない設計変数で問題を構成することができる。形状やトポロジーを決定する問題でも設計変数のセットによって形状やトポロジーを定義する場合がある。この場合, 複雑な形状や種々のトポロジーを考慮するためには設計変数の増加を避けることができない。これらの設計変数は, 目的関数と制約条件を設定することによって最適化問題として定式化され, 勾配を用いた数値計画法によって解くことが可能である。しかし, 設計変数の増加にともなって問題の複雑さも増加し, そのため, 設計変数の大きいセットをもつ最適化問題を勾配ベースの数値計画法を使って解くことは難しくなる。数値計画法に起因するこのような困難は, 例えば, 遺伝的アルゴリズム¹⁾や免疫アルゴリズム²⁾, シミュレーテッドアニーリング³⁾のような発見的手法を応用することによって克服することができる。構造から効果のない材料をすこしずつ取り除くことによって, 構造形態を進化させるという進化的構造最適化^{4,5)}も発見的手法の一つと考えることができる。

これに対し著者等は, セルの出現と消滅に関する単純な局所規則を用いる発見的手法^{6,7,8)}を提案した。応力の目標値を超えるセルが近傍にあった場合, 目標セルにはその近傍セルより一定の入力が与えられ, この入力が目標セルのポテンシャルを増加させ, 逆に入力がない場合はポテンシャルが減衰すると考える。そして, ポテンシャルがある閾値を超えると目標セルに材料が出現するというものである。そして, このアルゴリズムはアリの探索行動におけるフェロモンの役割をモデル化したものと考えることができる。フェロモンの作用をモデル化した最適化アルゴリズムによって, 構造形態を決定するさまざまな問題を解決できることを示すことがこの論文の目的である。

2 アリの探索行動と最適化アルゴリズム

2.1 アリの探索行動

アリやハチといった昆虫はコロニーを形成して生活する, いわゆる社会性昆虫である。このような社会性昆虫のコロニーでは, さまざまな状況に応じて, 個々の相互作用から全体の協調が生み出されている。例えば, 餌探しの行動はその一つである。この場合, 個々の行動の相互作用は非常に単純で, 別のアリが残したフェロモンのおいおいを追うだけのものである。しかし, 集団として見ると, 餌までの無数の経路のうち, 最短の経路をえらぶという最短路問題に答えを出していることになっている。その仕組みの重要な部分は, 「図1のように2匹のアリが同時に出発して, それぞれがフェロモンを残しながら異なる経路を歩くと, 近道を通ったアリが先に巣に戻り, その経路上のフェロモンが2倍になるので, より多くのアリをひきつけるようになる。」というものである。ここで重要な役割を演じるフェロモンの三つの性質に注目しなければならない。その一つは, 蓄積である。多くのアリが通過すればするほどその濃度が上昇する。二つ目は拡散である。拡散することで近傍にある解の探索を可能にする。もう一つは蒸発である。蒸発により動的な状況の変化にも対応することができる。

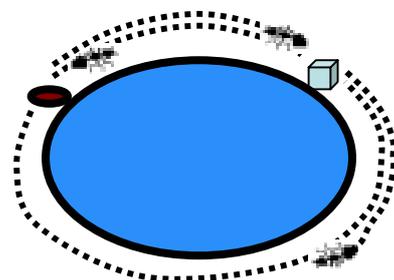


図1 アリの巣から餌までの経路

2.2 最適化アルゴリズム

設計領域中の各セルに対して上下左右に隣接する4つのセルを近傍とする Neumann 近傍を考える。目標とする応力値 σ^f を予め設定し, 相当応力が σ^f を超えるセルが近

傍にある場合には、そのセルから目標セルに入力信号 +1 が入力される。その結果、目標セルのポテンシャルには入力信号の合計が加算される。ここに、 u_i^k, u_i^{k+1} はそれぞれ i 番目のセルの離散時間 $k, k+1$ におけるポテンシャル、 x_{i0} は目標セルからの入力、 $x_{ij} (j=1\sim 4)$ は近傍セルからの入力である。また、 Δt は形状を更新するステップの時間間隔、すなわち時間増分である。

$$x_{ij} = \begin{cases} +1 & (\sigma_{ij} > \sigma^E) \\ 0 & (\sigma_{ij} \leq \sigma^E) \end{cases} \quad (1)$$

$$u_i^{k+1} = (1 - \lambda \Delta t) u_i^k + \omega \Delta t \sum_{j=0}^4 x_{ij} \quad (2)$$

$$\lambda = -\frac{\log \frac{\varepsilon}{u_s}}{T} \quad (3)$$

$$\omega = u_s \lambda \quad (4)$$

時刻 k におけるポテンシャル u_i^k と閾値 ε の差がその大きにかかわらず、 $u_i^k - \varepsilon \geq 0$ のとき材料が出現し、 $u_i^k - \varepsilon < 0$ のとき材料が消滅するとした。式(1)は近傍セルから目標セルへの情報伝達を意味し、アリのフェロモンでは拡散に相当する。式(2)の第 1 項の係数が $0 < 1 - \lambda \Delta t < 1$ となることから、この項は減衰を意味し、フェロモンの蒸発に相当する。第 2 項は入力の加算を意味し、フェロモンの蓄積に相当する。

3 最小重量問題への応用

図 2 に示す $1000\text{mm} \times 2400\text{mm}$ の設計領域において壁面から 1000mm の点に作用する 800N の荷重を支持する構造システムを上述の局所規則によって生成することを考える。これは構造最適化問題としてよく取り上げられる二部材フレーム問題である⁶⁾。設計領域は 25×60 の正方形格子で分割され、初期形状を図 3(a)のような片持ち梁とした。応力解析には、正方形格子の一つを平面応力要素とする有限要素法を用いた。尚、使用する材料は、例えば鋼などの線形弾性材料とし、ヤング率とポアソン比でその特性が記述できるものとした。また、座屈などの発生は考慮しない。初期形状では、体積が $8 \times 105\text{mm}^3$ であり、最終形状の $6.50 \times 106\text{mm}^3$ と比較して小さな構造であるが、応力は左側の壁面付近で 31.8MPa と右端に比較

して極めて高い値となっている。このような初期形状では、非常に不均一な応力状態であることがわかる。理想的には全ての部分において、ある安全な応力レベルの近傍に応力状態があることが望ましい。

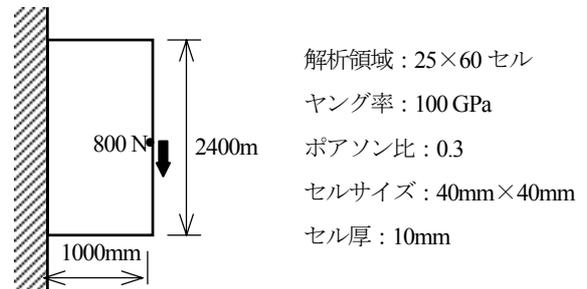


図 2 設計領域と荷重および支持条件

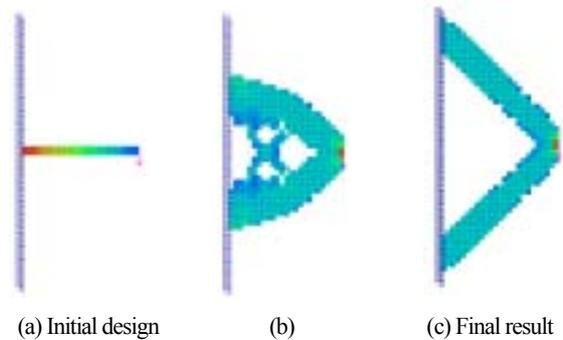


図 3 二部材フレーム構造の生成

セルの出現と消滅の局所規則として本研究で提案する規則を適用すると、ステップを重ねるごとにセルが出現して梁せいが増大し、やがて図 3 (b)のように一本の梁が枝分かれし、120 ステップで解析解として知られる図 3 (c)のような二部材フレーム構造となる。得られた形状では、高さとの幅の比がほぼ 2:1 となり、Xie 等⁴⁾の ESO 法による結果とも一致する。

4 3次元構造物への応用

次に、3次元の設計領域で本手法を適用した例について報告する。図 4 は、構造形態の創生と最適化セミナー⁹⁾で取り上げられた橋梁の最適化問題で、スパン $260\text{m} \times$ 幅 $40\text{m} \times$ 高さ 120m の設計領域を示している。これを一辺が 1m の立方体セルで均等に分割する。目標とする相当応力 σ^E は 8MPa で、ヤング率は 200GPa 、ポアソン比は 0.3 である。道路部分には一様な鉛直方向の分布荷重 20kN/m^2 を作用させ、さらに、車両などが通過できるよ

うに材料が出現しない領域（幅員 8m×高さ 10m）を設けた。図 5 は初期形状で、図 6 は 60 ステップにおける最適形状を示している。

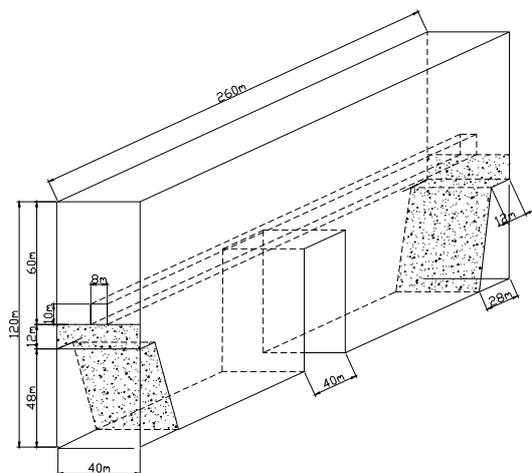


図 4 橋梁の設計領域

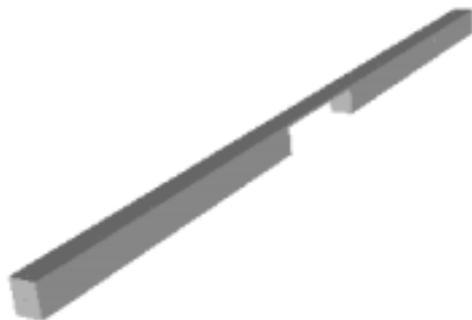


図 5 初期形状



図 6 計算された形態

5 外力が周期的に変動する問題への応用

図 7 に示す 1000mm×2400mm の設計領域において壁面から 1000mm の点に作用する 800N の荷重を支持する構造システムを上述の局所規則によって生成することを考える。このとき荷重は、鉛直方向に対して 0 度から 90

度まで周期的に方向を変化すると考える。

板厚は 10mm，ヤング率は 100GPa，ポアソン比は 0.3 とする。周期 $T=10\text{sec}$ とする。鉛直方向荷重が作用する基本的な問題は、構造最適化問題としてよく取り上げられる二部材フレーム問題である。設計領域はサイズ 40mm×40mm の正方格子で 25×60 に分割した。時間増分を $\Delta t=0.1\text{sec}$ とした。 $u_s=2$ ， $\varepsilon=1$ と選択すると、パラメータ ω ， λ は式(3)(4)により計算され、それぞれ $\lambda=0.0693$ ， $\omega=0.139$ と設定される。初期形状として、図 7 に示す荷重を左端に伝達する任意形状の中から荷重点と支持点を結ぶ直線梁 8(a)を選択した。図 8(b)(c)は生成過程であり、(d)は得られた形態である。

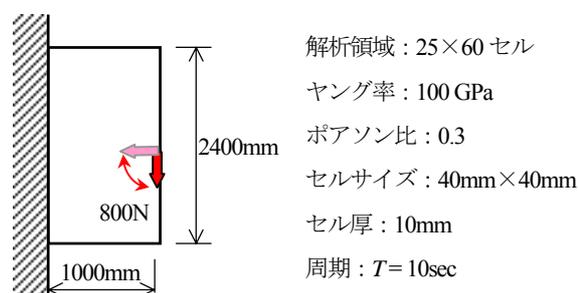


図 7 設計領域と荷重および支持条件

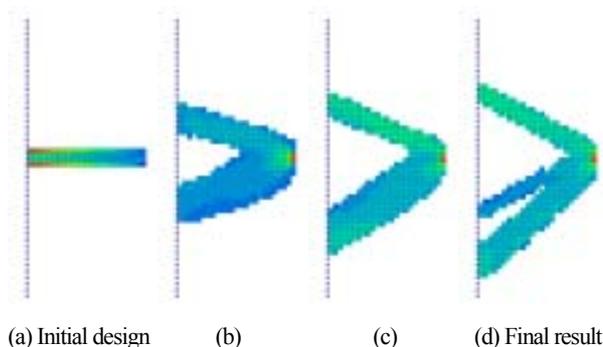
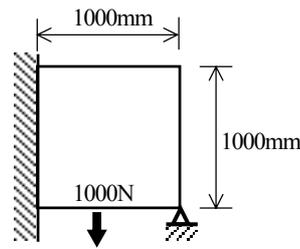


図 8 構造の生成

図 9 は得られた形態(d)と $\theta=45^\circ$ とした一定の荷重が作用する場合において得られた形態とに対して、周期外力の作用する場合の平均応力の変化を比較したものである。また、図 10 は得られた形態(d)と体積を同一とした片持ち梁とに対して、周期外力の作用する場合の平均応力の変化を比較したものである。本手法で得られた形態(d)が他の形態に比較して、周期中の全ての場合において低い応力状態を示すことが分る。これは、本手法が時間的加算性を有することに起因する特徴である。すなわち、周期中の荷重条件の変化に対する材料配置の必要性をポ

テンシヤルとして蓄積し、閾値を基準として形状を徐々に更新して解を探索する仕組みによるものである。

次に図 11 に示す 1000mm×1000mm の設計領域において底部に作用する鉛直方向 1000N の荷重を支持する構造システムを上述の局所規則によって生成することを考える。このとき荷重は、設計領域の底部を周期的に作用点移動すると考える。また、設計領域の左辺上では上下方向に移動可能なローラー支持、右下は固定とする。さらに、板厚は 10mm、ヤング率は 100GPa、ポアソン比は 0.3 とする。周期 $T=10\text{sec}$ とする。時間増分を $\Delta t=0.1\text{sec}$ とした。パラメータは周期から計算され、それぞれ $\lambda=0.0693$, $\omega=0.139$ と設定される。図 12 はその形態生成過程である。(a) の初期形状から生成が開始され、(e) の形状が得られた。



解析領域：50×50 セル
ヤング率：100 GPa
ポアソン比：0.3
セルサイズ：20mm×20mm
セル厚：10mm
周期： $T=10\text{sec}$

図 11 設計領域と荷重および支持条件

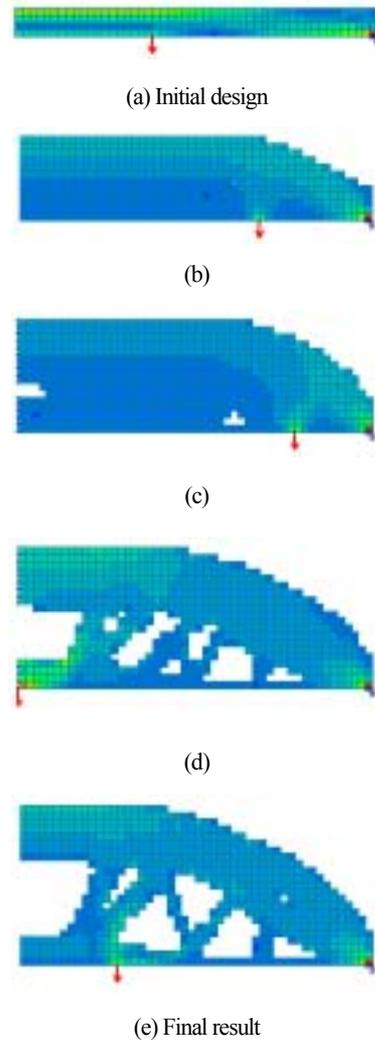


図 12 構造の生成過程

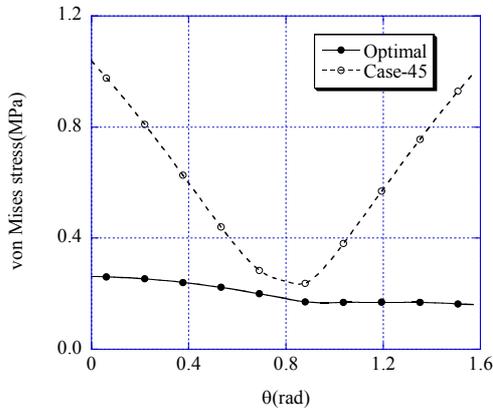


図 9 45° 方向の荷重に対する形態との応力の比較

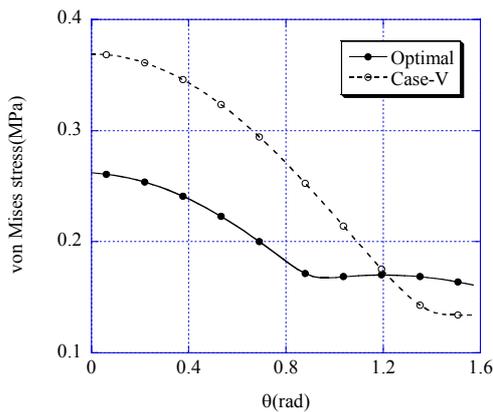


図 10 体積が同一の形態との応力の比較

6 支持条件が周期的に変動する問題への応用

図 13 に示す 1000mm×500mm の設計領域において中央に作用する 1000N の荷重を支持する構造システムを考

える。右側の支持点は、中央まで周期的に移動する。板厚は 10mm、ヤング率は 100GPa、ポアソン比は 0.3 とする。周期 $T=10\text{sec}$ とする。時間増分を $\Delta t=0.1\text{sec}$ とした。パラメータは周期から計算され、それぞれ $\lambda=0.0693$, $\omega=0.139$ と設定される。

図 14(a) に示す直線梁を初期形状として選択した。図 14(b)(c)(d)(e) は生成過程と得られた形態である。

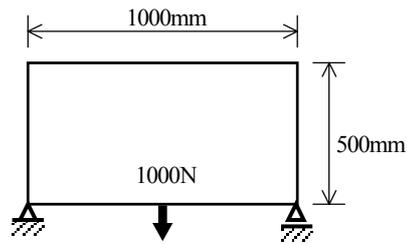


図 13 設計領域と荷重および支持条件

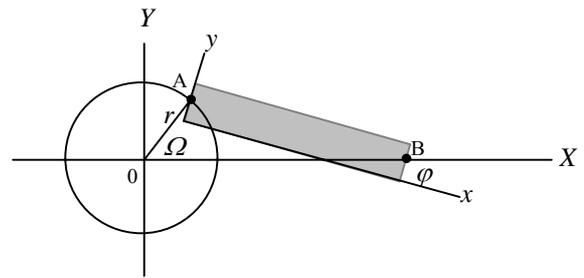
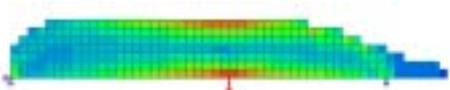


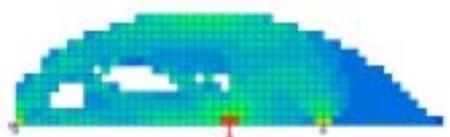
図 15 高速で回転する構造物



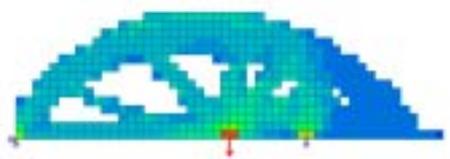
(a) Initial design



(b)



(c)



(d)



(e) Final result

図 14 構造の生成過程

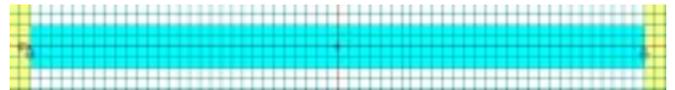


図 16 回転構造の初期形状

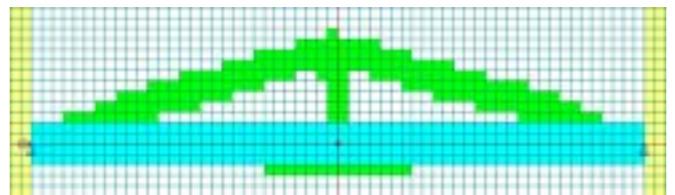


図 17 回転構造の最適形状(a)

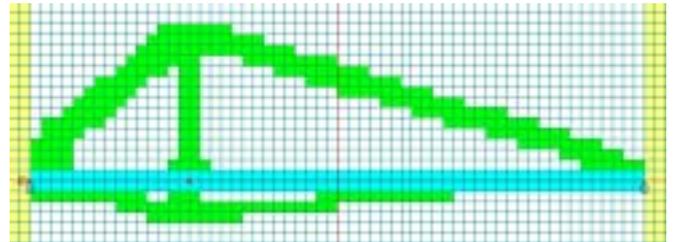


図 18 回転構造の最適形状(c)

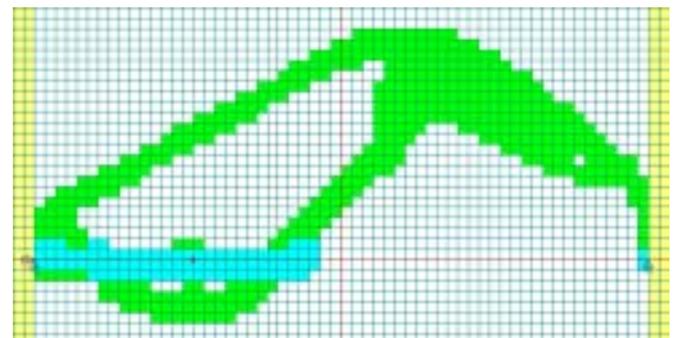


図 19 回転構造の最適形状(e)

7 高速回転する構造の問題への応用

図 15 に示されるように高速で回転する構造物の最適化問題を考える。高速で回転することにより、慣性力を考慮して動的な挙動を扱うことが重要である。しかしながら、慣性力は時間とともに複雑に変化するため、このような外力下の最適化問題は難しい問題となる。設計領域は、図 15 に示される点 A が半径 r 、角速度 Ω で回転し、点 B が x 軸上を移動するような灰色の領域である。

8 地震入力に対する骨組みの問題への応用

地震力が作用する骨組みの問題にも本手法が有効であることを示すために図 20, 21, 22 の例題を示す。高さ 12m、幅 8m のトラス構造を図に示すようなヤン

グ率 $2.1 \times 10^5 \text{MPa}$, 質量密度 7800kg/m^3 で構成し, 全ての節点に 1000kg の質量を付加した。解析には自重を考慮した。部材断面は, $\{10 \text{cm}^2, 20 \text{cm}^2, 30 \text{cm}^2, 40 \text{cm}^2, 50 \text{cm}^2\}$ の中から選択するとした。

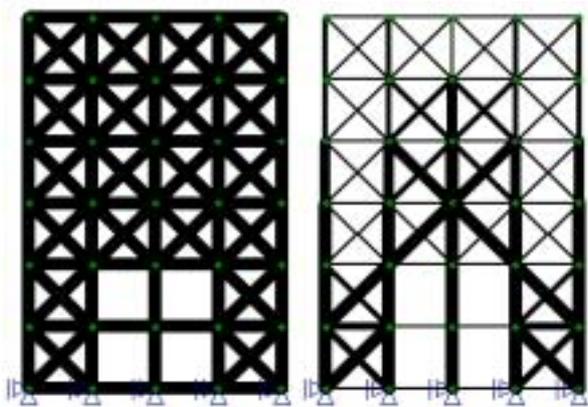


図 20 骨組み構造の初期形状と最適形状(a)

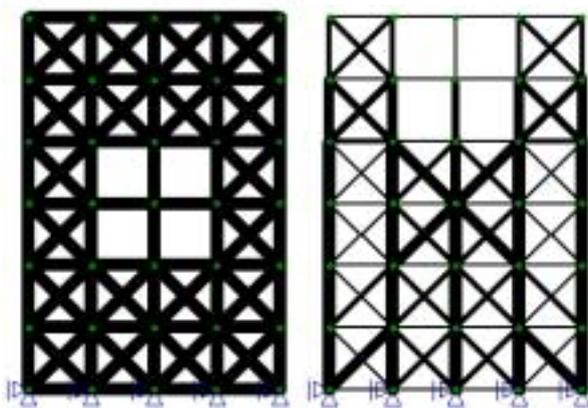


図 19 骨組み構造の初期形状と最適形状(b)

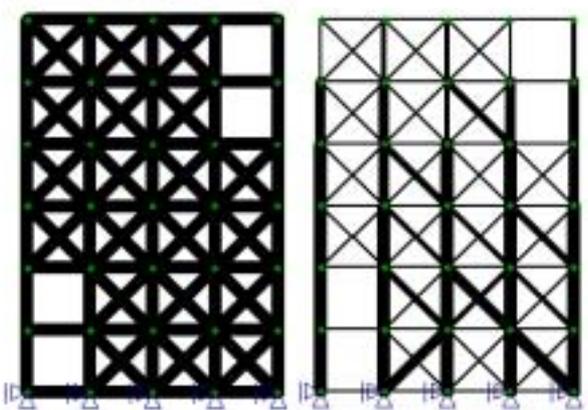


図 20 骨組み構造の初期形状と最適形状(c)

9 まとめ

構造形態を創生することを目的として, 入出力信号の二値性と上述の空間的加算性, 時間的加算性, 非線形性

の4つの基本的性質を有する局所規則を用いる発見的手法を提案した。また, この手法を典型的な形状最適化問題に適用し, その有効性を示すことができた。さらに, 外力が周期的に変動する問題および支持条件が周期的に変動する問題, 構造物自身が周期的に運動する問題, 地震力が作用する骨組み構造の問題へ適用し, 特に探索性能の向上に対する時間的加算性の有効性を示すことができた。

謝辞: 本研究が, 学術フロンティア推進事業 (平成 15 年度~平成 19 年度) により交付された補助金および科学研究費補助金 (平成 15 年度~平成 16 年度) による研究であることを記し, 謝意をあらわす。

参考文献

- 1) 大崎 純: 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.464, pp.119-127(1994)
- 2) 本間俊雄, 加治広之, 登坂宣好: 免疫アルゴリズムによる構造物の多目的最適化と解の多様性, 構造工学論文集, 49B, pp.309-317
- 3) 田川 浩, 大崎 純: 一様部材断面積を有する平面トラスのトポロジー・節点位置同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.521, pp.73-80(1999)
- 4) Xie, Y.M. and Steven, G.P.: Evolutionary Structural Optimization, Springer-Verlag, 1997
- 5) 大森博司, 崔昌禹: 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, No. 539, pp. 87-94(2001)
- 6) 三井和男: 構造形態を自律的に生成するセルオートマトン, 情報処理学会論文誌: 数理モデルと応用, Vol.44, pp.118-126(2003)
- 7) 曾我部博之, 三井和男: セルオートマトンによる構造物の最適化, 構造工学論文集, Vol.50B, pp.243-249, 2004
- 8) 三井和男: 周期的に変動する条件下における構造形態創生のための発見的手法, 日本建築学会構造系論文集, No. 593, pp. 73-79(2005)
- 9) 藤井大地, 野中哲也, 三井和男, 曾我部博之, 本間俊雄, 高崎一美: 橋梁の設計・連続体, 日本建築学会構造形態の創生と最適化セミナー, pp.27-34, (2005)

RS 座屈荷重係数を目的関数とした単層ラチスドームの形状最適化

山本 憲司¹⁾, 皆川 洋一²⁾, 大森 博司³⁾

1)鹿児島大学工学部建築学科, 助手, 博士(工学), yamamoto@aae.kagoshima-u.ac.jp

2)鹿児島大学工学部建築学科, 教授, 工博

3)名古屋大学大学院環境学研究科, 教授, 工博

1 はじめに

構造物の耐力を高め建設コストを削減することを目的として、座屈荷重を目的関数あるいは制約条件とした構造最適化問題が扱われている。しかしこの種の最適化によって得られた構造物は、不整に敏感な構造物となる傾向があることが指摘されている¹⁾。このような場合、不整の影響を考慮した最適化問題の設定が必要になる^{2,3)}。

弾性座屈荷重に対する初期不整の影響は、不整感度解析の分野において研究が進んでいる。しかし、その評価法は全ポテンシャルエネルギーの高階の微分を必要とし定式が煩雑であるため、一般には普及していない。一方で、初期不整による弾性座屈荷重の下限値を予測する方法として、Reduced Stiffness 法 (RS 法)^{4,5)}と呼ばれる方法が提案されている。これは、座屈前非線形性が主に面内剛性損失に起因するとした方法で、線形理論で算定可能な簡便で実用的な方法である。

本稿では、この RS 座屈荷重係数を目的関数とした単層ラチスドームの形状最適化問題を扱う。この問題から得られる解の力学性状について詳細に調査することで、初期不整の影響を考慮した座屈最適化法としての可能性について検討する。また、RS 法の任意形状ラチスシェルへの適用性などについても同時に調査する。

2 最適化の方法

2.1 RS 座屈荷重係数とその感度係数

RS 法は、古典的な線形座屈固有方程式から面内歪エネルギー成分を削除した解析により、初期不整による弾性座屈荷重の下限値を推定する方法である。山田ら^{4,5)}は RS 法の単層ラチスシェル構造への適用性について検討している。文献4)では RS 座屈荷重係数として2つの算定式を提案しているが、本研究ではこれらのうちエネルギー商で表される次式を採用する。

$$\lambda_i^* = \lambda_i^c \frac{\phi^T \mathbf{K}_L^* \phi}{\phi^T \mathbf{K}_L \phi} \quad (1)$$

ここに、 λ_i^c は i 次線形座屈荷重係数、 ϕ は i 次線形座屈

モード、 \mathbf{K}_L は線形剛性マトリクス、 \mathbf{K}_L^* は \mathbf{K}_L の軸剛性を零としたマトリクスである。(1)式右辺の $\phi^T \mathbf{K}_L^* \phi / \phi^T \mathbf{K}_L \phi$ は不整による座屈荷重係数の低減係数を表し、ノックダウンファクタと呼ばれる。

(1)式の RS 座屈荷重係数の感度係数について示す。本稿では線形座屈固有値問題を次の形式で解くものとする。

$$\left[\mathbf{K}_G + \frac{1}{\lambda_i^c} \mathbf{K}_L \right] \phi = 0 \quad (2-1)$$

$$\phi^T \mathbf{K}_L \phi = 1 \quad (2-2)$$

ここに、 \mathbf{K}_G は幾何剛性マトリクスを表す。(2-2)式は ϕ の正規化条件である。(2-2)式より RS 座屈荷重係数は次式となる。

$$\lambda_i^* = \lambda_i^c \phi^T \mathbf{K}_L^* \phi \quad (3)$$

(3)式を設計変数 x_j で微分すると次式を得る。

$$\frac{\partial \lambda_i^*}{\partial x_j} = \frac{\partial \lambda_i^c}{\partial x_j} \phi^T \mathbf{K}_L^* \phi + \lambda_i^c \left(\phi^T \frac{\partial \mathbf{K}_L^*}{\partial x_j} \phi + 2 \phi^T \mathbf{K}_L^* \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

上式には線形座屈荷重係数 λ_i^c の感度係数と線形座屈モード ϕ の感度係数を含む。これらは、以下のように求める。(2)式を設計変数 x_j で微分すると次式となる。

$$\left[\frac{\partial \mathbf{K}_G}{\partial x_j} + \frac{1}{\lambda_i^c} \frac{\partial \mathbf{K}_L}{\partial x_j} - \frac{\partial \lambda_i^c}{\partial x_j} \frac{1}{(\lambda_i^c)^2} \mathbf{K}_L \right] \phi + \left[\mathbf{K}_G + \frac{1}{\lambda_i^c} \mathbf{K}_L \right] \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (5-1)$$

$$\phi^T \frac{\partial \mathbf{K}_L}{\partial x_j} \phi + 2 \phi^T \mathbf{K}_L \frac{\partial \phi}{\partial x_j} = 0 \quad (5-2)$$

上式を整理し、次のようにマトリクス表現する。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_G + \frac{1}{\lambda_i^c} \mathbf{K}_L & -\frac{1}{(\lambda_i^c)^2} \mathbf{K}_L \\ -\frac{1}{(\lambda_i^c)^2} \phi^T \mathbf{K}_L & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \\ \frac{\partial \lambda_i^c}{\partial x_j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial \mathbf{K}_G}{\partial x_j} \phi + \frac{1}{\lambda_i^c} \frac{\partial \mathbf{K}_L}{\partial x_j} \phi \\ \frac{1}{2(\lambda_i^c)^2} \phi^T \frac{\partial \mathbf{K}_L}{\partial x_j} \phi \end{Bmatrix} \quad (6)$$

上式の連立1次方程式を解くことで、線形座屈荷重係数及び線形座屈モードの感度係数が求められる。

2.2 対称性による剛性マトリクスのブロック対角化法

一般に線形座屈荷重などの固有値を目的関数とした最適化問題では、あるモードの固有値を上昇させると他の

モードの固有値が下降し、最適解では複数の固有値が重複する傾向にある。本研究では RS 座屈荷重係数を目的関数とするが、RS 座屈荷重係数は(1)式のように線形座屈荷重係数にノックダウンファクタを乗じたものであるので同様の傾向を有する (図 1-a)。この種の問題では、目的関数の感度係数は設計変数に対し不連続となり、非線形計画法では最適解を求めることが難しい。

本稿ではこの問題を解くために構造形態の対称性を利用する方法⁶⁾を用いる。対称性を有する構造物の剛性行列は、基底を上手く選ぶことで対称性に応じた幾つかのブロック行列に対角化される。これにより線形座屈荷重係数や RS 座屈荷重係数は対称成分毎に求められる。RS 座屈荷重係数を最大化した際に異なる対称成分(ブロック行列)間で RS 座屈荷重係数が重複するケースの問題 (図 1-b) に対しては、互いの RS 座屈荷重係数は独立した方程式から得られるため、最適化の過程で最小の RS 座屈荷重係数に入れ替わりが発生しても、注目している RS 座屈荷重係数を見失うことが無く、また重複時の RS 座屈荷重係数の感度も単に独立した 2 つの RS 座屈荷重係数の感度として容易に求められる。(同じ対称成分どうしで RS 座屈荷重係数が重複するような問題はここでは扱わない。)

本稿では、z 軸回りに $\pi/3$ 毎の 6 つの回転 (回転角が 0 の回転を含む) と、z 軸回りに $\pi/6$ 毎に傾く 6 つの平面に対する鏡映に対して対称となる単層ラチスドームを解析対象とする (図 3)。この対称性は点群でいうと C_{6v} に該当し、既約表現でいえば $A_1, A_2, B_1, B_2, E_1, E_2$ の 6 つの対称成分に分けられる (図 2)。通常、構造物の変位を表現するのに各節点の x,y,z 方向の単位ベクトルが基底として用いられるが、これらを既約表現に従うように変換することで、剛性行列は既約表現毎のブロック行列に対角化され、線形座屈荷重や RS 座屈荷重係数はブロック行列 (既約表現) 毎の固有値問題を解くことで求められる⁶⁾。

2.3 最適化問題の定式化

構造材の体積が一定の条件のもとで、RS 座屈荷重係数が最大となる構造形状を求める。構造物の形状は要素節点座標で表され、問題は RS 座屈荷重を最大とする節点座標を求める問題として扱われる (ただし、節点座標の移動方向を制限し、初期値として与えた構造形状の対称性は保持するものとする)。

目的関数は初期形状の系全体で最小となる RS 座屈荷重係数が属する対称成分の最小 RS 座屈荷重係数を最大

化するものとし、他の対称成分における最小 RS 座屈荷重係数がこれを上回るように制約条件を設定する。上述の問題は次式のように表される。

$$\begin{aligned} \text{Objective Function } \lambda_1^{*(\mu)} &\rightarrow \text{maximize} \\ \text{Subject to } \sum_{k=1}^M V_k &= V_0 \quad (7) \\ \lambda_1^{*(\alpha)} &\geq \lambda_1^{*(\mu)} \quad (\alpha \in A) \end{aligned}$$

ここに、 λ^* は RS 座屈荷重係数を意味し、上添え字の () 内は λ^* の属する対称成分を表し、下添え字 1 は対称成分の中で最小の RS 座屈荷重係数であることを表す。 μ は初期形状の最小固有値が属している対称成分を表す。 V_k は要素 k の体積を、 V_0 は指定総体積を表す。 A は対称成分 $\{A_1, A_2, B_1, B_2, E_1, E_2\}$ の集合から μ を除いた集合を表す。上問題の解法には逐次 2 次計画法 (SQP 法) を採用する。

3 数値解析

初期形状はスパン 15m、ライズ 1.5m の球形単層ラチスドームとする (図 3-a)。曲面の分割方法は x-y 射影平面上で正三角形となる 3 方向グリッドとしている。部材は円形鋼管を使用し、接合部は剛接とする。各部材は中間節点を設け 2 要素でモデル化する。支持条件はピン支持とし、外力は x-y 平面に対して、 9.8kN/m^2 の等分布荷

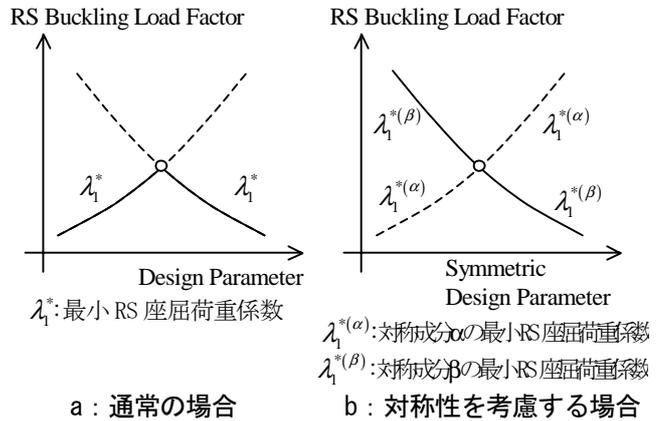


図 1 最適解で RS 座屈荷重係数が重複する問題の概念図

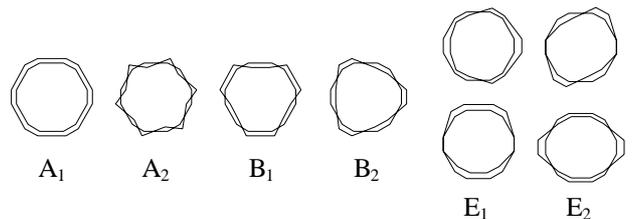


図 2 点群 C_{6v} の既約表現に従う変形モードの例

重を節点に振り分けて与える。部材の断面寸法は $\phi 139.8 \times 4.0(\text{mm})$ とし、ヤング率を 206GPa、ポアソン比 0.3 とする。代表部材長 (図 3-a 節点 1-2 間) は 2.505m であり、これを用いて算定される細長比は 52、シェルらしさ係数⁷⁾は 2.45 である。制約条件である構造材の総体積は初期形状と同じ体積を指定する。

最適化により得られた最終形状を図 3-b に示す。また、初期形状 (Initial Shape) および最終形状 (Final Shape) の節点座標を表 1 に示す (対応する節点番号は図 3-a に示してある)。最終形状の初期形状に対する視覚的な変化は小さく、節点の移動量は最大で 0.192m (断面 2 次半径の約 4 倍) である。初期形状および最終形状の RS 座屈荷重係数を表 2 に示す。RS 座屈荷重係数は、既約表現 (対称成分) 毎に、線形座屈荷重係数の小さいほうから 2 番目までの値を示している (表中の括弧内に示した数値は線形座屈荷重係数を表す)。表を見ると、初期形状では対称成分 A₁ の 2 次の RS 座屈荷重係数が 3.51 で、全体の最小値となっている。最終形状では、対称成分 A₁, B₂, E₂

の 1 次の RS 座屈荷重係数が等しくなり、その値は 5.34 と初期形状のおよそ 1.5 倍に上昇している。線形座屈荷重係数に注目してみると、初期形状では E₁ の 1 次が 8.58 で最小座屈であるのに対し、最終形状では B₂ の 1 次が 6.05 で最小であり、最終形状の線形座屈荷重係数は初期形状より小さくなっている。また、最終形状の A₁, B₂, E₂ の 1 次の RS 座屈荷重係数が 5.34 であるのに対し、対応する線形座屈荷重係数は 6.0~6.6 程度と 5.34 に比べその差は小さい。即ち、最終形状は RS 座屈荷重係数が上昇すると同時に線形座屈荷重係数が下降しており、RS 解析によるノックダウンファクタの影響が極端に小さい構造形状が得られていることがわかる。

初期形状および最終形状における線形座屈モードを図 4-a、図 4-b にそれぞれ示す。初期形状、最終形状ともに、シェル型の全体座屈が卓越していることがわかる。

次に、実際の座屈挙動を確認するために、これら初期形状および最終形状に対して改めて幾何学的非線形解析を行い、その座屈性状について調査する。

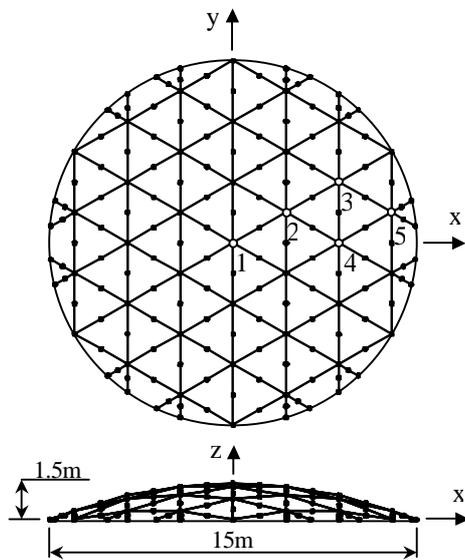


図 3-a 初期形状

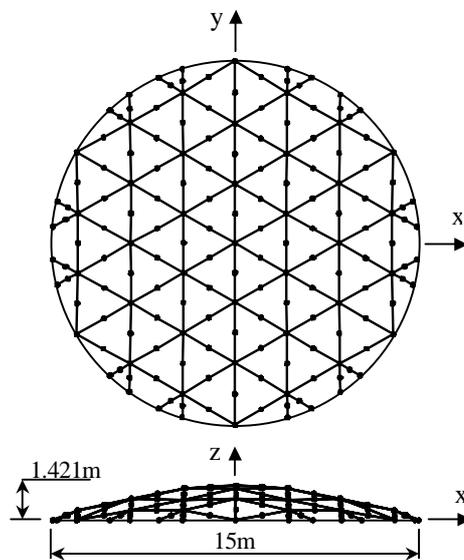


図 3-b 最終形状

表 1 節点座標 (Unit:m)

	Initial Shape			Final Shape			Distance of Nodes
	x	y	z	x	y	z	
Node 1	0.00000	0.00000	1.50000	0.00000	0.00000	1.42138	0.079
Node 2	2.16506	1.25000	1.33908	2.10951	1.21793	1.30405	0.073
Node 3	4.33013	2.50000	0.84808	4.26817	2.46423	0.88265	0.079
Node 4	4.33013	0.00000	1.01315	4.27513	0.00000	0.82949	0.192
Node 5	6.49519	1.25000	0.34394	6.45186	1.23742	0.39588	0.069

表 2 RS 座屈荷重係数

Irreducible Representation	Initial Shape		Final Shape	
	1st	2nd	1st	2nd
A1	6.61 (8.75)	3.51 (10.40)	5.34 (6.28)	6.54 (9.48)
A2	8.58 (10.45)	14.86 (14.86)	11.91 (13.95)	14.34 (14.36)
B1	5.53 (10.08)	7.24 (10.24)	8.34 (9.99)	6.28 (11.01)
B2	8.45 (9.87)	4.45 (10.40)	5.34 (6.05)	10.25 (11.59)
E1	4.71 (8.58)	7.83 (9.87)	6.90 (7.47)	6.22 (9.32)
E2	5.64 (9.60)	4.49 (12.95)	5.34 (6.57)	8.35 (9.88)

()内の数値は線形座屈荷重係数を表す

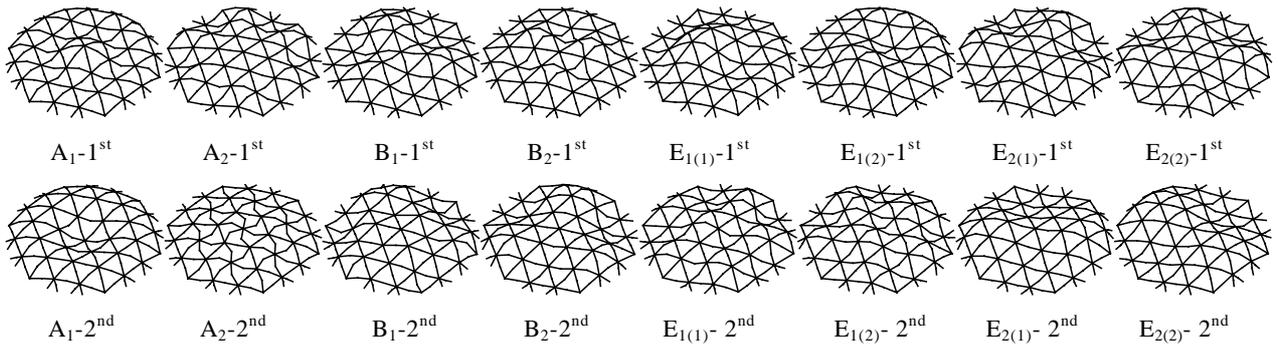


図 4-a 初期形状の線形座屈モード

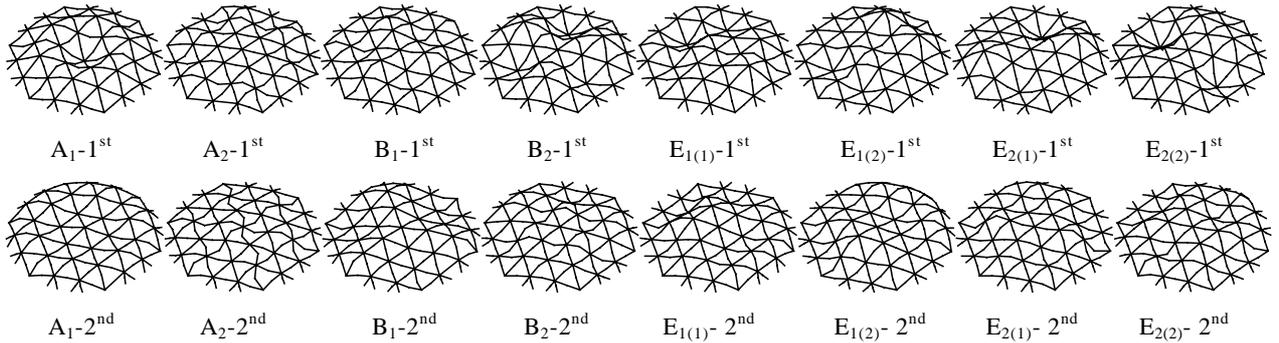


図 4-b 最終形状の線形座屈モード

まず完全系における初期形状および最終形状の頂部鉛直変位と荷重係数の関係（釣合主経路）を図 5-a、図 5-b にそれぞれ示す。図中の釣合曲線上にある○印は座屈点を表しており、座屈点（座屈モード）の属する対称成分を図中に記入した。図 5-a をみると、初期形状では極限点に到るまでの主経路上に多くの分岐点が近接して存在しており、極限点付近では合計 12 個の座屈モードに対して臨界となっている（ E_1, E_2 は 2 次元の既約表現であり、これらの座屈点では 2 方向に臨界である）。一方、最終形状（図 5-b）では極限点に近接している分岐点の数は初期形状に比べて少なく、合計 6 つの座屈モードに対して臨界となっている。（最小）非線形座屈荷重係数は、初期形状で 6.22、最終形状で 4.43 であり、線形座屈荷重係数の場合と同様、初期形状より最終形状のほうが小さくなっている。

次に、初期形状、最終形状に対し節点位置に不整を与えて幾何学的非線形解析を実施し、形状初期不整による座屈荷重の低下率および RS 座屈荷重係数との対応関係について調査する。節点位置不整の分布は図 4-a、図 4-b で示した線形座屈モードとする。ただし、部材の中間節点については不整を与えず、接合部節点を結ぶ直線の中央に規則的に配置した。これは、現実問題では施工時に

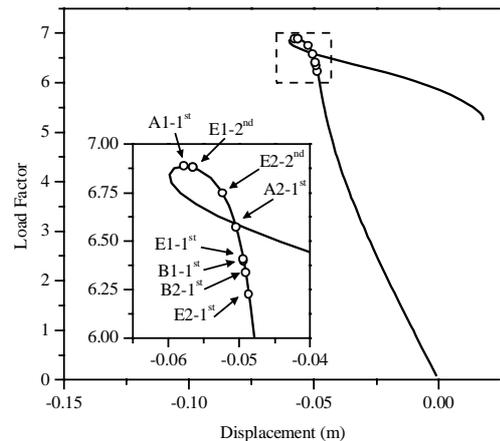


図 5-a 完全系の釣合曲線（初期形状）

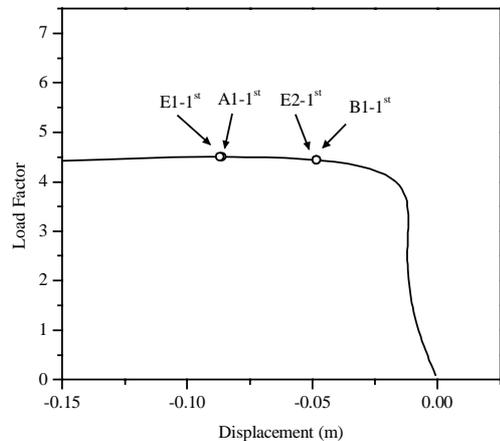
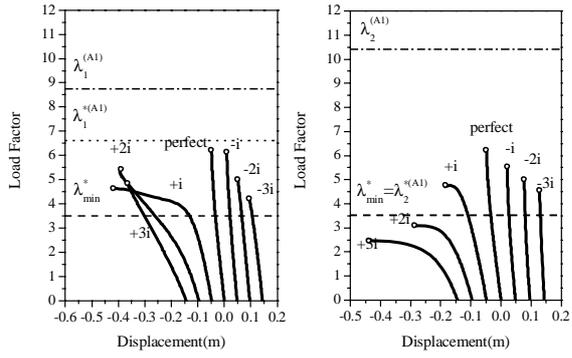
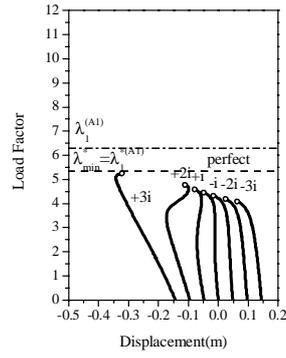


図 5-b 完全系の釣合曲線（最終形状）



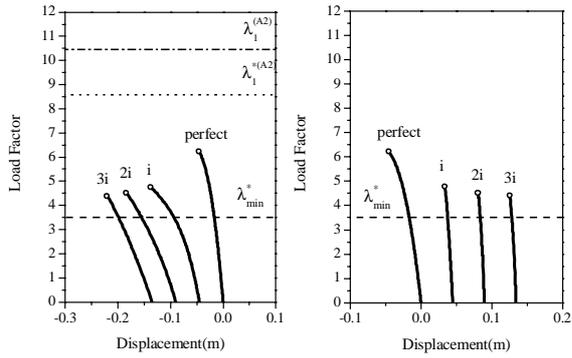
A₁-1st

A₁-2nd



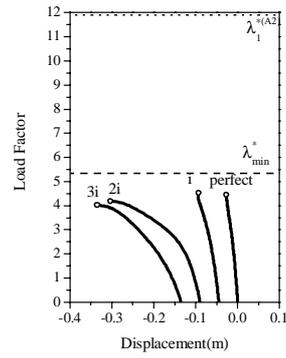
A₁-1st

A₁-2nd



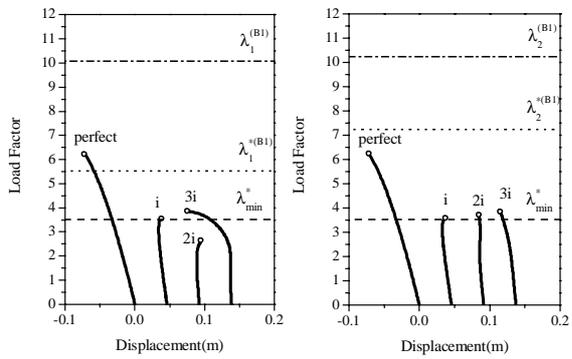
A₂-1st

A₂-2nd



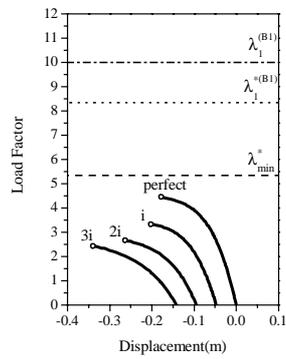
A₂-1st

A₂-2nd



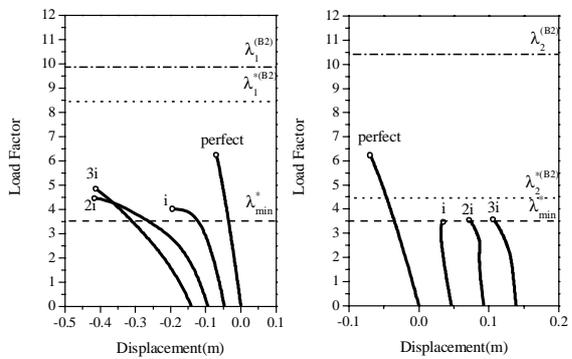
B₁-1st

B₁-2nd



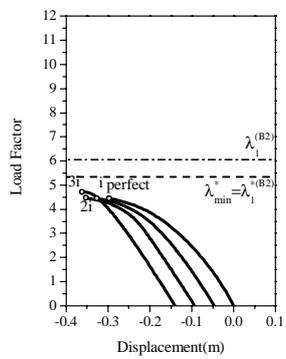
B₁-1st

B₁-2nd



B₂-1st

B₂-2nd

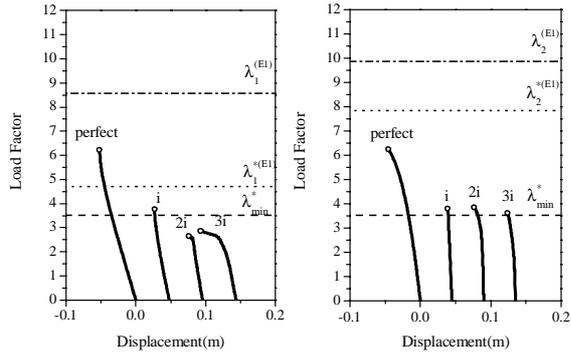


B₂-1st

B₂-2nd

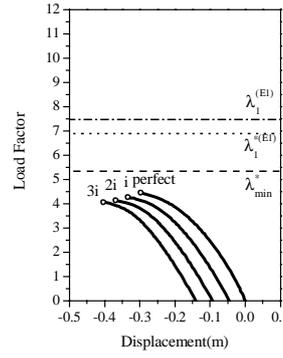
図 6-a-1 不整系の釣合曲線 (初期形状)

図 6-b-1 不整系の釣合曲線 (最終形状)

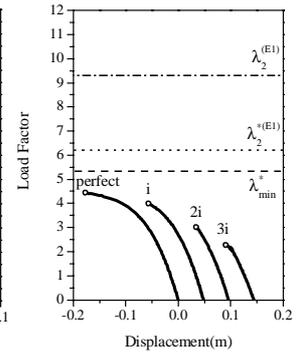


$E_{1(1)}-1^{st}$

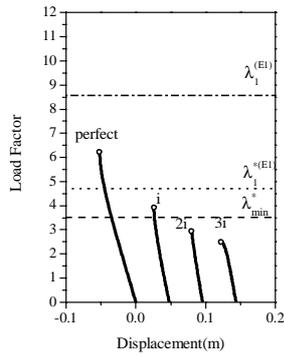
$E_{1(1)}-2^{nd}$



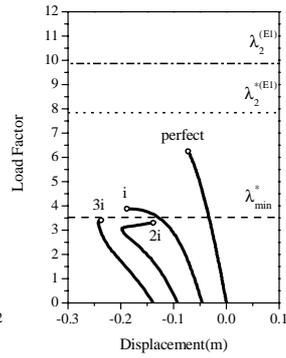
$E_{1(1)}-1^{st}$



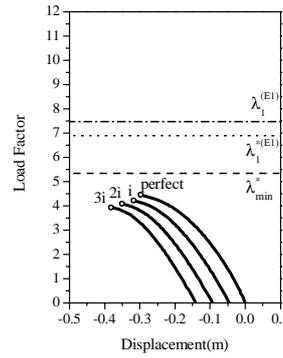
$E_{1(1)}-2^{nd}$



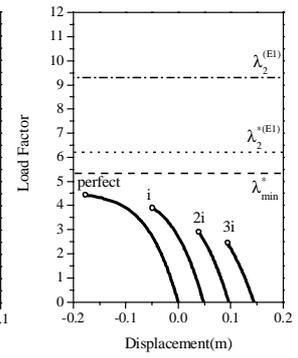
$E_{1(2)}-1^{st}$



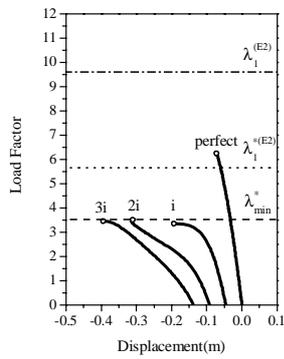
$E_{1(2)}-2^{nd}$



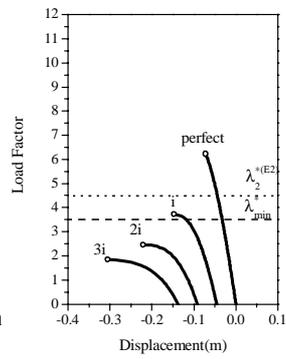
$E_{1(2)}-1^{st}$



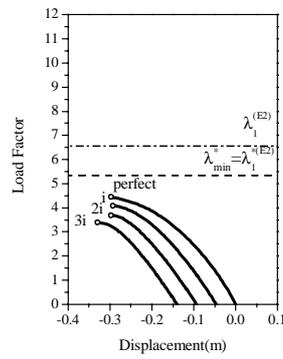
$E_{1(2)}-2^{nd}$



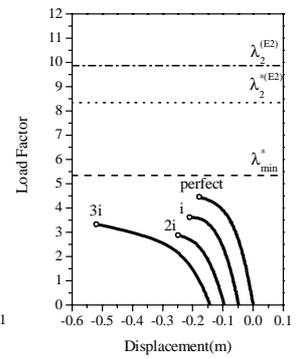
$E_{2(1)}-1^{st}$



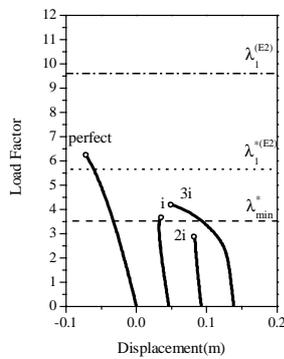
$E_{2(1)}-2^{nd}$



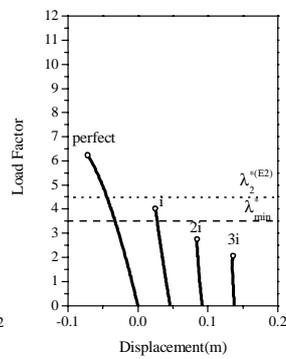
$E_{2(1)}-1^{st}$



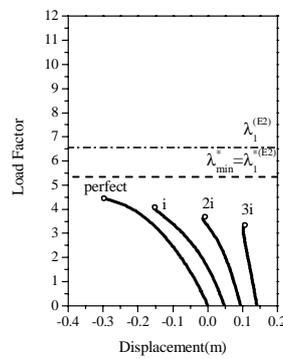
$E_{2(1)}-2^{nd}$



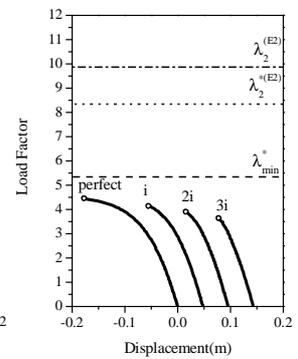
$E_{2(2)}-1^{st}$



$E_{2(2)}-2^{nd}$



$E_{2(2)}-1^{st}$



$E_{2(2)}-2^{nd}$

図 6-a-2 不整系の釣合曲線 (初期形状)

図 6-b-2 不整系の釣合曲線 (最終形状)

生じる形状不整は主に接合部位置の不整であり、部材の元たわみは十分小さいと考えたためである(対称成分 A_2 の座屈では個材座屈が卓越しているため、この不整分布は A_2 に関して適切でないかもしれない)。不整の振幅は最大振幅が部材の断面2次半径 i の1倍、2倍、3倍となるように定め、それぞれ解析する。

解析により得られた釣合曲線を、初期形状については図 6-a に、最終形状については図 6-b に示す。図は、不整振幅が最大となる節点における荷重-変位関係を表し、不整振幅 $\pm 1i, \pm 2i, \pm 3i$ の釣合曲線を不整モード毎にまとめて描いている。また横軸の変位には初期不整振幅が加算されている。曲線上の先端に付した○印は、主経路上に最初に現れる座屈点を意味する。図中に描いた水平の破線(λ_{\min}^*)は系全体で最小のRS座屈荷重係数を表し、水平の点線は不整分布に用いた座屈モードのRS座屈荷重係数を、水平の一点鎖線は不整分布に用いた座屈モードの線形座屈荷重係数を表す。

初期形状の釣合曲線(図 6-a)を見ると、いずれのモードの不整を与えた場合においても座屈荷重の低下が比較的大きく、特に A_1 の2次、 B_1 の1次、 E_1 の1次、 E_2 の2次のモード不整を与えた時の座屈荷重は、不整の無い時の半分以下となっている。また、これらの座屈荷重は最小RS座屈荷重係数 λ_{\min}^* を下回っている。山田ら⁵⁾は、RS座屈荷重係数は断面2次半径の3倍程度の不整に対する座屈荷重の下限値を表すことを述べているが、このモデル(初期形状)では若干危険側の予測になる。

次に、最終形状の釣合曲線(図 6-b)において、特に最小RS座屈荷重係数が重複しノックダウンファクタの影響の小さかった(表2) A_1 の1次、 B_2 の1次、 E_2 の1次の釣合曲線に注目する。これらのモードの不整では、不整時の座屈荷重の低下は小さく、初期形状の場合と比べ鈍い性状を示している。ただし、最小RS座屈荷重係数 λ_{\min}^* の値そのものは、完全系の座屈荷重を始めから上回っており、不整による座屈荷重の下限値を適切に評価していない。また、不整モードによっては敏感性の増しているものもある(B_1 の2次)。従って、RS座屈荷重係数を上昇させることで不整時の座屈荷重下限値が上昇したとは直接的には言い難い。しかし、多くのモードで不整時の座屈荷重の低下が小さくなっており、最終形状は初期形状よりも高いロバスト性を有している。

初期形状と最終形状の形状の差異は小さいにもかかわらず、最終形状では完全系の座屈荷重係数がRS座屈

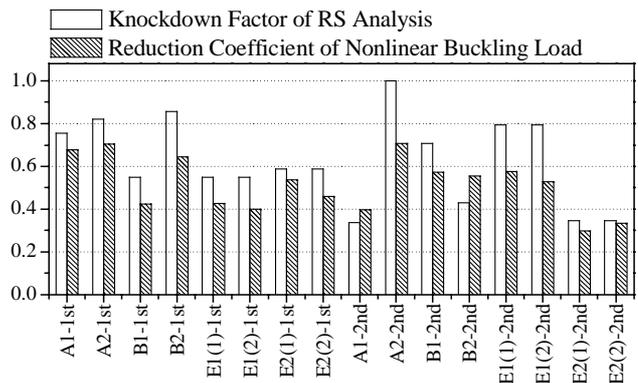


図 7-a RS 解析のノックダウンファクタと非線形座屈荷重低下係数の比較(初期形状)

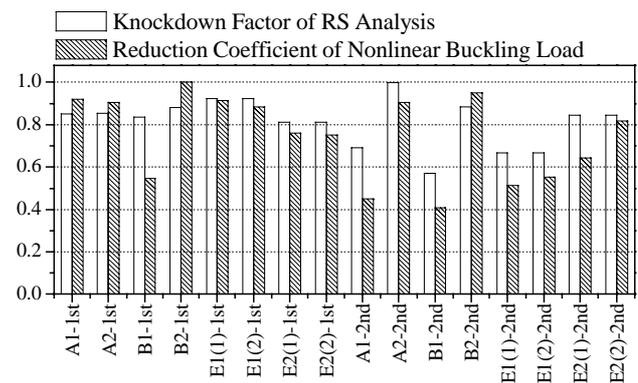


図 7-b RS 解析のノックダウンファクタと非線形座屈荷重低下係数の比較(最終形状)

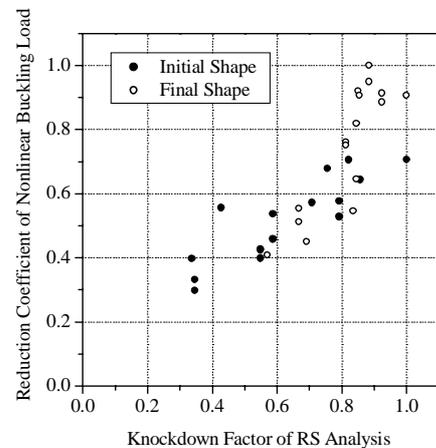


図 8 RS 解析のノックダウンファクタと非線形座屈荷重低下係数の相関図

荷重係数を下回った。従って、RS法によって単層ラチスシェルの座屈荷重の下限値を予測する場合、その適用範囲には限界があるようである(山田⁴⁾は(1)式の方法では危険側の予測となる場合があることを述べており、理想的な膜力状態における座屈モードを利用してRS解析する方法も提案している)。ただし、本論で扱った2つのモデル(初期形状、最終形状)に対し、RS解析のノックダ

ウンファクタと非線形座屈荷重の不整による低下係数には高い相関が見られた。このことについて示す。

初期形状における RS 解析のノックダウンファクタと不整による非線形座屈荷重の低下係数（不整振幅 $\pm 1i$ 、 $\pm 2i$ 、 $\pm 3i$ のうちで最小の非線形座屈荷重と完全系の非線形座屈荷重との比）の比較を図 7-a に示す。図中の白い棒グラフがノックダウンファクタを、ハッチのついた棒グラフが非線形座屈荷重の低下係数を表す。図を見ると、ノックダウンファクタが小さい座屈モードほど、そのモードの不整を与えたときの座屈荷重の低下が著しく、不整に敏感な傾向をもつことが確認できる。最終形状の場合の比較について同様に図 7-b に示す。最終形状においても初期形状と同様の傾向が確認できる。図 7-a、図 7-b の比較を相関図として表現したものを図 8 に示す。これらのデータから算定した相関係数は 0.83 であり、両者の相関は高い。

これら図 7-a、図 7-b の非線形座屈荷重の低下係数どうしを比較すると、最終形状では初期形状に比べ多くのモードで低下係数が上昇していることがわかる。最終形状は初期形状に比べ不整に鈍い構造形態となっており、最適化された効果は表れている。しかしながら、両者の違いはここで検討した形状初期不整と同程度の差異であり、この例題は最適化の実質的な効果を示すうえでは適切なモデルとは言えないかもしれない。

4 まとめ

不整に敏感な単層ラチスドームの座屈耐力を最大化することを目的として、RS 座屈荷重係数を目的関数とした形状最適化問題を扱った。特定のモデルに対し最適化を行い、その最適解の非線形座屈性状について詳細に調査を行った。その結果、最適解に対して RS 法の予測精度が悪くなっており、不整による座屈荷重下限値の上昇までは確認することができなかったが、最適解の座屈性状は初期値として便宜的に与えた幾何学形状の構造物と比べ多くの不整モードに対して鈍い性状を示し、最適化による幾らかの効果は確認することができた。座屈耐力が高くかつ不整に鈍い構造形態を得る為の方法として、RS 法を利用した構造最適化手法は有効な手段となる可能性を持つことを示した。

RS 法の任意形状ラチスシェルへの適用性に関して言えば、最適解の RS 座屈荷重係数は完全系における非線形座屈荷重を上回っており、(1)式の評価方法では場合によって極端に危険側となる可能性がある。また、初期形状、最終形状ともに RS 解析のノックダウンファクタと非線形座屈荷重の低下係数には高い相関が見られ、座屈前非線形性が主に面内剛性損失に因るものと仮定する RS 法の骨子の妥当性について確認した。

謝辞：本研究は日本建築学会シェル・空間構造運営委員会空間構造骨組小委員会における活動の中で、豊橋技術科学大学山田聖志先生との議論が動機付けとなりました。ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) Thompson, J.M.T. and Hunt, G.W. : A General Theory of Elastic Stability, J. Wiley, 1973
- 2) Reitinger, R., Ramm, E : Buckling and Imperfection Sensitivity in the Optimization of Shell Structure, Thin-Wall Structures, 23, pp.159-177, 1995
- 3) 竹内満, 大崎純, 上谷宏二 : 不整に敏感な対称構造物の最大支持荷重制約条件下の最適設計, 日本建築学会大会梗概集, B-1, pp.341-352, 1996
- 4) Yamada, S. : Relationship between non-linear numerical experiments and a linear lower bound analysis using finite element method on the overall buckling of reticular partial cylindrical space frames, Computer Applications in Civil and Building Eng., pp.259-266, 1991.7
- 5) 山田聖志, 竹内明子, 多田敬幸, 堤和敏 : 汎用解析コードによる RS 解析法と単層ラチスドームの座屈問題への適用, 日本建築学会構造系論文集, No.526, pp.85-92, 1999
- 6) 山本憲司, 皆川洋一, 大森博司 : 剛性行列のブロック対角化を利用した線形座屈荷重を目的関数とする単層トラスドームの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.578, pp51-58, 2004
- 7) 日本建築学会編 : 単層ラチスドームの安定解析—その現状と問題点—, 1989

学習付対話型 GA を用いた形態創生に関する研究 ～折板と自由曲線の融合～

佐々木啓介¹⁾、堤和敏²⁾

- 1) 芝浦工業大学、大学院生、m505033@sic.shibaura-it.ac.jp
- 2) 芝浦工業大学、教授、工博、tutumi@sic.shibaura-it.ac.jp

1 はじめに

1960年以降、システム最適化手法を力学の分野に適用した最適設計および形状最適化の問題が多く研究されてきた¹⁾²⁾。構造形態の最適化では、均質化法³⁾、ESO法⁴⁾⁵⁾、セルオートマトン⁶⁾⁷⁾、遺伝的アルゴリズム（以下、GA）⁸⁾を使った研究が行われ、力学的に優れた形態を得られることが報告されている。しかし、これら最適化の研究では形態のデザインには着目していない。形態のデザイン性については、本間⁹⁾が対話型進化計算による形態発想支援システムを提案しているが、著者らは、人間の感性を考慮し、感性和力学的合理性をともに満足する形態創生システムの研究を進めている。

既報¹⁰⁾¹¹⁾では、対称形屋根と非対称形屋根をそれぞれ単独のシステムとして扱い、それぞれのシステムにおいて、力学的合理性・デザイン性ともに優れた形態が遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を用いることにより得られることを報告しているが、その遺伝子座の構成は全く別物であり、折板と自由曲線を組み合わせたような多様な屋根形態を生成することはできなかった。

本研究では、折板と自由曲線を同時に表現する新たなシステムを構築し、形態の多様性を向上させている。また、既報では、社会的感性（利用者・地域住民などの感性）を重視し、事前に感性評価アンケートシステムを行うことにより、社会的感性を抽出し、その結果を用いて感性評価を行っていた。本研究では、社会性を考慮したシステムの構築ではなく、設計者側に立った設計支援システムの構築を行っている。形態の生成には、評価者の感性が直接反映される対話型GAを用いた。しかし、対話型GAでは、全世代において評価者による評価を行わなければならない、評価者の拘束時間が長い等、身体的・精神的負担が課題とされる。そこで本研究では、評価者は10世代ごとに評価をし、それ以外の世代ではニューラルネットワーク（以下、NN）により評価値を推定するという学習付対話型GAを用いている。NNによる学習を付加することにより、対話型GAにおける評価者の身体的・精神的負担を軽減し、より精度良く評価者の感性を抽出できると考えている。

今回は、評価者にとって魅力ある形態を生成することを目的としているため、評価項目は「形態の面白さ」とした。屋根形状の表現方法には、既報同様にNURBS曲線を用いている。

2 システムフロー

本研究におけるシステムフローを図1に示す。まず、任意数（20個体）の初期個体を生成させ、5段階尺度で評価者が評価を行う。評価項目は「形態の面白さ」とした。評価後、NNで学習を行い、重みを算出する。その後、適応度算出を行い、適応度の一番高い個体をエリート保存し、交叉後に再度NNによる適応度の算出を行い、適応度の一番低い個体とエリート保存した個体を入れ替える。エリート戻し後の個体群を次世代とする。その後、10世代目になるまでNNによる適応度評価を行い、エリート保存～エリート戻しを繰り返し、10世代目になったら評価者が対話的に評価を行い、NNによる再学習を行い、重みを更新する。以上の操作を設定した世代まで繰り返す。

3 NURBS 曲線

本研究では、NURBS曲線で形態を表現している。NURBS曲線は、制御点、階数、重みを指定することにより、自由度の高い滑らかな曲線や折板のような直線も描くことができる。例として、表1に示す制御点座標と階

数で描いた NURBS 曲線を図 2 に示す。本研究では、直線を表示する場合は、階数を 2 として形状を生成している。

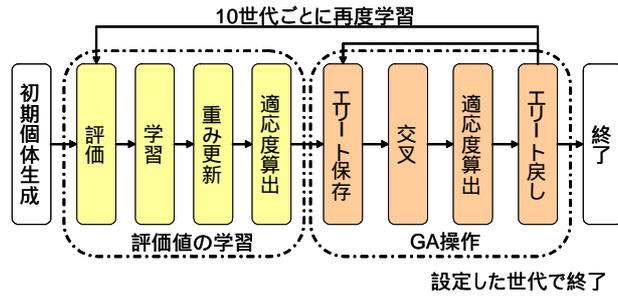


図 1 全体システムフロー

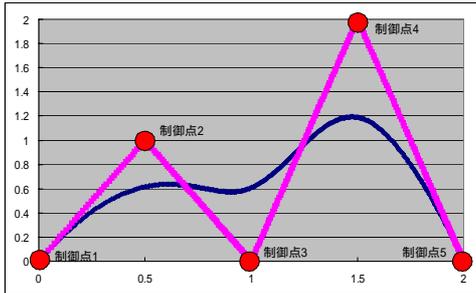


図 2 NURBS 曲線

表 1 制御点座標と階数

制御点	x座標	y座標	階数
1	0	0	直線 2
2	0.5	1	
3	1	0	曲線 4
4	1.5	2	
5	2	0	

3 形態の定義

3.1 形状の生成方法

本研究では、折板屋根も扱えるように 3~13 の奇数個の制御点を用いる。制御点の x、y 座標は同間隔とし、制御点の z 座標は、偶数番号と奇数番号の制御点に分類し、それぞれ図 3 に示す z 座標を決定させるための 4 種類の関数から 1 つを選択し決定させる。例えば、階数が 2、制御点数が 13、偶数制御点関数が②、奇数制御点関数を高さが 0 の④とした場合、図 4 のような 6 折板の形状が生成される。

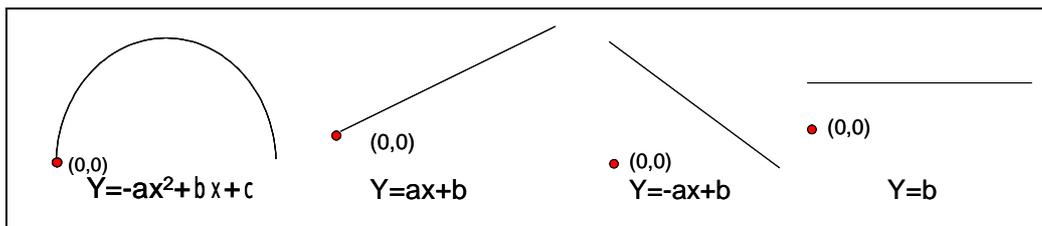


図 3 制御点座標決定関数

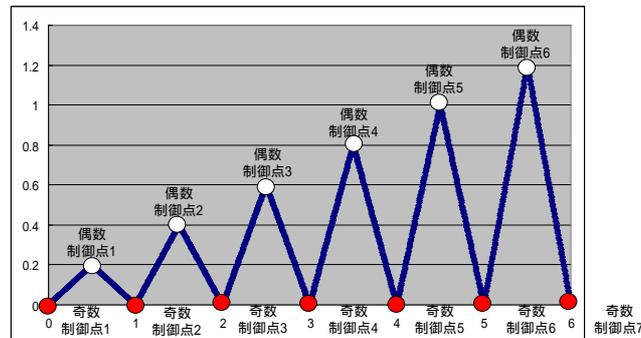


図 4 6 折板形状

3.2 遺伝子座

本研究では、形状を表 2 に示す遺伝子座で与えている。NURBS 曲線を用いることにより、x-z 方向、y-z 方向共に同数の遺伝子座で定義することができる。

遺伝子座は、「制御点の数」・「制御点関数」・「制御点関数の高さ」・「形状選択」・「開口サイズ」で構成されている。「制御点の数」では、3~13 までの奇数個の制御点の数を選択する。「制御点関数」では、偶数制御点・奇数制御点に分け、図 3 の 4 種類の関数の中から、各制御点の z 座標を決定するための関数を選択する。「制御点関数の高さ」では、偶数制御点・奇数制御点に分け、「制御点関数」で選択した関数の高さを選択する。高さは、最大高さに対する比 (0、1/3、2/3、1) で与える。「形状選択」では、曲線形状にするのか直線形状にするのかを選択する。「開口サイズ」では、1 方向で 2 箇所ある開口のサイズを変化させるか否かを選択する。変化の割合は、通常の開口サイズの 1/2 とした。以上の設定により、全 28bit の遺伝子座で形態を定義することができる。

表 2 遺伝子座

	制御点の数			制御点関数			
				偶数		奇数	
x-z方向	1	2	3	4	5	6	7
y-z方向	15	16	17	18	19	20	21

	制御点関数の高さ				形状選択	開口サイズ	
	偶数		奇数				
x-z方向	8	9	10	11	12	13	14
y-z方向	22	23	24	25	26	27	28

4 NN による学習

本研究では、評価者の負担を減らすため、10 世代ごとに評価者による評価を行い、その間の世代では、NN で学習した結果を用いて評価値を推定している。

評価は、GA により生成された任意数 (20 個体) の個体を VRML で確認し、5 段階で評価を行う。評価項目は、「形態の面白さ」とし、魅力ある形態が生成されるようにした。入力した評価値は 0~1 の値 (1→0.1、2→0.3、3→0.5、4→0.7、5→0.9) に変換して学習を行った。評価用の VRML 画面の例を図 5 に示す。

NN は、入力ユニット数を 14、中間層を 2 層 (ユニット数 : 50、25)、出力ユニット数を 1 とし、10000 回を目安に収束するまで行った。入力ユニットは、表 2 に示す遺伝子座を用いて、「制御点の数」・「制御点関数 (偶数と奇数)」・「制御点関数の高さ (偶数と奇数)」・「形状選択」・「開口サイズ」をそれぞれ 1 ユニットとし、x-z 方向、y-z 方向それぞれ 7 ユニットずつの合計 14 ユニットとした。入力ユニットのパラメータを示した表を表 3 に示す。

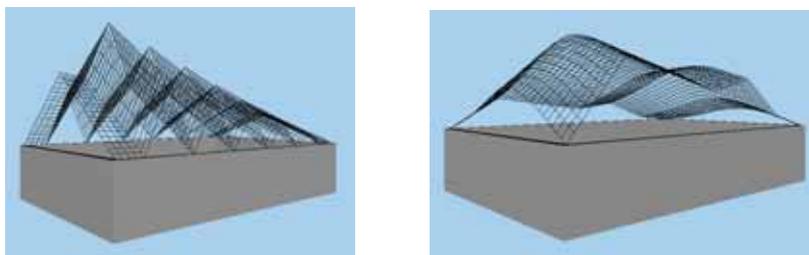


図 5 評価用 VRML 画面

表 3 入力ユニットパラメータ

制御点数	制御点関数	高さ	形状	開口	入力値
3	$y=ax^2+bx+c$	0	直線	大小	-1
5	$y=ax$	最大高さ*1/3	/	/	-0.5
7	/	/	/	小大	0
9	$y=-ax+b$	最大高さ*2/3	/	/	0.5
13	$y=a$	最大高さ	曲線	大大	1

5 システム実行

最終世代を 50 世代、個体数を 20 個体、ルーレット選択、多点交叉、交叉率 100%、突然変異率を 5%と設定し、「形態の面白さ」を評価値としてシステムを実行した。乱数により発生させた初期個体の一部と評価値を図 6 と表 4 に、50 世代目の個体の一部と評価値を図 7 と表 5 に示す。

表 4 と表 5 の色塗られたセルは、5 段階評価の 5 にあたる評価値 0.8 以上を示している（次項参照）。1 世代目では 1 個体しか生成されていないのだが、50 世代目では 14 個体生成されている。評価値平均も、1 世代目と比べて倍近い値となっており、世代数が増えるごとに評価者が魅力的と感じる形態が多く生成されてきていることが分かる。

生成された形態を見てみると、初期個体では個体番号 1 や個体番号 16 のようなある程度シンプルで高さのある形態の評価値が高い。また、個体番号 16 のような、長辺方向の中央部分に小さな開口がある、システムの拡張により生成することができた形態の評価値も高い。逆に、個体番号 8 のように高さの低い形態や、個体番号 11 のように複雑な形態の評価値は低くなっている。50 世代目では、評価値が高いとされる、ある程度シンプルで高さがあり、対称形と非対称形を組み合わせた形態など、システムの拡張により生成することができた形態が多く生成された。個体番号 9 や個体番号 15 のような短辺方向のシンプルなおきに長辺方向の 2 次曲線形状が複数ある開口を組み合わせた形態や、個体番号 12 のような短辺方向が折板で長辺方向が自由曲線になっている形態などが生成された。また、個体番号 1 のような、一方が閉じていてもう一方が分割数の多い 2 次曲線の開口を持つような形態も生成されている。他の形態を見てみても、様々な開口の組合せの形態が生成され、形態として面白い形態が多く生成されており、著者の主観がよく反映されている。

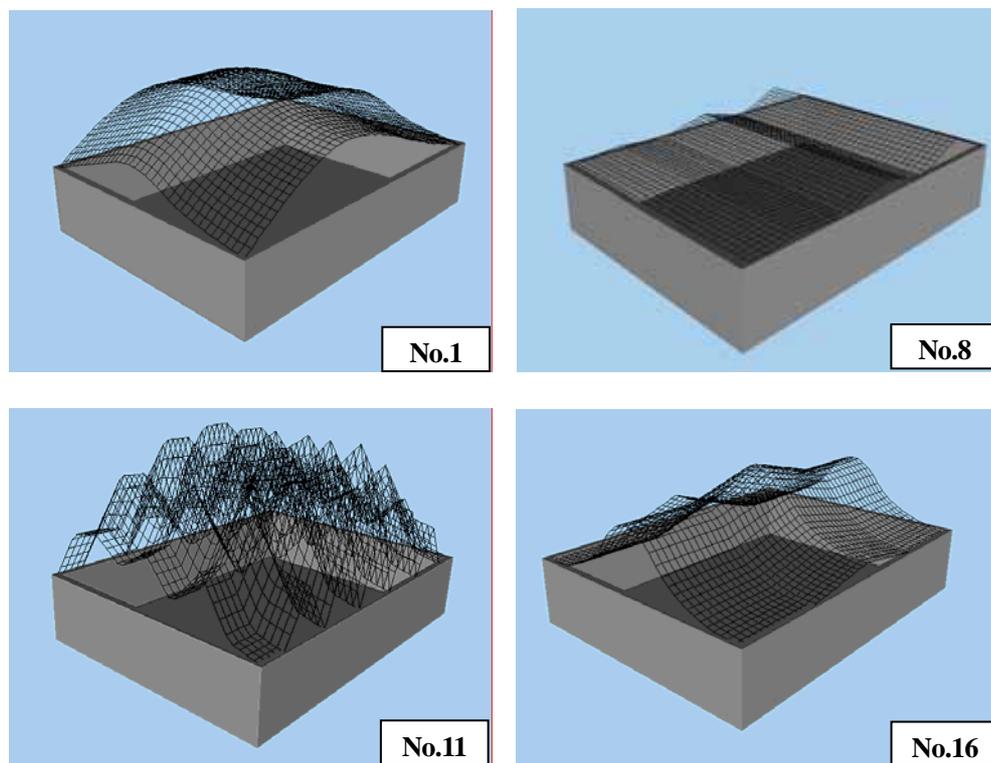


表 4 1 世代目評価値

1 世代目	
個体番号	評価値
1	0.718
2	0.499
3	0.300
4	0.308
5	0.501
6	0.697
7	0.499
8	0.298
9	0.503
10	0.301
11	0.113
12	0.502
13	0.698
14	0.697
15	0.500
16	0.866
17	0.691
18	0.508
19	0.304
20	0.501
最大値	0.866
最小値	0.113
平均値	0.499

図 6 初期個体

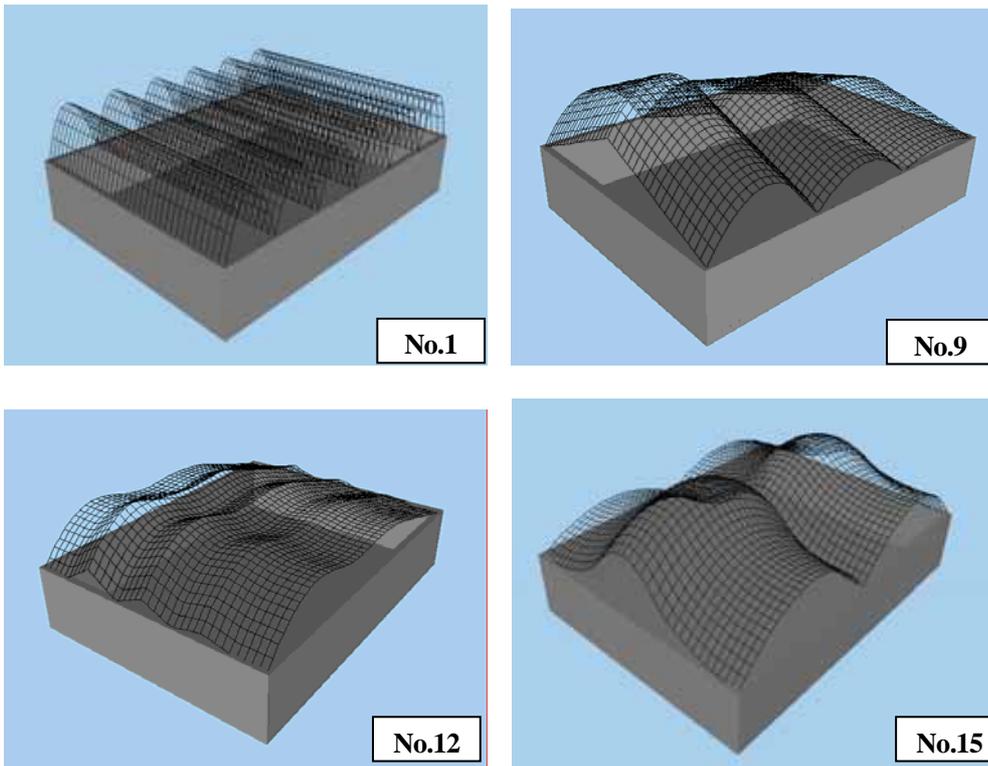


図7 50世代目の個体

表5 50世代目評価値

50世代目	
個体番号	評価値
1	0.964
2	0.785
3	0.653
4	0.888
5	0.778
6	0.821
7	0.871
8	0.633
9	0.934
10	0.956
11	0.793
12	0.830
13	0.947
14	0.953
15	0.878
16	0.580
17	0.843
18	0.937
19	0.879
20	0.823
最大値	0.964
最小値	0.580
平均値	0.831

6 NNの精度検証

本研究では、10世代ごとに学習を行いNNの重みを更新し、評価値の推定を行っている。システム実行の際に、10世代ごとの実際値（評価者の評価値）と推定値（NNにより推定した評価値）を比較し、正答率と準正答率を算出した。正答率とは実際値と推定値が一致した割合のことを示し、準正答率とは実際値と推定値の誤差が+1の範囲で一致している割合のことである。推定値は、表4や表5のように0~1の値で算出されるので、0~0.2を1、0.2~0.4を2、0.4~0.6を3、0.6~0.8を4、0.8~1を5として評価値を変換した。表6に10世代ごとの実際値・推定値・平均値・正答率・準正答率を示す。

表6 10世代ごとの評価値

10世代目			20世代目			30世代目			40世代目			50世代目		
個体番号	実際値	推定値												
1	3	3	1	4	5	1	4	5	1	5	4	1	3	5
2	2	3	2	4	5	2	4	5	2	5	5	2	3	4
3	3	3	3	5	5	3	4	5	3	4	5	3	3	4
4	5	4	4	4	5	4	4	4	4	5	5	4	3	5
5	1	3	5	5	4	5	4	5	5	4	4	5	5	4
6	4	5	6	5	5	6	4	5	6	3	5	6	4	5
7	2	5	7	5	5	7	5	5	7	4	4	7	5	5
8	1	4	8	4	5	8	4	5	8	4	4	8	4	4
9	4	4	9	5	5	9	5	5	9	4	4	9	5	5
10	1	4	10	5	5	10	2	5	10	4	4	10	3	5
11	5	5	11	4	5	11	5	5	11	4	5	11	2	4
12	5	4	12	3	5	12	2	5	12	5	4	12	4	5
13	2	3	13	3	5	13	4	5	13	3	5	13	3	5
14	1	3	14	3	5	14	3	5	14	4	5	14	4	5
15	4	3	15	3	5	15	4	5	15	3	4	15	5	5
16	4	4	16	2	5	16	4	5	16	4	5	16	4	3
17	4	4	17	5	5	17	4	5	17	3	5	17	5	5
18	4	4	18	4	5	18	3	4	18	3	5	18	3	5
19	4	5	19	4	5	19	4	5	19	4	5	19	4	5
20	3	4	20	4	5	20	5	5	20	4	4	20	5	5
平均値	3.10	3.85	平均値	4.05	4.95	平均値	3.90	4.90	平均値	3.95	4.55	平均値	3.85	4.65
正答率	35%		正答率	30%		正答率	25%		正答率	40%		正答率	30%	
準正答率	75%		準正答率	75%		準正答率	85%		準正答率	80%		準正答率	70%	

表 6 を見てみると、正答率は最大で 40% であり、決して高いとは言えない結果であったが、準正答率では最大で 85%、平均的に高い割合となっている。一方、実際値の平均値は世代数が増えると高くなっており、システム実行時に生成された 50 世代目の形態を見てみると、著者の主観であるが「面白い」と感じる形態の特徴を捉えた形態が多く生成されており、評価者（著者）が意図している形態が生成されていると思われる。

7 結論

本研究では、折板と自由曲線を同時に表現する新たなシステムを構築し、学習付対話型 GA を用いることで評価者の感性を反映した「面白い」形態を生成することを目的としている。

本研究で得られた結論を以下に示す。

- 1) NURBS 曲線を生成する際の制御点を奇数個にし、偶数と奇数の制御点に分類し、階数と制御点座標を定義することにより、折板と自由曲線の両方の形状を生成することができ、多様な形態を生成することができるようになった。
- 2) 学習付対話型 GA を用いることにより、評価する世代を少なくし、評価者の身体的・精神的負担を減らすことができた。

今後の課題を以下に示す。

- 1) 世代数や個体数を増やすことにより、NN の精度を向上させ、より高い精度で評価値を推定することができる実用性の高いシステムを構築する。
- 2) 今回は著者がシステムを実行し、生成された形態の分析を行ったが、今後は、評価者の違いによる生成された形態の分析を行う。
- 3) 適応度に力学的評価も考慮し、力学的合理性と形態の「面白さ」をともに考慮した形態創生システムを構築する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築システムの最適化、建築システム最適化特別研究委員会報告書、2003 年
- 2) 日本建築学会：構造形態創生の理論と応用、2001 年
- 3) M. P. Bendsoe and N. Kikuchi, Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 71, pp. 197-224, 1988
- 4) Xie, Y. M., G. P. Steven, Evolutionary Structural Optimization for Dynamic Problems, Computers and Structures, Vol. 58, No. 6, pp. 1067-1073, 1996
- 5) 大森博司、崔昌禹：等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生、日本建築学会構造系論文集 第 539 号、pp. 87-94、2001 年 1 月
- 6) 奥田敏：自己組織化法に基づく構造の位相最適化設計シミュレーション、日本機会学会第 5 回最適化シンポジウム講演論文集、pp. 117-122、2002 年 10 月
- 7) 三井和男：セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化、日本建築学会構造系論文集 第 555 号、pp. 101-105、2002 年 5 月
- 8) 河村拓昌、大森博司：遺伝的アルゴリズムによる立体トラス構造物の形態創生、日本建築学会構造系論文集 第 538 号、pp. 115-121、2000 年 12 月
- 9) 本間俊雄：空間構造の形態発想支援に関するシステム開発の試み、計算工学講演会論文集 7(2)、pp. 883-886、2002 年 5 月
- 10) 堤和敏、太田優子、佐々木啓介：感性を考慮した建物屋根形態創生に関する研究、構造工学論文集 Vol.51B, 2005 年 3 月, pp.1-6.
- 11) 佐々木啓介、堤和敏：感性を考慮した建物屋根形態創生に関する研究 その 2 非対称屋根形態の創生、構造工学論文集 Vol.52B、pp.33-39、2006 年 3 月

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デザインに関する研究

小林 春之¹⁾, 内藤 雅子²⁾ 大森 博司³⁾

1)名古屋大学大学院環境学研究科, 博士前期課程, kobayashi@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

2)名古屋大学大学院環境学研究科, 博士前期課程, naito@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

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

1 序

近年, 地球環境問題の深刻化に伴い, 建築分野においても環境負荷削減の必要性が広く認知されつつある。そこで, 建築構造物をその設計から廃棄に至るまでのライフサイクル (Life Cycle, 以下 LC) において環境負荷が少なくなるように設計することが求められる。また, 建築構造物には多額の資金が関係しているため, その設計に際しては経済性をも考慮しなければならない。

しかしながら, 環境配慮性と経済配慮性とは一般に相容れず, 要求を同時に満足した設計解を求めることは難しい。そこで, 本論文では多目的遺伝的アルゴリズム (Multi-Objective Genetic Algorithm, 以下 MOGA) を用いたライフサイクルデザイン (Life Cycle Design, 以下 LCD) 手法を提案する。建築構造物の設計段階で MOGA を用いて LCD を行うなら, 環境配慮性と経済配慮性とを同時に考慮した複数の設計案を提示することができる。これは設計者や施主等の意思決定者にとって有用であると考えられる。

また, 本論文では現在日本において建設される建築物のおよそ 60% を占めている [1] 住宅の 2 つの主要なタイプである独立住宅と集合住宅の LCD を行ない, MOGA による LCD 手法の有用性を検討する。

2 ライフサイクル評価

2.1 イニシャル評価

イニシャルにおける部材 i のコスト評価 $C_{0,i}$ は, 素材 j , 重量 W_{ij} および購入単価 c_j を用いて次式で算定される [2]。

$$C_{0,i} = \sum_j (W_{ij} \cdot c_j) \quad (1)$$

ここに, c_j は素材 j の製造および流通に関する単価を表している。素材 j の取捨選択を空間的パラメータとして設定することにより, 選択する構成要素の評価項目に与える影響を評価することが可能となる。

2.2 ランニング評価

時刻 t における部材 i の k 回目の修繕に関するコスト C_{ik} は, 部材別の修繕率 r_{ik}^* を用いて次式で算定される。

$$C_{ik} = \frac{C_{0,i}}{(1+\nu)^t} \cdot \gamma^q \cdot r_{ik}^* \quad (2)$$

ここに ν は公定歩合, γ^q は修繕率とコストとの関係を示すパラメータである。

部材 i の k 回目の修繕, すなわち時刻 $t = k \cdot t_{p,i}$ における修繕率 r_{ik}^* は初期投資を $k = 0$ 回目の修繕, すなわち $r_{i0}^* = 1$ とすれば, 劣化する部材 i の修繕率 $r_i(t)$ を用いて次式のように表現できる。

$$r_{ik}^* = 1 - \sum_{n=0}^{k-1} r_{in}^* \{1 - r_i(t)|_{t=(k-n) \cdot t_{p,i}}\} \quad (3)$$

一方, 構法順序による階層化を考慮に入れる必要がある。構法順序による階層化とは, 建築構造物を構成する部位の序列関係を示す概念であり, 建築構造物を造る順序であり, 修繕のし難さの順序でもある。式 (2) に示したランニングコストは, 構法順序による階層化の観点から見て支持側の部材の修繕の影響を考慮していない。しかし, 被支持側の部材は支持側の部材の修繕によってシナリオに制約を受ける。LC を適切に表現するためには, この現象を把握することが望まれる。以降, 支持側の部材を構法的に上位, 被支持側の部材を構法的に下位と呼ぶこととする。図 1 に構法的序列による階層化によるシナリオの制約の様子を示す。

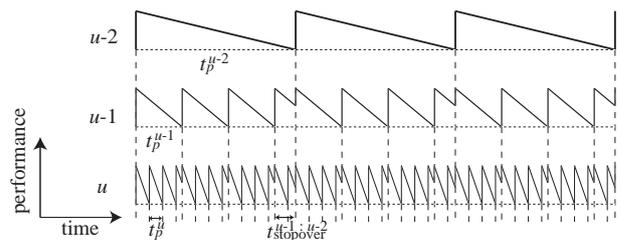


図1 構法順序による階層化を考慮したシナリオ

建築構造物の寿命 $t_p^1 = t_l$ 中に発生する第 u 位の部材 i の構法的序列を考慮したランニングコスト C_i は次式で算定できる。右辺最終項はイニシャルとの重複を避けるため減じている。

$$C_i = \prod_{x=1}^{u-2} n^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=1}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:1}} C_{ik} - C_{0,i} \quad (4)$$

ここで、修繕回数 $n_i^{a:b}$, $n_{\text{stopover},i}^{a:b}$ ($a > b$) は Ceiling 関数 $\lceil \cdot \rceil$ を用いた次式で表現できる。

$$n^{a:b} = \left\lceil \frac{t_p^b}{t_p^a} \right\rceil - 1 \quad (5)$$

$$n_{\text{stopover},i}^{a:b} = \left\lceil \frac{1}{t_p^u} \left\{ t_p^b - \left(\left\lceil \frac{t_p^b}{t_p^a} \right\rceil - 1 \right) \cdot t_p^a \right\} \right\rceil - 1 \quad (6)$$

よって、建築構造物全体の時間軸において累積したランニングコスト C_r は、上式を用いて次式で算定される。

$$C_r = \sum_i C_i \quad (7)$$

2.3 ライフサイクル評価

建築構造物全体のイニシャルコスト C_0 に、時間軸において累積したランニングコスト C_i を加算したものを LC コスト (Life Cycle Cost, 以下 LCC) C_{lc} とする。

$$C_{lc} = \sum_i (C_{0,i} + C_i) \quad (8)$$

寿命の異なる複数の設計案を比較するために、評価対象期間 t_{eval} を設定し、評価対象期間中に LC が繰り返されるとして、拡張した LCC を用いて評価する。評価対象期間を、 $t_{eval} = t_p^0$ として式 (8) は次式のように拡張される。

$$C_{eval} = \sum_i \left\{ \prod_{x=0}^{u-2} n^{x+1:x} \sum_{k=0}^{n_i^{u:u-1}} C_{ik} + \sum_{y=0}^{u-3} \prod_{z=y}^{u-3} n^{z+1:z} \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:z+1}} C_{ik} + \sum_{k=0}^{n_{\text{stopover},i}^{u-1:0}} C_{ik} \right\} \quad (9)$$

上式は、CO₂ 原単位を用いれば LCCO₂ 評価も可能となる。

3 適合度関数

本研究では MOGA として SPEA2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2) を採用する[3]。本研究で用いる適合度関数について述べる。

3.1 遺伝的アルゴリズム

環境配慮性あるいは経済性を評価基準とする単一目的の最小化問題を GA で解くためには、目的関数を適合度関数として表現する必要がある。本研究では MOGA として適合度の最小化を行う SPEA2 を用いるため、通常とは異なり GA のための適合度も小さいほど優良であると新たに定義する。

$$\begin{aligned} &\text{minimize} \quad \text{fitness}_i \\ &\text{subject to} \quad g_j \leq 0 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{fitness}_i \equiv f_i(\mathbf{x}) \prod_j \gamma_j \quad (11)$$

ここに fitness_i は個体の適合度、 f_i は評価関数、 \mathbf{x} は設計変数、 γ_j は制約条件 j を満たさなかった場合のペナルティ項である。

3.2 多目的遺伝的アルゴリズム

全ての個体 i に対して、その個体の強度として、支配している個体の数 $s(i)$ を求める。

$$s(i) = |\{j | j \in P_t + \overline{P}_t \wedge i \succ j\}| \quad (12)$$

ここで、 P_t は t 世代目の探索母集団を、 \overline{P}_t は t 世代目のアーカイブ母集団を、 $i \succ j$ は j が i に支配されていることを示している。

次に、個体 i を支配している個体の持つ強度 s を全て足し合わせた値と、 k 最近傍個体との距離 σ_i^k の逆数を加算して個体 i の適合度 $f(i)$ とする。

$$f(i) = \sum_{j \in P_t + \overline{P}_t, j \succ i} s(j) + \frac{1}{\sigma_i^k + 2} \quad (13)$$

なお探索個体数 N 、それまでの世代までに保存されている非劣解 (他の解に比べ劣っていない解) のアーカイブ個体数 \overline{N} を用いて k は Floor 関数 $\lfloor \cdot \rfloor$ を用いた次式とする。

$$k = \lfloor \sqrt{N + \overline{N}} \rfloor \quad (14)$$

なお、制約条件を満たさない場合、 $f(\mathbf{x})$ 自体にペナルティ項を掛け合わせたものを新たな目的関数 $h(\mathbf{x})$ として、以下のように多目的最適化問題を定式化する。

$$\text{minimize} \quad h(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x}) \prod_j \gamma_j \quad (15)$$

4 解析対象

本研究では独立住宅と集合住宅について解析を行う。標準的な規模の独立住宅 [4] を独立住宅の評価対象モデルとして設定し、その規模を図 2 に示す。また、標準的な集合住宅 [5] を集合住宅の評価対象モデルとして設定し、図 3 に示す。建築部位の構成要素および LC における耐用年数などのシナリオに関する設計変数が決まれば、設計がなされるものと想定する。

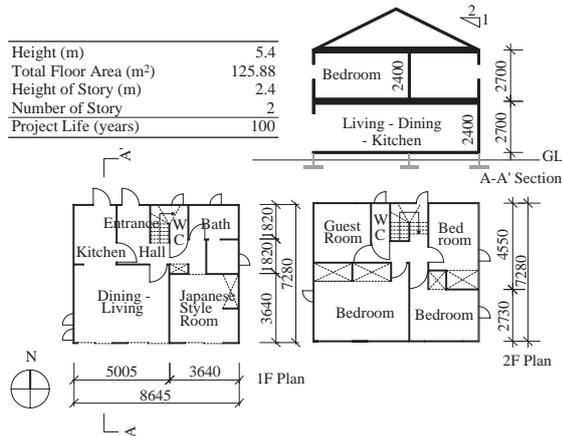


図2 問題対象：独立住宅 [4]

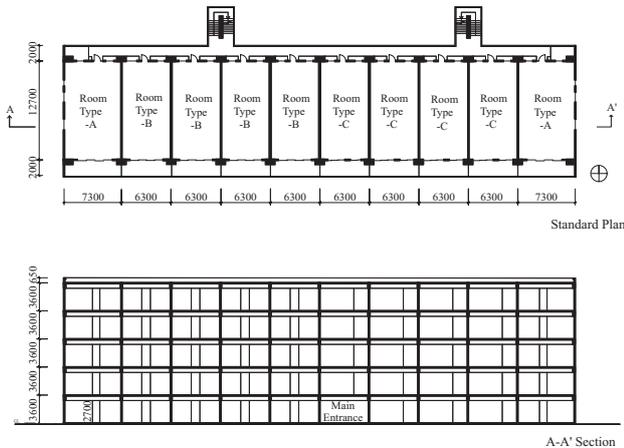


図3 問題対象：集合住宅 [5]

GA を用いて単一目的最小化を行う場合の GA のパラメータを表 1 に示す。SPEA2 を用いて多目的最適化を行う際に用いる SPEA2 のパラメータを表 2 に示す。以降、最適化を行う場合は表 1 および表 2 のパラメータを用いる。

表 1 GA パラメータ

Population	100
Elite	2
Generation	1000
Prob. of Crossover	0.80
Prob. of Mutation	0.01

表 2 SPEA2 パラメータ

Population	100
Archive	25
Generation	1000
Prob. of Crossover	0.80
Prob. of Mutation	0.01

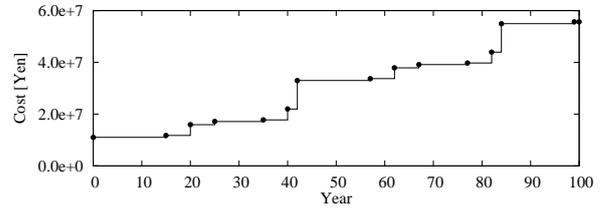
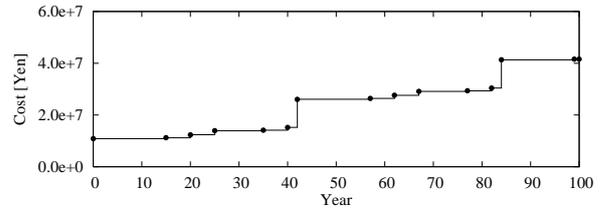


図4 構成要素による影響

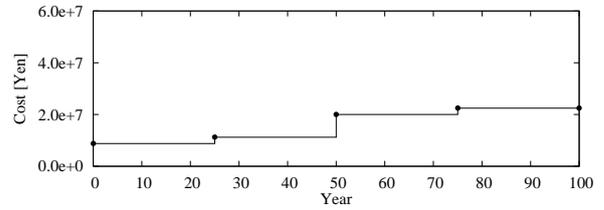
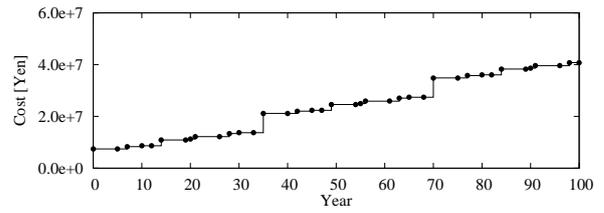


図5 シナリオによる影響

5 設計変数による影響

本研究で設計変数とする、構成要素とシナリオを変化させることによる影響について述べる。本研究では、構成要素とは建築構造物を構成している部材のうち設備機器を除く部材を表現している。また、シナリオとは各部材に対しての修繕時期および耐用年数についての時期を表している。

5.1 構成要素

解析対象の住宅において構成要素を変化させた場合の影響について述べる。同一のシナリオで、建築構造物を構成する部材を無作為に変化させた場合の LCC 累積を示したものが図 4 である。ここに、縦軸はコスト [yen]、横軸は経年を表現している。

上と下の図を比較することにより、使用部材の変化による影響を見ることができる。ほぼ同等のイニシャルコストであるがライフサイクルコストでみると大きく異なっている。これは、各部材特有の原単位の影響であり、修繕により発生するコストが異なるためである。したがって、最適化によって目的に適合する構成要素が選択されると考えられる。

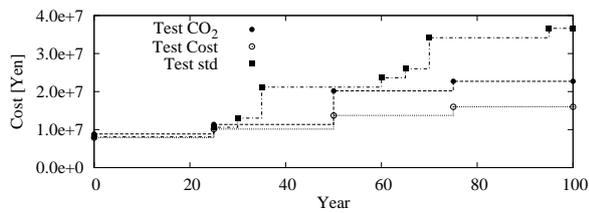


図6 コストの経年累積 (独立住宅)

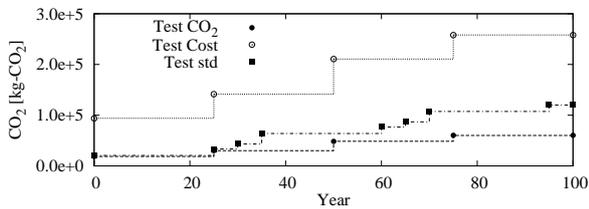


図7 CO₂ 排出量の経年累積 (独立住宅)

5.2 シナリオ

解析対象住宅においてシナリオを変化させた場合の影響について述べる。同一の構成要素の場合に修繕時期および耐用年数を変化させた場合の LCC 累積を図 5 に示す。

同一の構成要素で構成されているために、インシャルコストは同一であるが、ライフサイクルコストではシナリオによって大きな変化が表れている。シナリオについて整合性を図ることで大きな影響が生じることが分かる。これより、ライフサイクルデザインにおけるシナリオ操作の重要性が分かる。

6 標準独立住宅の解析

6.1 遺伝的アルゴリズムによる最適化

GA を用いて図 2 の独立住宅について LCC および LCCO₂ の単一目的最小化を行う。LCC 最小化および LCCO₂ 最小化について Test Cost および Test CO₂ と呼ぶ。また、比較対象として標準的な独立住宅の構成要素において得られた結果に対して LC 評価を行い、これを Test std と呼ぶ。図 6 および図 7 には、各問題において得られた解の評価値を経年で累積したものを示す。

図 6 および図 7 より Test std, Test Cost および Test CO₂ を比較する。LC 最適化を行ったことにより、修繕回数が減少していることが分かる。これより、LC 最適化を行うことでシナリオの整合性が図られていることが分かる。構成要素の取捨選択は、Test Cost で RC 造、および Test CO₂ で木造となる解が得られた。この構成要素の選択で異なった部材が選択されるのは、

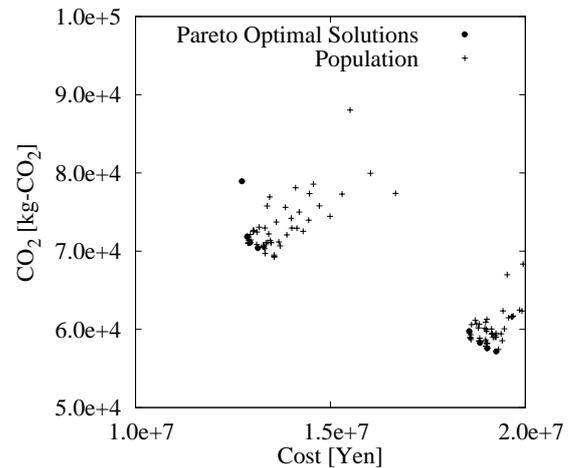


図8 得られた Pareto 最適解集合 (独立住宅)

各構成要素において特有な原単位において、LCC および LCCO₂ に対して優位となる部材が異なることによると考えられる。これらより、シナリオおよび構成要素の選択の重要性が伺える。

Test Cost によって得られた解は LCC は最小であるが、LCCO₂ で最大値を取っている。逆に、Test CO₂ によって得られた解は LCCO₂ は最小であるが、LCC では最小値を取ってはいない。つまり、この 2 つの評価項目にはトレードオフの関係があると考えられる。

6.2 多目的遺伝的アルゴリズムによる多目的最適化

SPEA2 を用いて図 2 の独立住宅について LCC および LCCO₂ の多目的最適化を行う。これにより、得られた解の目的関数空間における存在位置を図 8 に示す。ここで、縦軸は CO₂[kg-CO₂] を、横軸はコスト [yen] である。ここに、Pareto Optimal Solutions は最適化によって得られた Pareto 最適解集合を、Population は 1000 世代目で得られた全個体を示している。

単一目的最適化問題と比較すると次のようなことが分かる。単一目的最小化では、トレードオフ関係の評価値の最小解は進化過程で保存されない。それに対し SPEA2 では、進化過程で得られた単一目的最適解を常に保存することが可能となる。

Pareto 最適解集合が多数得られていることより、ここでの目的関数である、コストと CO₂ の間にはトレードオフの関係が存在していることが確認できる。なぜなら、トレードオフの関係が存在しない場合には多目的最適化で完全最適解の唯一の解が求められるためである。また、得られた Pareto 最適解集合は、分散形を示しており、このような多様性を持つ Pareto 最適解集合は、意思決定者に提示するために有用である。

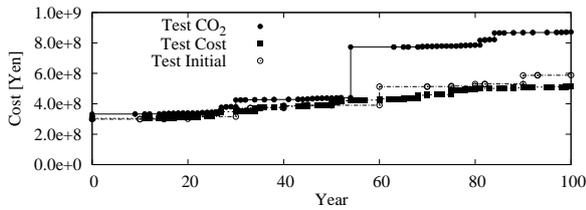


図9 コストの経年累積 (集合住宅)

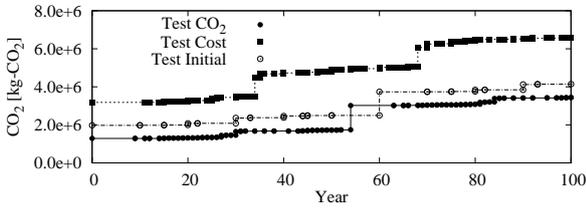


図10 CO₂ 排出量の経年累積 (集合住宅)

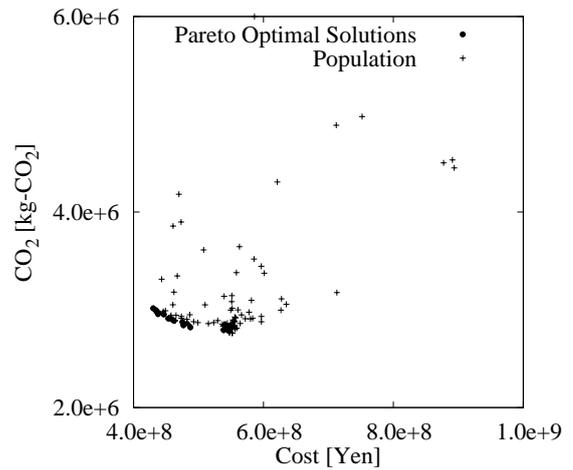


図11 得られた Pareto 解集合 (集合住宅)

7 標準集合住宅の解析

7.1 遺伝的アルゴリズムによる最適化

GA を用いて図 3 の集合住宅について LCC および LCCO₂ の単一目的最小化を行う。以後 LCC 最小化および LCCO₂ 最小化について Test Cost および Test CO₂ と呼ぶ。また、比較対象として標準的な集合住宅の構成要素において得られた結果に対して LC 評価を行い、これを Test std と呼ぶ。

図 9 および図 10 に、各解析において得られた解の評価値を経年で累積したものを示す。

図 9 と図 10 は独立住宅と同様の関係が存在しており、LCC と LCCO₂ の間には集合住宅においてもトレードオフの関係が存在することが確認できる。

最適化を行ったものでは修繕回数は多くなっている。しかし、1 回の修繕での負荷が軽減されているために多くの修繕回数にも関わらず LCC および LCCO₂ は減少している。これより、構成要素の選択が LC 評価値軽減において大きな影響を及ぼすことが分かる。

7.2 多目的遺伝的アルゴリズムによる最適化

SPEA2 を用いて図 3 の独立住宅について LCC および LCCO₂ の多目的最適化を行う。この解析結果の目的関数空間における存在位置を図 11 に示す。ここに、Pareto Optimal Solutions は得られた Pareto 最適解集合を、Population は 1000 世代目における個体の存在位置を示している。

図 11 について、独立住宅の場合と同様な傾向が見られる。したがって、集合住宅に対しても独立住宅と同様に Pareto 解を得ることが可能であることを確認できた。

8 独立住宅と集合住宅の比較

第 6 節および第 7 節における評価結果の 1m² 当たりの各評価値について比較を行う。

8.1 遺伝的アルゴリズムによる最適化

GA を用いて単一目的最小化を行った場合について比較を行う。独立住宅と集合住宅の 1m² 当たりの評価値の経年累積を図 12 および 図 13 に示す。

ここで、Test Cost (House) は LCC 最小化を、Test CO₂(House) は LCCO₂ 最小化を独立住宅に対して行った結果を、Test Cost (Collect) は LCC 最小化を、Test CO₂(Collect) は LCCO₂ 最小化を集合住宅に対して行った結果を示している。

Test Cost (House) および Test Cost (Collect) では、共に RC 躯体という結果が得られた。Test Cost (House) と Test Cost (Collect) において、LCC と LCCO₂ はいずれの時点においても集合住宅の方が少なくなっており、年を経るごとにその差が増大している。すなわち、集合住宅のほうが独立住宅よりも 1 m² あたりの重量が少いため、LCC の面においても LCCO₂ 排出量の面においても有利であるといえる。しかしながら、ここでは延べ床面積で LC 評価値を除しており、共用部を除いた居住可能な面積で除して比較するなら、相対的な関係は変化する。

Test Cost (Collect) および Test CO₂ (Collect) においては、Test Cost (House) および Test CO₂ (House) と比較して修繕回数が著しく増大している。しかし、LC 評価値が著しく増大していないのは、各部材の修繕を行っても上位部材の修繕に伴う下部部材の強制的な修繕が生じないためである。これらのことから、構

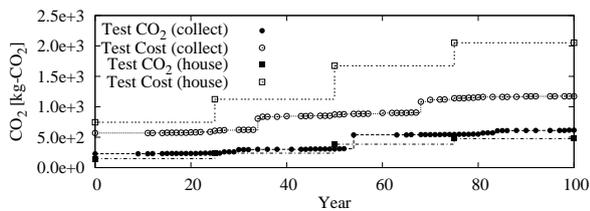


図12 1m² 当たりの LCCO₂ の経年累積

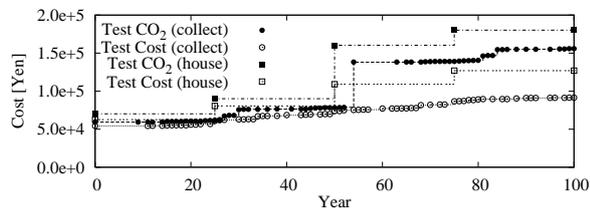


図13 1m² 当たりの LCC の経年累積

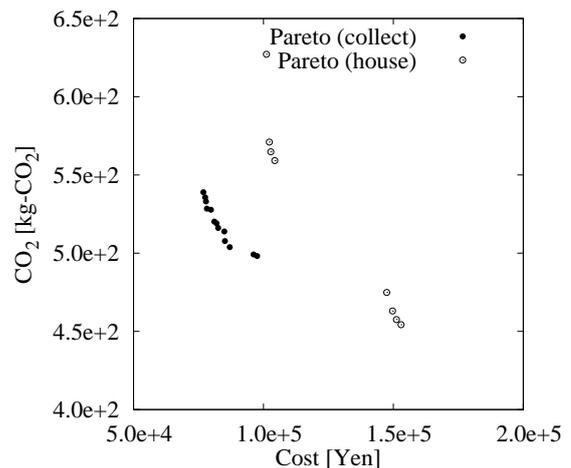


図14 Pareto 最適解集合 (1m² 当たり)

法的序列の上位に存在している部材が建築構造物全体に対して占める割合が大きい部材の長寿命化が LCC や LCCO₂ 排出量に大きく影響を及ぼすといえる。

また、構造材料の強度という点から考えると、LCC および、LCCO₂ において有利な構造材料を推測することができる。比強度と原単位から、それぞれの構造材料 1 円あたりの強度および CO₂ 排出 1kg-CO₂ あたりの強度を知ることができる。コストについて見てみると、1 円あたりの強度が最も強いのはコンクリートであるため、LCC 最小化を図る際に RC 造が選択されたことが想定される。

8.2 多目的遺伝的アルゴリズムによる最適化

SPEA2 を用いて多目的最適化を行った場合について比較する。独立住宅および集合住宅における延べ床面積で除した単位面積当たりの Pareto 最適解の集合の目的関数空間での存在位置を図 14 に示す。ここに、Pareto (house) は独立住宅の、Pareto (collect) は集合住宅の Pareto 最適解集合である。

これを見ると、集合住宅の Pareto 最適解が独立住宅の Pareto 最適解よりもやや優越しているように見える。しかしながら、居住可能面積で比較すると、RC 造躯体の独立住宅と RC 造躯体の集合住宅とは同じような値になる。

多目的最適化によって得られた Pareto 最適解集合の分布形状では、RC 造躯体を採用した集合住宅と独立住宅の分布形状がよく似ており、木造住宅を採用した独立住宅はやや異なった分布形状を見せた。このことから、居住形式、もしくは建築規模による LC 評価の相違よりも、躯体構造種別による LC 評価の相違の方が大きいといえる。

9 結

本研究では構成要素およびシナリオをパラメータとした最適化による建築構造物の LCD 手法を提案した。多目的 GA を用いることにより得られる多様性を持つ Pareto 最適解集合は、意思決定者に提示するために有用であると考えられる。また、独立住宅および集合住宅についての解析より、建築構造物の形式に関わらず、本手法は適用可能であるということが分かった。

参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局情報管理部建設調査統計課, 建築統計年報, 建設物価調査会, 2004
- 2) 日本建築学会, 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, 2003.
- 3) E. Zitzler, M. Laumanns and L. Thiele, SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, *Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks*, 2001
- 4) 弥田俊男, 宗本順三, 吉田哲, 高野俊吾, 独立住宅モデルの建材選択システムに伴う LCC, LCCO₂, 最終廃棄物量低減の多目的問題 - 住宅建材の選択システムへの GA 適用の研究 -, 日本建築学会計画系論文集, No. 524, pp. 77-84, 1999.
- 5) 茂呂隆, 廣瀬朗, 多葉井宏, 建築の資源循環性に関する環境影響評価手法の研究, 日本建築学会環境系論文集, No.580, pp.85-92, 2004.
- 6) 野田賢, 大森博司, 遺伝的アルゴリズムによる建築構造部のライフサイクルデザインに関する研究, 建築学会構造系論文集, No.601, pp.181-188, 2006.

スポーツネットのように極端に弛むネットの载荷実験と解析計算

藤井文夫¹⁾, 藤原 淳²⁾, 瀬川信哉²⁾, 小田憲史³⁾, 大崎 純⁴⁾, 野口裕久⁵⁾

1) 岐阜大学工学部数理デザイン工学科, 教授, *Dr.-Ing.*, *ff@gifu-u.ac.jp*

2) 太陽工業 (株) 空間技術研究所, 博士 (工学)

3) 太陽工業 (株) 開発研究本部, 工博

4) 京都大学大学院工学研究科建築学専攻, 助教授, 工博,

5) 慶応義塾大学理工学部システムデザイン工学科, 教授, 工博

1 はじめに

建築構造で多用される高張力ケーブルネット¹⁾⁻⁵⁾の対極に, 自重と平衡する応力以外には, 人工的な初期張力のない形態のネット構造がある。例として, 魚網や投網, スポーツネット, ハンモック, 蚊帳, クモの巣などがある。このように, 与えられた荷重条件や変形条件により, その幾何学的な形態が変幻するネットを, 本報ではたるみ性ネットと呼ぶことにする。このたるみ性ネットの特性と機能性に着目した工学的な応用例としては, ゴルフ練習場ネットや防風 (雪) 用ネット, さんご礁の白化を防ぐために, 海水温の上昇防止対策としての海洋ネット (日除けネット) などがある。しかし, たるみ性ネットについては, 著者らの知る限り, これまで, 実験的な研究は公式には皆無であるばかりか, 解析的な研究例⁶⁾⁻⁹⁾も少ない。この理由として考えられるのは, たるみ性ネットを工学において, より積極的に利用する着想がなかったばかりでなく, 計測技術の観点からは, ネットの曲面形態の平衡応答があらゆる载荷条件の変化に対して, 非常に敏感である点が挙げられ。また解析上の問題点として, 高次非線形性, 特異剛性行列, それにネット脚の非抗圧性などがある。本報の目的は, 他に類似した研究例の少ないスポーツネットについて载荷実験を試み, 計測結果と計算結果を比較検証し, たるみ性ネットの挙動を解明する基礎データを提供することにある。

2 スポーツネットの実験と計算

解析計算で使用したネット要素とは, 通常弾性有限変位を示すトラス要素に, つぎの 2.1 節で解説する非抗圧性の構成則を組み込んだ要素である。その定式化の詳細や平衡経路の追跡方法については, 文献⁶⁾⁻¹¹⁾に詳しい。

2.1 ネット脚 (要素) の構成則

図 1 にある六角形目合いの脚には, 細い断面の脚 1 (2-3-4 & 5-6-1) と太い断面の脚 2 (1-2 & 4-5) の二種類がある。脚 1 と脚 2 と同じ断面で, 長さ 50mm (チャック巾) の試験片 (ポリエステル) について, 伸び (mm) と引張力 (N) の関係を図 2 に示す。○印が計測値を示す。

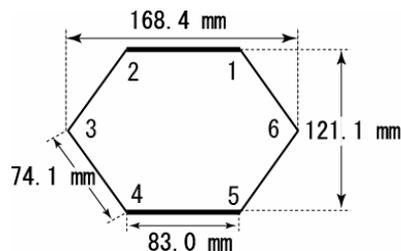


図 1 六角形の目合い

図2の計測結果から、つぎのような特性が観察される。(a)数少ない繊維フィラメント間の擦れによる摩擦抵抗は、ほとんど観測されず早期に直線状に立ち上がる。これに対して、(b)数多くの繊維フィラメントからなる太い断面の内部では、伸びとともにフィラメント同士で、段階的に滑らかな擦れが発生し、その結果、緩やかな曲線で直線域に接続する。したがって、線形弾性域に至るまでの挙動は、繊維フィラメントの多い断面ほど滑らかになることが観測される。

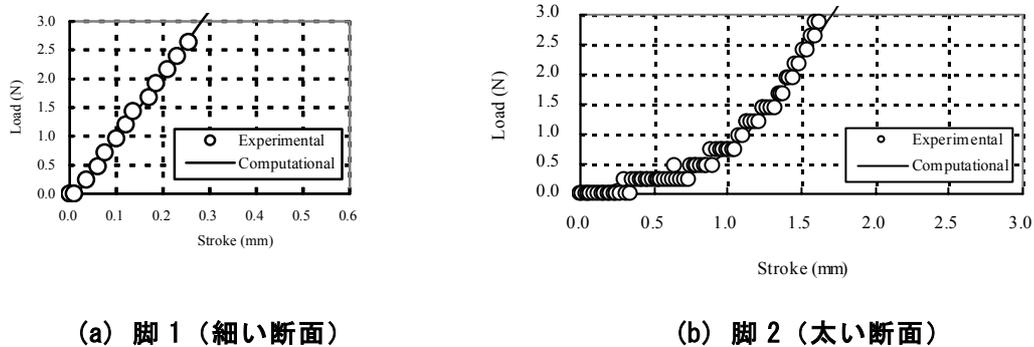


図2 材料特性の同定

以上のような材料実験の結果を参考に、非抗圧性のある脚材料（ポリエステル）については、次のような非線形弾性構成則を仮定する。

$$\frac{N}{EA} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right) + \sqrt{\left(\frac{\Delta}{L} - \varepsilon_0 \right)^2 + 4 \left(\frac{T_0}{EA} \right)^2} \right\} \quad (1)$$

ここに、 N , Δ , EA , L はそれぞれ、ネット要素の軸力と伸び、それに断面伸び剛性と原長である。ネット要素には、曲げ剛性はないものとする。 ε_0 はネット脚断面の織構造で見られる材料的な初期ゆるみであり、 T_0 は $(\Delta/L) = \varepsilon_0$ における断面張力である。図3に示すように、 $T_0 = 0$ のとき、式(1)の構成則はbi-linearとなり、 $(\Delta/L) = \varepsilon_0$ では、こう配は不連続となる。このため、微小な T_0 の値($\neq 0$)で平衡反復を安定化する。図2では○印で示す測定値を、構成則パラメータ(ε_0 , T_0 , EA)を用いて同定した結果を実線で示す。このように同定されたパラメータを、脚1($\varepsilon_0 = 0.0003$, $T_0 = 0.01\text{N}$, $EA = 560\text{N}$)と脚2($\varepsilon_0 = 0.02$, $T_0 = 0.7\text{N}$, $EA = 200\text{N}$)の構成則の中で採用する。以上のような準備のあと、六角形の目合いのスポーツネットの静的載荷実験と解析計算を行った。

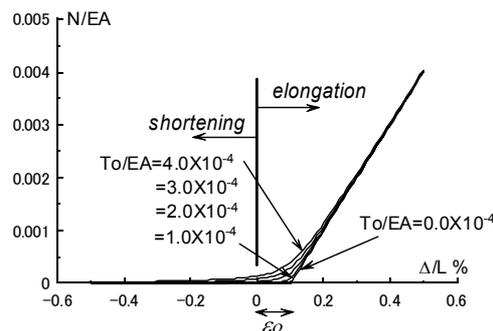


図3 構成則モデル

2.2 ネットの初期形状と離散化

図1に示す六角形の目合いを極力保った状態で、平坦な床の上で試験台フレームと同じ正方形領域に、ネット面を展開した（ネット自重は未載荷）。これが写真1である。この形態でネット脚（六角形の各辺）の伸

びをゼロと仮定し、ネット面の初期（入力）形状とする。図 1 の目合いの各脚を、一本のネット要素で離散化し、写真 1 にあるネットの初期形状に対応する計算モデルと節点の配置を、図 4 に示す。試験台の 4 辺上の節点変位の拘束を想定すると、666 節点、962 要素、それに 1788 節点自由度の FEM 離散化モデルとなる。



写真 1 平坦な床に展開したネット

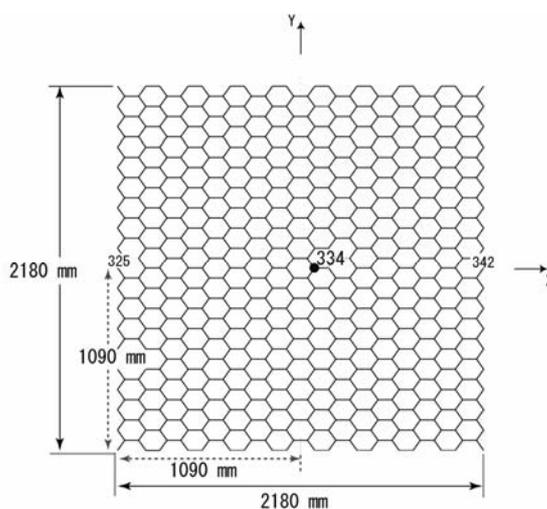


図 4 ネットの有限要素モデル

ネットの離散化平衡方程式は、一般に次のように与えられる¹¹⁾。

$$E(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 \quad (2)$$

ここに、 $E(\mathbf{u}, \mathbf{p})$ は、節点における非平衡力ベクトルで、系の内力と外力の差として定義する。節点変位 \mathbf{u} と荷重変数 \mathbf{p} が、式 (2) を満たすとき、平衡解 (\mathbf{u}, \mathbf{p}) となる。写真 1 の状態から、試験台フレームに張った後、つぎのような D), B) および P) の 3 つの载荷ケースについて考える。

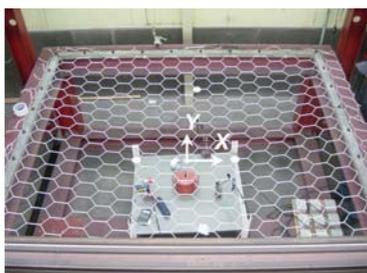


写真 2 D) 自重を载荷されたネット曲面

D) ネットの自重(写真 2, 図 5, および図 8)

写真 1 の平坦な展開図を、六角形ネットの初期形状として、式 (2) の左辺を、次のように定義して、自重载荷時の平衡解を、ニュートン・ラフソン法で計算する¹¹⁾。

$$E(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \mathbf{R}(\mathbf{u}) - \mathbf{f} \quad (3)$$

$R(u)$ は、節点変位 u に依存する内力ベクトルで、ネットの自重（全重量 4.163N）は、定荷重ベクトル f で考慮した。計測結果と計算結果を、図 5 で比較する。ネット曲面は極めて滑らかで、自重だけの作用下にある場合は、たわみの計測値と計算値は、良好に一致する（図 8 の D）も参照）。

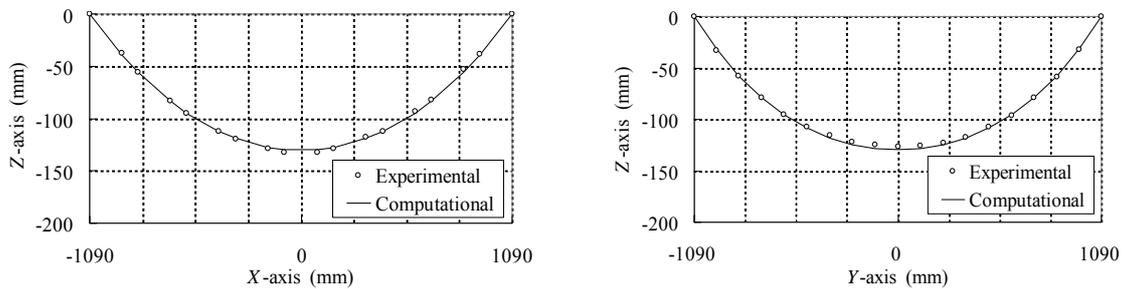


図 5 D) 自重载荷のたわみ曲線

B) ネットの自重+ネット面中央にボール荷重(図 6 および図 8)

つぎに D) の平衡状態に、ネット中央に位置する六角形の各角点に、ボール重量 (5.174N) の 1/6 ずつを、均等に節点荷重として作用させる。この载荷条件に対する非平衡力ベクトルを、つぎの式で定義する。

$$E(u,p)=R(u)-f-pe \quad (4)$$

ボール荷重は、式 (4) の右辺の第 3 項で考慮して、荷重変数 p を、ボール荷重に対応する荷重モード e の倍率とする。計測結果と計算結果を、図 6 において対比する。このとき、ネット曲面の滑らかさは消失し、たわみが中央に集中し、たわみ分布は局所化する（図 8 の B）も参照）。たわみの大きさの比較では一般に、現実のネット挙動より計算モデルの方が、わずかながら低い剛性を示す傾向にあるが、962 要素による離散化モデルでも、たわみ分布の局所化はよく再現されている。

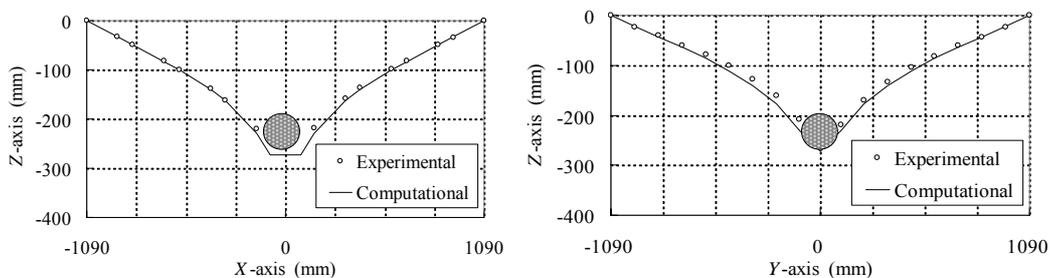


図 6 B) ネット中央付近のボール荷重によるネット曲面

P) ネットの自重+ネット面の吊り上げ(図 7 および図 8)

D) の形態から、図 4 に示す節点 334 を、錘を用いて滑車を経由して、上方に 293 mm だけ吊り上げる。この吊り上げ力は、式(4)の右辺の第 3 項で考慮して、変位制御で漸増させる。計測値と計算値を比較したのが、図 7 である（図 8 の P）も参照）。この荷重ケースでは、たわみ分布の局所化は、B) よりさらに進み、吊り上げ点（節点 334）が鋭角となる。この場合も、たわみの計測値と計算値は、良好に一致する。

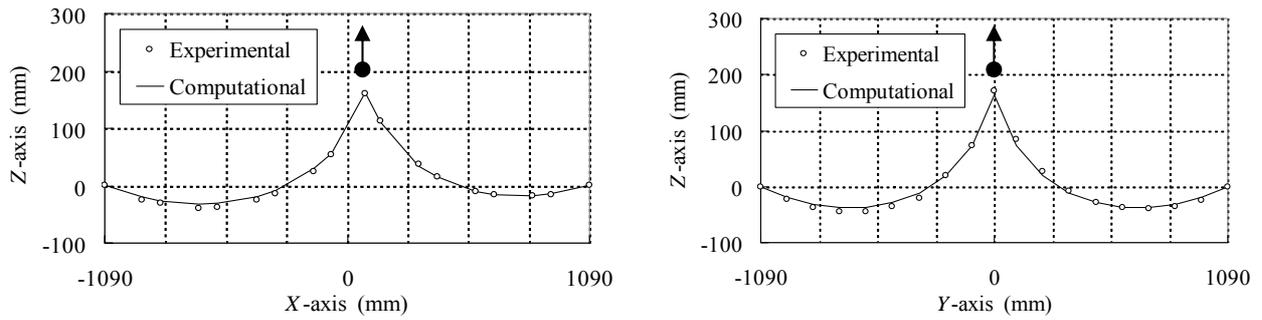


図 7 P) 上方に吊り上げたネット曲面

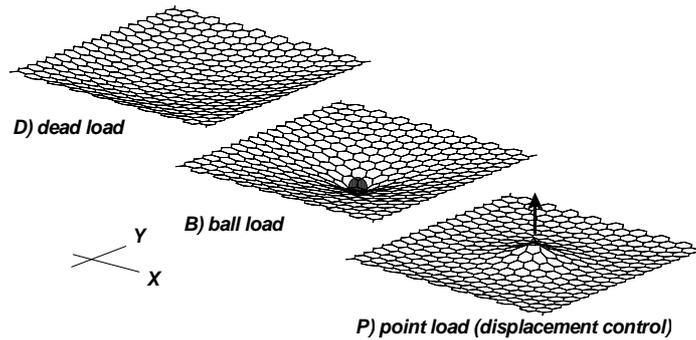


図 8 計算で求めたネット曲面

3. 計算モデルの応用 (図 9)

実験結果との比較検証により、計算モデルの妥当性が検証されたので、以下では計算モデルの応用例を考える。実験に用いた六角形目合いのネット（六角形ネットと略称する）の他に、計算モデルとして、もうひとつの四角形目合いのネット（四角形ネットと略称する）を考える。

図 1 にある六角形目合いの大きさと、図 2 にある六角形ネットの目合いの数（18x17 個）を極力変えず考案した四角形ネット（目合いの数は 17x19 個）であり、自重と平衡する曲面形態を比較する。四角形ネットについては、すべて脚 1 の断面を仮定した。

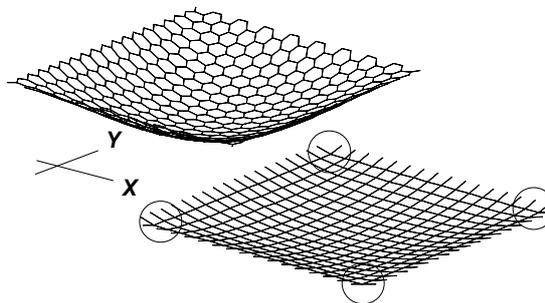


図 9 自重によるネット曲面形態の違い（たわみの倍率 3.0）

四角形ネットでは、2180mm x 2180mm の正方形領域全体を、17x19 個の長方形目合いに区分する。この結果、単一目合いは、128mm x 115mm の長方形（六角形の面積の 96%）となる。すべて脚 1 の断

面を仮定した長方形ネットの全重量 (2.655N) は、六角形ネットの全重量 (4.163N) の 64% になる。六角形ネットと同様に、1脚1本の要素で離散化すると、864要素、610節点、そして864自由度となる。

両タイプの目合いのネットを、自重载荷し、そのときのネット曲面の形態を、違いが明確となるように節点変位を倍率 $\times 3$ で拡大して、図9で比較する。六角形ネットは、太い断面の脚2を含むため、比較的大きな材料重量と初期ゆるみ (図2) から、四角形ネットに比べたわみ量が大きくなる。またネット曲面の形態に関しては、六角形ネットの方が、より滑らかな曲面を生成し、膜構造の形態に近い挙動を示す。一方、四角形ネットは脚方向 (XY方向) に強い方向性を示し、より軽量であることに加えて、初期ゆるみがわずかな脚1 (図2) であるため、たわみ量も小さく、滑らかさが消失した曲面形態となる。特に図9の○印が示すように、ネット曲面の四隅付近に、曲面こう配の明確な不連続性 (折れ角) が集中する。

4. まとめ

たるみ性ネットについては、自重载荷の場合、弾性変形は無視でき、有限変位のほとんどは、個々の脚 (要素) の剛体変位となる。特に、脚の織構造内部におけるフィラメントの擦れ、すなわち直線弾性域に至るまでの初期ゆるみ ϵ_0 を無視することはできない。これは脚の剛体変位とともに、たるみ性ネットの形態の敏感度を高くする要因のひとつでもある。直交する脚方向に強い方向性と、比較的高い剛性を示す四角形ネットと異なり、六角形ネットは、ネット全体として柔軟性に富み、等方性と均質性が見られる。力学的には膜の変形形態に近い挙動を示すが、膜構造よりも軽快な構造となり、光や熱流体の透過性についても優れた機能をもつ。この機能は、たるみ性ネットを用いた新しい構造形態を考えるときのヒントとなる。また自重と平衡する応力レベルにある脚断面に関する測定データが、構成則パラメータの同定には不可欠となる。しかし一方では、脚の伸びゼロの点に対応する現実の織構造の状態の定義には任意性が伴う。この点に着目したネット材料の計測方法の提案と、構成則モデルの精密化が、今後の課題となる。

謝辞 本研究に、(財)能村膜構造技術振興財団から、平成17年度に研究助成 (研究代表:藤井文夫) を受けたことを、記しておきます。

参考文献

- 1) 日本建築学会編：空間構造の数値解析ガイドライン，日本建築学会，2001.
- 2) 土木学会編：ケーブル・スペース構造の基礎と応用，鋼構造シリーズ11，土木学会，1999.
- 3) Irvine HM, Sinclair GB. The suspended elastic cable under the action of concentrated vertical loads. *Int J Solids and Structures* 1972; 12: 309-317.
- 4) Piertzak J. Matrix formulation for static analysis of cable structures. *Computers & Structures*, 1978; 9: 39-42.
- 5) Fried I. Large deformation static and dynamic finite element analysis of extensible cables. *Computers & Structures* 1982; Vol.15, No.3: 315-319.
- 6) Fujii F., Noguchi H, Osterrieder P. Static and dynamic large displacement response of flexible nets. 2003: IASS-APCS, Taipei.
- 7) Fujii F., Noguchi H. Flexible nets in statics and dynamics. *Proceedings Volume I*, ISBN 951-39-1868-8 ECCOMAS2004 2004; Jyväskylä, Finland, CD-ROM.
- 8) 犬飼佳幸, 木村昭雄, 藤井文夫, 野口裕久: たるみ性と非抗圧性のあるネットの計算技法, 構造工学論文集, Vol.50A, 151-156, 2004
- 9) Fujii F., Noguchi H., Oda K.: Flexible and incompressible goal nets in soccer, Invited lecture, ICCM04, December 2004, Singapore
- 10) 藤井文夫, 瀧論, 萩原伸幸, 本間俊雄, 三井和男: 非線形構造モデルの動的応答と安定性, 計算工学シリーズ2, コロナ社, 2003
- 11) 藤井文夫, 大崎 純, 池田清宏: 材料と構造の分岐力学, 計算工学シリーズ3, コロナ社, 2005

連続値ホップフィールドモデルによる連続体の形状最適化

瀧 圭佑¹⁾, 曾我部博之²⁾, 三井和男³⁾

1) 愛知工業大学工学研究科, 大学院生

2) 愛知工業大学工学部, 教授, 工博

3) 日本大学生産工学部, 助教授, 工博

1 はじめに

著者等はニューラルネットワークの連続値ホップフィールドモデルを用いた構造形態の最適化手法を提案し、その有効性を示してきた¹⁾。この最適化手法はニューロンの時間的変化に伴って、ニューロンの出力値の2次形式で表されるエネルギー関数が極小化する性質を利用したもので、最適化問題をこのエネルギー関数の形式に表現することによって最適解を求めるものである。しかしながら、最適化問題の目的関数や制約条件をこのエネルギー関数の形式に表現するためには、いくつかの制約、たとえばシナプス結合荷重が対称であることや自己結合しないことなどがあり、工夫を要する点がいくつか必要である。本論では、これらの問題点を解決した改良型の連続値ホップフィールドモデル²⁾を用いて形状最適化問題に適用し、その有効性をいくつかの例題によって報告する。

2 連続値ホップフィールドモデルの改良

先ず、ニューラルネットワークの連続値ホップフィールドモデルについて述べる。これはニューロン i の内部状態 $u_i(t)$ が連立微分方程式(1)によって変化するとき、式(2)で表されるエネルギー関数が極小化するというものである。このエネルギー関数に最適化問題の目的関数と制約条件を対応させることによって最適解を求めることが可能になる。

$$\frac{du_i(t)}{dt} = -\frac{1}{R}u_i(t) + \sum_{j=1}^n T_{ij}v_j(t) + I_i(t) \quad (1)$$

$$E(t) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n T_{ij}v_i(t)v_j(t) - \sum_{i=1}^n I_i v_i(t) \quad (2)$$

ここで、 T_{ij} はニューロン j から i へのシナプス結合荷重で、 $T_{ii}=0$ 、 $T_{ij}=T_{ji}$ である。 I_i はニューロン i のしきい値で、 R ($R>0$) は入力の減衰定数である。さらに、 $v_j(t)$ はニューロン j からの出力値を表しており、0 から 1 までの連続値である。このニューロンの出力値 $v_i(t)$ は、内部状態 $u_i(t)$ の単調増加関数として次式(3)のようなシグモイド関数で表される。

$$v_i(t) = \frac{1}{1 + \exp(-2u_i(t)/\mu)} \quad (3)$$

ここで μ はシグモイド関数の形状を表すパラメータである。

最適化問題の目的関数をエネルギー関数に変換する場合、目的関数を出力値 $v_j(t)$ の2次形式にして、シナプス結合荷重やしきい値を設定しなければならない。このとき、シナプス結合荷重の対称性などを考慮する必要がある。このような制約を取り除くために改良型の連続値ホップフィールドモデルが文献2)によって提案されている。これは式(1)に示した微分方程式の代わりに次式(4)を用いたものである。

$$\frac{du_i(t)}{dt} = -\frac{\partial E(t)}{\partial v_i(t)} \quad (4)$$

ニューロンの出力値 $v_i(t)$ は、0 から 1 までの連続値で式(3)と同様に内部状態 $u_i(t)$ の単調増加関数である。この場合もホップフィールドモデルを動作させることによって、エネルギー関数の極小化が保証されている。但し、エネルギー関数を設定する場合、式(2)のような制約がないので様々な最適化問題に応用し易くなって

いる。さらに、入力の減衰定数 R も不要でパラメータの数も少なくなっている。

3 改良型ホップフィールドモデルによる最適化手順

前節で述べた改良型ホップフィールドモデルによる形状最適化の手順を以下に示す。

1) 設計領域と初期形状の設定

図1で示すように設計領域を細かく正方形の要素として区切り、それを神経細胞のニューロンに対応させる。初期形状は設計領域の全領域とする。

2) ニューロンの出力値の初期設定

次に、ホップフィールドモデルのニューロンの出力値を設定する。ここでは、 $v_j(0)=0.5$ とした。

3) ホップフィールドモデルの動作

FEM 計算を行うことによって、構造物の相当応力や固有振動数等を計算する。この応答に基づいて、ホップフィールドモデルのエネルギー関数が収束するまで、ニューロンの内部状態と出力値を繰り返し計算する。

4) 構造要素の削除

従来の研究¹⁾では、収束したニューロンの出力値が0になった場合（正確には、小さな数値 ε を使って $v_j(0) < \varepsilon$ の場合、0と判定した）、そのニューロンに相当する構造要素を削除していたが、ニューロンの出力値がシグモイド関数の形状係数 μ によって敏感に変化するため、このパラメータを設定するためには試行錯誤を重ねる必要があった。本論では、この点を解決するためにニューロンの出力値の大小関係を調べ、小さいほうから単純に R 個削除するという方法をとった。この削除する個数 R は、パラメータとして与えた。

5) 以下、3) と 4) を目的関数の最小値（極小値）が得られるまで繰り返す。

以上の手順をフローチャートで図2に示す。

4 重量最小化問題に対する応用

4. 1 改良型ホップフィールドモデルの微分方程式とエネルギー関数

始めに、構造物の体積を最小化する最適化問題について考える。制約条件は、構造要素 i における相当応力 σ_i の平均値が目標として定める相当応力 σ^E になることである。この目的関数と制約条件は、ニューロン i の出力値 v_i を用いて、それぞれ式(6)及び式(7)で表される。

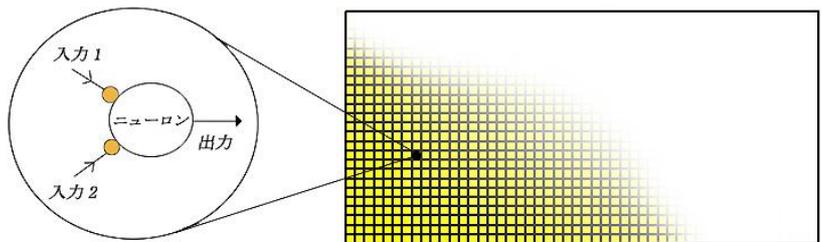


図1 ニューロンと構造の関係

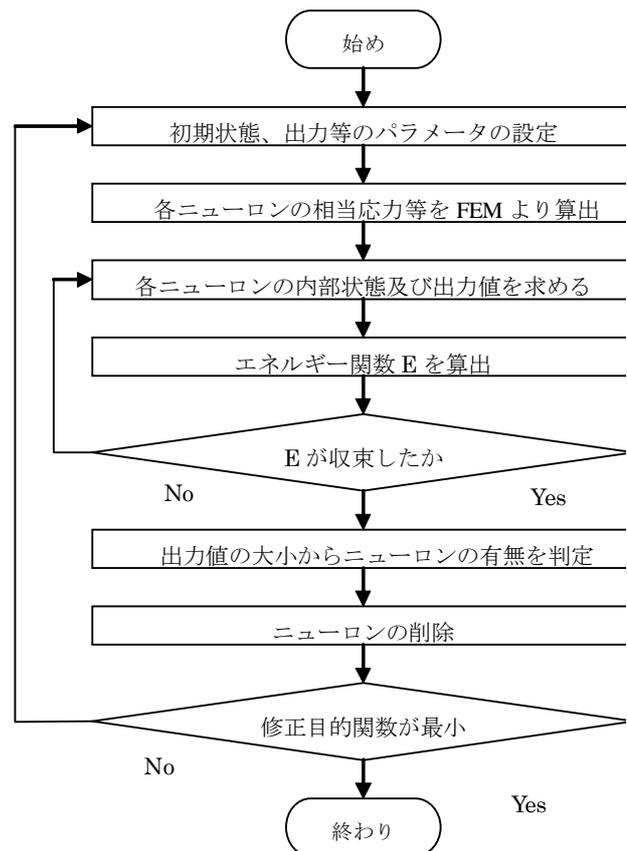


図2 フローチャート

$$\text{目的関数} : f_1 = \frac{1}{W_0} \sum_{i=1}^n \Delta w v_i \rightarrow \min \quad (6)$$

$$\text{制約条件} : f_2 = \frac{1}{n\sigma^E} \sum_{i=1}^n \sigma_i v_i - 1 = 0 \quad (7)$$

ここで、 Δw は構造要素の体積、 W_0 は全設計領域の体積、 n は存在している構造要素の個数である。さらに、上式(6),(7)はペナルティ係数 λ を用いて、次のような制約条件のない最適化問題の目的関数 f に変換することができる。

$$\text{修正目的関数} : f = f_1 + \lambda f_2^2 \quad (8)$$

この修正された目的関数をエネルギー関数 E にすることで、連立微分方程式(4)は次式(9)のようになる。

$$u_i(t + \Delta t) = u_i(t) - \frac{\Delta w \Delta t}{W_0} - \frac{2\lambda \Delta t}{n\sigma^E} \left(\frac{1}{n\sigma^E} \sum_{j=1}^n \sigma_j v_j - 1 \right) \sigma_i \quad (9)$$

4. 2 計算例 1 : Michell タイプ構造

最適化について検証するため、図3に示すような設計領域(10m×5m)で生成される Michell タイプ構造³⁾の問題について考える。図3のように、設計領域の中央下に集中荷重 1 kN を作用させ、両端を支持する。初期状態では、全ての構造要素が存在するものとする。また、ニューロンの出力値の初期値を $v_i(0)=0.5$ とした。さらに、ニューロンの内部状態を表す初期値 $u_i(0)$ は、式(3)のシグモイド関数の逆関数より求めた。また、板厚を 0.1m、ヤング率を 100GPa、ポアソン比を 0.3 とし、構造要素のサイズを 0.2m×0.2m で分割して、50×25 とした。目標とする相当応力の平均値は $\sigma^E = 6\text{kPa}$ とする。ホップフィールドモデルに必要なパラメータは、 $\Delta t=1$ 、 $\lambda=1$ 、 $\mu=10$ とする。また、収束したニューロンの出力値に基づい

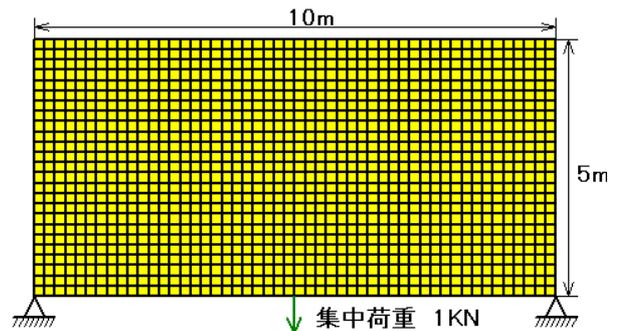


図3 設計領域

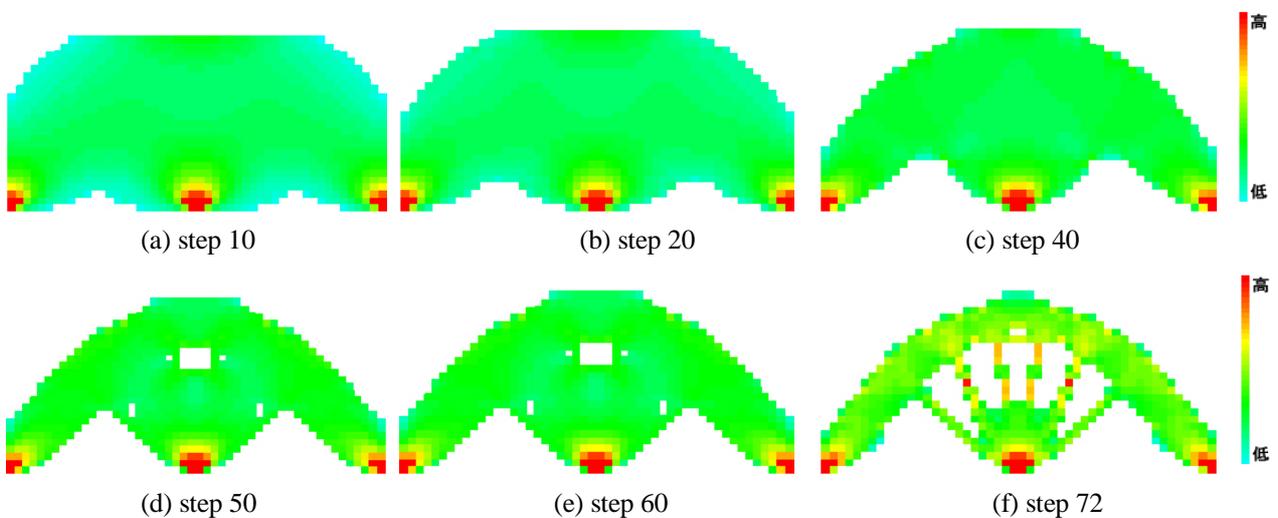
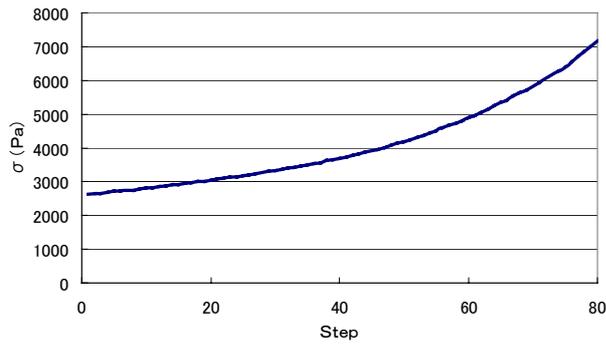
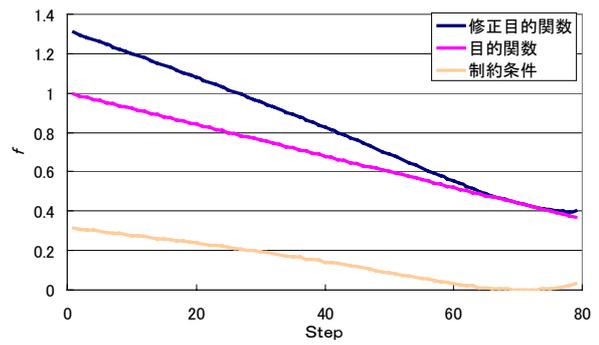


図4 Michell タイプ構造の生成



(a)相当応力の推移



(b) 目的関数と制約条件の推移

図5 相当応力と目的関数の推移

て削除される構造要素の個数は $R=10$ とした。

図4に形状の変化の様子を示す。図中の濃淡は相当応力の高低を示し、濃淡が濃くなる程、相当応力が高いことを示している。全設計領域の初期形状から相当応力の低い両端上部から順に削除されていき、アーチの形状になりながら、(d)のように中央部の相当応力の低い部分が削除されていく。そして、72ステップで目標の相当応力の平均値が得られる位相形状になった。また、図5に相当応力 σ^E と修正目的関数 f 、目的関数 f_i 、制約条件式 λf_2^2 の推移の状況を示す。修正目的関数 f の推移を見ると、72ステップ付近において最小になっていることが確認できる。

4. 3 計算例2：片持ち梁

次に、図6に示すような初期形状を持つ片持ち梁 ($0.16\text{m} \times 0.1\text{m}$) を設計領域とした最適化問題³⁾について考える。板厚を 0.001m 、ヤング率を 207GPa 、ポアソン比を 0.3 とし、構造要素のサイズを 0.005×0.005 で分割し、 32×20 とした。さらに、目標とす

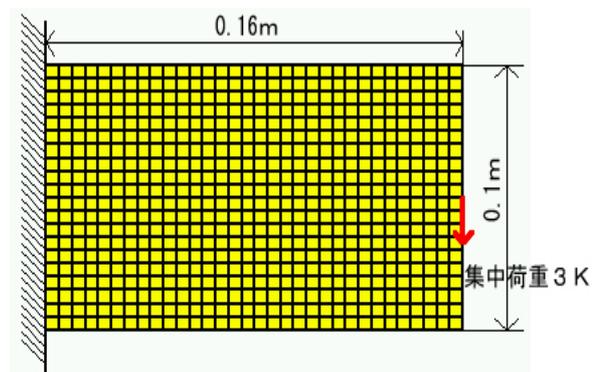


図6 設計領域

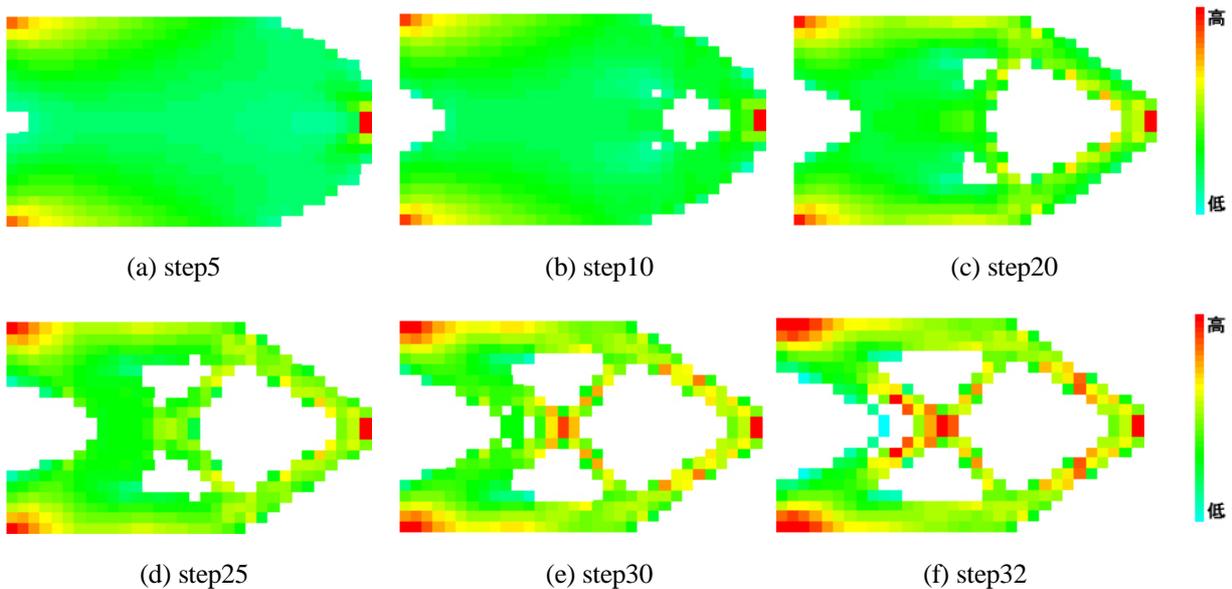
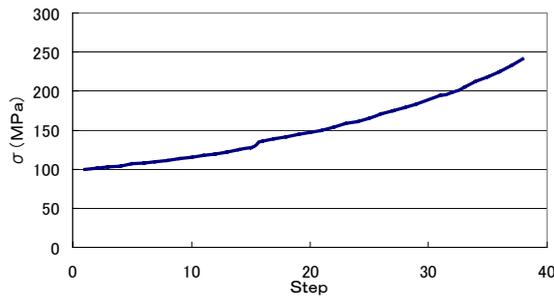
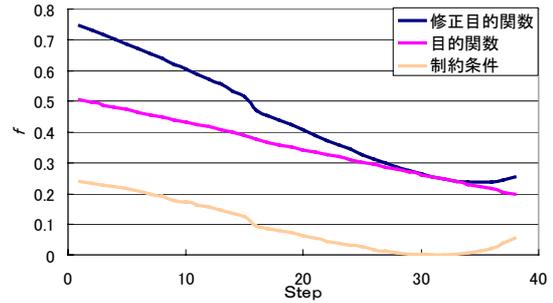


図7 片持ち梁構造の生成



(a) 相当応力の推移



(b) 目的関数と制約条件の推移

図8 相当応力と目的関数の推移

る相当応力を $\sigma^E=200\text{MPa}$ とした。また、ホップフィールドモデルのパラメータは Michell タイプ構造の問題と全く同じに設定した。

シミュレーションの結果を図7と8に示す。図7は形状の変化の様子を示している。ステップの経過に伴い自由端上部及び固定端中央部が削れて、トラスを形成していくことがわかる。また、図8は相当応力と修正目的関数 f 、目的関数 f_1 、制約条件式 λf_2^2 の推移の状況である。目的関数の体積は一律に減少し、制約条件は相当応力の平均値が目標値になって32ステップでほぼ0になり、修正目的関数 f が最小化されていることがわかる。

5. 固有振動数最大化問題への応用

構造物の1次固有振動数を最大化する問題について考える。制約条件は構造物の総体積を予め与えられた体積 W_1 にすることである。この最適化問題は次式のように定式化される。

$$\text{目的関数: } f_1 = \frac{1}{\omega_0^2} \omega^2 \rightarrow \max \quad (10)$$

$$\text{制約条件: } f_2 = \frac{1}{W_1} \sum_{\ell} \Delta w v_{\ell} - 1 = 0 \quad (11)$$

ここで、 ω^2 は各ステップにおける構造物の固有値、 ω_0^2 は初期形状の固有値、 Δw は構造要素の体積である。上式(10), (11)をペナルティ係数 λ を用いて式(8)のように変換する。なお、固有値 ω^2 は、固有ベクトル x を用いたレイリー商により次のように表される。

$$\omega^2 = \frac{x^T K x}{x^T M x} \quad (12)$$

ここで、 \mathbf{K} は全体剛性マトリックス、 \mathbf{M} は全体質量マトリックスである。さらに、上式は要素 ℓ に対応するニューロンの出力値 v_{ℓ} を用いて次のように表すことができる。

$$\omega^2 = \frac{\sum_{\ell} c_{\ell} v_{\ell}}{\sum_{\ell} d_{\ell} v_{\ell}} \quad , \quad c_{\ell} = \sum_{i,j} {}_{\ell} k_{ij} \quad {}_{\ell} x_i \quad {}_{\ell} x_j \quad , \quad d_{\ell} = \sum_{i,j} {}_{\ell} m_{ij} \quad {}_{\ell} x_i \quad {}_{\ell} x_j \quad (13)$$

ここで、 ${}_{\ell} k_{ij}$, ${}_{\ell} m_{ij}$, ${}_{\ell} x_i$ は、それぞれ要素 ℓ の剛性マトリックスと質量マトリックス、固有ベクトルである。以上より、改良された連続値ホップフィールドネットワークの微分方程式は、次式(14)のようになる。

$$u_i(t + \Delta t) = u_i(t) - \Delta t \left\{ \frac{-1}{\omega_0^2 \left(\sum_{\ell} d_{\ell} v_{\ell} \right)^2} \left(c_i \sum_{\ell} d_{\ell} v_{\ell} - \sum_{\ell} c_{\ell} v_{\ell} d_i \right) + 2\lambda \frac{\Delta w}{W_r} \left(\frac{\Delta w}{W_r} \sum_{\ell} v_{\ell} - 1 \right) \right\} \quad (14)$$

形状最適化問題の計算例を次に示す。設計領域は図9に示すような両端固定のはり³⁾である。密度は7000kg/m³、ヤング率は200GPa、ポアソン比は0.3である。セルサイズは0.05m×0.05m(板厚は0.1m)で、分割数を100×20とした。目標とする体積W_tは、設計領域の90%に設定した。削除する要素数Rは8とした。26ステップにおける最適形状を図10に示す。このときの体積は設計領域の90%で、振動数は初期形状(図9)の振動数178.5Hzより11.9%高くなって199.7Hzとなった。図11に修正目的関数f、目的関数-f_i、制約条件式λf₂²の変化の様子を示す。

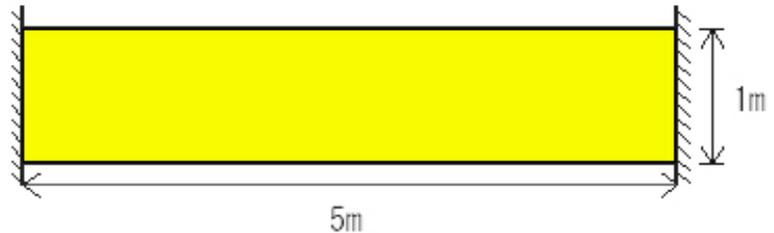


図9 初期形状

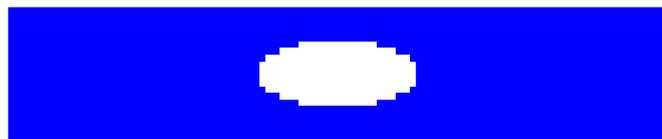


図10 最適形状 (step26)

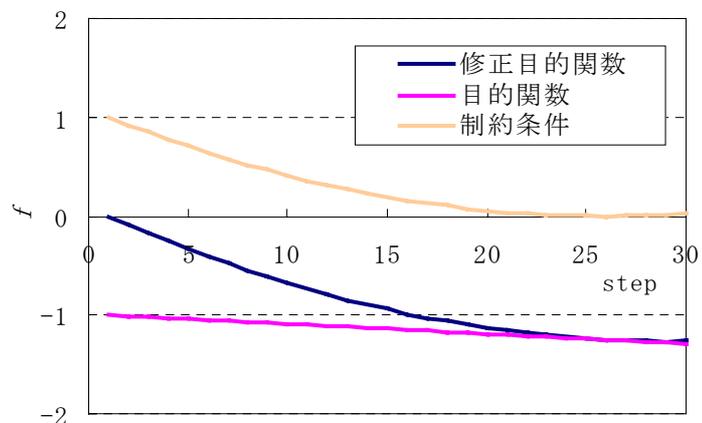


図11 目的関数と制約条件の推移

6. おわりに

本論では、改良型のホップフィールドモデルを使った連続体の形状最適化手法を提案した。この手法を重量最小化問題と振動数の最大化問題に適用し、その有効性について報告した。本論で用いた連続値ホップフィールドモデルは、シナプス結合荷重やしきい値を定める必要がなく、さらに、従来のホップフィールドモデルに比べ、パラメータの個数も少ない。

参考文献

- 1) 曾我部、三井、ホップフィールドネットワークによる連続体の形状最適化、FCS/テクノシンポ名大/MPSシンポジウム、2005年10月
- 2) Y. Takefuji and K. C. Lee: A Super parallel sorting algorithm based on neural networks ,IEEE trans. on circuits and systems, 37,1425-1429,1990
- 3) Xie, Y. M. and Steven, GP. :Evolutionary Structural Optimization, Springer-Verlag,1997

拡張 ESO 法による曲面構造形態の創生

石川 敬一¹⁾, 梶田 哲嗣²⁾, 大森 博司³⁾

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

2) 株式会社竹中工務店, 工修, kajita@dali.nuac.nagoya-u.ac.jp

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

1 はじめに

拡張 ESO 法は構造形態創生法のひとつであり, 有限要素法から求まる各要素の基準量を定め, 不要な部分は削除し, 補強の必要な部分には材料を付加することを繰り返し, 応力などの要素の基準量となるべく均一に分布する構造形態を繰り返し過程を通して求める手法である。拡張 ESO 法は建築設計の初期段階で力学的な合理性に基づき建築形態を提案することに有効な手法である。本稿では予め設定した曲面形状の中で形態創生を行う手法を示し, 実構造物への応用について報告する。

2 構造形態創生法の概要

2.1 変位敏感数

構造体を n 要素に細かく分割した時, i 番目要素を削除すると構造体のある位置での変位が変化する。この変化量を変位敏感数と定義して, 着目する要素が構造体全体へ与える力学的, 幾何学的な影響程度を評価して, これに基づき, 進化の各段階での設計領域における要素の付加・削除を行う。構造体の静的釣合式は, 次のように表現できる。

$$[K]\{u\} = \{P\} \quad (1)$$

n 要素で成り立った構造体の i 番目要素が削除された時, 全体剛性マトリクスが $[\tilde{K}]$ に変化したとすると, 全体剛性マトリクスの変化量 $\Delta[K]$ は次のようになる。

$$\Delta[K] = [\tilde{K}] - [K] = -[K^i] \quad (2)$$

ここで $[K^i]$ は i 番目要素の剛性マトリクスである。この時の外力 $\{P\}$ により生ずる変位を $\{\tilde{u}\}$ とすれば, 次式が成立する。

$$[K]\{u\} = [\tilde{K}]\{\tilde{u}\} = \{P\} \quad (3)$$

式 (3) は次のように変形できる。

$$[\tilde{K}]\{\tilde{u}\} = [K]\{u\} + [K]\Delta\{u\} + \Delta[K]\{u\} + \Delta[K]\Delta\{u\} \quad (4)$$

他の量と比べ, $\Delta[K]\Delta\{u\}$ の量が小さいものとし, $\Delta[K]\Delta\{u\} \approx 0$ と仮定すれば, 式 (4) から節点変位ベクトルの変化量 $\Delta\{u\}$ を次のように求めることができる。

$$\Delta\{u\} = -[K]^{-1}\Delta[K]\{u\} \quad (5)$$

ここで, j 番目節点と考えている方向に作用する荷重を 1 とし, それ以外を 0 とした単位荷重ベクトル $\{F^j\}^T$ を式 (5) の両辺に左からかけ $\{F^j\}^T = \{u^j\}^T [K]$ の関係を用いると次式を得る。

$$\Delta u_j = \{u^{ij}\}^T [K^i] \{u^i\} \quad (6)$$

ここで, $\{u^i\}$ は $\{u\}$ のうち, i 番目要素の節点ベクトルを表し, $\{u^{ij}\}$ は $\{u^j\}$ のうち, i 番目要素の節点ベクトルを表す。 i 番目要素を削除した時の j 節点の鉛直方向に対する変位変化程度を表わした式 (6) の絶対値を, i 番目要素に対する変位敏感数と定義して, 次式で表現する。

$$\alpha_{ij} = | \{u^{ij}\}^T [K^i] \{u^i\} | \quad (7)$$

2.2 von Mises 応力

応力を進化の基準とする場合には, von Mises の相対応力を用いる。Mises の降伏条件は, 一般の 3 次元体に複数の応力が作用した時, それらのいかなる組み合わせにおいて降伏を生ずるかという条件を与えるものであり, 二次元問題における von Mises 応力 σ_{von} は x 方向応力を σ_x , y 方向応力を σ_y , せん断力を τ_{xy} として次式で定義される。

$$\sigma_{von} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (8)$$

2.3 NURBS

曲面上の点を表現する時, 通常の座標値としてデカルト座標系上の各軸成分の組として表現した場合, 曲面形状との間には誤差による距離が発生する。より曲面形状の滑らかさを表現するために, 座標を曲面形状のパラメータ値として表し, 「形状の上に乗った点」とすることで誤差を抑えることができる。曲線や曲面を表わす数式として非一様有理 B-スプライン (Nonuniform Rational B-Splines, NURBS) を用いるとパラメトリック空間において, 自由曲面や解析的な曲面などが統一的に表現できる特徴を持つ。NURBS による表現形式は, 区分的有理式としてパラメータ表現するもので, 図 1 で示すように円・円弧・楕円・楕円弧などの円錐曲線や, 球面・円柱面・円錐面などの曲面を近似なしに統一的に表現することができる。



図 1 NURBS による曲面

NURBS 曲面はパラメータ (u, v) を用いると次のように表わされる。

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{ij}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m w_{ij} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} \quad (9)$$

ここで u, v はパラメータ, $N_{i,p}, N_{j,q}$ は基底関数である。 P_{ij} は制御点, w_{ij} は重みをそれぞれ表わす。式 (9) により, 3 次元空間内の任意の曲面を二つのパラメータを用いて統一的に表現できる。

3 シェル構造物の形態創生

構造物の変形に対する抵抗能力は材料の量だけでなく、構造の形態と大きく関係があり、構造形態の選択は構造体の各部材の機能を最も効果的に生かし、設計荷重に対する抵抗度が高い空間構成が望ましいと言える。本節ではシェル構造物を例として、特定位置での変位に着目した変位敏感数による進化と von Mises 応力を基準量とした解析例について述べる。

3.1 ピン支持球形シェル

図2に示すように、一辺が2mの正方形平面を有し、ライズが0.6mである四点ピン支持された裁断球形シェルの頂点に集中荷重を作用させた時の形態創生を考える。シェル厚を0.1mとしている。形態創生は各過程で求まる各有限要素の

- (i) 載荷点鉛直方向変位
- (ii) 曲げ応力を考慮した von Mises 応力

をそれぞれ求め、それに基づいて得られるシェル曲面内の等応力値曲線に沿って削除・復活を繰り返すことによって進化させている。

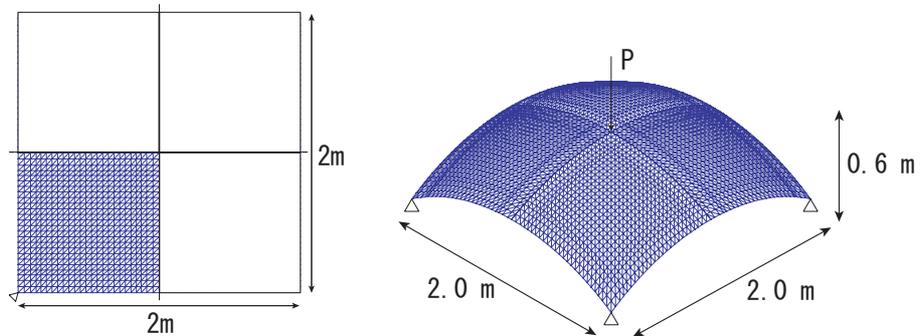


図2 解析モデル

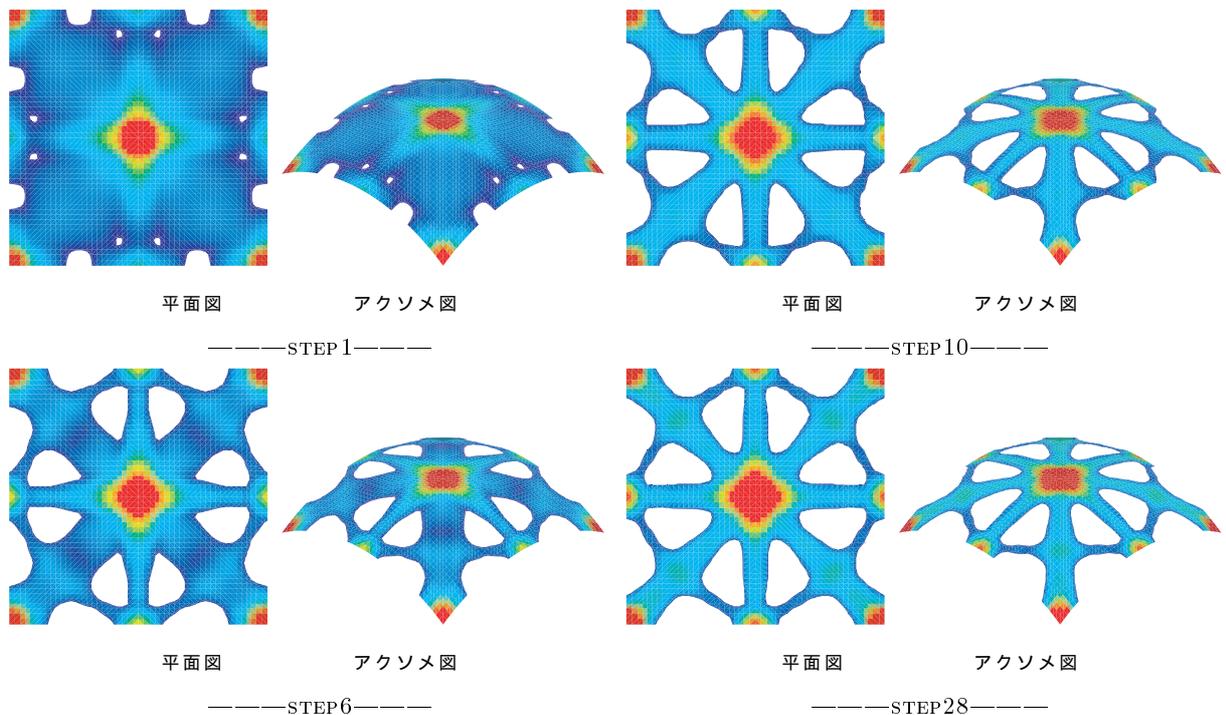


図3 変位敏感数を基準とした進化過程

図3より変位に着目した形態創生では、支持部どうしを交差して結ぶトラス状の形態へと進化した。荷重はこの交差する部材を伝わり、周りのテンションリングによってクロスアーチの広がりを防ぐ構造システムをとる。また、図4より、進化が進むにつれ重量が減少することが分かる。図5より敏感数の平均値はわずかずつではあるが次第に高くなっていることから進化とともに構造体全体で敏感数が均一に分布する形態へと変化していることが分かる。図6に von Mises 相当応力を敏感数とした場合を

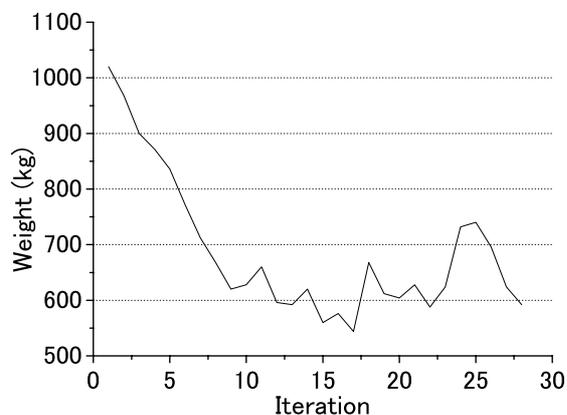


図4 総重量の推移

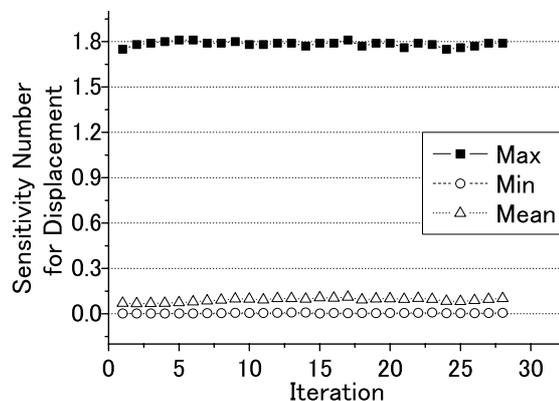


図5 敏感数の推移

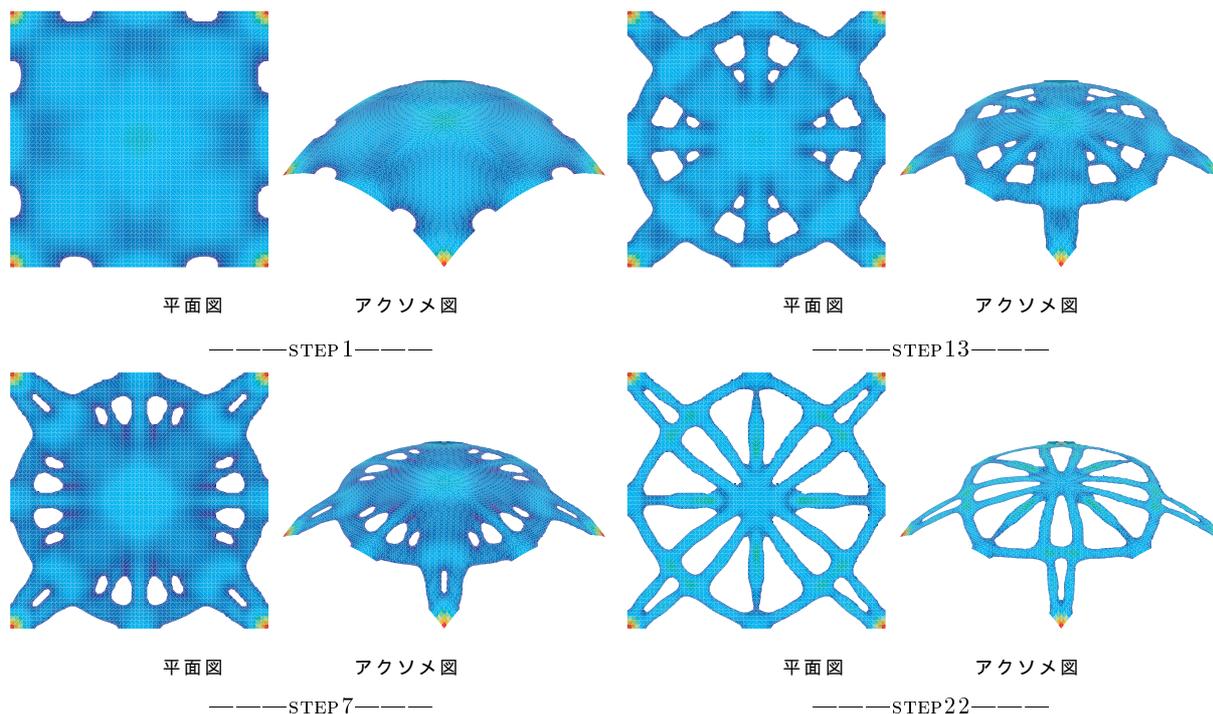


図6 von Mises 応力を基準とした進化過程

示す。von Mises 応力を基準とした形態創生では、進化の初期段階で図3で示した進化の基準を頂点鉛直方向変位とした進化の時と似た形状を示している。また進化の中間段階では、外側に作られたテンションリングの内側にもう一つリング状の部材が生じる。外側のリングは集中荷重を受けたシェルが外側に広がろうとする変形を押さえるテンションリングの働きをする。また、進化の過程で現れる内側のリングは、集中荷重によるシェル頂部の沈みこみによる圧縮変形に対し抵抗していることが分か

る。進化の最終段階において、クロス状の部材の内側から穴が開く始め、最終的に頂点と支持部はテンションリングを介して二本の線材によって支えられ、二本の線材は頂点から支持部までまっすぐな直線になるのではなく、円弧を描く楕円形の線材となっている。膜応力の流れが荷重載荷点から外側に広がってから支持部で再び集まるという流れが示されている。

3.2 ローラー支持球形シェル

前節で示したピン支持球形シェルと同じモデルを用いて、支持条件をローラー支持とした時の形態創生を行った。一辺が2mの正方形平面を有し、ライズが0.6mである四点ローラー支持された裁断球形シェルの頂点に集中荷重を作用させた時の形態創生を行っている。形態進化は、頂部載荷点の鉛直方向変位を基準量とし、剛性/重量のパフォーマンスを大きくするシェル形態を、予め設定した曲面内に発生させることを目指したものである。解析は計算時間の短縮のため対象条件を考慮して、1/4の領域を対象として解析を行った。シェル厚は0.1mとしている。解析の結果、図7に示すように支持条件

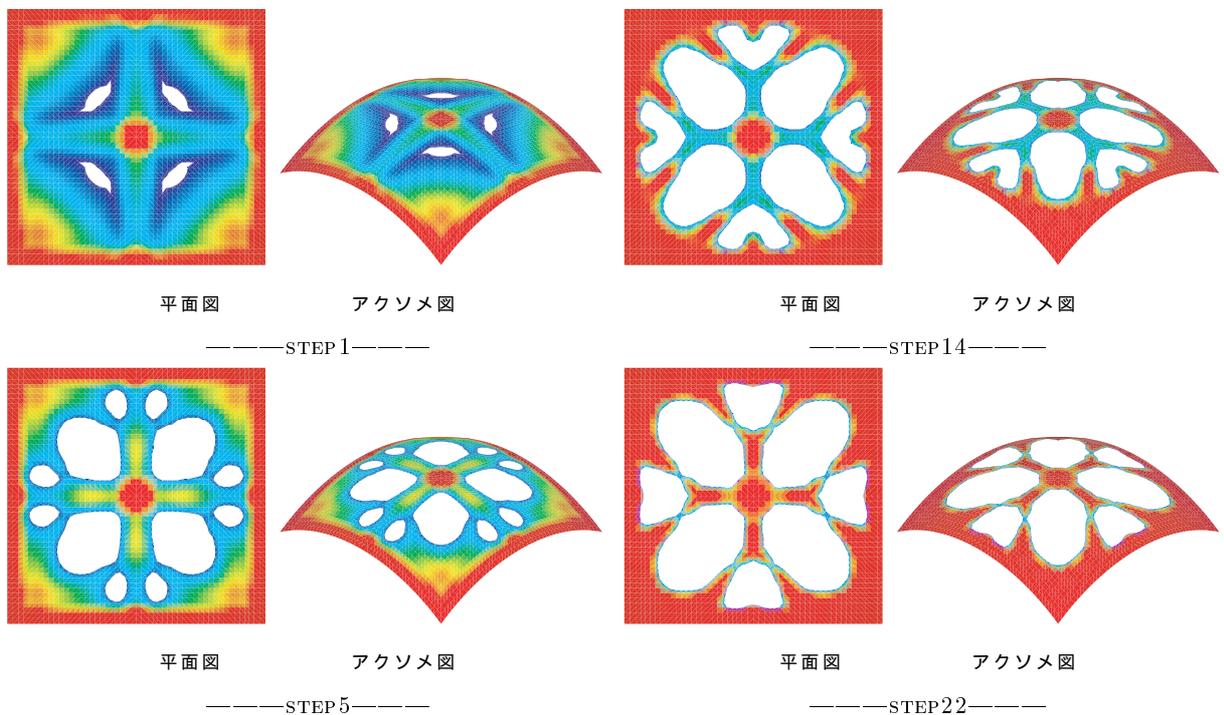


図7 変位敏感数による進化過程

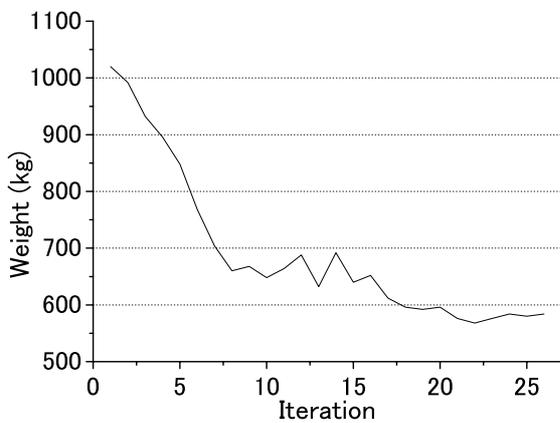


図8 総重量の推移

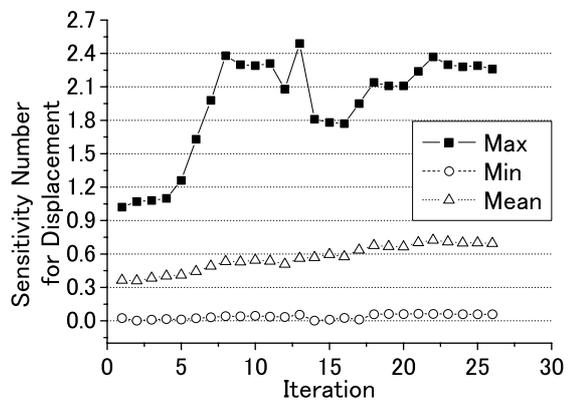


図9 敏感数の推移

を変えることで得られる形態がピン支持球形シェル解析例の図3とは大きく異なるものとなる。支持部がローラーの為、支持点の広がりを抑えるのにシェルのエッジ部分はタイビームの働きをして、削除されず、最終形態では、力は頂点からシェルの縁に向かって流れ、エッジ部分を介して支持点へと滑らかに流れる枝分かれした経路を辿って伝達されている様子が分かる。図8,9に示されているように、進化に伴って重量が減少するが、敏感数の平均値は上昇することが分かる。応力が構造体内で均一に分布し、省材料の構造体の中でより高い剛性を持つ形態が得られる。

4 実設計への適用

ベルギー、アントワープ市文化フォーラムのコンペ案(設計:伊東豊雄,構造:新谷真人)はトーラス曲面を基本的なモジュールとしたもので、その概観図を図10に示す。

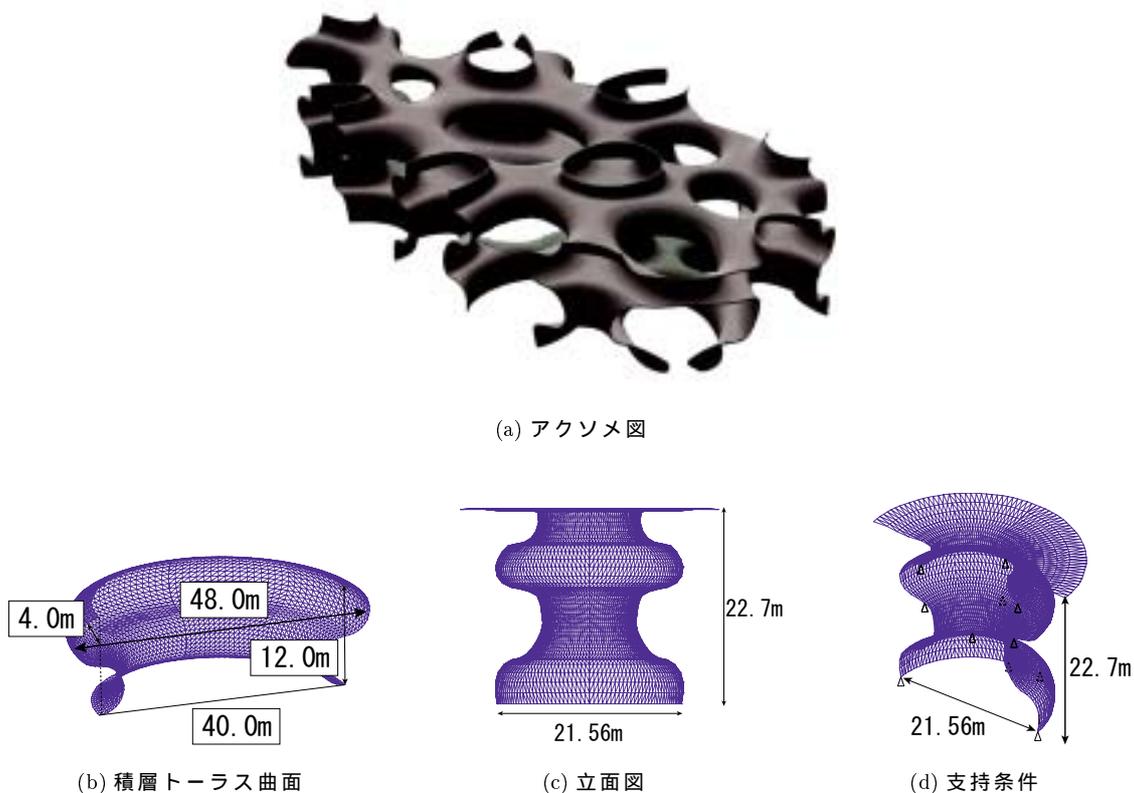


図10 ゲント市文化フォーラム

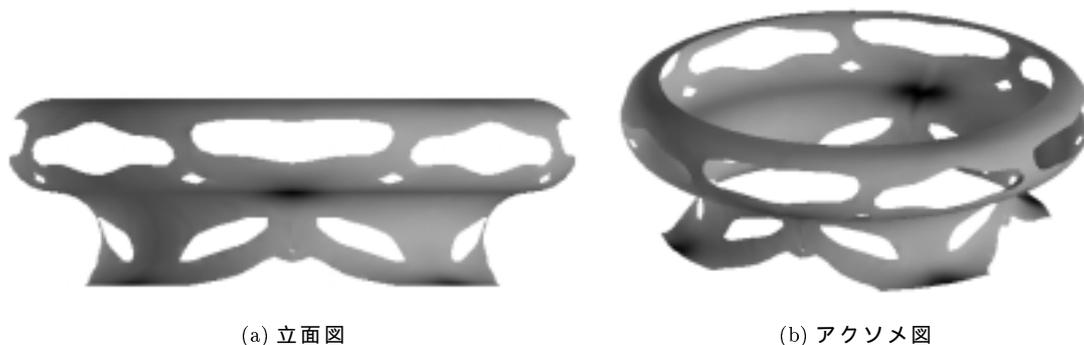


図11 von Mises 応力(膜応力+曲げ応力)による進化結果

図 11 に示した結果は、図 10(b) に示す積層トラス曲面に外力として、単位体積重量 23kN/m^3 とする自重を作用させ構造形態創生を行った結果である。支持条件はトラスの接続状態を勘案し、底面及び中間層をピン支持とした。形態進化は、各過程で求まる各有限要素の膜応力と曲げ応力を考慮した von Mises 応力を基準量として計算している。構造形態は各層に設けられた支持点に力を伝達する経路を示すように形成され、上層では曲げ応力に対応するように曲面の頂部に開口部が設けられ、下層では膜応力の流れを表わすような円弧を描く楕円形の開口部が形成されている。また、図 10(c),(d) に、同図 (a) で示したゲントフォーラム全体から抽出した解析モデルの詳細を示す。図 11, 12 に示したのは、この解析モデルに対し外力として、単位体積重量 23kN/m^3 とする自重を作用させ形態解析を行った結果である。支持部周辺で応力が集中するため要素が残され、また曲面の頂部で要素の削除が進んでいることが分かる。

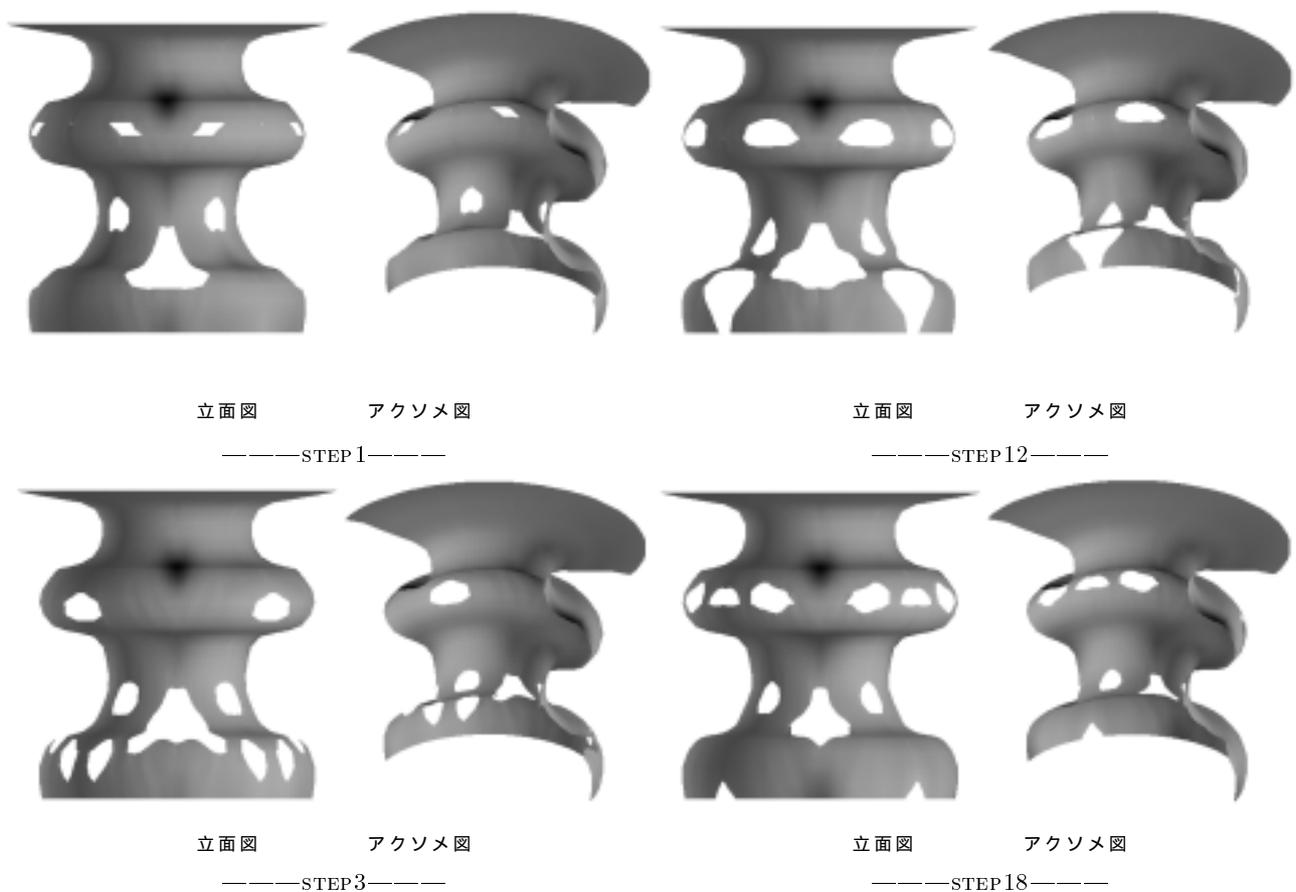


図 12 von Mises 応力 (膜応力+曲げ応力) による進化結果

5 むすび

本研究では応力と変位を進化の基準値として、曲面形状に拡張 ESO 法を適用して形態創生を行った。NURBS により曲面形状を表現することで、自由曲面から球、トラス曲面まで設計領域を設定することが可能となり、複雑な曲面形状の構造物の形態創生においても高い汎用性を有している。本手法は定められた曲面内の構造形態創生法として構造システムを提案するデザインツールとして利用することができる。

参考文献

- 1) Y.M.Xie,G.P.Steven , Evolutionary Structural Optimization , Springer-Verlag,1997.
- 2) 大森博司 , 崔昌禹 , 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生. 日本建築学会構造系論文集, 第 539 号, pp87-94, 2001
- 3) 大森博司 , 崔昌禹 , 拡張 ESO 法による構造形態の創生 多目的適応型構造とシェル構造への適用. 日本建築学会構造系論文集, 第 552 号,pp109-116,2002
- 4) E.Crevera,J.Trevelyan, Evolutionary Structural Optimization based on Boundary Representation of NURBS , Computers and Structures,Vol.83,No.23-24, pp1917-1929, 2005

空間構造物における冗長性評価手法に関する基礎的研究

船橋 健吾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, funahashi@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

世界貿易センタービルの崩壊をきっかけに冗長性 (Redundancy) という言葉が一般的に認知されるようになり, その重要性が認識されるようになった。近年では, 多様な意匠性への要求にこたえるために, 構造形態は多様化する一方で, 計算速度, 解析技術の向上により詳細な条件を入力して構造解析を行うことができるようになった。しかし, 構造形態や構造システムの多様化に伴い, 構造解析により得られた解の良否の判断が困難となり, 更に解析技術の向上と経済性への要求から設計外力に対する構造安全余裕度の小さな構造物が設計されることが多いのが現状である。

大勢の人を収容する空間構造物は, 少ない使用材料で大きな空間を覆うことを目指して設計されており, また, 人に感動を与えるような空間は本質的に冗長さとは対立する傾向にあるとも考えられるため, このことが空間構造物から構造冗長性を奪う要因になると考えられる。

本研究では, 特に空間構造物の冗長性の定量的評価の方法を吟味し, 空間構造物で考慮すべき個材座屈や全体座屈を含めた冗長性の評価手法の提案を試みる。

2 損傷に対する強さを決定する概念

万が一, 構造物の一部が損傷を受けても構造物が全体的に崩壊しない能力に関連する概念として, 冗長性 (Redundancy) の他に, ロバスト性 (Robustness) と脆弱性 (Vulnerability) をあげることができる。冗長性は, 構造形態, 部材サイズ, 材料性能, 接合形式, 荷重の位置や大きさなどの緒元が限定された状態における構造物の損傷に対する強さ^[1], 脆弱性は, 任意の損傷に対して構造物が受ける影響の度合い (Damage Tolerance の逆数)^[2], ロバスト性は, 任意の損傷に対して構造物が機能的な要求を損なうことなく健全である強さ^[3]を意味するものとしてそれぞれ整理できる。これらの概念の関係性をまとめれば, 図1のようになると考えられる。

したがって冗長性を考慮した設計とは, ある程度の部材や部分の損傷や崩壊を許容でき, 図1に示すように構造物の形状が同じでも荷重条件が異なる場合, あるいは部材性能が異なる場合 (Redundancy 1, Redundancy 2, ..., Redundancy n) について損傷に対する強さを明確にした設計方法として位置づけられる。

構造物により支配的となる荷重はある程度決まっていると考えられるため, 構造物は, 形状, 部材配置, 部材サイズ, 荷重などの各条件に対応できる強さ, 余裕度を持つことが求められる。本研究では, このような考え方に基づいて, 構造物が弾性範囲内で挙動する場合に対する冗長性の定量的な評価手法の提案とその妥当性の検討を行う。

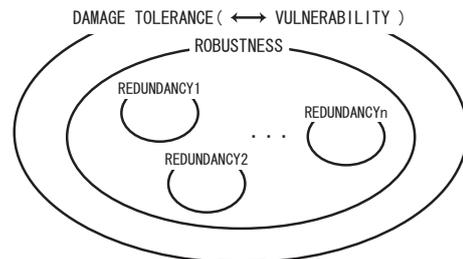


図1 脆弱性, ロバスト性, 冗長性の関係

3 冗長性の定量化の方法

3.1 手法の概要

ここでは, Pandeyら^[4]の感度解析に基づく手法を利用して構造冗長性を評価する。それによれば, 与えられた構造, 荷重条件における冗長性は, 構造要素の鈍感度に比例し, 逆に敏感度に反比例する。すなわち,

$$\text{Generalized Redundancy} \propto \frac{1}{\text{Response Sensitivity}} \quad (1)$$

ここに, Generalized Redundancy は, 冗長性を表す。

構造物の一部, または要素が一定の損傷を受けた時, 構造要素の応答は, 損傷の度合いに応じて変化する。このとき, 明らかに感度の小さい要素は損傷を受けにくく, したがって, 冗長性があるものと考えられる。

式(1)に加え、さらに構造要素の大きさを考慮して、構造物の冗長性 (Redundancy) を次のように定義できる。

$$\text{Redundancy} \propto \frac{V_i}{\text{Sensitivity}} \quad (2)$$

V_i は、 i 番目要素の体積である。

式(2)に基づき、第 i 要素の第 j 要素に対する冗長性を以下のように定義する。

$$GR_j = \frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{V_i}{S_{ij}} \right]}{V} \quad (3)$$

$j = 1, 2, 3, \dots$, damage parameter

式(3)を基準化して、

$$GNR_j = \frac{GR_j}{\max(GR_1, GR_2, \dots, GR_n)} \quad (4)$$

ここに、 GR_j は第 j 要素が損傷を受けた時の冗長性、 GNR_j は第 j 要素が損傷を受けた時の基準化された冗長性、 S_{ij} は j 要素が損傷を受けたときの i 要素の応答感度を表し、 V_i 、 n 、 V は、 i 要素の体積、要素数、構造物の全体積を表す。

本研究では、 n 個の要素で成り立った構造体の第 i 番目要素の断面積 A_i の変化を部材の損傷と仮定する。冗長性評価式(3)の感度 S_{ij} は、構造物の特質に応じて決められるものである。通常、部材の応力度や変位を評価関数として感度を求める。これは、連続体シェル、離散的な構造物のどちらに対しても適用可能である。

3.2 冗長性の定量化

空間構造物では個材座屈や全体座屈を考慮した冗長性評価を行うことが必要である。本研究では許容応力度の概念を用いて個材座屈を考慮した冗長性評価手法を、また、座屈前線形の仮定が成立するような全体座屈を考慮した評価手法を提案する。

3.2.1 個材座屈の考慮

許容応力度に対する応力度を断面積 A_j で偏微分することで、式(3)中の感度 S_{ij} を次のように定義する。

トラス要素(曲げが発生せず、軸力のみで抵抗)

$$S_{ij} = \frac{\partial}{\partial A_j} \left(\frac{\sigma_{ni}}{f_{ni}} \right) \quad (5)$$

ここに、 σ_{ni} は軸方向の応力度、 f_{ni} は許容応力度を表す。

フレーム要素(曲げ、軸力で抵抗)

$$S_{ij} = \frac{\partial}{\partial A_j} \left(\frac{\sigma_{ni}}{f_{ni}} + \frac{\sigma_{bi}}{f_{bi}} \right) \quad (6)$$

ここに、 σ_{ni} は軸方向の応力度、 σ_{bi} は曲げによる応力度、 f_{ni} は軸方向の許容応力度、 f_{bi} は許容曲げ応力度を表す。

以上のような考え方によれば、トラス要素に対しては式(5)、フレーム要素に対しては式(6)をそれぞれ式(3)あるいは式(4)に用いることにより、個材の座屈を考慮した冗長性を求めることができる。

3.2.2 全体座屈の考慮

構造物が損傷を受けた時の線形固有値(座屈荷重)の変化度から全体座屈に対する冗長性の評価を試みる。座屈荷重は、次の固有値問題を解くことによって求めることができる。

$$([K_L] + \mu[K_\sigma])\{\phi\} = \mathbf{0} \quad (7)$$

ここに、 $[K_L]$ は線形剛性マトリクス、 μ は座屈固有値、 $[K_\sigma]$ は幾何剛性マトリクス、 $\{\phi\}$ は固有モードを表す。式(7)を断面積 A_i で偏微分し、左から固有モードの転置ベクトル $\{\phi\}^T$ をかけて式(7)を考慮して整理すると、座屈荷重の断面積に関する偏微分、座屈荷重係数感度は次のように定義できる。

$$\frac{\partial \mu}{\partial A_i} = - \frac{\{\phi\}^T \left(\frac{\partial [K_L]}{\partial A_i} + \mu \frac{\partial [K_\sigma]}{\partial A_i} \right) \{\phi\}}{\{\phi\}^T [K_\sigma] \{\phi\}} \quad (8)$$

ここで、各部材の断面の違いを考慮するため、初期断面積 A_i に対して欠損断面積を ΔA_i 、座屈固有値の変化を $\Delta \mu$ とし、次のように座屈荷重係数感度を定義しなおす。

$$\lim_{\frac{\Delta A_i}{A_i} \rightarrow 0} \frac{\Delta \mu}{\left(\frac{\Delta A_i}{A_i} \right)} = A_i \lim_{\Delta A_i \rightarrow 0} \frac{\Delta \mu}{\Delta A_i} = \frac{\partial \mu}{\partial A_i} A_i \quad (9)$$

式(9)の座屈荷重係数感度を用いて冗長性を次のように定義する。冗長性は式(1)と同様に損傷に対する影響度に反比例すると考える。

$$GRB_i = \frac{1}{\frac{\partial \mu}{\partial A_i} A_i} \quad (10)$$

ここに、 GRB_i は第 i 部材が損傷を受けた時の全体座屈に関する冗長性を表している。

4 冗長性評価手法の検討

本章では、以上で定義した冗長性の定量化法の妥当性について簡単な空間構造の例題を通して検討する。

4.1 星型ドームモデル

図2に示すような星型ドームモデルを用いる。支持条件は境界でピン支持、荷重条件は全面分布荷重と頂点集中荷重、使用部材はトラス要素とフレーム要素について雪荷重を考慮した短期荷重時 $2.6kN/m^2$ を想定して断面算定を行った結果を用いた。解析条件の詳細を表1に示す。

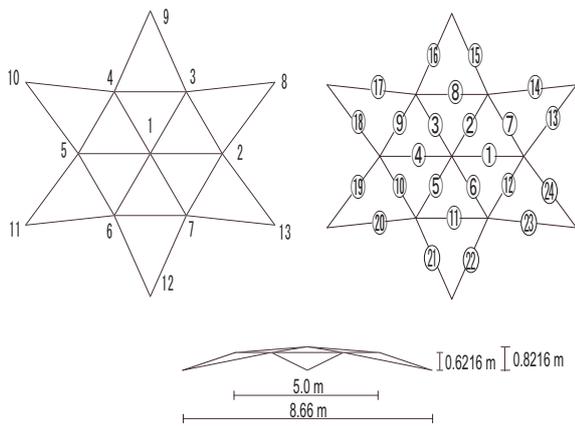


図2 星型ドームモデル(左: 節点番号, 右: 部材番号)

表1 解析条件

形状	長辺10m, 短辺8.66m	
支持条件	周辺ピン支持	トラス要素: ピン接合
接合条件		フレーム要素: 剛接合
荷重条件	0.6kN/m ² 鉛直等分布荷重 0.6kN/m ² 頂点集中荷重	
材料定数	2.06 × 10 ⁴ kN/cm ² ν = 0.3	
使用材料	部材1-12	φ 60.5 × 2.3
	部材13-24	φ 76.3 × 2.8

4.2 トラス構造としての検討

それぞれの荷重条件における個材座屈, 1次の全体座屈を考慮した解析結果について以下の表2, 3にまとめる。

全面分布荷重時の荷重がドーム全面に分布している場合, 表2に示すように, 荷重伝達経路が構造物の荷重点と支持点を結ぶドーム経線方向に配されている。部材1から6, 及び13から24の冗長性(GNR)が0.499, 0.417と相対的に小さくなる。ドームの形状を保つための部材7から12は冗長性(GNR)が1.0となり破断などの大きな損傷を受けない限り構造物に与える影響は比較的小さいことがわかる。全体座屈を考慮すると, 図3

からわかるように最小の座屈荷重に対応する座屈モードが頂点の大きく変位するモードなので, 変化の小さい部材13から24の冗長性(GRB)が67.92と大きいのに対し, 部材7から12の冗長性(GRB)が小さくなるとともに, 部材1から12の冗長性(GRB)が0.344と小さくなるのがわかる。

頂点集中荷重の場合については, 表3に示すように, 応力の集中する部材1から6の冗長性(GNR)は, 0.134と小さく, また個材座屈を考慮することで, 応力が1.894 kN/cm²と大きいにもかかわらず発生応力度が引張であるため, 部材7から12の冗長性(GNR)が0.758と大きくなるのがわかる。全体座屈に関して, 分布荷重時と同様の変形モード(変形は全面荷重時と異なる)であり, 応力の非常に小さい部材13から24(GRB=9267.5)が損傷に対してほぼ影響を受けないことが示されている。

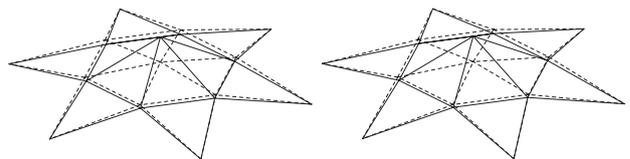


図3 分布荷重時変形モード 図4 集中荷重時変形モード

表2 分布荷重時各部材の応力度, 冗長性分布(-: 圧縮)

部材	部材1-6	部材7-12	部材13-24
応力度(kN/cm ²)	-1.610	-1.755	-1.887
許容応力度(kN/cm ²)	-6.325	-6.366	-6.345
冗長性GNR (4)式	0.499	1.000	0.417
冗長性GRB (10)式	0.344	0.283	67.92

表3 集中荷重時各部材の応力度, 冗長性分布(-: 圧縮)

部材	部材1-6	部材7-12	部材13-24
応力度(kN/cm ²)	-2.485	1.894	-0.328
許容応力度(kN/cm ²)	-6.325	15.68	-6.325
冗長性GNR (4)式	0.134	0.758	1.000
冗長性GRB (10)式	0.458	0.453	9267.5

4.3 フレーム構造としての検討

全面分布荷重の場合については, 表4に示すように, 応力度に大差はなく, 全部材の冗長性(GNR)の値にも大きな差がみられないことから, この形状, 荷重条件のときは全体として冗長性のバランスがとれた状態であるといえる。全体座屈を考慮した結果をみると周

辺支持部の部材13から24が大きく変位するモードであることから、当該部材の冗長性 (GRB) が0.821と小さくなるのがわかる。

頂点集中荷重のときは、表5に示すように、曲げを含むことで部材1から6の応力がトラスの場合と比べて大きくなることから、損傷に対する影響が大きくなるため、対応部材の冗長性 (GNR) が0.009と相対的に非常に小さくなった。全体座屈を考慮した結果、トラス要素と同様に荷重のかかっている頂点付近の冗長性が非常に小さい。上部がねじれるようなモード (図6) であり、支持部周辺部材13から24の損傷の影響を受けやすく、トラスの場合に比べて冗長性が7.699と特別大きな値とならないことがわかる。

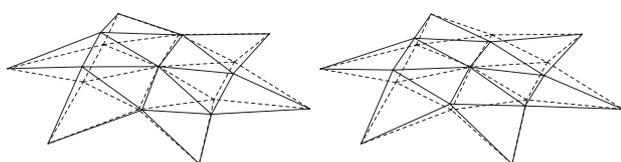


図5 分布荷重時変形モード 図6 集中荷重時変形モード

表4 分布荷重時各部材の応力度, 冗長性分布(－: 圧縮)

部材	部材1-6	部材7-12	部材13-24
軸方向応力度(kN/cm^2)	-1.663	-1.689	-1.879
曲げ応力度(kN/cm^2)	-0.493	-0.118	-0.279
冗長性GNR (4)式	0.804	0.609	1.000
冗長性GRB (10)式	5.954	1.548	0.821

表5 集中荷重時各部材の応力度, 冗長性分布(－: 圧縮)

部材	部材1-6	部材7-12	部材13-24
軸方向応力度(kN/cm^2)	-2.134	1.504	-0.345
曲げ応力度(kN/cm^2)	-2.774	0.259	-0.601
冗長性GNR (4)式	0.009	0.036	1.000
冗長性GRB (10)式	0.184	3.770	7.699

4.4 考察

本手法により、弾性範囲内で個材座屈 (圧縮, 引張) を考慮した評価と全体座屈を考慮した評価を行った。しかし、感度解析では感度の正負は無視し、影響の大きさのみを考慮しているが、部材の損傷に対して応力が大きくなる部材もあれば、小さくなる部材もある。その点で応力が小さくなる部材を過大評価してしまう問題が残されている。

5 余裕度の考慮

許容応力度と実応力度の差, つまり余裕応力度に着目し, これと許容応力度との比を余裕度 (Reserve Ratio) として, 生じている応力に対して応力の余裕がどの程度あるのかに着目した検討を行った。

前章と同様, 星型ドームをトラス構造とした場合とフレーム構造とした場合について検討を行う。図2に示されるシステムの構造部材は1から6, 7から12, 13から24の3つのグループに分けることができる。そこでわかりやすいように, 部材1から6をA, 部材7から12をB, 部材13から24をCグループとする。各グループのそれぞれ一つの部材 (1, 7, 13) が損傷したときの余裕度の推移を図7, 8にまとめる。断面積を $1/100cm^2$ ずつ減少させ, 損傷部材が初期断面から $1/3$ の断面積になるまで線形で変化すると仮定し, 縦軸を余裕度, 横軸を初期断面積に対する損傷断面積の割合として表す。

損傷に対して大きく推移し, 最終的に余裕度が0となっている部材が損傷を仮定している部材である。また, 図中の破線は, 最終損傷時の最小余裕度の値を示している。下の図から, トラスシステム, フレームシステムともに, 損傷に対する余裕度の推移が似通ったものであり, 荷重伝達経路は接合条件には大きく寄与しないことがうかがえる。また各グラフの余裕度の推移の広がり, 損傷に対する影響度の度合い (感度) に対応している。ここで注目すべきものは, 部材13が損傷を受ける時に損傷が大きくなると部材7の余裕度が小さくなるということである。つまりCグループの部材が損傷を受けると, Bグループの部材の余裕度についても注意が必要であることがわかる。

感度解析により求めた冗長性の小さな部材に加えて, 余裕度の評価による注意すべき部材を抽出することで構造物の弱点となりうる場所を特定することが可能であり, 余裕度の検討を行うことで感度解析により構造物の注意すべき部材を特定することができると考えられる。

6 大規模空間構造への適用

$50m \times 50m$ の矩形境界を持つ平面を剛接合単層ラチスシェルで覆う場合について考える。支持条件は周辺ピン支持, 荷重条件は鉛直等分布荷重, 使用材料として $\phi 190.7 \times 5$ の単一種類の鋼管をすべての部材に用いた。Model 1, Model 2は, 曲面の振動1次モード, 3

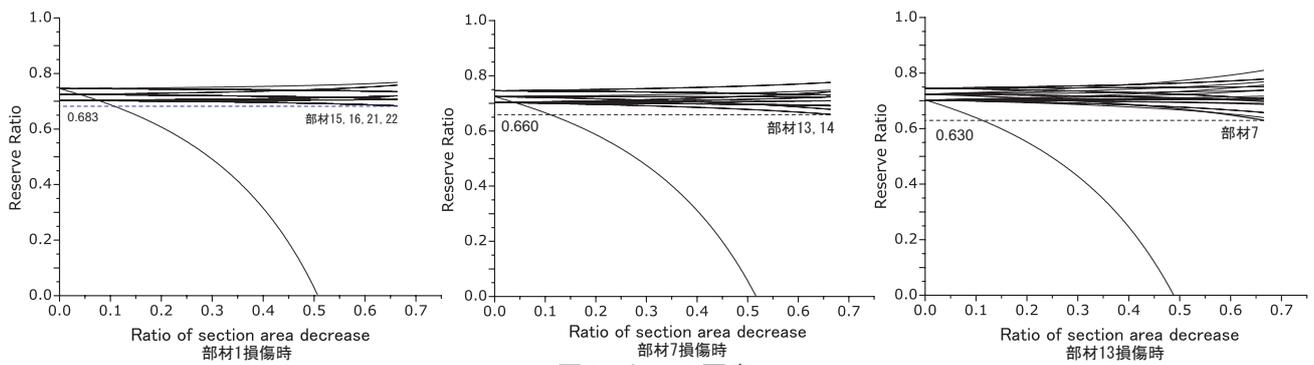


図7 トラス要素

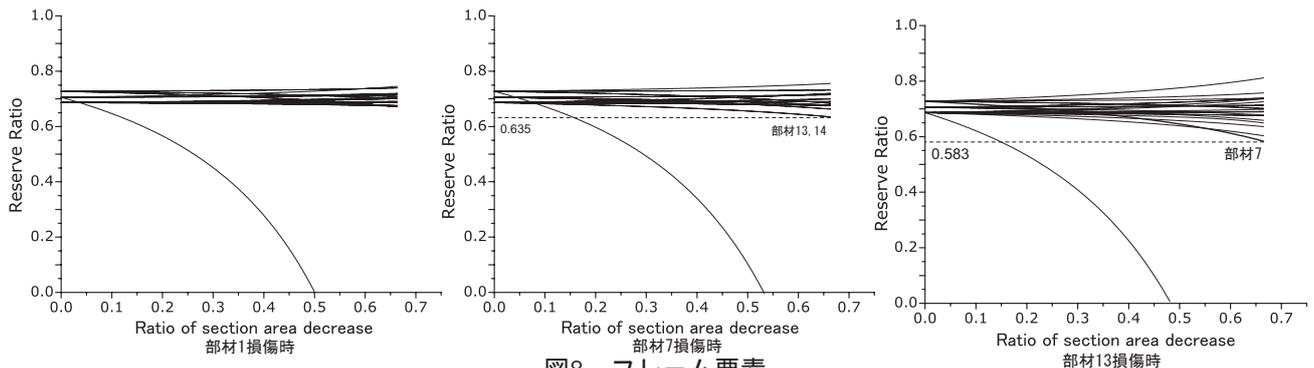


図8 フレーム要素

次モードを元にひずみエネルギーが小さくなるように決定した形態である^[5]。

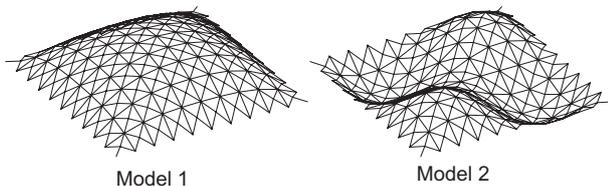


図9 解析モデル

表6 解析条件

形状	50 × 50m 4方向格子
支持条件・接合条件	周辺ピン支持 剛接合
荷重条件	0.8kN/m ² 鉛直等分布荷重
材料定数	2.06 × 10 ⁴ kN/cm ² ν = 0.3
使用材料	φ 190.7 × 5

一般的なドーム形状のModel 1は、荷重に対して曲げはほとんど発生せずほぼ圧縮力で抵抗する形態である。個材座屈を考慮した解析結果を図10、全体座屈を考慮した結果を図13に示す。分布図の太い線は冗長性が大、応力が大であることを示している。ドーム形状では、荷重伝達経路が荷重点と支持点を結ぶ線上にあり、同心円状に配置された部材は比較的小さな応力しか発生しないため、冗長性が相対的に大きくなる。また中央部と端部に冗長性の小さな部材が分布していることがわかる。また、全体座屈に対して座屈時に大き

く変形する部材の冗長性が小さく、変化しない部分では損傷を受けても座屈値に与える影響が少ないことがわかる。

凹凸を含むModel 2は、荷重に対して曲げと軸力により抵抗する形態である。個材座屈、全体座屈を考慮した冗長性評価手法を適用した。個材座屈を考慮した解析結果を図14、全体座屈を考慮した結果を図19に示す。曲げが大きく、軸方向の応力の比較的小さな凹凸の境界上付近で相対的に冗長性の大きな部材が多く分布する。凹の引張力で抵抗する部分の損傷は全体座屈に全く関係しない。そのため凸の大きく変位する部分の冗長性が小さい。構造形態の違い、荷重に対する抵抗形態の違いにより冗長性の相対的な分布に大きな違いがあることがわかる。

7 結

本研究では、従来定量化が試みられることの少なかった構造冗長性を部材断面欠損に対する弾性範囲内での力学応答量の感度により捉えることを試み、この考え方を形態抵抗構造物である空間骨組み構造に適用し、評価手法の特性について検討を行った。その結果、構造形態、荷重条件、接合条件など諸条件によって冗長性の違いがあることが確認された。また感度という観点から個材座屈や全体座屈を考慮した部材間の冗長性

評価を定量的に行うことを試みた。本手法を用いて支配的な条件の構造物の部材間の相対的な冗長性の分布を明らかにすることにより、構造物内の弱点となりうる部材を特定し、部材設計を検討することで構造全体としての高い冗長性を有する構造物を設計することができると考えられる。しかし、本研究の手法は、弾性範囲に限られたものであり、構造物の最終的な崩壊を考えるためには、非線形性を考慮することが必要である。また、相対的に冗長性の小さい、弱点となる部材を補強（断面修正）することも可能であるが、一部の補強が全体の挙動に影響を与えることから、その補強が必ずしも構造物全体の冗長性につながるとはいえないという側面を考慮に入れる必要がある。

構造物全体の、大変形や部材の塑性化を伴う非線形性を考慮した上での冗長性の評価に向けた方法の研究開発が望まれる。

参考文献

- 1) Dan M. Frangopol, Minoru Iizuka, Keito Yoshida, Redundancy measure for design and evaluation of structural systems, *ASME, Safety and Reliability*, Vol. 2, pp. 157-163, 1991
- 2) Niels C. Lind, A Measure of Vulnerability and Damage Tolerance, *Reliability Engineering and System Safety*, 48, pp. 1-6, 1995
- 3) Xin Wu, David I. Blockley, Norman J. Woodman, Vulnerability of Structural Systems Part2: Failure Scenarios, *Civil Engineering Systems*, 10, pp. 319-333, 1993
- 4) P. C. Pandey, S. V. Barai, Structural sensitivity as a measure of redundancy, *Journal of Structural Engineering*, 3, pp. 360-364, 1997
- 5) 浜田英明, 江畑和弘, 大森博司, 佐々木睦朗, 自由曲面の力学的特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 853-854, 2004

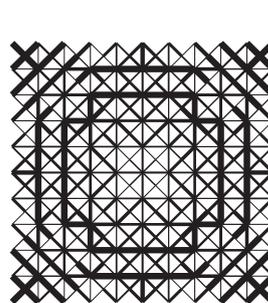


図10 冗長性GNR分布

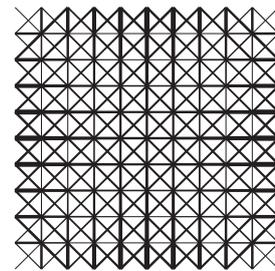


図11 発生応力度/許容応力度

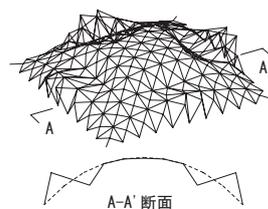


図12 座屈変形モード

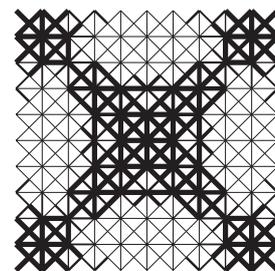


図13 冗長性GRB分布

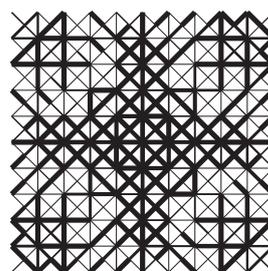


図14 冗長性GNR分布

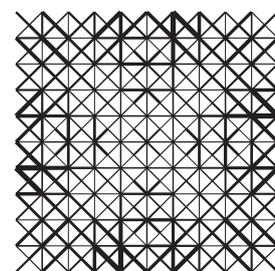


図15 発生応力度/許容応力度

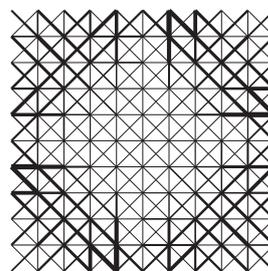


図16 軸方向応力/許容応力度

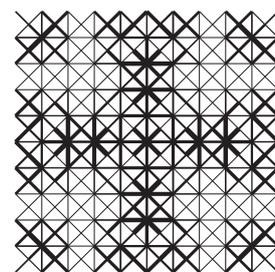


図17 曲げ/許容応力度

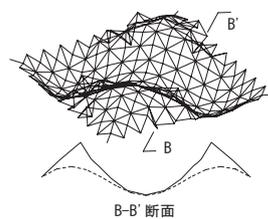


図18 座屈変形モード

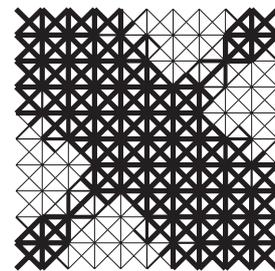


図19 冗長性GRB分布

張力構造の形態解析に関する一方法と設計支援システム

森哲也¹⁾, 矢山正大²⁾, 本間俊雄³⁾

- 1) 鹿児島大学理工学研究科建築専攻建築計算工学研究室, tetsuya@com.aae.kagoshima-u.ac.jp
- 2) 鹿児島大学理工学研究科建築専攻建築計算工学研究室, yayama@com.aae.kagoshima-u.ac.jp
- 3) 鹿児島大学工学部建築学科, 助教授, 工博, honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1 はじめに

張力構造である膜構造の設計は、一般的に次の手順をとる¹⁾³⁾。まず意匠設計者のイメージする形状を基に、膜構造材に境界条件や初期張力を与え、設計原型曲面を設定する。次に設計原型曲面に基づき膜材の裁断図解析を実施し、工場で製作された帯状の平面膜材の立体裁断を行う。裁断された膜材は、裁断線に沿って縫合・溶着し境界条件や初期張力を与えることで設計曲面を得る。また得られた設計曲面(初期形態)に、静的荷重さらに必要に応じて動的荷重を想定した応力・変形解析へと移行する。しかし、膜構造物の設計は、膜材の織布特性や立体裁断の内容等の条件に左右され、得られた設計曲面は想定した形状や応力状態を満たさない場合がある。ここに、正確でシステム化された裁断図決定に関する研究が重要となる⁴⁾⁹⁾。

本論では、上述した膜構造の設計手順を踏まえ、系全体の座標値を未知量とした座標仮定の有限要素法による張力構造の数値解析法⁸⁾⁹⁾を示し、設計支援システムの考え方を記述する。ここで示す座標仮定の有限要素法と従来の変位法との相違は、平面状に置かれた自然状態(無応力状態)の張力材を基準に、直接変形後の座標値を未知量とする点にある。この座標仮定による有限要素法は、一般構造材である骨組や連続体要素と併用した張力構造物の解析にも適用できる。

ここで採用する解析モデルは、鞍型曲面の膜構造形態とする。まず、設計曲面の①応力状態、②コンプライアンス最小化、③想定形状を目標として裁断図解析を行う。次に、得られた裁断線を基に膜材に構造条件を与え設計曲面を構成する。この設計曲面に外力として静的・動的荷重を想定しその力学的挙動を示す。

さらに、本解法を用い設計支援システムの考え方をまとめる。システムの実現により意匠設計者と構造設計者の双方が円滑に張力構造物の最終形状を決定できる。本論では、システムの構成や解析の流れを説明し、試作システムを提示する。

2 構造モデルの支配方程式 (平衡方程式)

仮想仕事の原理により、ひずみ γ を変形後の直交直線座標 \mathbf{X} で表現すると平衡方程式は次のように導かれる。

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{f}, \lambda) = \int_{\Omega} \delta\gamma(\mathbf{X})^T \boldsymbol{\tau}(\mathbf{X}) d\Omega - \delta\mathbf{X}^T \lambda \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで、 $\boldsymbol{\tau}$: 応力, \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。式(1)は従来の変位ではなく、変形後の座標値を未知量とする離散化のための基礎式である。ひずみ γ と変形後の座標 \mathbf{X} の関係及び、ひずみ増分 $\delta\gamma$ と変形後の座標増分 $\delta\mathbf{X}$ の関係式は次式のように与えられる。

$$\gamma = \tilde{\mathbf{B}}(\mathbf{X}) \mathbf{X} + \mathbf{C} \quad (\mathbf{C}: \text{定数ベクトル}), \quad \delta\gamma = \tilde{\mathbf{B}}^*(\mathbf{X}) \delta\mathbf{X} \quad (2)$$

式(2)のひずみ-変形後の座標関係に次のGreenひずみを用いる。

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2} \left(\delta_{\alpha\beta} \frac{X_{\alpha}}{x_i} \frac{X_{\beta}}{x_j} - \delta_{ij} \right) \quad (i, j, \alpha, \beta = 1, 2, 3) \quad (3)$$

ここで、 x_i, X_i : 各々変形前と変形後の直交直線座標系の座標成分, δ : Kronecker's Delta である。なお離散化式を解くための接線剛性行列 \mathbf{K}_t は次式で与えられる。

$$\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} = \mathbf{K}_t(\mathbf{X}) = \mathbf{K}_G(\mathbf{X}) + \mathbf{K}_S(\mathbf{X}) \quad (4)$$

ここで、 $\mathbf{K}_G, \mathbf{K}_S$ は各々幾何剛性行列と線形+大変位剛性であり、次式で与えられる。

$$\mathbf{K}_G(\hat{\mathbf{X}}) = \int_{\Omega} \frac{\partial \tilde{\mathbf{B}}^{*T}}{\partial \hat{\mathbf{X}}} \boldsymbol{\tau} d\Omega, \quad \mathbf{K}_S(\hat{\mathbf{X}}) = \int_{\Omega} \tilde{\mathbf{B}}^{*T} \frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial \hat{\mathbf{X}}} d\Omega \quad (5-a, b)$$

3 座標仮定によるケーブル要素と膜要素の離散化⁸⁾⁹⁾

平衡方程式(1)の離散化式と接線剛性行列式(4)をケーブル要素と膜要素に対して示す。未知量を安定形態における系全体の座標値 (X, Y, Z) とする。平面上の張力材は無応力状態(自然状態)で与えられ、構造条件導入後に3次元張力構造として安定化する。

3.1 ケーブル要素の場合 (トラス一次要素)

図1に示す2節点で構成するケーブル要素を設定する。 S 軸はケーブル要素1-2上にとる(xy -平面上)。ここで、通常の

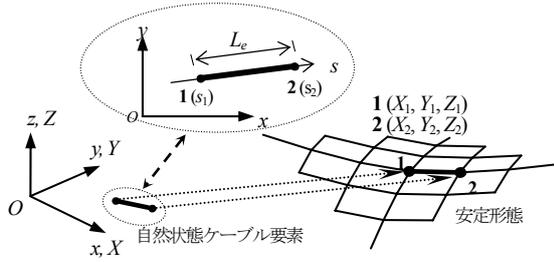


図1 ケーブル要素の自然状態と安定形態の座標関係

有限要素法による定式化の手続きに従い、ケーブル要素の安定形態の座標 (X, Y, Z) は次の一次仮定を与え、ケーブル要素の定式化を行う。

$$X = \alpha_1 + \alpha_2 s, \quad Y = \alpha_3 + \alpha_4 s, \quad Z = \alpha_5 + \alpha_6 s \quad (6)$$

α_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) は一般化座標 (未定定数) である。最終的にケーブルにおける代表要素の離散化平衡方程式は次式を得る。

$$\frac{E_e A_e}{L_e} \left(\mathbf{G}^T \mathbf{X}_e \right) \left[\frac{1}{2L_e^2} \left(\mathbf{X}_e^T \mathbf{G} \mathbf{X}_e \right) + \mathbf{C}_e \right] - \lambda \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (7)$$

ただし A_e はケーブル要素の断面積 (要素内一定), L_e はケーブル要素の部材長さ, E_e は要素のヤング係数とする。式(7)の具体的な成分は以下の通りである。

$$\mathbf{X}_e = [X_1 \quad X_2 \quad Y_1 \quad Y_2 \quad Z_1 \quad Z_2]^T$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{H} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_e = -\frac{1}{2} \quad (8a-d)$$

ケーブル要素の接線剛性行列 \mathbf{K}_{te} は次式を得る。

$$\mathbf{K}_{te} = \mathbf{K}_{Ge} + \mathbf{K}_{Se} = \frac{A_e}{L_e} \mathbf{G}^T \boldsymbol{\tau}_e + \frac{A_e E_e}{L_e^3} \mathbf{G}^T \mathbf{X}_e \mathbf{X}_e^T \mathbf{G} \quad (9)$$

3.2 膜要素の場合 (三角形一次要素)

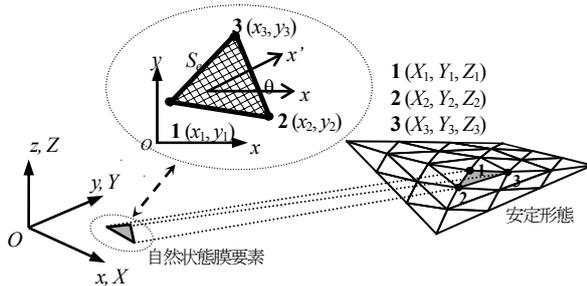


図2 膜要素の自然状態と安定形態の座標関係

図2に示すように三角形膜要素を採用する。ケーブル要素と同様に安定形態の座標 (X, Y, Z) は次の一次仮定で与え、膜要素の定式化を行う。

$$X = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y, \quad Y = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y, \quad Z = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 y \quad (10)$$

β_i ($i = 1, 2, \dots, 9$) は一般化座標である。最終的に膜材における代表要素の離散化平衡方程式は次式を得る。

$$\frac{1}{4S_e} \left(\mathbf{Q}^T \mathbf{X}_e \right) \mathbf{D}_e \left[\frac{1}{8S_e^2} \left(\mathbf{X}_e^T \mathbf{Q} \mathbf{X}_e \right) + \mathbf{C}_e \right] - \lambda \mathbf{f}_e = \mathbf{0} \quad (11)$$

ただし, S_e は要素面積, \mathbf{D}_e は構成関係行列である。各行列成分は以下の通りである。

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{b}} & \hat{\mathbf{a}} & \hat{\mathbf{c}} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{C}_e = \frac{1}{2} [-1 \quad -1 \quad 0]^T \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{a}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{a}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{a}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{b}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{b}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{b}} \end{bmatrix}, \quad \hat{\mathbf{c}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{c}} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{c}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{c}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし, $\mathbf{a} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]$, $\mathbf{b} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]$ とおくと, $\tilde{\mathbf{a}} = \mathbf{a}^T \mathbf{a}$, $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b}^T \mathbf{b}$, $\tilde{\mathbf{c}} = \mathbf{a}^T \mathbf{b} + \mathbf{b}^T \mathbf{a}$ で与えられる。なお $a_i = x_k - x_j$, $b_i = y_k - y_j$ ($i = 1, 2, 3$; $j = 2, 3, 1$; $k = 3, 1, 2$), x_i, y_i は自然状態の座標値である。膜要素の接線剛性行列 \mathbf{K}_{te} は次式を得る。

$$\mathbf{K}_{te} = \mathbf{K}_{Ge} + \mathbf{K}_{Se} = \frac{1}{4S_e} \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\tau}_e + \frac{1}{16S_e^3} \left(\mathbf{Q}^T \mathbf{X}_e \right) \mathbf{D}_e \left(\mathbf{X}_e^T \mathbf{Q} \right) \quad (14)$$

3.3 離散化平衡方程式と接線剛性方程式の評価

具体的な代表要素 e のケーブルと膜の離散化平衡方程式(7), (11)、接線剛性行列(9), (14)は同形式で得られ、安定形態における系全体の座標値を直接未知量とする。これらの式の成分をみると、ケーブル・膜要素共に自然状態の直交直線座標における位置に依存しない(ケーブル要素の場合:要素長さ、膜要素の場合:要素面積と節点間の相対距離)。また代表要素の未知量と系全体の未知量が同じ全体座標で与えられるため重ね合わせの際、座標変換なしに全体座標値を求める関係式が構成できる。この関係式において、幾何剛性項のみの利用により、張力比を与えた線形状解析も可能である。また応力状態・仕事量最小化・形状等の目標を指定し、何らかの最適化手法を利用すれば裁断図情報が得られる。さらにこの裁断図情報を用い、静的あるいは動的に対する応力・変形解析へと進められる。

4 張力構造の数値解析例

前節までの離散化定式化を用い、鞍型構造モデルを例に膜構造の裁断図解析を行う。さらに、得られた裁断図に構造条件を導入し設計曲面を得、動的荷重を想定した解析へと移行する。

4.1 問題の定式化

[最適化問題①] 設計曲面における膜応力指定の最適化を考える^{7),11)}。設計曲面の最適化対象要素における膜応力 $\boldsymbol{\sigma}$ と想定膜応力 $\boldsymbol{\sigma}_0$ との差の2乗和を目的関数とする次の問題を設定する。

$$\text{Minimize } f(\mathbf{x}^*) = \sum_{e=1}^m \frac{1}{2} (\boldsymbol{\sigma}_e - \boldsymbol{\sigma}_{e0})^T (\boldsymbol{\sigma}_e - \boldsymbol{\sigma}_{e0}) \quad (15)$$

ここで、 m : 対象となる膜材の総膜要素数、 \mathbf{x}^* : 対象となる膜材の自然状態における節点座標値情報(設計変数)である。

[最適化問題②] 最適化指標には、外力作用時(静的)の仕事量(コンプライアンス)を用いる。コンプライアンス C_{om} は、外力 \mathbf{f}^* の作用時における外力仕事であり、次式で与えられる^{12),13)}。

$$C_{om} = \Delta \mathbf{X}^T \mathbf{f}^* = \sum_{e=1}^m \Delta \mathbf{X}_{e,g} \mathbf{K}_{e,e} \mathbf{X}_e \quad (16)$$

ただし、 $\Delta \mathbf{X}$: 安定形態からの節点移動量ベクトルである。 C_{om} の最小化を行う事により、作用外力に対する変形量を最小化する。膜応力に関する制約条件を与え、 C_{om} を最小化する次の問題を設定する。

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & C_{om} = C_{om}(\mathbf{x}^*) \\ \text{subject to } & \boldsymbol{\sigma}^L \leq \boldsymbol{\sigma}_e \leq \boldsymbol{\sigma}^U \quad (e=1,2,\dots,m) \end{aligned} \quad (17a,b)$$

式(17b)は応力の上下限値を既定している。

[最適化問題③] 設計者がイメージする設計原型曲面と実際に得られる釣合曲面との偏差量を最小化する以下の問題を考える。設計原型曲面は、幾何剛性項のみの線形形状解析により形状を決定する。最適化対象とする釣合曲面の全体系での座標値 \mathbf{X} と設計原型曲面座標値 \mathbf{X}_0 との差の2乗和を目的関数とする¹¹⁾。

$$\text{Minimize } f(\mathbf{x}^*) = \sum_{e=1}^n \frac{1}{2} (\mathbf{X}_e - \mathbf{X}_{e0})^T (\mathbf{X}_e - \mathbf{X}_{e0}) \quad (18)$$

ここで n : 対象となる総節点数である。式(18)は形状指標のみの目的関数である。従って得られる釣合曲面は目標形状を満足しても、構造的釣合状態を満たさない場合が想定される。ここに制約条件として次式を与える。

$$\boldsymbol{\sigma}^L \leq \boldsymbol{\sigma}_e \leq \boldsymbol{\sigma}^U \quad (e=1,2,\dots,n) \quad (19)$$

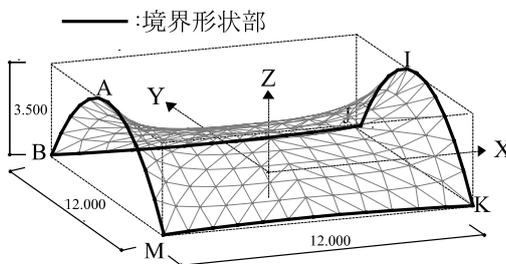


図3 鞍型膜構造境界形状(単位:mm)

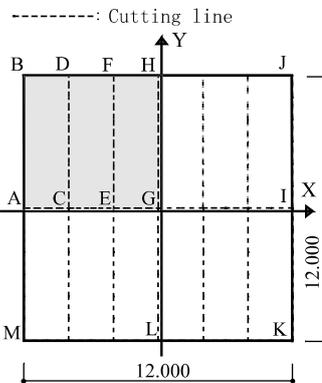


図4 膜帯(平面)の接続情報

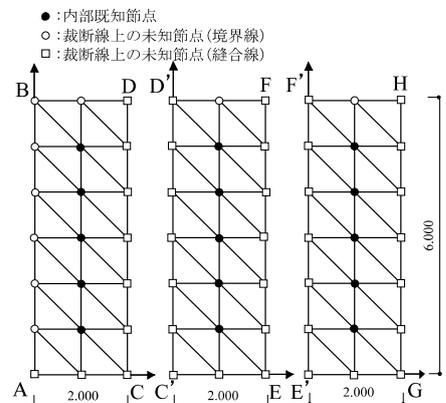


図5 初期裁断図及び要素分割図

4.2 解析モデルと設計変数

解析モデルには、図3に示す外周部(M-A-B, M-Kライン共に二次曲線で表現)を固定境界部とした鞍型曲面の膜構造形態を用いる。解析は鞍型モデルの対称性を考慮し、図4に示すように頂点ABHGを結ぶ全体の1/4の領域(ハッチング部)とする。要素分割は図5に示す49節点、72要素とする。裁断図の決定において、図5に示す自然状態の平面膜ピースにおける内部節点は固定とし、裁断線(ピース境界部)を設計変数とする。また、裁断線の平滑化と設計変数の低減のため、裁断線は3次スプライン曲線で表現する¹⁴⁾。なお、解析モデルの材料定数は、表1の通りである。

4.3 数値計算例

最適化問題①は、制約条件なしの最適化手法として有効な準ニュートン法により、数枚の膜ピースからなる裁断図を得る。目標応力値は $t\sigma_x$ (x-軸垂直応力) = $t\sigma_y$ (y-軸垂直応力) = 12.0 N/mm, $t\tau$ (せん断応力) = 0 N/mm とした。以上の条件の基、解析結果を表2にまとめる。また初期裁断図と最適化した裁断図による釣合形状をそれぞれ図6.a,7.aに、釣合形状の比較(図3,A-Iライン)を図10に示す。さらに裁断図形状、主応力図を図7.b,7.cに示す。なお、この問題は動的解析の比較モデルにそのまま用いる。

最適化問題②は、制約条件付き最適化手法として有効な逐次2次計画法(SQP法)を用い制約条件は次式とする。

$$8.0 \leq \sigma_x, \sigma_y \leq 16.0 \text{ (N/mm)} \quad (20)$$

外力は釣合形状の全内部節点に鉛直下向き(一節点に $P=5.0\text{N}$)に作用させる。初期裁断図と最適化後の裁断図で得られた釣合形状の応力状態とコンプライアンスの結果を表3にまとめる。外力作用後の形状を図8.a(変位を1000倍して表現)、裁断図・主応力図を図8.b,8.cに示し、釣合形状の比較(図3,A-Iライン)を図11に示す。

表1 材料定数表

膜厚	$t=0.8\text{ mm}$
縦弾性係数	$E_x \cdot t=213.8\quad E_y \cdot t=645.3\text{ (N/mm)}$
ポアソン比	$\nu_{xy}=0.3000\quad \nu_{yx}=0.9055$
せん断弾性	$G_{xy} \cdot t=55.9\text{ (N/mm)}$
単位質量	$1.215 \times 10^{-6}\text{ (kg/mm}^2\text{)}$

表2 最適化結果(N/mm) [最適化問題①]

	τ_x	τ_y	τ_t
目標応力	12.00	12.00	0.00
平均値	11.79	11.85	-0.03
最大値	13.47	12.74	1.13
最小値	10.22	11.52	-1.44
標準偏差	0.413	0.547	0.490

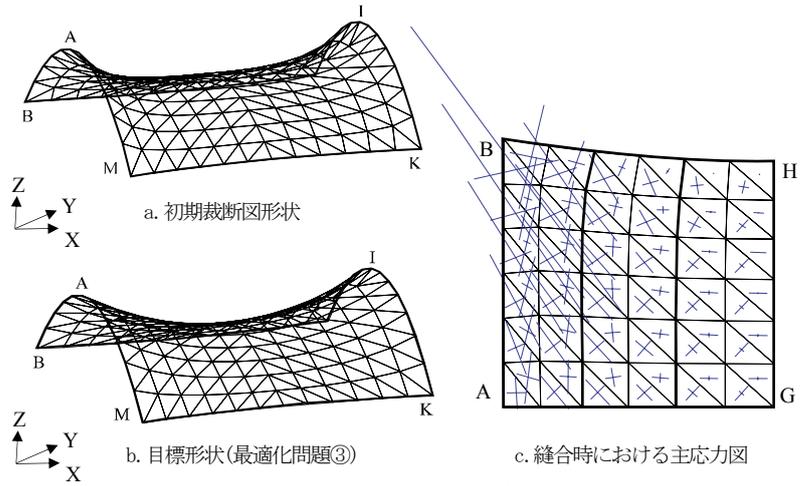


図6 初期裁断図における解析結果

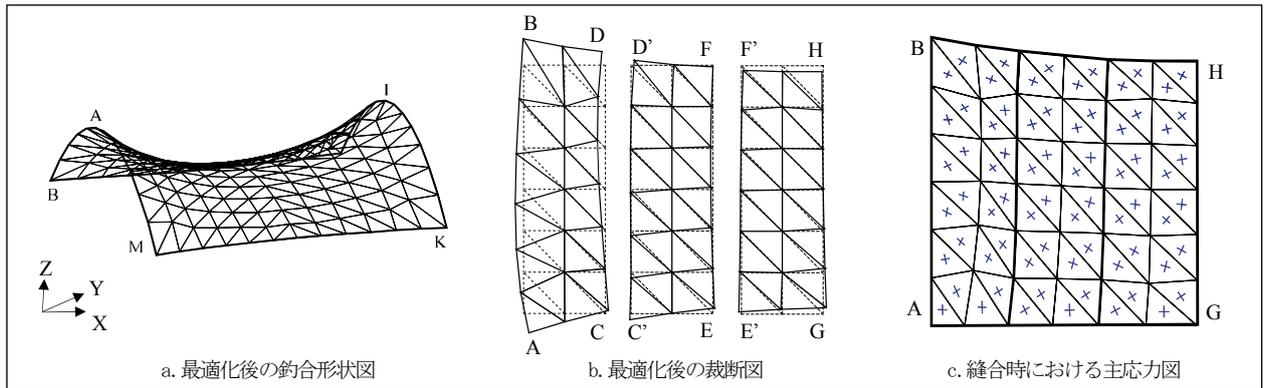


図7 [最適化問題①]における解析結果

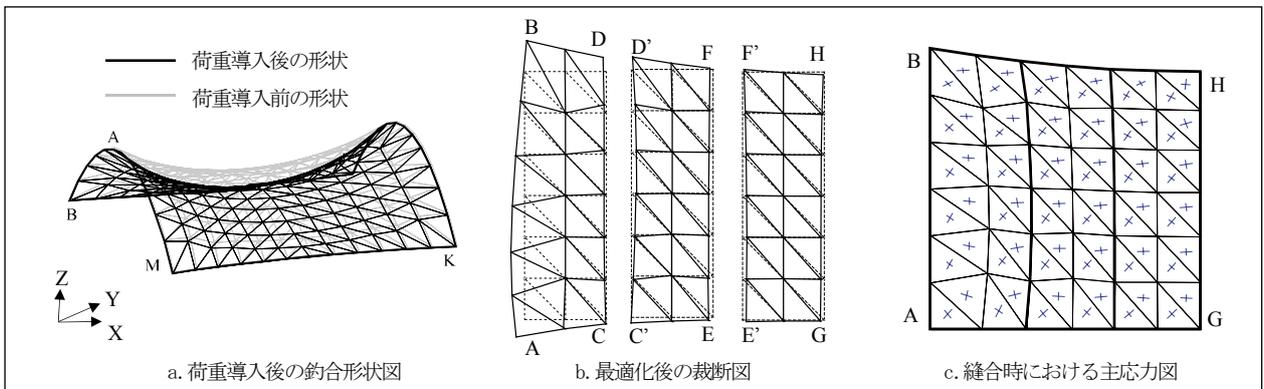


図8 [最適化問題②]における解析結果

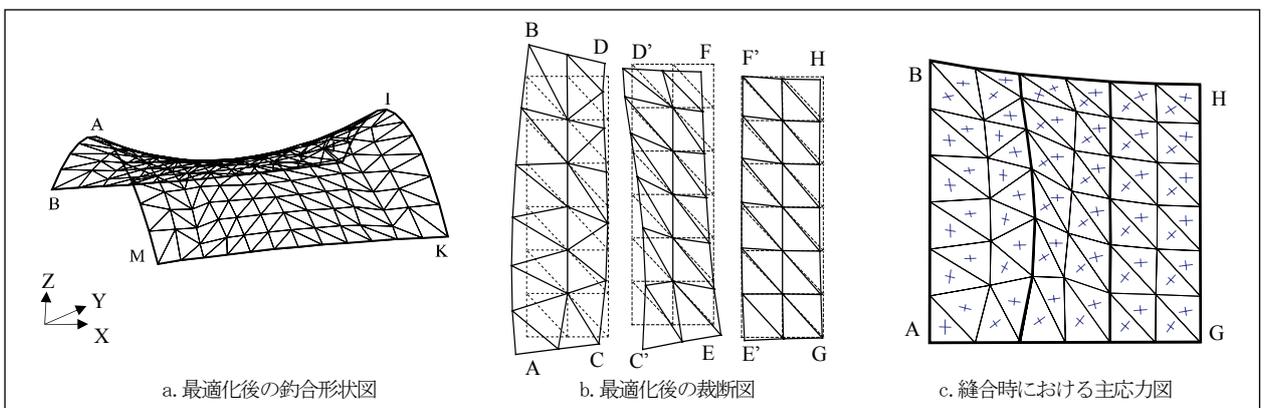


図9 [最適化問題③]における解析結果

表3 最適化前後における応力の比較(N/mm) [最適化問題②]

	初期裁断図形状		最適化による裁断図形状	
	$t\sigma_x$ (N/mm)	$t\sigma_y$ (N/mm)	$t\sigma_x$ (N/mm)	$t\sigma_y$ (N/mm)
平均値	50.75	25.74	9.40	14.79
最大値	476.67	118.92	14.22	15.91
最小値	-0.14	0.14	7.97	10.64
標準偏差	74.53	16.70	1.41	0.86
C_{em} (Nmm)	222.10		258.34	

表4 最適化前後における応力の比較(N/mm) [最適化問題③]

	初期裁断図形状		最適化後の裁断図形状	
	$t\sigma_x$	$t\sigma_y$	$t\sigma_x$	$t\sigma_y$
目標応力			$8 \leq \sigma_x \leq 16$	$8 \leq \sigma_y \leq 16$
平均値	50.77	25.74	10.30	15.27
最大値	476.67	118.93	16.0	16.0
最小値	-0.10	0.16	8.0	10.81
標準偏差	74.52	16.70	1.99	0.76

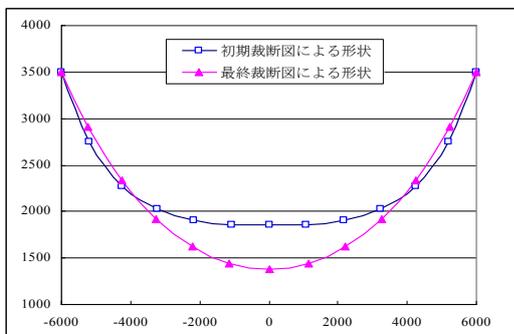


図10 最適化前後における形状比較[最適化問題①]

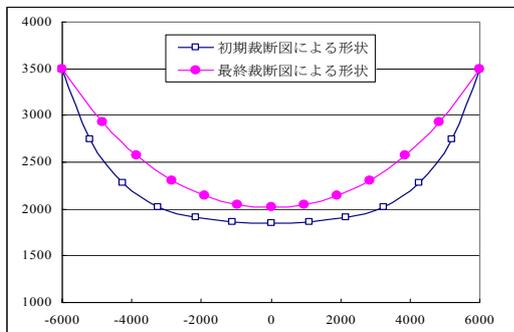


図11 最適化前後における形状比較[最適化問題②]

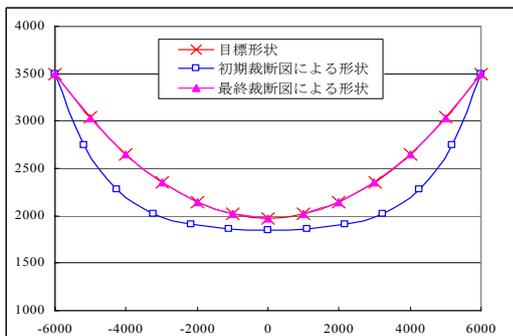


図12 最適化前後における形状比較[最適化問題③]

最適化問題③は、初期裁断図(図5)に構造条件(初期張力・内圧・境界条件)を与え線形形状解析を行うことで、目標形状とする設計原型曲面の図3, A-I ラインを決定する。最適化手法にはSQP法を用い制約条件は次式とする。

$$8.0 \leq \sigma_x, \sigma_y \leq 16.0 \text{ (N/mm)} \quad (21)$$

以上の条件の下、最適化した裁断図による釣合形状の応力状態の結果を表4にまとめた。最適化後の形状を図9a、裁断図・主応力図を図9.b,9.cに示し、釣合形状の比較(図3, A-I ライン)を図12に示す。

5 動的解析

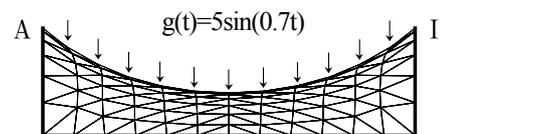
張力構造のような軽量構造物は、一般に静的な荷重よりも動的な荷重が支配的になる。つまり構造物を設計する際、自重や載荷物による構造物の静的性状を捉えると共に、風などの外力を考慮した動的挙動を把握することは、精度の高い設計を実施する上で非常に重要である。

ここでは、動的解析に対して3で示した座標値を未知量とした静的な離散化定式化を基準に、次の幾何学的非線形運動方程式を考える。

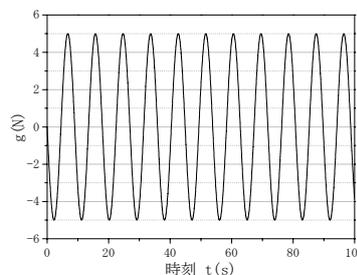
$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{f}, \lambda_0) = \mathbf{S}(t) \quad (22)$$

ここで、 \mathbf{M} ：質量行列、 \mathbf{C} ：減衰行列、 \mathbf{S} ：時間 t に依存した数値計算を実施する。なお、座標仮定を用いたニューマーク法による非線形運動方程式の解法では、通常の運動方程式における未知量 \mathbf{u} (変位ベクトル)、 $\dot{\mathbf{u}}$ (速度ベクトル)、 $\ddot{\mathbf{u}}$ (加速度ベクトル) は \mathbf{X} (位置ベクトル)、 $\dot{\mathbf{X}}$ (= $\dot{\mathbf{u}}$ 速度ベクトル)、 $\ddot{\mathbf{X}}$ (= $\ddot{\mathbf{u}}$ 加速度ベクトル) と単純に置き換えられる^{8)9),15)}。

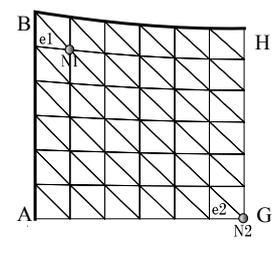
解析例題は、4.1 最適化問題①のモデルをそのまま利



a. 荷重モード



b. 設定周期外力



c. 応答解析結果を示す要素・節点位置

図13 周期荷重と歴応答結果に用いる要素と節点の位置

用し、初期裁断図と最適化した裁断図(最適裁断図)との違いによる釣合形状の応答結果を示す。ただし、空気膜構造等の動的性状に影響を及ぼすことが知られている内包体積による空気の弾性効果や付加質量の影響及び材料の粘弾性等のモデル化は考えない。また、減衰項 C は無視する。質量行列 M は LM (lumped mass) 法により構成する。動的荷重は式(23)を想定し、鉛直方向に次の周期外力 $g(t)$ を与える(図 13.a 参照)。

$$g(t) = P \sin(0.7t) \quad (23)$$

ここで、 $P=5.0N$ とする。ニューマーク法における計算パラメータは、 $\beta=0.25, \gamma=0.5$ 、時間刻みは $\Delta t=0.002$ (s) とした。以上の準備の下、初期裁断図と最適裁断図に対する時刻歴応答解析結果を示す。数値比較は 2 要素(e1,e2)と 2 節点(N1,N2)とし、それらの位置を図 13.c に示す。解析結果として各要素の最大最小主応力値を図 14、各節点の鉛直方向変位の時刻歴応答波形を図 15 に示す。

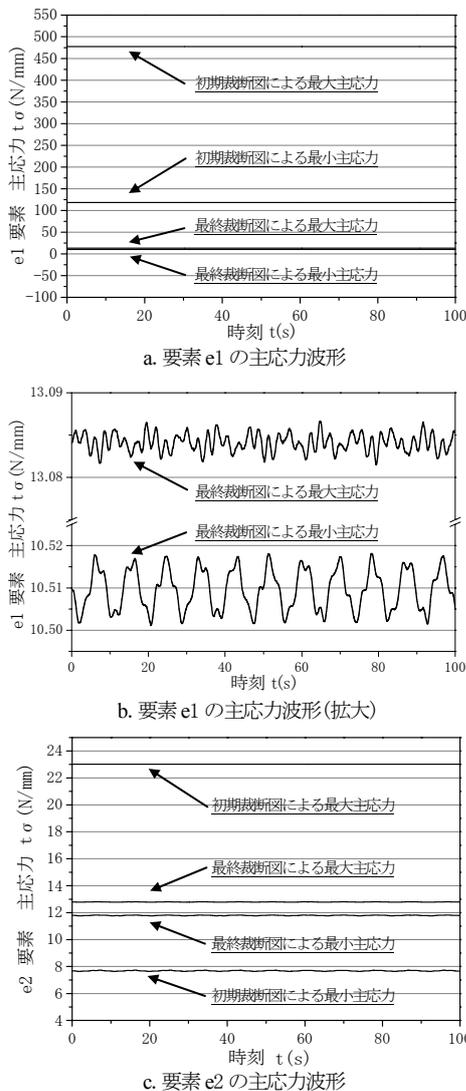


図 14 要素 e1, e2 の主応力の時刻歴応答波形(N/mm)

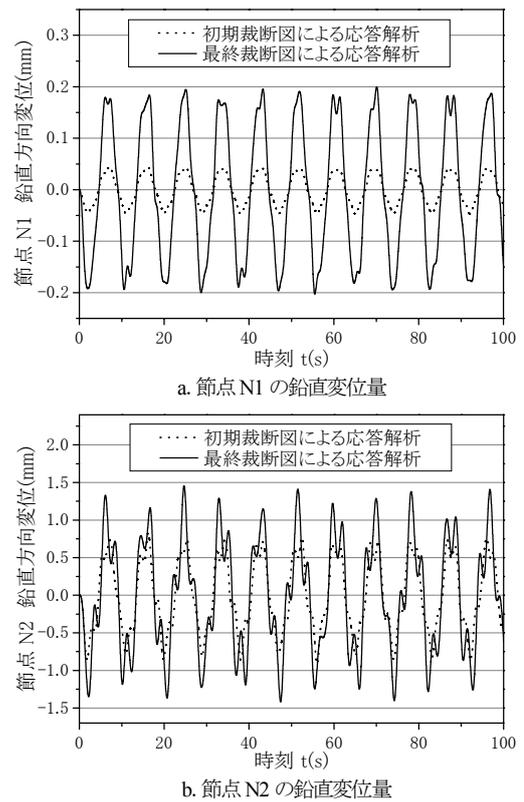


図 15 節点 N1, N2 の鉛直方向変位の時刻歴応答波形(mm)

6 設計支援システム

6.1 システム開発の背景

張力構造物は初期状態が形状不確定な不安定状態で存在する。そのため通常の構造設計で実施される応力-変形解析を行う前に、初期形状解析や裁断図解析等、張力構造物特有の解析が必要となる。張力構造物に対する知識の少ない意匠設計者のイメージする形状は力学的釣合状態を満たさない場合が考えられ、張力構造物を実空間内に形成する際、多くの問題が生ずる。従って、意匠設計者の自由な発想は構造設計者の複雑な数値解析の結果に依存せざるを得ない。

このように張力構造物を設計する場合、意匠設計者と構造設計者とのイメージ・知識等の相違により最終的に決定される設計形状は意匠設計者の初期のイメージとは大きく変わってしまう可能性がある。ここでは 3 で示した離散化手法を用い、意匠設計者の発想から張力構造物の最終設計形状が決定するまでの流れを統一的に扱えるシステムの考え方を示し、その考え方に基づいた試作システムを紹介する。

6.2 システム構成

本システムはインターフェース部・解析部・グラフィック表示部の 3 部で構成されている(図 16 参照)。

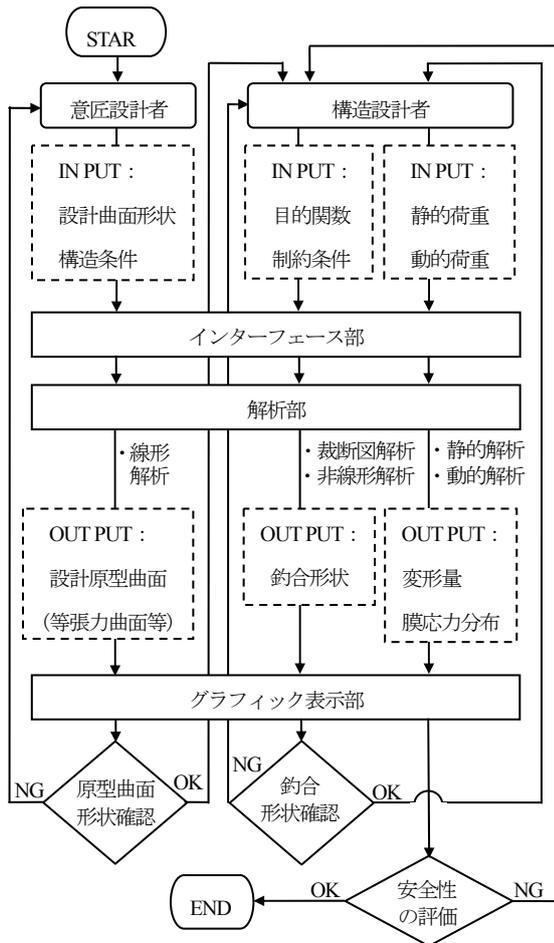


図 16 システム全体の流れ

[インターフェース部] システムを利用するユーザーが実際に操作する部分である。意匠設計者は簡単な操作で自らのイメージする形状を画面上に作成できる¹⁰⁾。構造設計者は釣合形状を決定する各種パラメータや、目的関数・制約条件等、より専門的な情報を設定する。

[解析部] ユーザーがインターフェース部で入力したデータを読み込み、形状解析・裁断図解析・動的解析等様々な解析を実行する部分である。

[グラフィック表示部] 解析結果である曲面形状・裁断図・主応力図・時刻歴応答波形等を視覚的に表示する部分である。

6.3 システムの流れ

図 16 に示すように意匠設計者はインターフェース部を通して自らの発想に基づき、境界条件・膜初期張力・ケーブルの導入等、様々な構造条件を設定し設計原型曲面を決定する。グラフィック表示部では得られた曲面形状がムービー等の利用により 3 次元的に確認できる。ここで、線形解析結果と非線形解析結果は全体的な形状イメ

ージに大きな差が表れないことより¹⁶⁾、試作システムは簡潔化のため設計原型曲面決定に線形解析を用いる。

システム上で構成された設計原型曲面を基に、構造設計者は目的関数や制約条件、その他各種パラメータを設定し裁断図解析を行なう。さらに非線形解析に移行し、実空間内に形成可能な釣合形状を構成する。グラフィック表示部における釣合形状の確認後、必要に応じて静的・動的荷重を設定し、外力作用後における応力状態や変形量など釣合形状を様々な角度から評価する。得られた評価や曲面形状を指標に、構造設計者はシステムを介して意匠設計者と協議し最終的な設計形状を決定する。

6.4 試作システム

本システムは張力構造物設計において意匠設計者と構造設計者の双方を支援することを目指す。図 17 に示すように意匠設計者はマウスクリックを基本とする単純な操作により感覚的にデザインの試みが実行でき、複雑な解析部を意識することなく容易に設計原型曲面を作成で

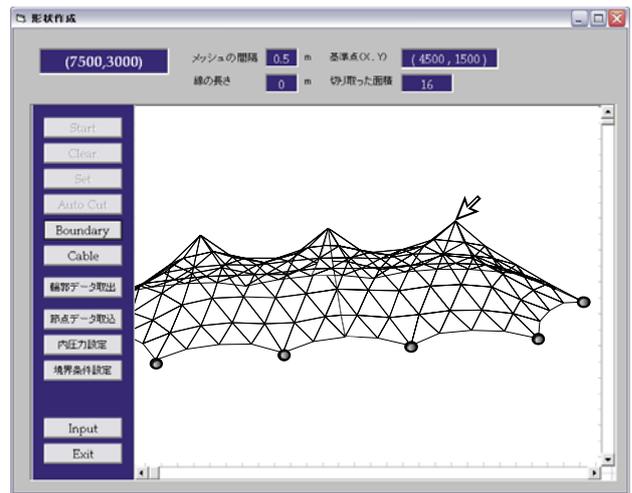


図 17 設計原型曲面作成画面

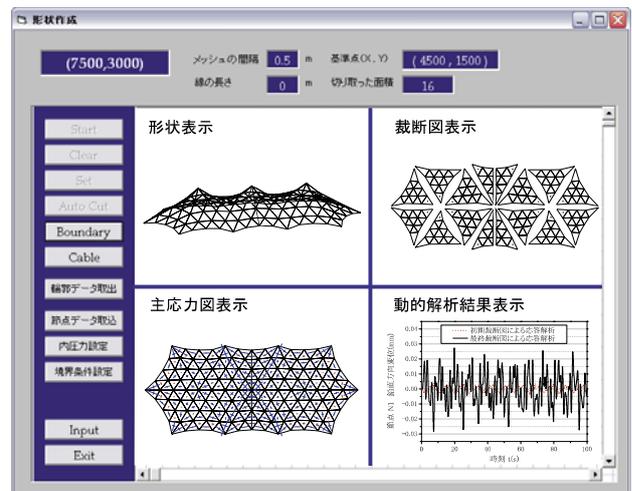


図 18 釣合形状の安全性確認画面

きる。図 18 に示すように構造設計者は釣合形状・裁断図・主応力図・動的解析結果等を同一画面上でリアルタイムに決定・確認でき、多面的な形状作成・形状評価が可能となる。本システムを介することで意匠設計者と構造設計者は、設計形状決定の指標となる種々のデータを共有でき、より円滑な張力構造物設計が行える。

7 考察

既往の張力構造物解析における研究では伸び量や変位を未知量とするため、要素埋め込み座標系における変位とひずみの関係式を出発点とする。従って、系全体のシステム行列を構成する際、座標変換が必要となる。

それに対し、本論文では直接安定形態における座標値を未知量とするため、座標変換なしのシンプルなアルゴリズムによりプログラム開発が可能である。解析例では、設計曲面の①応力状態、②コンプライアンス最小化、③想定形状を目標とし裁断図解析を実施し得られた裁断図を基に動的解析を行なった。解析結果より本解法が張力構造物の解析に有効な方法であることを示せた。

試作システムは、ケーブル膜構造の設計原型曲面がマウスクリックを基本とした単純な作業で作成できる。得られた曲面形状は画面上で視覚的に確認でき、容易に修正が可能のためデザインの・構造的試みが様々に行える。

8 まとめ

本論では未知量の捉え方を少し変えることで、張力構造物解析に有用な一解法を示し、裁断図解析、動的解析を連続して実施することができた。これにより系全体の座標値を未知量とする有限要素法によって張力構造物の解析を統一的に扱えることを示した。また、この解析ツールを用いた設計支援システムの実現により、意匠設計者と構造設計者が張力構造物の設計を円滑に実行でき、本来あるべき自由な発想による試みが可能となることが期待される。

今後は、応力状態・コンプライアンス最小化・形状など一つの目標だけを評価尺度とせず、二つ以上の目的を指標とした多目的最適化による裁断図解析へ展開したい。また、形状の変化に伴って裁断図や応力図等の変化が確認できる実用的で操作性に優れる設計支援システムの実現を目指す。さらに、骨組材や連続体要素と併用した張力構造物の解析、地震荷重・風荷重による張力構造物の特性の把握を行う。

参考文献

- 1) 石井一夫：膜構造の形状解析(形状決定問題)概説, 膜構造研究論文集, **3**, 83-107, 日本膜構造協会, 1989
- 2) 石井一夫：膜構造の応力・変形解析概説, 膜構造研究論文集, **4**, 69-105, 日本膜構造協会, 1990
- 3) 日本建築学会：空間構造の数値解析ガイドライン, 228-325, 丸善, 2001
- 4) 坪田張二, 吉田新, 黒川泰嗣:裁断図をもとにした膜構造の実初期つり合い状態の解析, 日本建築学会構造系論文報告集, **373**, 101-109, 1987
- 5) Jae-Yeol Kim, Jang-Bog Lee : A new technique for optimum cutting pattern generation of membrane structures, *Engineering Structures*, **24** (6), 745-756, 2002
- 6) 上谷宏二, 満田衛資, 大崎純:境界形状と応力比を設計パラメータとした骨組膜構造物の裁断図形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, **540**, 73-78, 2001
- 7) 八木孝憲, 萩原信幸, 大森博司, 松井徹哉:膜構造物の釣合形状と裁断形状の同時解析手法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, **508**, 71-78, 1998
- 8) 本間俊雄, 安宅信行:座標値を未知量とした有限要素法による張力構造の解析と評価, 膜構造論文集, **18**, 15-21, 日本膜構造協会, 2004
- 9) 本間俊雄, 合田雄策, 安宅信行:座標値を未知量とした有限要素技術による張力構造解析の一方法, 日本建築学会構造系論文集, **602**, 161-169, 2006
- 10) 本間俊雄, 谷口弘子:ステアリングの機能を考慮した膜構造物の初期設計支援可視化システム, *NICOGRPH 論文コンテスト論文集*, **9**, 215-224, 日本コンピュータ協会, 1993
- 11) 大崎純, 上谷宏二, 高谷真次:逆問題型手法による膜構造物の目標形状・応力トレードオフ設計法, 日本建築学会構造系論文集, **395**, 107-115, 1996
- 12) 大崎純, 山川誠:膜構造物の静的積載時の剛性を考慮した初期応力・裁断膜形状最適化, 膜構造系論文集, **11**, 31-38, 1997
- 13) 山川誠, 大崎純, 上谷宏二:膜構造の静的積載時の剛性を考慮した初期応力・裁断図形状最適化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系 **B-1**, 389-390, 1998
- 14) 市田浩三, 吉本富士市:スプライン関数とその応用, 教育出版, 1979
- 15) 藤井文夫, 瀧諭, 萩原伸幸, 本間俊雄, 三井和男:非線形構造モデルの動的応答と安定性, 計算工学シリーズ2, コロナ社, 2003
- 16) 本間俊雄, 西村敏雄:第4章 膜構造の形状決定問題, 構造物の設計力学と制御力学, 応用力学シリーズ2, 日本建築学会・丸善, 1998

最適化における剛性感度テンソルの応用

陳 沛山¹⁾

1) 八戸工業大学 大学院工学研究科建築工学専攻 助教授, 博士 (工学), chen@hi-tch.ac.jp

1. 概要

形態解析や形態最適化において, 構造形態が変化すると共に構造剛性も変化し, 剛性の形態変数に対する勾配 (微分) の展開も多く見られる^{1,2,3)}. 本論文では, 剛性マトリックスの勾配をテンソル記号で表現することにより「剛性感度テンソル」という概念を導入する. さらに, スペースフレームの最大座屈荷重形態, テンション構造の最大剛性形態理論において剛性感度テンソルの応用を紹介する.

2. 剛性感度テンソルの概念

非線形構造解析は増分解析が多く, その最も基本的な増分式は下記のように表される.

$$\mathbf{Kd} = \lambda \mathbf{f} \quad (1)$$

ここに, \mathbf{K} は接線剛性マトリックス, \mathbf{d} は変位の増分ベクトル, \mathbf{f} は荷重, λ は荷重パラメータの増分である. 形態最適化において, \mathbf{K} , \mathbf{f} そして \mathbf{d} は構造形状, 部材断面そして初期応力などの形態変数 (以下設計変数と呼ぶ) に依存する. 同様な変位増分において基本式(1)を設計変数で微分すると, 下式を得ることができる.

$$\dot{\mathbf{K}}\mathbf{d} = \lambda \dot{\mathbf{f}} + \dot{\lambda} \mathbf{f} \quad (2)$$

また, 設計変数を $\mathbf{X} = \{X_k\}$ とし, テンソル解析の縮約記号の導入により式(2)は次式のように表される.

$$K_{ij,k} d_j = \lambda f_{i,k} + \lambda_{,k} f_i \quad (3)$$

($i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, q$)

式(3)の右辺は設計変数の変化により荷重の変化及びそのパラメータ増分の変化を示している. また, その左辺により次式を得ることができる.

$$\mu_i = K_{ij,k} d_j \Delta X_k \quad (4)$$

ここに, $\{\mu_i\}$ は設計変数の変化 $\{\Delta X_k\}$ により生じる構造剛性の変化, そして釣合い力の変化を表している. さらに, 式(4)はベクトル $\{d_j\}$ と $\{\Delta X_k\}$ からスカラー μ_i への変換であり, $\{d_j\}$ と $\{\Delta X_k\}$ のそれぞれに関しては線形的であることが分かる. これは釣合い経路上においての線形関変換であり, 3 階のテンソルとみなすことができる. ここに, $K_{ij,t}$ を剛性

感度テンソルと呼び, その物理的な意味は剛性マトリックスの設計変数に対する微分 (感度) である. 必要に応じて高次微分や高階テンソルへの展開も可能であり, 座標変換や単位ベクトルに関する計量変換を導入することにより, 共変・反変ベクトル及び共変・反変微分への析展開も可能である.

形態の変化, 釣合い経路の遷移などの問題において, 変数の添え字が 3 つ以上になり, 高次微分により添え字が増える場合がある. そして, 上述のようにテンソル記号を導入することにより, 演算が簡潔になり, 解析も便利になる. さらに, スペースフレームの非線形解析や形態最適化においてテンソル理論の応用の普及を期待したい.

3. 最大座屈荷重形態理論への応用

3.1 解析モデル

スペースフレーム, 特に単層スペースフレームは安定性が突然失って崩壊し, 重大な被害を齎す場合も少なくない. より安定的な大スパン構造を創出することは大変重要な課題になり, スペースの最大座屈荷重形態を求める理論は構造分野における難問として知られている. 本研究はスペースフレームや曲面構造の座屈荷重を最大化することを目的として形態最適化解析を展開する. ここに, 最大化とされる座屈荷重は幾何学的非線形増分解析における極限点或いは分岐座屈点を示す.

前述のように, 幾何学的非線形構造解析の増分方程式は式(1)のように表される. 明快な数学処理のため, 荷重パラメータの増分を陽変数として表す.

$$\lambda^u = \mathbf{b}^T \mathbf{K}^u \mathbf{d}^u \quad (5)$$

ここに, u は増分解析のステップを示し, ベクトル \mathbf{b} は次のように定義されている.

$$\mathbf{b}^T \mathbf{f} = 1 ; b_i = \begin{cases} 0 & , \forall f_i = 0 \\ \frac{1}{N} f_i^{-1} & , \forall f_i \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

但し, N は \mathbf{f} の非零要素 ($f_i \neq 0$) の数である. 増分解析の第 T ステップで座屈点あるいは座屈近傍に到着すると, 座屈荷重パラメータ Λ は次式のように表される.

$$\Lambda = \mathbf{b}^T \sum_{u=1}^T \mathbf{K}^u \mathbf{d}^u \quad (7)$$

従って, 本研究の最適化問題は次のような数理モデ

ルで表現できる.

$$\begin{cases} \text{Maximize } \Delta = \mathbf{b}^\top \sum_{u=1}^T \mathbf{K}^u \mathbf{d}^u & (7) \\ \text{Subject to } \boldsymbol{\phi}(\mathbf{X}) = \mathbf{0} & (8) \\ \varphi(\mathbf{X}) \leq \mathbf{0} & (9) \end{cases}$$

ここに, 設計変数 \mathbf{X} は構造体の節点座標あるいはその他の幾何学要素を表す. 式(8)は等式拘束条件, 式(9)は不等式拘束条件を示している. そして, 本研究の最適化問題は拘束条件を満たす設計変数 \mathbf{X} を探索することにより, 座屈荷重パラメータ Δ を最大化することである.

3.2 最適化解析理論

本解析では, 目的関数の増大方向に沿って設計変数を修正することにより座屈荷重を増大させる. 目的関数の設計変数に対する微分 (勾配) をその増大方向とする. 式(7)を設計変数 $\mathbf{X} = \{X_i\}$ で微分すると次式が得られる.

$$\begin{aligned} \dot{\Delta}_i &= \mathbf{b}^\top \sum_{u=1}^T \mathbf{K}^u \mathbf{d}^u + \mathbf{b}^\top \sum_{u=1}^T \dot{\mathbf{K}}_i^u \mathbf{d}^u \\ &= \Delta \mathbf{b}^\top \mathbf{f} + \mathbf{b}^\top \sum_{u=1}^T \dot{\mathbf{K}}_i^u \mathbf{d}^u \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, q) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし, $\dot{\mathbf{O}}_i = \partial \mathbf{O} / \partial x_i$. テンソル解析の縮約記号を用いると式(10)が次式に変化できる.

$$\dot{\Delta}_i = \Delta \dot{b}_{j,i} f_j + b_j \dot{K}_{jlu,i} d_l^u \quad (11)$$

ここで, $\dot{K}_{jlu,i}$ が剛性感度テンソルである. この解析手法により, 座屈点 (あるいはその近傍点) まで増分解析を行いながら荷重パラメータとその増大方向を同時に求めることができる.

また, 荷重-変位曲線が連続曲線であるため, 最適化解析においては正確な座屈荷重パラメータを最大化することとその近傍点の荷重パラメータを最大化することは同等な効果を持つと考えられる.

従って, 目的関数の増大方向 Δ は次式のようになる.

$$\Delta = \mathbf{J} \begin{pmatrix} \dot{\Delta}_1 \\ \dot{\Delta}_2 \\ \vdots \\ \dot{\Delta}_n \end{pmatrix} = \mathbf{J} (\nabla \Delta) \quad (12)$$

ここに, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial X_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial X_q} \right)$. 幾何学的非線形解析

が座屈点あるいは座屈近傍点に到達後, 設計変数を目的関数の増大方向に沿って修正し, 再び非線形構造解析を行う. 即ち, 最適化解析の第 k ステップにおいて, 設計変数を次式のように修正し, $k = k+1$ ステップの設計変数が得られる.

$$\mathbf{X}^{k+1} = \mathbf{X}^k + \boldsymbol{\alpha}^k \quad (13)$$

ここに, $\boldsymbol{\alpha}$ は直線探索のステップ長^{4,5)}である. 式(13)により, 新たな形態が得られ, この形態による目的関数の値は大きくなる, $\Delta^{k+1} > \Delta^k$; $\Delta^k > \Delta^{k-1}$.

最適性条件を満足するまで繰り返し解析を行うと最適解を得ることができる. ここで用いられる最適性条件は原則としては Kuhn and Tucker の条件^{4,5)}である.

3.3 剛性勾配テンソルの誘導

用いられる非線形解析手法によって接線剛性マトリックスが異なり, 剛性感度テンソルの表現式も異なる. 非線形解析において, 剛性マトリックスを次式で表すことができる.

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}^L + \mathbf{K}^U + \mathbf{K}^o \quad (14)$$

ここに, \mathbf{K}^L は線形項であり, 普通の線形構造解析の剛性マトリックスと同じ. また, \mathbf{K}^U と \mathbf{K}^o は変位と応力に関する剛性マトリックスである.

例として, スペースフレームの剛性マトリックスの感度テンソルを誘導する. まず, 線形項 \mathbf{K}^L の各要素は部材の長さ L_k , 断面積 A_k , 断面2次モーメント I_k と断面捻りモーメント J_k により構成されていることを想定し, 接点座標 $\{X_i\}$ 及び断面設計変数 $\{r_i\}$ で微分する.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial X_i} \mathbf{K}^L &= \frac{\partial \mathbf{K}^L}{\partial L_k} \frac{\partial L_k}{\partial X_i} \\ \frac{\partial}{\partial r_i} \mathbf{K}^L &= \frac{\partial \mathbf{K}^L}{\partial A_k} \frac{\partial A_k}{\partial r_i} \\ &\quad + \frac{\partial \mathbf{K}^L}{\partial I_k} \frac{\partial I_k}{\partial r_i} + \frac{\partial \mathbf{K}^L}{\partial J_k} \frac{\partial J_k}{\partial r_i} \end{aligned} \quad (15)$$

\mathbf{K}^L は 12×12 の対称マトリックスであり, 手計算でもマトリックス要素を誘導できる. そして, \mathbf{K}^U と \mathbf{K}^o の微分も同様な手法で誘導できる. 幾何学剛性マトリックスの感度テンソルは用いられている解析手法によって異なる.

3.4 解析例題

3.4.1 例題の説明

図1に示す剛節点単層ラチス・ドームを例題として数値解析を行った。ドームの初期形態は切断球面であり、その断面は図2に示している。ライズ $H = 300\text{cm}$ 、底の半径 $R = 1500\text{cm}$ 、そして頂部には半径 $r = 500\text{cm}$ の範囲に剛的な構造となっている。部材は厚さ 0.8cm のパイプとし、断面直径は

設計変数とする。各部材の初期直径は 3.5cm としている。部材のヤング係数は $4.91 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、せん断弾性係数は $1.27 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ と設定されている。荷重は鉛直等分布荷重であり、各節点に作用している荷重が節点座標の関数である。荷重ケースは全域載荷と半域載荷の2ケースである(図3)。最適化解析により決める設計変数は $H1, H2, R1, R2$ 、及び部材直径 $r_1 \sim r_5$ である。

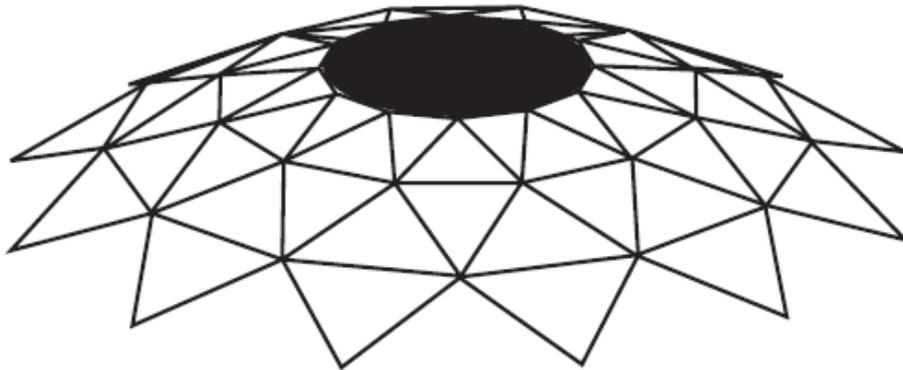


図1 剛節点単層ラチス・ドーム

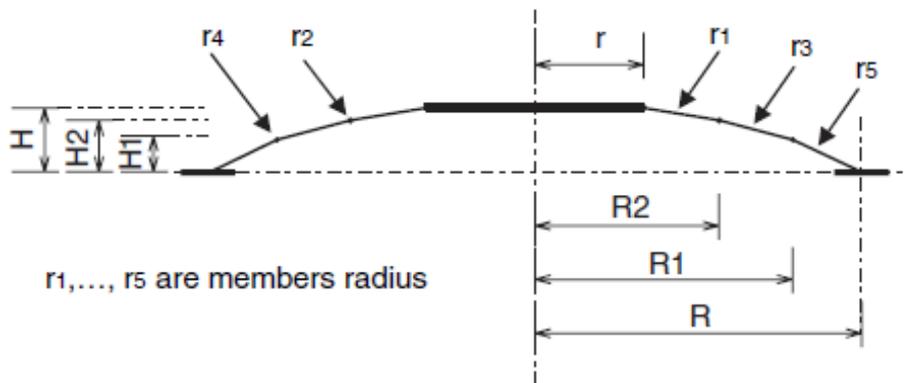


図2 設計変数

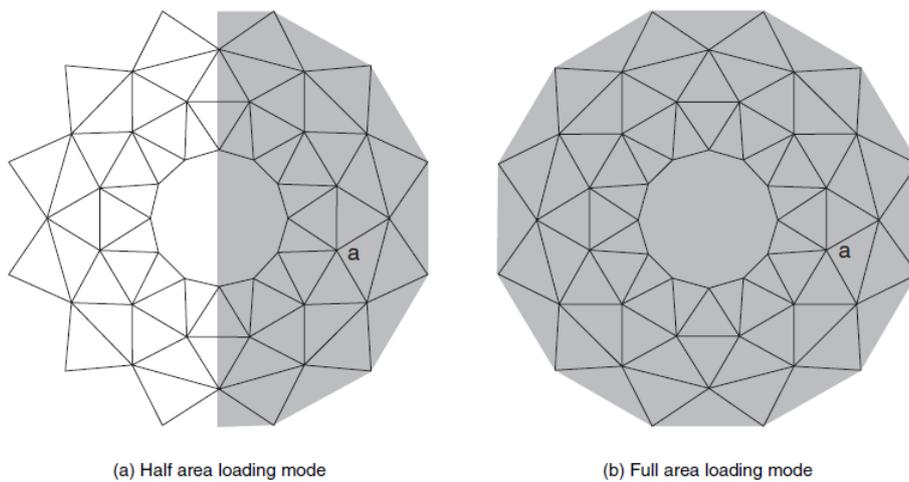


図3 荷重ケース

各設計変数の変化は表1で表される。図4はドーム

3.4.2 解析結果

ムの断面変化を示している。図5は上から第2番目のリングにある点の荷重-変位曲線を示している。

これは岐座屈であり、座屈荷重は32.75%増えることが分かる。図6は目的関数の収束様子を表している。

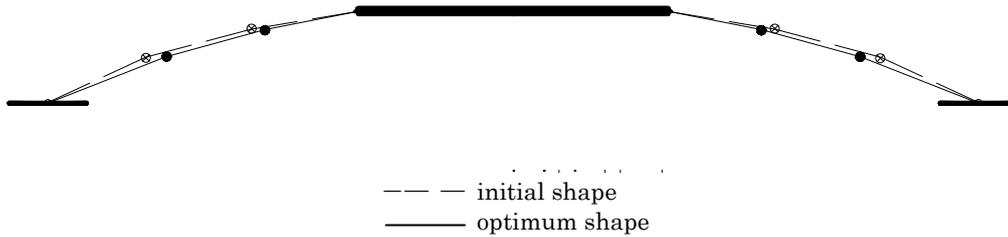


図4 構造断面の変化

表1 設計変数の変化 (cm)

	Initial values	Optima	Changes	Ratio of changes
R1	1183.344	1181.245	-2.099	-0.177%
H1	149.626	149.490	-0.136	-0.091%
R2	845.023	845.150	0.127	0.015%
H2	240.044	242.755	2.711	1.129%
r1	3.500	3.605	0.105	3.00%
r2	3.500	3.499	-0.001	-0.028%
r3	3.500	3.660	0.160	4.571%
r4	3.500	3.501	0.001	0.028%
r5	3.500	4.176	0.676	19.314%

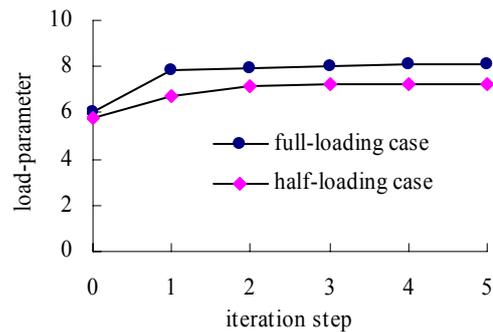
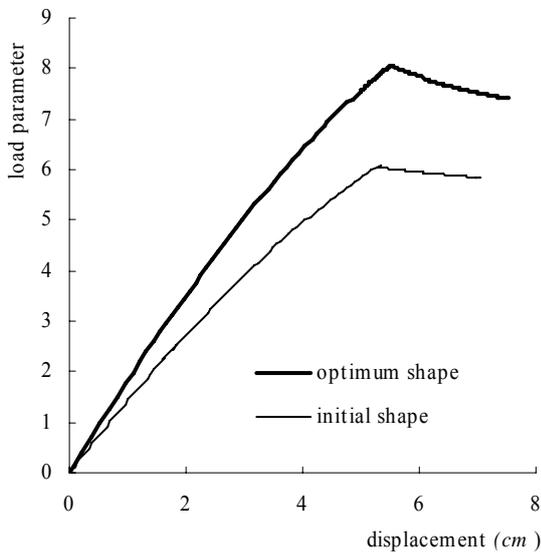


図6 目的関数の収束様子



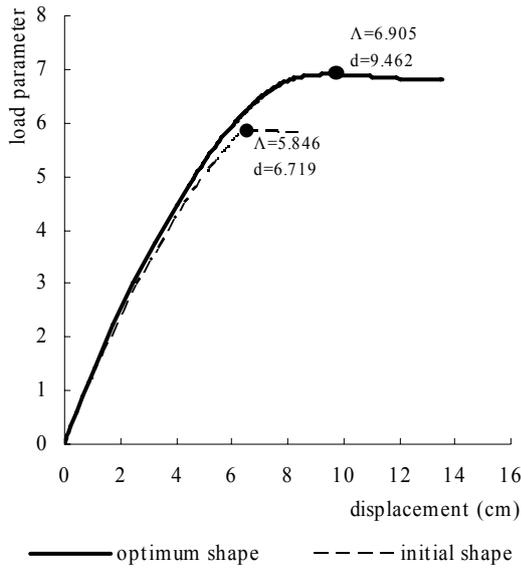
The load-displacement curves of point a due to full area loading case [The position of a is shown in Figure 3(b)]
図5 全域荷時の荷重-変位曲線

本解析理論では形状の初期不整に対する座屈感度についての解析を行っていない。初期不整に対する感度解析理論の代わりに、初期形態の不整形と最適形態の不整形の座屈荷重を比較する方法を勧める。即ち、同等の形状不整に対して、最適形態の不整形の座屈荷重は初期形状の不整形の座屈荷重より大きい場合、提案解析理論が有効的であると判断できる。

ここに、得られた分岐座屈モードを初期不整モードとして解析モデルを作成し、非線形解析を行った。図7は、最大不整点の水平半径とその最大不整量の比がおおよそ1:0.0005の場合、第2番目リングにある点の荷重-変位曲線である。この図を考察すると、座屈点において最適形態の不整形の変位及び荷重パラメータが初期形態のそれより大きいことが分かる。即ち、最適形態とその初期形態の非線形挙動を比べて、最適形態の座屈荷重が必ず初期不整に敏感するとは言えない^{6,7)}。

本解析例題では、設計変数はドームの全体形状及び部材の断面である。スペースフレームはシェルと違って、部材剛性の不連続性と異方向性がその非線形挙動を強く支配していることが分かる。本解析手法では全体形状を最適化されると共に部材断面も適切変化された。その結果、上部の部材が細く、下部の部材が太く、子午線方法の部材が太く、リングが細く変化された^{8,9)}。異方向においての不連続的な部材断面変化は原因となり、スペースフレームの最適形態が初期不整に敏感でないことが分った。但し、こ

の結論について詳細な理論的な検証必要である。



The load-displacement curves of point a, shape imperfection for CASE 2;

Full area loading case; Point a is shown in Fig.3(b)
図7 初期形態及び最適形態の形状不整の影響

4. 最大剛性形態における応用

4.1 剛性最大化解析モデル

剛性感度テンソルの第2の応用例として、テンション構造の最大剛性形態理論を紹介する。

テンション構造は全体剛性が低く、特に風や地震による変位が大きいことがその消極な特徴の一つである。通常、剛性を高めるためには高いプレストレスの導入が試みられるが、これは一般的に不経済であり、また工事上の困難を伴う場合がある。プレストレス導入時に、一部の部材を緊張すると他の部材は緩みあるいは許容応力範囲を超える場合がある。合理的かつ有効的にプレストレスを導入することは難しい課題であるとも言える。本研究はテンション構造の最大剛性形態（最小変位形態）及び最適プレストレスの分布を求めることを試みる。

ここに紹介される最適化解析手法は、全体剛性の最大化を目的として、非線形計画法を用いて形状パラメータ及びプレストレスの分布を定める。テンション構造の形態解析は、プレストレス導入前、プレストレス導入時、そしてプレストレス導入後に付加荷重に対する変形解析の三段階に分けて行われる。本解析理論で求められる最適形態はプレストレス導入後の構造形態であり、プレストレス導入前の形態は最適化解析結果より逆解析で得ることができる。そして、本研究ではテンション構造における逆問題とも言える。

外部荷重が変位になす仕事を剛性の評価関数とする方法も考えられるが、荷重が存在している成分と存在していない成分における剛性評価は大きな差

が生じることを推測できる。これゆえ、本解析手法の剛性評価としては、外部荷重のなす仕事という方法を避け、距離関数法（変位の二乗の総和）を採用した。全ての節点に変位が生じるので、変位の二乗の総和は全ての節点変位を評価できる。全ての節点を必ず評価され、最大変位成分を適切に大きく評価する方法として距離関数法が最も有効である。従って、最適化解析の目的関数は式(17)、(18)で表される。

$$\left. \begin{aligned} f^1 &= \sum_{i=1}^n D_i^2 && \left. \begin{array}{l} \text{for loading case 1} \\ \text{for loading case 2} \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \end{array} \right\} && (17) \\ f^2 &= \sum_{i=1}^n D_i^2 \\ \dots & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ f^l &= \sum_{i=1}^n D_i^2 && \left. \begin{array}{l} \text{for loading case } l \end{array} \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$F = w_1 f^1 + w_2 f^2 + \dots + w_l f^l \quad (18)$$

但し、 $\sum_{j=1}^l w_j = 1$ は各荷重ケースの重み係数であり、

l は考慮する荷重ケースの数である。また、 $\mathbf{D} = \{D_i\}$ は節点変位ベクトル、 n は構造の自由度数である。そして、最適化問題は次のように表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimize: } F = \sum_{i=1}^l w_i f^i \quad (18) \\ \text{subject to:} \\ \phi_j(\mathbf{X}, \mathbf{P}) = 0 \quad (j=1, \dots, s) \quad (19) \\ \varphi_k(\mathbf{X}, \mathbf{P}) \leq 0 \quad (k=1, \dots, t) \quad (20) \end{array} \right.$$

ここに、 $\mathbf{X} = \{x_i\}$ は節点座標ベクトル、 $\mathbf{P} = \{P_k\}$ は部材のプレストレスベクトルである。式(19)は等式拘束条件、式(20)は不等式拘束条件を示している。

この最適化問題は、拘束条件(19)と(20)を満足しながら設計変数 (\mathbf{X}, \mathbf{P}) を探索することにより目的関数 F を最小にすることである。ただし、 \mathbf{X} はプレストレス \mathbf{P} を導入した後の構造形態の節点座標であり、変位 \mathbf{D} もまたプレストレス \mathbf{P} を導入した後の荷重により生じるものを示す。

4.2 最適化解析の展開

荷重が十分小さい場合、目的関数 F と設計変数 \mathbf{X}, \mathbf{P} は下記の支配方程式を満足している。

$$\mathbf{KD} = \mathbf{Q} \quad (21)$$

ここに、 \mathbf{K} は構造の剛性マトリックスであり、 \mathbf{Q} は

荷重ベクトルである。KにはプレストレスPによる幾何剛性マトリックスが含まれている。

本解析では、非線形計画法を用いて拘束空間において目的関数の減少方向（降下方向）に沿って設計変数を修正することにより最適解を得る。目的関数の降下方向は目的関数の設計変数での微分である。式(21)を設計変数で微分すると、

$$\mathbf{K}\mathbf{D} + \mathbf{K}\dot{\mathbf{D}} = \dot{\mathbf{Q}} \quad (22)$$

$$K_{ij,k} D_j + K_{ij} D_{j,k} = Q_{i,k} \quad (23)$$

を得る。そして、荷重ケースsによる変位の微分は次式のように求められる。

$$D_{j,k}^s = Q_{i,k}^s K_{ij}^{-1} - D_j^s K_{ij,k} K_{ij}^{-1} \quad (24)$$

ここに、 $K_{ij,k}$ は剛性感度テンソルである。評価関数(17)の微分は

$$f_{,k}^s = \frac{\partial}{\partial X_k} \sum_j (D_j^s)^2 = 2\delta_j^l D_j^s D_{l,k}^s \quad (25)$$

となり、 δ_j^l はKronecker's deltaである。従って、目的関数の降下方向の一つの成分 η_k は次式のように表わすことができる。

$$\eta_k = -w_s f_{,k}^s = -2\delta_j^l w_s D_j^s D_{l,k}^s \quad (26)$$

4.3 解析例題

4.3.1 解析モデル

図8に示している Tensegrity frame を例題として数値解析を行った。ケーブルとポストのヤング係数はそれぞれ $1.90 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ と $2.10 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ である。最適化により定める設計変数は半径及びリングケーブルの高さ $R1 \sim R14$ 、部材の断面積、各ポストの初期応力 $P1 \sim P4$ である。

荷重は鉛直等分布荷重であるが、各節点に作用している荷重は節点座標の関数となっている。全域載荷(Full-loading case); 半域載荷(Half-loading case) そして 1/4 域載荷 (Quarter-loading case) の三種類の荷重ケースに対して数値解析を行った。数値解析において用いられている等分布荷重の値は $1.0 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$ である。

力学的等式拘束条件は、荷重のない状態でのプレストレス軸力の自己釣り合い式である。力学的不等式拘束条件は、荷重あるいはプレストレスによるケーブルの軸力が正（テンション）に保つことである。ケーブルとポストの軸力がその終局耐力より小さいこ

とも不等式拘束条件とされている。

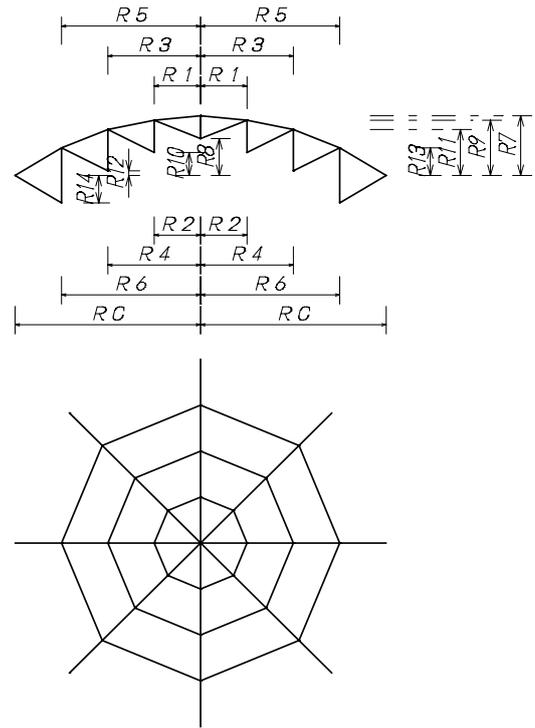


図8 テンション構造の解析モデル

例題の Tensegrity は全域荷重に対して変位は常に小さく、非対称荷重による変位が非常に大きい。また、最適形態への遷移は、全域載荷に対する形態変化が小さく、非対称荷重に対する形態変化が大きい。これらの理由で、重み係数は、全域載荷の場合 $w_1 = 0.1$; 半域載荷の場合 $w_2 = 0.5$; 1/4 域載荷の場合 $w_3 = 0.4$ と設定され、剛性目的関数と構造ボリューム目的関数（体積）に対してそれぞれ 0.9 と 0.1 と設定されている。

4.3.2 解析結果

図9は構造断面の変化を示している。初期形態と最適形態の各寸法を表2、部材断面積とプレストレスの変化はそれぞれを表3と表4で表している。図10と図11は上部節点の鉛直変位を表している。図12は最適化解析の収束様子を表している。

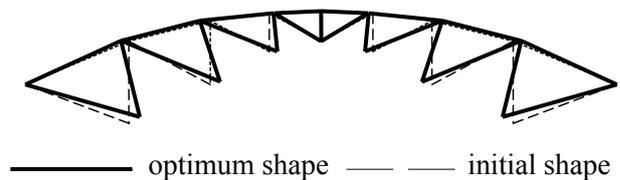
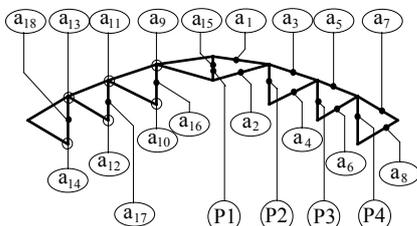


図9 構造断面の変化

表2 設計変数の変化 : (cm)

	initial	optimum shape
RC	4000.00	4000.00
R1	700.00	643.84
R2	700.00	593.27
R3	1500.00	1639.46
R4	1500.00	1364.80
R5	2600.00	2708.33
R6	2600.00	2454.04
R7	100.00	100.25
R8	592.00	592.06
R9	971.00	971.66
R10	448.00	449.63
R11	867.00	868.93
R12	0.00	37.46
R13	593.00	594.79
R14	-520.00	-442.83

表 3 部材の断面積 (cm^2):



	initial	optimum		initial	optimum
a ₁	20.00	15.61	a ₁₀	20.00	16.75
a ₂	20.00	14.96	a ₁₁	20.00	12.19
a ₃	20.00	14.14	a ₁₂	20.00	12.72
a ₄	20.00	13.43	a ₁₃	20.00	6.75
a ₅	20.00	12.67	a ₁₄	20.00	7.36
a ₆	20.00	11.20	a ₁₅	85.00	84.67
a ₇	20.00	10.39	a ₁₆	85.00	81.53
a ₈	20.00	9.73	a ₁₇	130.00	124.36
a ₉	20.00	16.64	a ₁₈	130.00	122.79

表 4 プレストレス軸力 (kg):

	P1	P2	P3	P4
initial	2500.000	-3000.000	-10000.000	-50000.000
optimum	-2500.000	-3000.021	-10000.204	-50000.044

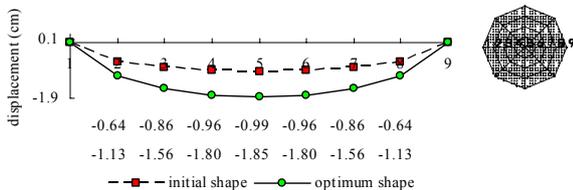


図 10 全域載荷時の上部節点の変位

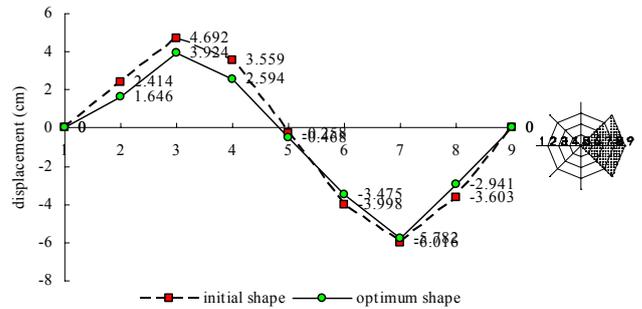


図 11 1/4 域載荷時の上部節点の変位

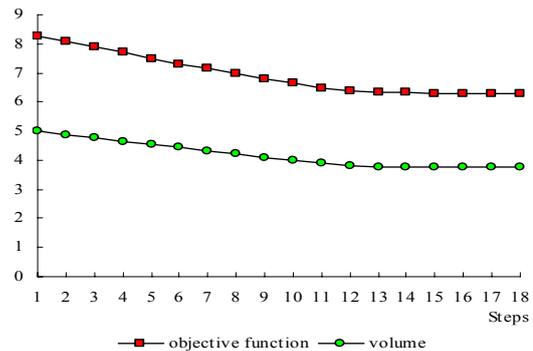


図 12 目的関数の収束

例題の解析結果、構造のボリュームが 24.6%減少し、節点変位は最大 30%程度減少したことを確認できた^{10,11,12}。

5. 終わりに

本論文は剛性感度テンソルを新しい概念として提案したが、更なる研究や幅広く応用されることを期待している。連続体解析においてテンソル理論を展開する Wilhelm Flugge の名作¹³があるが、FEM やスペースフレームの解析理論においてテンソル理論の応用に関する研究を深めることが期待している。

本論文はテンション構造の最大剛性形態理論、スペースフレームの最大座屈形態理論において剛性感度テンソルの応用を紹介した。スペース・フレームの最大座屈荷重形態理論は、構造の安定性を高めて、形態を有効的に最適化できることが確認できた。

テンション構造の最大剛性形態理論に関する例題では全域、半域、そして 1/4 域載荷の三種類の荷重ケースを採り入れ最適解析を行ったが、実際の設計では最も影響の大きな荷重ケースを採り入れるようになる。また、この方法により得られる形態は重み係数に依存するため、具体的な設計要件を勘案し、適切な重み係数を決めることが重要である。

本論文で紹介した何れの最適化手法は、拘束空間の局所において最適解を探査することに有効であるが、拘束空間全域の最適解を求めることには効率的ではない。但し、これらの最適化理論を用いて設計方案の近傍においてより合理的な構造形態を見付け出すような有用性が期待できる。

参考文献

- 1) E. Simson, A. Taranukha, Shape Optimization of Large Ultrasonic Tools, Optimization of Structural Systems and Applications, Computer Mechanics Publications, pp31-39, 1993,
- 2) E. Hinton, M.Ozakca, Structural Optimization of Vibrating Shells, Optimization of Structural Systems and Applications, Computer Mechanics Publications, pp89-109, 1993,
- 3) W-H. Zhang, P. Bckers, P. Duysinx, C. Fleury, A Parametric Based Approach to Astructural Shape Optimization, Computer Mechanics Publications, pp89-109, 1993,
- 4) 今野浩, 山下浩: 非線形計画法, 日科技連 1978.
- 5) M. Minoux : Mathematical Programming (Theory and Algorithms), John Wiley and Sons, 1983.
- 6) Pei-Shan Chen and Mamoru Kawaguchi, Optimization for Maximum Buckling Load of a Lattice Space Frame With Nonlinear Sensitivity Analysis, International Journal of Space Structures Volume 21 · No.2 · 2006, pp111-118.
- 7) Seishi Yamada and Kazuaki Yano (2000), Reduced Stiffness Buckling Criteria of Orthotropic Cylinders under Compression, Transaction of JSCES, Paper No.20000012.
- 8) 陳沛山, 川口衛: スペース・フレームの最大座屈荷重形態, 日本建築学会構造系論文集, 第 489 号, pp.41-46, 1996 年 11 月
- 9) M. Kawaguchi, I. Tatemichi and Pei Shan Chen, Optimum Shape of a Cable Dome Structure, Engineering Structures, No. 8, Vol. 21, Aug. 1999, pp.719-726 .
- 10) 陳沛山, 川口衛, テンション構造の最小変位形態, 日本建築学会論文報告集, 第 468 号. 1995 年 2 月. pp.101~108.
- 11) Pei Shan Chen and Mamoru Kawaguchi, Minimum-Deformation-Shape of Prestressed Bar-Structures, Nonlinear Analysis And Design for Shell and Spatial Structures, Proceeding of The Seiken-IASS Symposium Oct. 19-22, 1993, Tokyo, Japan.
- 12) 陳沛山, 川口衛, テンション構造の最大剛性形態, 日本建築学会構造系論文集, 第 476 号, 1995 年 10 月, pp113-120.
- 13) W. Flugge, Tensor Analysis and Continuum Mechanics, Springer-Verlag New York, 1972.

多目的遺伝的アルゴリズムを用いたリカレント建築設計支援システム

北村大輔¹⁾, 谷明勲²⁾, 山邊友一郎³⁾, 河村廣⁴⁾

1)神戸大学大学院自然科学研究科大学院生 2)神戸大学工学部建設学科・(兼)大学院自然科学研究科教授・博士(工学)

3)神戸大学工学部建設学科助手・修士(工学) 4)神戸大学名誉教授・工博

1 序

建築物の解体時に排出される大量の廃棄物が、二酸化炭素排出と並んで建築分野における重大な環境問題となっている今日、地球環境負荷の低減を図るために環境調和型の社会システム形成に着手していかなければならないのは明白である。そこで、廃棄物抑制の一手法として筆者らの研究室では、建築物に対して部材のリユースを導入して環境調和を図る循環型建築システムとして、リカレント建築¹⁾を提唱している。リユースはリサイクルと比較すると素材段階まで解体する必要がないため、廃棄物を減少させるだけでなくエネルギーや二酸化炭素の排出を更に削減させることが可能となり、環境への影響を配慮した手法であると考えられる。

部材のリユースを前提としたリカレント建築システムを実現するためには、部材の規格化、解体後の部材を保管・管理するストックヤードの確保や、情報管理システムの構築²⁾、解体が可能な接合法³⁾、リユース材を用いた設計システムの構築⁴⁾、解体手順の最適化⁵⁾などの検討を行う必要がある。

本研究では、リカレント建築におけるリユース材を用いた設計支援システムに関する当研究室の既往の研究⁶⁾の発展として、遺伝的アルゴリズム(GAs)⁷⁾を用いて建築形態の最適化とその形態の配置箇所に要求される性能を持つ最適部材の選定について、制約条件を含む多目的最適化を行ない、ユーザーの要望を満足させる建築物を設計する際の支援ツールシステムの構築を目指す。尚、多目的最適化にはパレート最適解集合を生成するという手法であるMOGAs(Multi-Objective Genetic Algorithms)⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾を用いて制約条件と目的関数を統合した評価関数を用いて最適化を行い、それぞれの目的に応じた最適な解を効率的に複数提案することができるシステムの有効性を検証する。

2 システム概要

システムフローを Fig.1 に示す。本システムは建築形態最適化と部材選択最適化の二つの最適化から構成され

る。まず、セルオートマトン¹¹⁾の手法を用いて Fig.2 に示す直方体セルを増殖させる。1セルを建物の1ユニットとし、増殖を繰り返すことで形態を生成する。そしてユーザーの要望に対する適応度に基づいて建築形態を評価し、GAsにより形態の最適化を行う。

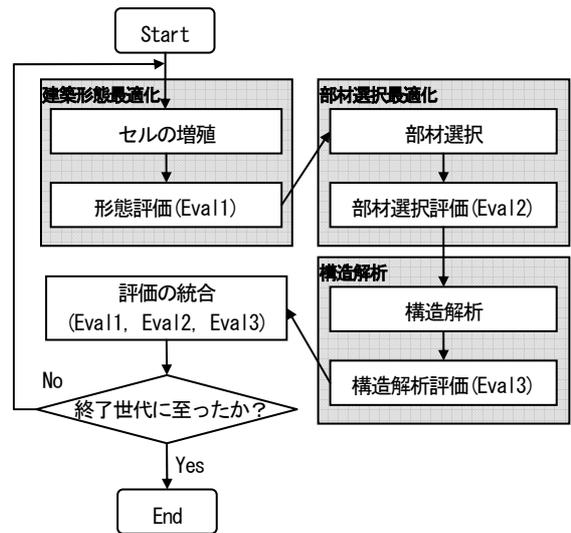


Fig.1 システムフロー

次に、最適化された建築形態の空間を構築するリユース材の選択をユーザーの要望に対する適応度に基づいて評価し、GAsにより最適部材の選択を行う。尚、部材は回収工場(ストックヤード)にストックされた部材情報データベース(Web データベース)から選定・入手することとしている。続いて三次元マトリックス構造解析法¹²⁾¹³⁾により、立体骨組解析を行なう。以上の操作から得られたそれぞれの総合評価値(Eval1~3)を元に、MOGAsにより多目的最適化を行なうことで、ユーザーの要望を満足させる建築物の形態形成及び、部材選択が行われる。

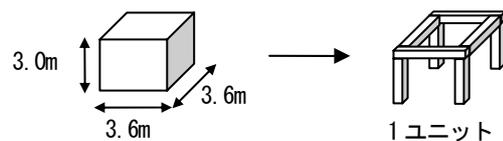


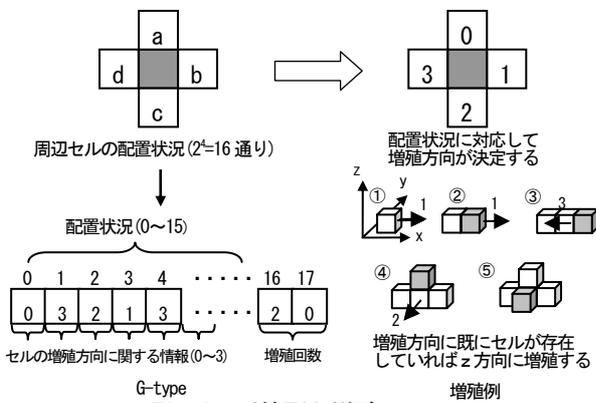
Fig.2 直方体セル

3 建築形態最適化

本システムはセルの増殖によって形態を形成させるが、その具体的な増殖方法と最適化のプロセスを以下に示す。

3.1 空間増殖方法

増殖ルールとしてノイマン近傍によるセルオートマトンの手法を用いる。増殖を行うセルの近傍 a~d の状況を把握し、周囲の $2^4=16$ 通りの状況から Fig.3 に示す GAs の G-Type の 0~15 の遺伝子座にランダムに入力された値 (0~3) により増殖方向が決定され、増殖を行う。また遺伝子座 16 には 1~3, 17 には 0~9 の整数値がランダムに入り、2 つ 1 組でセルの増殖回数(10~39)を表す。決定した増殖回数まで増殖を繰り返すことにより、建築形態が形成される。この増殖ルールと増殖回数を最適化することで、建築形態の最適化を行う。



3.2 形態評価指標

建築形態の評価として以下の評価指標を用いる。

(a) 建蔽率

敷地面積を 270 m² と設定し、敷地面積に対する建物の建築面積 S の割合を式(1)により算出する。Fig.4 に示す評価関数を用い、建蔽率の評価値 $\mu.1$ を求める。

$$(Coverage) = \frac{S}{270} \times 100 (\%) \quad (1)$$

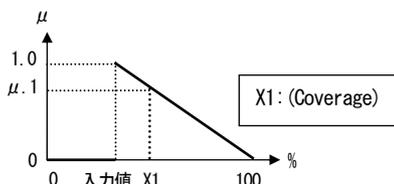


Fig. 4 建蔽率の評価関数

(b) 稠密度

Fig.5 に示すように建築形態に外接する直方体(dx, dy,

dz)に対して、内に含まれるセルの割合を式(2)により算出する。Fig.6 に示す評価関数を用い、稠密度の評価値 $\mu.2$ を求める。

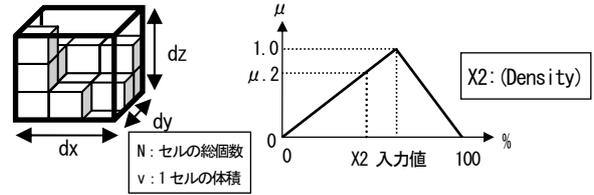


Fig. 5 建物の稠密度 Fig. 6 稠密度の評価関数

$$(Density) = \frac{N \times v}{dx \times dy \times dz} \times 100 (\%) \quad (2)$$

(c) 水平縦横比

建築形態の長辺と短辺(dx, dy)の比率を表し、形態の水平方向のプロポーシオンを考慮するために用いる。その比率を式(3)に示すように (短辺) / (長辺) として算出する。Fig.7 に示す評価関数を用い、水平縦横比の評価値 $\mu.3$ を求める。

$$(Aspect) = \frac{\min(dx, dy)}{\max(dx, dy)} \quad (3)$$

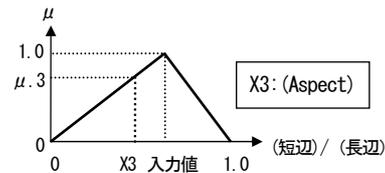


Fig. 7 水平縦横比の評価関数

(d) 階数

式(4)に示すように設定した階数(OK)ならば評価値 $\mu.4$ を 1, それ以外(NG)ならば 0 とする。

$$OK \rightarrow \mu.4(Floor) = 1, NG \rightarrow \mu.4(Floor) = 0 \quad (4)$$

3.3 形態形成評価の統合

(a)~(c)で求めた評価値の相乗平均に、(d)の階数の評価値を乗じたものを形態形成の総合評価値 Eval0 とする (式(5))。相乗平均を用いることで、それぞれの評価がともに上昇することを期待している。この Eval0 を GAs の評価指標として、建築形態最適化を行う。

$$Eval\ 0 = \sqrt[3]{\mu.1 \times \mu.2 \times \mu.3} \times \mu.4 \quad (5)$$

4 部材選択最適化

前章において生成された建築形態に対して、配置する最適な部材を選択する。なお、本システムで用いる建築物モデルは柱・梁の 2 種類の部材から構成され、接合部等は現段階では考慮していない。

4.1 部材オブジェクト

本研究では建物の解体後、部材は仮想的に設けられたストックヤードに収集され保管されている。その部材の情報は Web データベースで管理するものとしている。梁には H 型鋼、柱には角型鋼管を用い、データベースには梁・柱毎に各 400 個のリユース材が登録され、重複しない番号 (No.0~No.399) と、10 年単位毎の残存耐用年数 (10~100 年) を各部材 1 本毎に割り当てている。また、部材価格は残り耐用年数によって変動する (式(6))。Table1 に本システムで扱う部材の断面リストを示す。

Table1 部材の断面リスト

Type	柱 (角型鋼管)			梁 (H型鋼)			
	H (mm)	B (mm)	t (mm)	H (mm)	B (mm)	tw (mm)	tf (mm)
0	200	200	8	200	150	6	9
1	250	250	9	300	150	6.5	9
2	300	300	12	350	175	7	11
3	350	350	14	400	200	8	13
4	400	400	16	450	200	9	14

$$\text{価格} = [\text{製造時価格}] \times ([\text{残り耐用年数}] / 100) \quad (6)$$

[製造時価格]一般鋼材: 76000 円/t¹⁰⁾

4.2 部材の選択・配置

形成された建築形態を構成する全ての部材に番号 (Index) を与え Fig.8 のようにリスト化する。Fig.9 に示すように GAs の遺伝子座を 3 つ 1 組に分け、各遺伝子座に入力されたランダムな数値がデータベースに登録されている部材断面の ID Number(0~399)を表す。部材の番号 (Index) と部材断面の ID Number とが対応し、遺伝子座に入っている数値が示す番号を持つ部材が選択される。

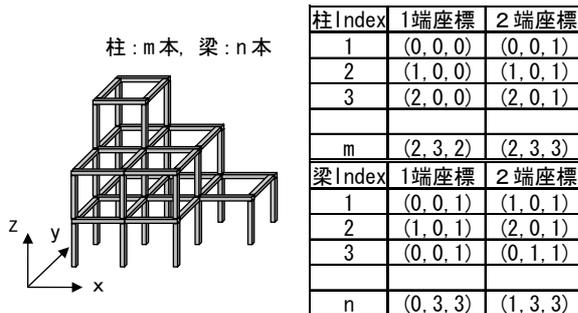


Fig. 8 部材のリスト化

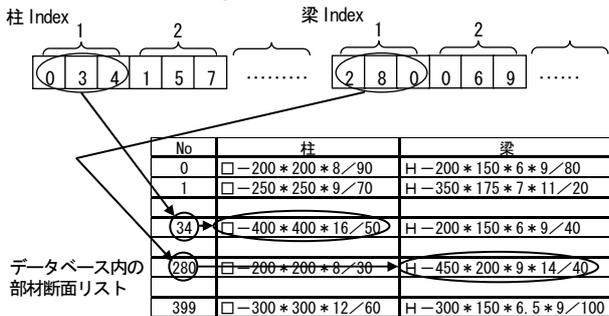


Fig. 9 部材断面の選択

4.3 部材選択評価

部材選択の評価として以下の評価指標を用いる。

(e) 建物使用年数

各部材には耐用年数が設定され、建物の使用期間中に部材の寿命に達すると、部材交換やメンテナンス等の支出が生じ非効率な結果となるため、建物の予定使用年数以上の耐用年数を有するリユース材の選択を評価する。Fig.10 に示す評価関数から部材 1 本毎の評価値 $\mu'.5$ を求め、式(7) より部材全本数における評価値 $\mu.5$ を求める。

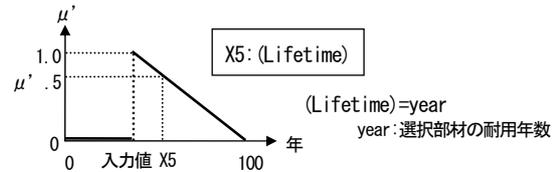


Fig. 10 建物使用年数の評価関数

$$\mu.5 = \frac{\sum \mu'.5}{mn} \quad \text{m n : 総部材数} \quad (7)$$

(f) コストパフォーマンス

より安価な部材を選択するように選択部材の総価格に対する最小の総価格の割合 $\mu.6$ を式(8)より求める。

$$\mu.6 = \frac{\sum \text{min Cost}}{\sum \text{Cost}} \quad (8)$$

$\sum \text{min Cost}$: 最小となる選択部材の総価格
 $\sum \text{Cost}$: 選択部材の総価格

4.4 部材選択評価の統合

(e), (f) で求めた評価値の相乗平均をとったものを部材選択の総合評価 Eval1 とする (式(9))。前述した形態評価の統合と同じように相乗平均をとることで互いの評価が上昇することを期待している。この Eval1 を GAs の評価値として、部材選択最適化を行う。

$$\text{Eval 1} = \sqrt{\mu.5 \times \mu.6} \quad (9)$$

5 マトリックス構造解析

5.1 条件設定

本研究において立体骨組のマトリックス構造解析は、以下の条件設定の下で行なった。

① 接合条件

建築物モデルの支持点は全て完全固定とする。また、各節点の接合はすべて剛接合とする。なお、接合部での強度の検討は行っていない。

② 荷重条件

設計荷重は、Fig.11 に示すように節点に対して自重による鉛直荷重と水平荷重を作用させる。水平荷重は鉛直荷重の20%とした。

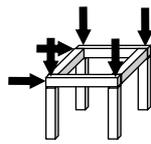


Fig.11 荷重条件

③ 部材性能

鉄骨材料は、防錆処理などの適切な品質管理を施すことにより、経年劣化を防ぐことができる。これより、各鋼材の材料としての性能は製造時からの経過年数に依存せず一定と仮定する。また、使用鋼材はSN400とする。

④ 設計条件・解析対象

許容応力度設計法を用いる。また、解析はラーメン骨組を構成する部材（梁・柱）についてのみ行う。

5.2 構造解析評価（制約条件）

構造物の安全性、機能性を保持するために、部材の応力度 ≤ 許容応力度範囲(式(10))と、層間変形角 ≤ 1/200(式(11))の2つの条件を設定する。ここでは条件を満たしている制約条件の項目の割合 Eval2 で評価を行なう(式(12))。全ての条件が満たされていれば値は1となり、構造物の安全性が確保されたと考えられる。

$$\frac{\text{応力度}}{\text{許容応力度}} \leq 1 \quad (10)$$

$$\frac{\text{層間変形角}}{1/200} \leq 1 \quad (11)$$

$$\text{Eval}2 = \frac{\text{CLimitSize}}{\text{LimitSize}} \quad (12)$$

CLimitSize : 条件を満たしている制約条件の項数
LimitSize : 制約条件の全項目数

6 多目的最適化方法と解の選択

建築形態、使用部材を決定し、建築物モデルの評価を行なうにあたり、本システムでは玉置らの方法¹⁵⁾によるMOGAsを用いて多目的最適化を行う。この方法は、次世代の個体群を目的関数に等しい数の部分個体群に分割し、各目的関数に対しそれぞれの個体群を形成する並列選択法と、個体群中のパレート最適個体を全て次世代の個体群に加えるパレート保存戦略法を組み合わせた方法である。本システムでは、制約条件である構造解析評価と2つの目的関数（形態総合評価、部材選択総合評価）

により3次的にパレート最適解集合を求め、その内、制約条件を満たした解集合(Eval2が1となったときの解集合)の中から目的に応じた最適解を選択するという方法をとる。最終的な意思決定はユーザーの選考となり、決定過程における合理性を得る手段として、複数案を提示できるMOGAsは有効であると考えられる。Fig.12は制約条件を満たす解を得る過程の2次元的なイメージ図で、目的関数の評価を最大化するような解を求める。

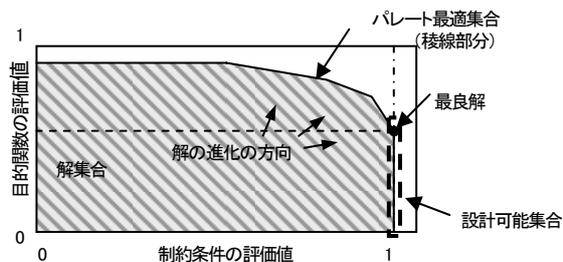


Fig.12 制約条件を満たした解探索の概要

7 システムの実行

7.1 設定

システムの実行に伴い、ユーザーの初期入力値の設定をTable2に、MOGAsの初期設定をTable3に示す。

Table2 入力値の設定

建蔽率	稠密度	水平縦横比	階数	使用年数
50%	60%	1:1	3階	40年

Table3 MOGAsの設定

実行世代数	初期乱数	初期個体数	親選択数
2000	1	50	6
交叉数	交叉率	突然変異率	
2	0.95	0.15	

7.2 実行結果

システムの実行結果として、
[Case1] Eval0が最大となる場合、
[Case2] Eval1が最大となる場合、
[Case3] Eval0とEval1の相乗平均が最大となる場合、
の3つのCaseの結果をFigs.13~18に示す。なお、Figs.13, 15, 17のグラフは、左から
・ Eval2が1となったとき(制約条件が満たされたとき)のEval0(横軸)とEval1(縦軸)の解集合の関係図、
・ Eval0(縦軸)とEval2(横軸)の解集合の関係図、
・ Eval1(縦軸)とEval2(横軸)の解集合の関係図
を示している。また、各評価値は全て0~1の間で基準化した。

[Case1]

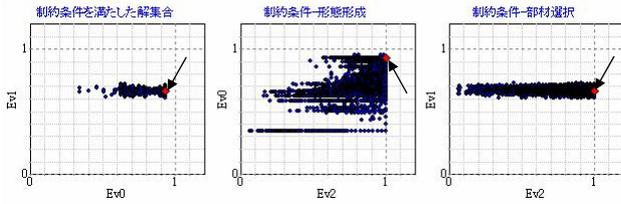
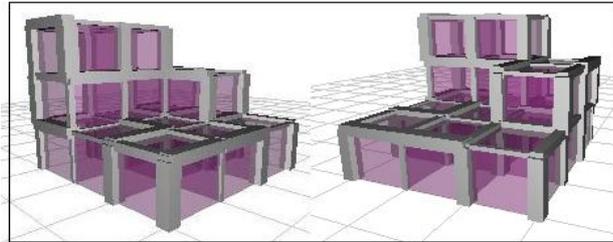


Fig. 13 パレート解集合①



総部材価格：874560 円

Fig. 14 出力画面①

Table4 各評価値①

建蔽率	稠密度	水平縦横比	Eval0
0.864	0.926	1	0.928
階数	使用年数	コスト	Eval1
1	0.855	0.520	0.667

[Case 3]

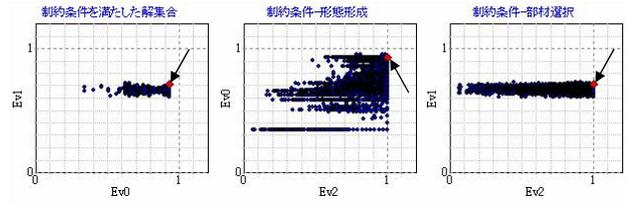
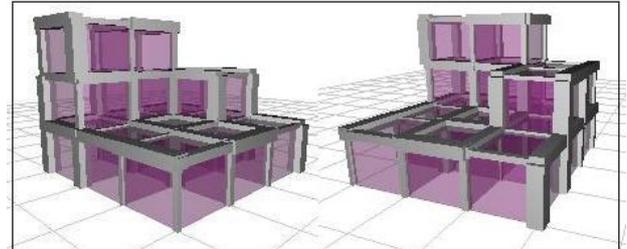


Fig. 17 パレート解集合③



総部材価格：818195 円

Fig. 18 出力画面③

Table6 各評価値③

建蔽率	稠密度	水平縦横比	Eval0
0.864	0.926	1	0.928
階数	使用年数	コスト	Eval1
1	0.934	0.541	0.711

[Case 2]

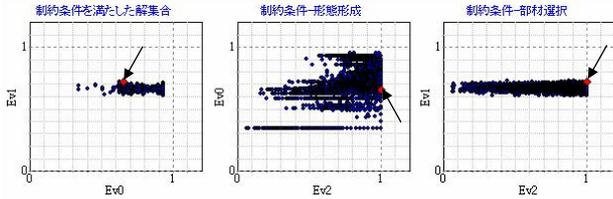
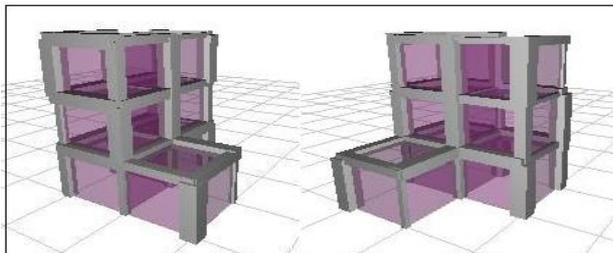


Fig. 15 パレート解集合②



総部材価格：439245 円

Fig. 16 出力画面②

Table5 各評価値②

建蔽率	稠密度	水平縦横比	Eval0
0.288	0.972	1	0.654
階数	使用年数	コスト	Eval1
1	0.886	0.588	0.722

7.3 考察

- Case1 は、形態形成の総合評価値 Eval0 が最大となった場合であるが、同一の値を示す解が複数得られたため、結果にはその中の一つを示している。この場合、同一の評価値ならば、同一の形態となる結果となった。
- Case2 は、部材選択の総合評価値 Eval1 が最大となった場合で、Eval1 の評価値が Case1~Case3 の結果中、最大となった。ただし、建蔽率の評価値が低いため、Eval0 の値は低くなってしまった。これは建築形態が小さくなることで、使用部材数も少なくなり、使用年数、コストパフォーマンスの評価が上がりやすくなるため Eval1 の値が高くなったと考えられる。このため、建築形態形成に関しては最適化が十分に行なわれない結果となり、Eval1 のみを最大化した場合は、建築的観点からの最適解は得られていないと考える。
- Case3 は、Eval0 と Eval1 の相乗平均が最大となった場合で、Eval0 の値は Case1 と同じになった。しかし、相乗平均を取ることによって二つの評価値をバランスよく高め合うことができ、Case1 と比べても Eval1

の値が高く、評価値で見るとバランスの取れた最適解を得ることができたと考える。

- 4) パレート解集合(Figs.13, 15, 17)を見ると Eval0 の解のばらつきは多いが, Eval1 の解のばらつきは少なく, 狭い範囲内で集中する結果となった。理論的にはさらに高い値が存在する可能性があるため, 実行世代数を増やす等をして今後, 検討していく必要がある。

8 結

本研究では, セルオートマトンの原理により建築形態の生成を行い, そこに配置させる最適なリユース部材をデータベースの中から選択をすることで, 建築物を作り出すというリカレント建築における設計支援システムの構築を行なった。遺伝的アルゴリズム(GAs)を用いることにより, 膨大な解の組み合わせの中からユーザーの要望を満足させるような最適解を得ることができた。

本報では, 最適化の際に従来の単一の GAs に対して多目的最適化を行う MOGAs を導入した。単一 GAs では各評価値を全て掛け合わせて評価を行っていたため, 許容応力度を満たさない解があると総合評価が 0 となることから致死遺伝子が多く発生し, 効率の悪い最適化となっていた。ここでは, 許容応力度を制約条件, その他の評価指標を目的関数とし, 多目的最適化を行なうことで制約条件を満たした解を効率的に得る事が可能になった。また, 得られた複数の最適解の中からユーザーの目的や趣向に合わせて解を選択できる MOGAs は, ここで提案している設計支援システムに有効であると考えられる。

謝辞: 本研究の一部は神戸大学大学院自然科学研究科等が受けた文部科学省 21 世紀 COE プログラム「安全と共生のための都市建築デザイン戦略」の支援を受けて実施されたものである。

参考文献

- 1) リカレント建築・都市研究会: ニュースレターNo.1 創刊号ハイライト, 1999.11
(URL:<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~a2/recurrent/recurrent.html>)
- 2) 森本和明, 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: 無線 IC タグを用いた建築物の施工支援システム—ユニット型プレハブ住宅を対象とした組み建て支援システム—, 第 28 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 論文, 2005.12, pp.133-138
- 3) 中尾浩紀, 谷明勲, 山邊友一郎, 河村廣: 多目的遺伝的アルゴリズムを用いたピン接合された建築構造物の部材配置システム—第 28 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 論文, 2005.12, pp.157-162
- 4) 石田陵, 河村廣, 瀧澤重志, 谷明勲: 遺伝的アルゴリズムを用いたリカレント建築設計支援システム—マトリックス構造解析の適用—, 第 24 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, 論文, 2001.12, pp.13-18
- 5) Du, Y., Kawamura, H., Takizawa, A. and Tani, A. : A Support System of Optimization of Dismantling Recurrent and Emergent Buildings by GA, Proceedings of the 4th International Workshop on Emergent Synthesis (IWES'02), 2002.5, pp.29-34
- 6) 石田陵, 瀧澤重志, 河村廣, 谷明勲: リカレント建築の設計支援情報インフラシステム近畿支部研究報告集計画系, 2002.6, pp.129-132
- 7) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.6
- 8) Holland, J.H. : Adaptation in Natural and Artificial Systems, The Univ. Michigan Press, 1975
- 9) 瀬尾美巳子: 多目的評価と意思決定, 日本評論社, 1984
- 10) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム 2, 産業図書, 1995.5
- 11) Von Neumann, J. : Theory of Self-Reproducing Automata, University of Illinois Press, 1966
- 12) 青山博之・上村智彦: マトリックス法による構造解析, 培風館, 1988.2
- 13) 藤谷義信: パソコンで解く骨組みの力学, 丸善株式会社, 1993.3
- 14) 財団法人建設物価調査会: 主要建設資材市況動向ホームページ(URL:<http://www.kensetsu-bukka.or.jp>)
- 15) 玉置久, 森正勝, 荒木光彦, 遺伝アルゴリズムを用いたパレート最適解集合の生成法, 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.1185-1192, 1995

最適トラス・トポロジーの多様性・複雑性と設計領域・荷重条件に関する考察

松岡 貴士¹⁾, 高田 豊文²⁾

1)三重大学大学院工学研究科建築学専攻, 大学院生, matsuo@s.arch.mie-u.ac.jp

2)三重大学大学院工学研究科建築学専攻, 助教授, 博士(工学), takada@arch.mie-u.ac.jp

1 はじめに

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, 部材体積制約下のコンプライアンス最小化問題などに定式化されることが多い。これらの最適化問題に分枝限定法を適用した解法[1], 遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した手法[2, 3], 数理計画法による解法[4, 5]などが報告されている。

トラス・トポロジー最適化を多目的最適化問題として取り扱うこともあり, 多目的GA[6], Min-Max法とGAに基づく方法[7], 免疫アルゴリズム[8]などの手法も報告されている。

これまで筆者らは, 体積, 最大応力度および最大節点変位の最小化を目標としたトラスの最適設計問題に, 多目的GAの1つであるStrength Pareto Evolutionary Algorithm[9]を適用してきた[10]。また, 部材総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を対象として, パレート境界の理論的導出と, 線形計画法(シンプレックス法)による解法も示した[11, 12, 13]。さらに, 文献[14]では, 得られる最適トラス・トポロジーの多様性および複雑性が, グランドストラクチャのアスペクト比および荷重方向に依存することを定量的に示している。

本稿では, 既報[11, 12, 13]で示した手法を様々な設計例に適用し, グランドストラクチャのアスペクト比および荷重方向に加え, 設計領域の広さや荷重位置が最適トラス・トポロジーの多様性・複雑性に及ぼす影響について考察する。

2 トラス・トポロジーの多目的最適化問題

一定応力下のトラス・トポロジー最適化問題を, 部材総体積 V とコンプライアンス C の最小化を目標とした多目的最適化問題として取り扱う。応力算定は弾性解析に従うものとする。この問題は, 部材断面積 A を

設計変数として, 次式のように定式化される。

$$\{V, C\} \rightarrow \min. \quad (1)$$

なお, 本設計問題では, 部材断面積の上限は設定しない。また, 荷重としての自重及び座屈も考慮しない。

3 線形計画問題としての定式化

ここでは, (1)式の多目的最適化問題が線形計画問題に帰着されることを示すが, 詳細は文献[11]を参照されたい。

釣合条件, 適合条件, フックの法則および多目的最適化問題のKuhn-Tucker条件(1次の必要条件)[15]を考慮すると, パレート最適解での部材総体積とコンプライアンスとの関係が次式のように得られる。

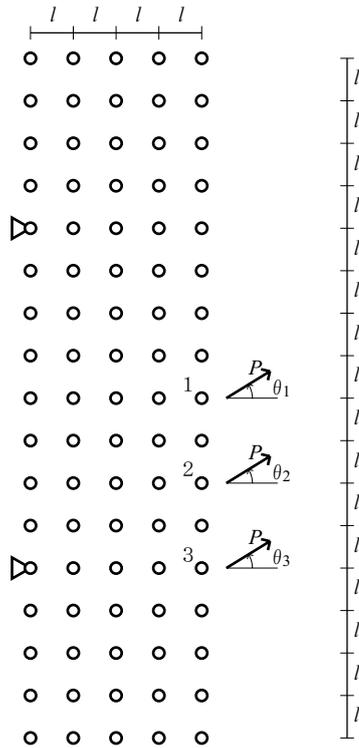
$$VC = (|N|^T l)^2 / E \quad (2)$$

ここに, N, l はそれぞれ部材の軸方向力ベクトル, 部材長ベクトル, $|\cdot|$ は各要素が絶対値のベクトル, 添字 T はベクトル・行列の転置を表す。また, 全部材のヤング係数が等しいものとし, その値を E と表記する。

パレート最適解では, ある設計変数 A_i に関する $|N|^T l$ の偏微分が0となるので, (2)式より $\partial(VC)/\partial A_i = 0$ が得られる。したがって, (1)式のパレート最適解を求める問題は, VC の最小化問題の停留点を求める問題と等価である。さらに, (2)式を考慮すれば, 多目的最適化問題(1)式は, 各部材の軸力 N を設計変数とした次の最適化問題に帰着される。

$$\left. \begin{aligned} f = l^T |N| &\rightarrow \min. \\ \text{subject to } P &= BN \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに, P は節点荷重ベクトル, B は釣合行列を表す。非負変数 N_+, N_- を導入すると, (3)式は次のように



$P = 10\text{kN}$
 $l = 100\text{mm}$
 $\tan \theta_1 = -\infty, -2, -0.5, 0$
 $\tan \theta_2 = -\infty, -3, -0.75, 0, 0.25, 1, \infty$
 $\tan \theta_3 = -\infty, -4, -1, 1, \infty$

図1 85節点2196部材グラウンドストラクチャ (GS1)

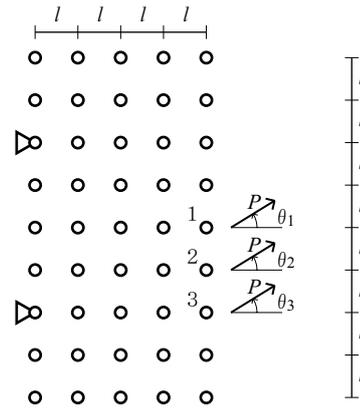
書き換えられる.

$$\left. \begin{aligned} f &= l^T N_+ + l^T N_- \rightarrow \min. \\ \text{subject to } P &= BN \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

上式は線形計画問題であり, シンプレックス法により容易に最適解が得られる. 最小目的関数値を f_{\min} とおくと, 多目的最適化問題(1)式のパレート境界 (V と C の関係式) は次式で表される.

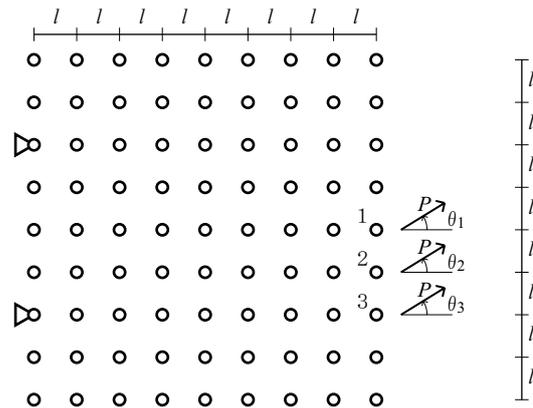
$$C = \frac{f_{\min}^2}{EV} \quad (5)$$

シンプレックス法では, 許容基底解の更新を繰り返して最適解を得る. その際, 基底解の選び方により得られる最適解が異なる場合がある. 基底解の選択はデータの並び順に依存する. そこで, 本研究では部材データの並び順をランダムに変え, それぞれの入力データに対してシンプレックス法を適用し, 多様な解を得る.



$P = 10\text{kN}$
 $l = 100\text{mm}$
 $\tan \theta_1 = -\infty, -1, -0.25, 0$
 $\tan \theta_2 = -\infty, -1.5, -0.375, 0, 0.125, 0.5, \infty$
 $\tan \theta_3 = -\infty, -2, -0.5, 1, \infty$

図2 45節点632部材グラウンドストラクチャ (GS2)



$P = 10\text{kN}$
 $l = 100\text{mm}$
 $\tan \theta_1 = -\infty, -0.5, -0.125, 0$
 $\tan \theta_2 = -\infty, -0.75, -0.1875, 0, 0.0625, 0.25, \infty$
 $\tan \theta_3 = -\infty, -1, -0.25, 1, \infty$

図3 81節点2040部材グラウンドストラクチャ (GS3)

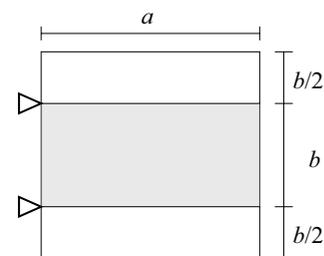


図4 設計領域の模式図

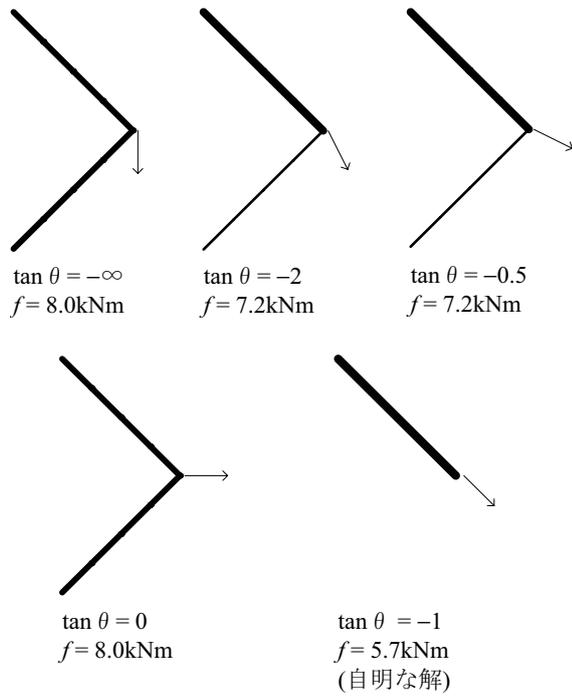


図5 GS1から得られた解(点1に载荷)

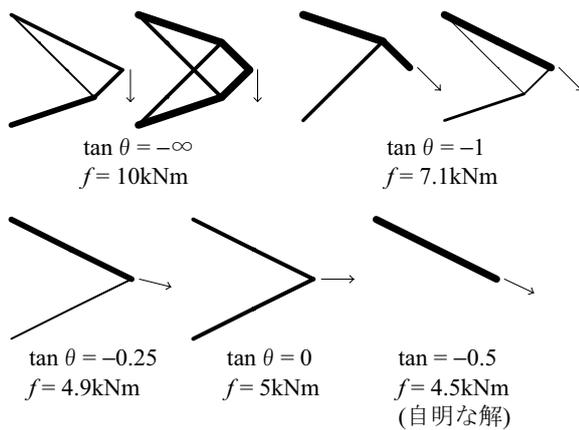


図6 GS2から得られた解(点1に载荷)

4 設計例と考察

4.1 設計例

図1~3に示すグランドストラクチャを解析対象とする。グランドストラクチャの部材は全ての節点をつないだ(重なる部材は除く)ものを考える。節点は格子状に配置し、縦横とも節点間隔 $l = 100\text{mm}$ である。各グランドストラクチャの設計領域は図4のように設定している。荷重は、点1~3のうちのいずれか1点に作用させ、荷重方向は、各図中に示すように、载荷点が点1のとき4方向、载荷点が点2のとき7方向、载荷点が点3のとき5方向を考える。

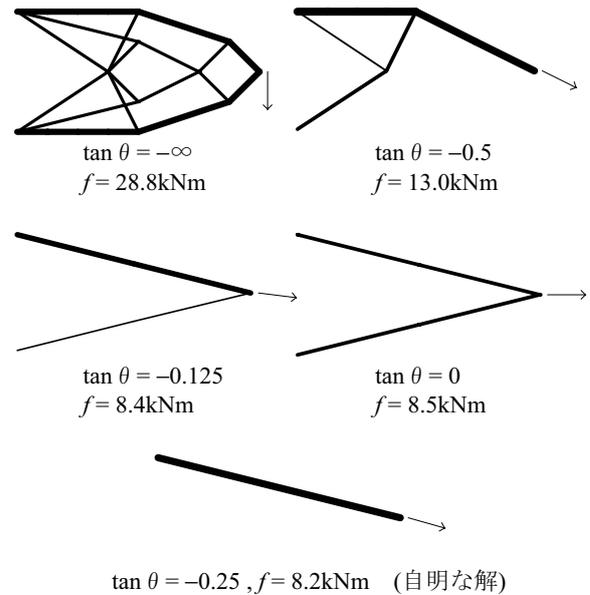


図7 GS3から得られた解(点1に载荷)

4.2 点1に载荷した場合

各グランドストラクチャで点1に载荷した場合、荷重方向によって図5~7に示すトラス・トポロジーが得られた。図中の部材の太さは軸力に比例しており、軸力に比例した断面積を与えることにより、実際の設計解が得られる。なお、これらの図中には、支点と载荷点とを結ぶ方向が荷重方向と同じ場合の解(自明な解となる)も示している。

図8は、図4中の灰色部分のアスペクト比 b/a や荷重方向の違いによって、どのようなトラス・トポロジーが得られるか示した図である。文献[14]では、図8中の灰色の設計領域のアスペクト比 b/a が1.3~5.3程度(図8中の灰色の範囲)のとき、得られるトラス・トポロジーは、荷重方向によらず全て2部材トラスとなる(荷重方向が支点と载荷点を結ぶ方向と同じ場合を除く)ことが示されている。このことは図5でも確認される。さらに、図5~7の結果より以下の事項が明らかとなった。

- アスペクト比 b/a が1.3程度より小さい場合(図6, 7), 図8中の(i)に示す斜線の領域の荷重方向では、最適トラス・トポロジーは2部材トラスとなる。それ以外の荷重方向(図8中の(i)で矢印の範囲)では最適トラスは3部材以上となり、複数のトラス・トポロジーが得られる場合もある。
- アスペクト比 b/a が5.3程度より大きい場合(文献[14]), 図8中の(ii)に示す斜線の領域の荷重方向では、最適トラスは3部材以上となる。それ以外の

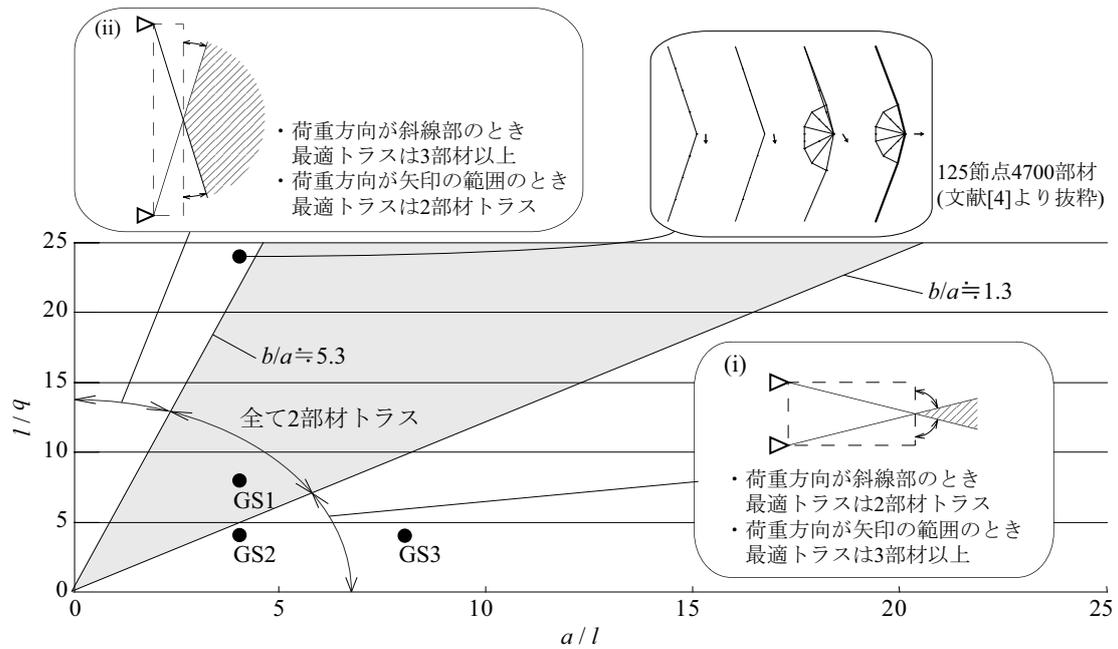


図8 アスペクト比 b/a と最適トラス・トポロジーの関係(点1に载荷)

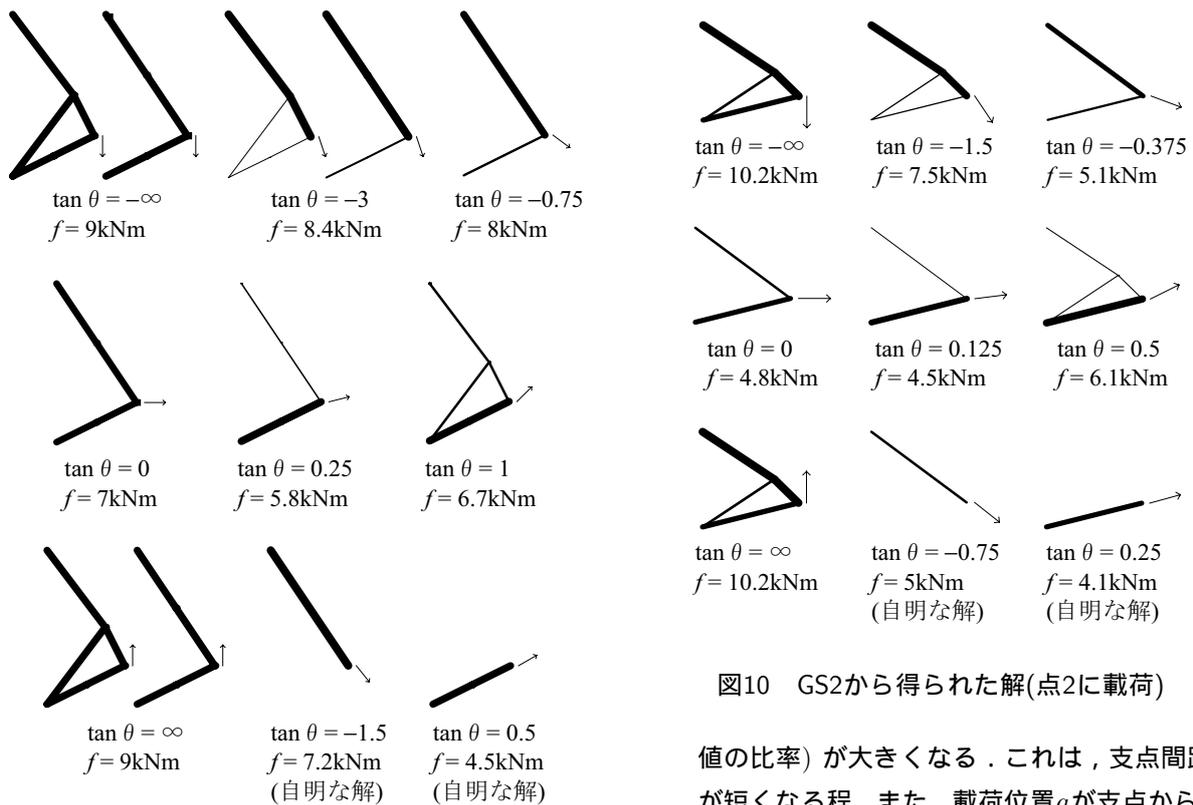


図9 GS1から得られた解(点2に载荷)

図10 GS2から得られた解(点2に载荷)

荷重方向(図8中の(ii)で矢印の範囲)では最適トラスとして2部材トラスが得られる。

- アスペクト比 b/a が小さくなるにつれて、荷重方向の違いによる目的関数値の差異(最小値と最大

4.3 点2に载荷した場合

図1~3のグランドストラクチャの点2に载荷したときに得られるトラス・トポロジーを図9~11に示す。また図12は、アスペクト比 b/a ・荷重方向の差異と得られ

値の比率)が大きくなる。これは、支点間距離 b が短くなる程、また、载荷位置 a が支点から離れる程、鉛直荷重に対して抵抗しにくくなることを示している。

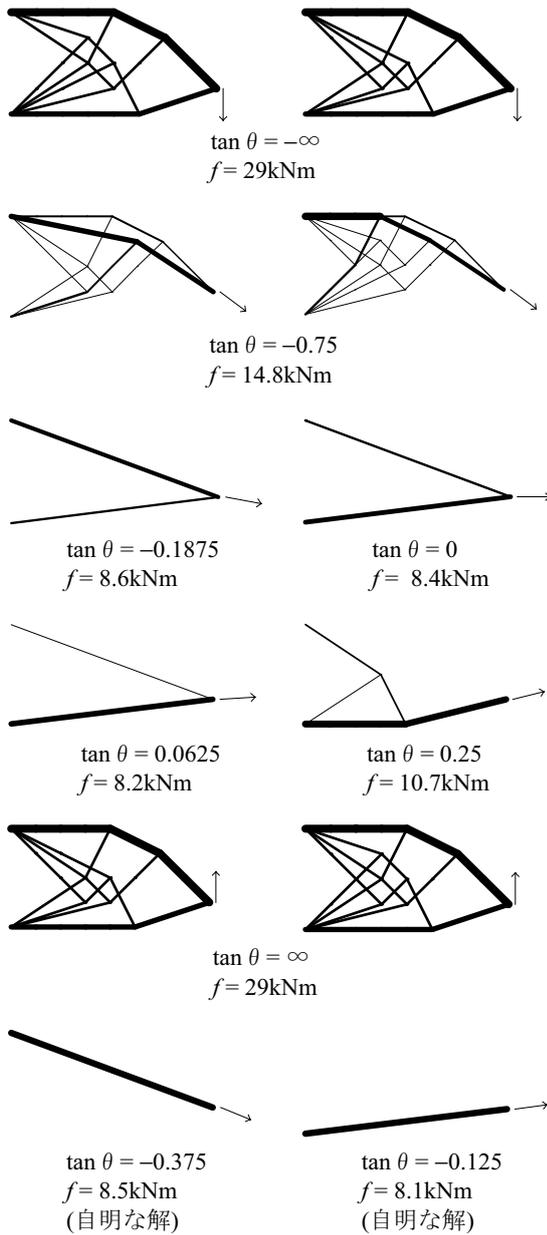


図11 GS3から得られた解(点2に载荷)

るトラス・トポロジーの関係について表したものである。これらの図より、少なくともアスペクト比 b/a が2程度以下(図12の灰色の範囲)の場合、図12中の四角内の模式図で灰色の範囲にある荷重方向では、最適トラス・トポロジーが2部材になり、それ以外の荷重方向では3部材以上の最適トラス・トポロジーが得られることなど、4.2節で述べた特徴と同様の傾向が確認される。

4.4 点3に载荷した場合

各グランドストラクチャの点3に载荷した場合に得られるトラス・トポロジーには、点2に载荷したときと同様の傾向がみられた。一方、点3に载荷した場合にだけ現れる特徴もある。図13はGS3から得られたトラス・

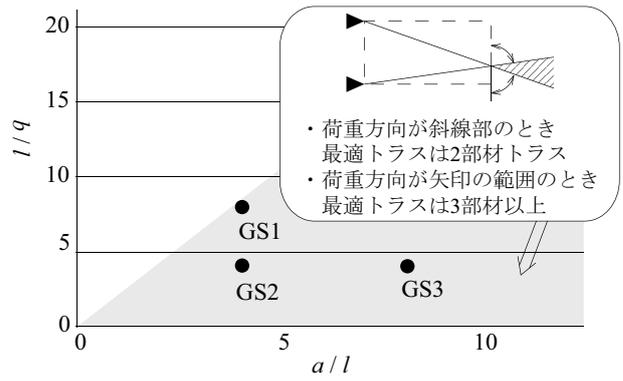


図12 b/a と最適トポロジーの関係(点2に载荷)

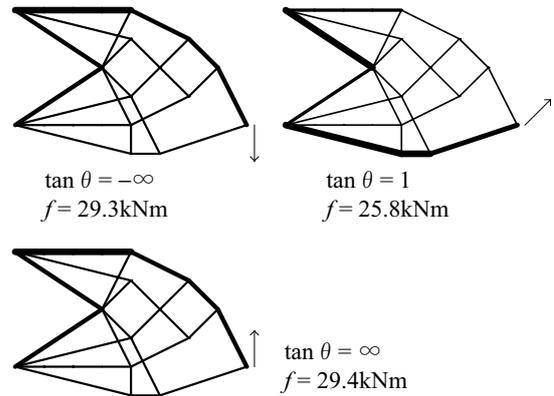


図13 GS3から得られた解(点3に载荷)

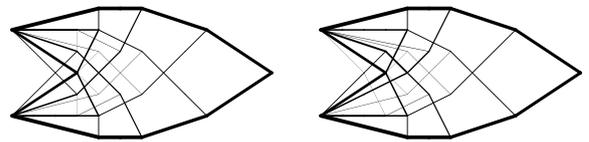
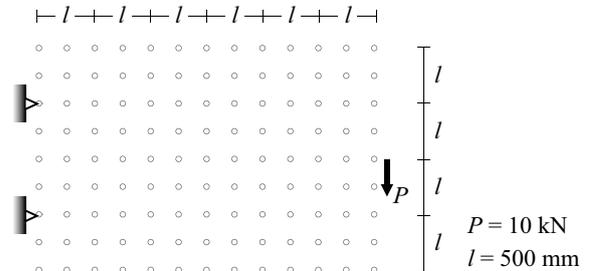


図14 117節点4216部材の設計解(文献[12]より抜粋)

トポロジーを示しているが、この設計例だけ、支点間の外の領域に部材が存在するトポロジーが得られた。また、文献[12]ではアスペクト比 $b/a = 1/3$ のグランドストラクチャについて設計を行っており(本稿の設計例における点1に载荷)、この例でも支点間の外の領域に部

材が存在するトポロジーが得られている。これらの例から、グラウンドストラクチャのアスペクト比 b/a が小さいか、あるいは荷重点が偏在する場合には、支点間の外の領域に部材が存在するトポロジーが解となる傾向にあることが示唆される。

5 まとめ

本稿では、部材総体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジーの多目的最適化問題に線形計画法を適用した。また、複数の設計例から、グラウンドストラクチャのアスペクト比、荷重位置・方向、設計領域の広さが得られる最適トポロジーに与える影響について考察した。本稿の内容は以下のようにまとめられる。

- 最適トポロジーとして2部材トラスが得られるときのアスペクト比、荷重方向を定量的に示した。
- 上記以外のアスペクト比、荷重方向では、最適トポロジーが複雑・多様になる傾向があることを示した。
- グラウンドストラクチャのアスペクト比が小さいか、荷重点が偏在すると、広い領域まで部材が存在するトラス・トポロジーが得られる傾向にあることを示した。

これらの特徴をふまえれば、大規模な設計対象でも効率よく最適解を得られることができると考えられる。計算効率の向上については今後の課題である。

参考文献

- 1) Ohsaki, M. and Katoh, N. : 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, 2005.3
- 2) Rajeev, S. and Krishnamoorthy, C.S. : Discrete optimization of structures using genetic algorithms, *Journal of Structural Engineering*, Vol.118, No.5, pp.1233-1250, 1992.5
- 3) 曾我部, 中垣 : 適応型遺伝的アルゴリズムによるトラス構造物の最適化, *構造工学論文集*, Vol.49B, pp.303-308, 2003.3
- 4) Ben-Tal, A. and Bendsoe, M.P. : A new method for optimal truss topology design, *SIAM Journal on Optimization*, Vol.3, No.2, pp.322-358, 1993.5
- 5) 藤井, 鈴木, 大坪 : 最適化手法CONLINを用いた骨組構造の位相最適化, *日本建築学会構造系論文集*, 第548号, pp.59-66, 2001.10
- 6) Cheng, F.Y. and Li, D. : Multiobjective optimization design with Pareto genetic algorithm, *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.9, pp.1252-1261, 1997.9
- 7) Coello, C.A. and Christiansen, A.D. : Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms, *Computers and Structures*, Vol.75, pp.215-238, 2000.5
- 8) 本間, 加治, 登坂 : 免疫アルゴリズムによるトラス構造の多目的最適化と解の多様性, *構造工学論文集*, Vol.49B, pp.309-317, 2003.3
- 9) Zitzler, E. and Thiele, L. : Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), pp.257-271, 1999
- 10) 松嶋, 高田 : 骨組構造物の弾性設計に対する多目的遺伝的アルゴリズムの応用-その2. トラス構造物の弾性設計への応用, *日本建築学会大会学術講演梗概集*, B1, pp.275-276, 2003.7
- 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*, 第598号, pp.87-91, 2005
- 12) 高田 : 線形計画法によるトラス・トポロジーの多目的最適化, *日本建築学会東海支部研究報告集*, 第44号, pp.129-132, 2006
- 13) 高田 : 体積とコンプライアンスを目的関数としたトラス・トポロジーの多目的最適化その1. 線形計画法による最適化, *第55回理論応用力学講演会講演論文集*, pp.141-142, 2006
- 14) 高田, 松岡 : 最適トラストポロジーの多様性・複雑性に関する考察, *計算工学講演会論文集*, Vol.11, pp.709-712, 2006
- 15) 計測自動制御学会編, 中山, 谷野 : 多目的計画法の理論と応用, コロナ社, pp.22-38, 1994

Multi-stable テンセグリティ構造物

張景耀¹⁾ 大崎純²⁾ S.D.Guest³⁾

1) 京都大学建築学専攻, 博士課程, 修士 (工学), is.zhang@archi.kyoto-u.ac.jp

2) 京都大学建築学専攻, 助教授, 博士 (工学), ohsaki@archi.kyoto-u.ac.jp

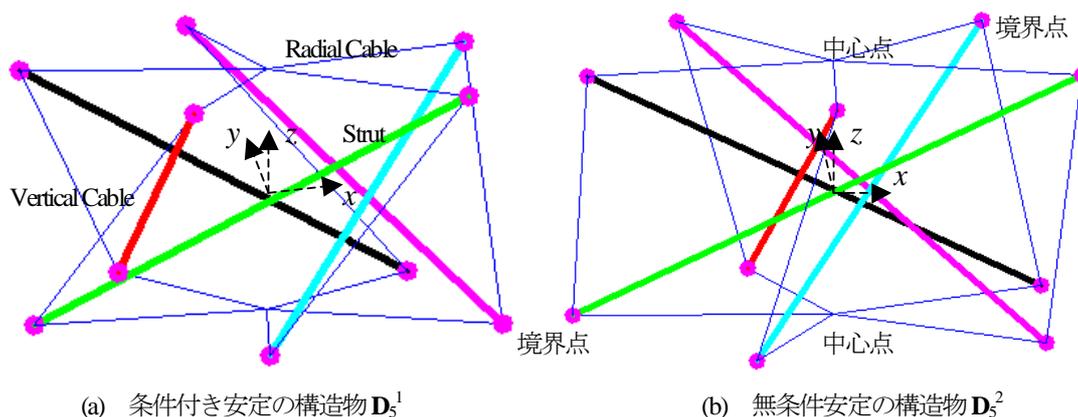
3) Dept. of Engineering, University of Cambridge, Reader, Ph.D, sdg@eng.cam.ac.uk

1. 序

構造物の安定性は外力の作用しない自己釣合い状態において、ひずみエネルギーの極小性によって判定できる。Multi-stable 構造物においては、ひずみエネルギーが極小となるような釣合い状態が複数存在するため複数の安定な釣合い形状を持ち、外力の作用によって、一つの安定形状から他の安定形状へ移行することができる。このような multi-stable 構造物は、宇宙工学や機械工学で有効に利用されている。本論では、新しい multi-stable 構造物である star-shaped prismatic テンセグリティ構造物を紹介し、その multi-stable 挙動を追跡する。

互いに接触しない棒材 (strut) と、連続なケーブルで構成されるピン接合構造物を、テンセグリティ構造物という[1]。棒材の間を接合するためのピンジョイントが不要なので、制作の容易さはこの構造物の一つのメリットとして挙げられる。全ての節点において軸力は自己釣合状態にあるので、通常のピン接合構造物のような自己釣合形状を維持するための固定節点 (支点) も必要ではない。

テンセグリティ構造物の安定性は軸力分布と形状に大きく依存している。本論の研究対象である図 1(a), (b)に示すような star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の安定性は、構造物の位相 (部材の接続関係) 及び高さや半径 (上下面それぞれの節点が存在する円の大きさ) の比によって異なる。基本的には、無条件安定(super stable)と条件付き安定(prestress stable)という二つの場合がある[2, 3]。例えば、図 1 に示すような 2 種類の star-shaped prismatic テンセグリティ構造物は同じ数の節点と部材を持ち、vertical cable (上下の二つの平面にある境界点を繋ぐ細線) の接続関係のみが異なる (D_5^1 と D_5^2 は 2 節で述べるように構造物の対称性と接続関係を表す)。しかし、図 1 (a)の構造物は条件付き安定であるが、図 1(b)の構造物は無条件安定である。



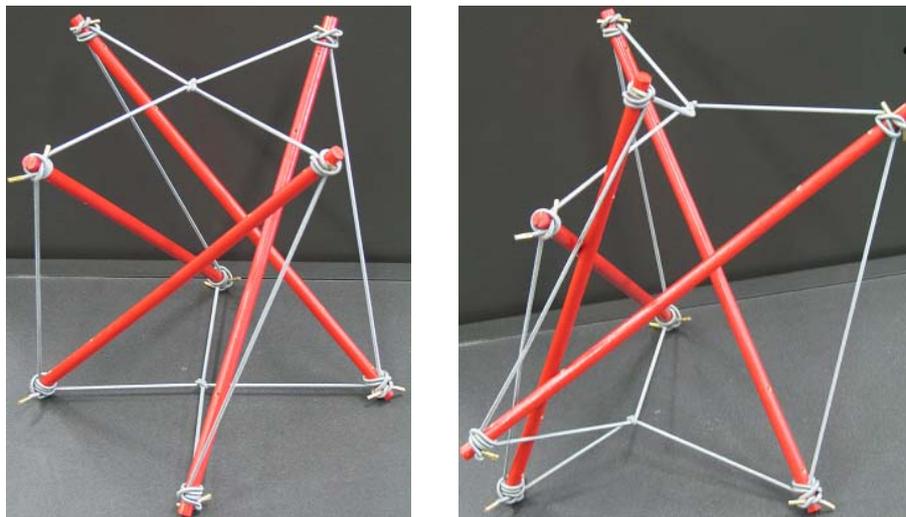
(a) 条件付き安定の構造物 D_5^1

(b) 無条件安定の構造物 D_5^2

図 1 Vertical cable の接続関係が異なる 2 種類の star-shaped prismatic テンセグリティ構造物

無条件安定(super stable)の場合には、形状 (高さおよび半径) や部材の剛性や軸力のレベルなどにもかかわらず、構造物のひずみエネルギーは唯一の大域的な最小値があり、条件付き安定の場合には、幾つかの極小値がある。これらのエネルギー

一の極小値に応じて、条件付き安定な構造物は多数の安定形状を有している。例えば、図 2(a)に示すような 4 本の strut を持つ star-shaped prismatic テンセグリティ構造物は無条件安定ではなく、2 節で示すように高さの半径に対する比が十分に大きい場合には安定である。また、外力の作用によって、高い対称性を持っている元の安定形状(図 2(a))から、図 2(b)のような別の安定形状へ達することができる。対称性により、3 節に示すとおり、この構造物には無変形の安定形状を含めて 5 個の安定形状がある。ここで、図 2(b)での安定形状において 3 本の strut が接している。



(a) 安定形状 1

(b) 安定形状 2

図 2 Star-shaped prismatic テンセグリティ構造物 D_4^1 の安定形状

本論の構成は以下のとおりである。まず、2 節で star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の自己釣合条件と安定性条件を導く。続いて 3 節でその multi-stable のひずみエネルギー曲線形状を求めることによって原形状とは異なる安定な釣合い形状が存在することを示し、4 節で結論と今後の課題を述べる。

2. 自己釣合形状と安定性

図 3 に示すように、star-shaped prismatic テンセグリティ構造物には 2 種類の節点 (境界点と中心点) と、3 種類の部材 (strut, radial cable, vertical cable) がある。全ての節点は xy 平面に平行な二つの平面上にある。Radial cable は同じ平面にある境界点と中心点を接続し、strut と vertical cable は異なる平面にある境界点を接続する。Radial cable の長さを構造物の半径 R とし、二つの平面の z 方向の座標差を構造物の高さ H とする。

Star-shaped prismatic テンセグリティ構造物は dihedral 対称性 D_n を有している。 D_n では $2n$ 個の対称操作: n -fold 回転主軸 (z -軸) および構造物の中心を通り z -軸と直交する n 個の 2-fold 回転軸がある。節点或いは部材の集合において、 D_n の対称操作によって 1 つの要素が他の任意の要素に移動できる場合には、この集合の要素は一つの orbit にあるという。 D_n 対称性を有する star-shaped prismatic テンセグリティ構造物において、2 種類の節点 orbit ($2n$ 個の境界点と 2 個の中心点) があり、3 種類の部材 orbit (n 個の strut, $2n$ 個の radial cable と n 個の vertical cable) がある。

上平面の節点に時計まわりに 1 から n まで、下平面の節点に $n+1$ から $2n$ までの番号を付け、中心点の節点番号を $2n+1$ 及び $2n+2$ とすると、各部材の両端の節点番号は以下のとおりである。

Strut: 上平面の境界点 i と下平面の境界節点 $n+i$ ($i=1, \dots, n$)。

Radial cable: 上平面では境界点 i と中心点 $2n+1$ 、下平面では境界点 $n+i$ と中心点 $2n+2$ 。

Vertical cable: 上平面の境界点 i と下平面の境界点 $n+v$ (v はパラメータ、 $v \leq n/2$)。

Star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の位相は、strut の数 n および vertical cable の接続関係を表すパラメータ v のみで定められる。したがって、 D_n 対称性を有する star-shaped prismatic テンセグリティ構造物を D_n^v と記述する。

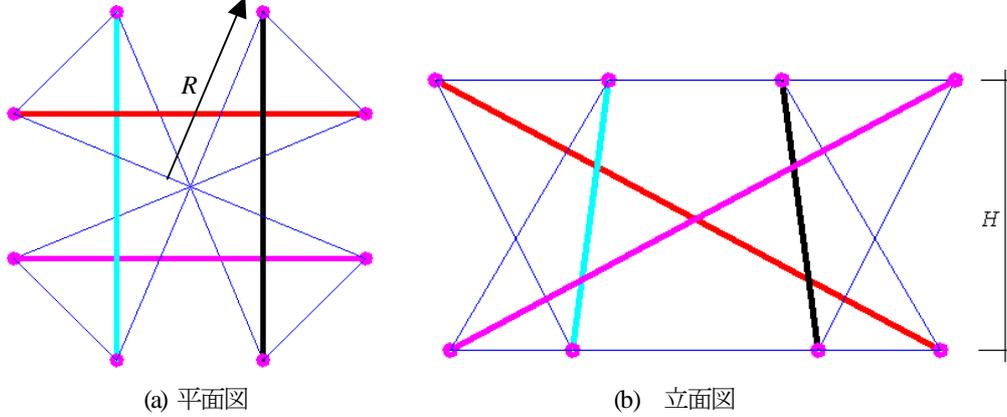


図3 Star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の形状

構造物の対称性によって、各節点 orbit に含まれる節点の自己釣合状態を同一の釣合い式で表現できる。したがって、構造物全体の自己釣合方程式の代わりに、代表節点（一つの境界点と一つの中心点）の自己釣合状態だけを考えれば十分である。Strut、radial cable と vertical cable の force density をそれぞれ q_s 、 q_r および q_v とすると、自己釣合状態での各部材の force density は次の関係が成立する[3]。

$$q_v / q_s = -1 \tag{1}$$

$$q_r = \sqrt{2(1 - \cos(2v\pi / n))}$$

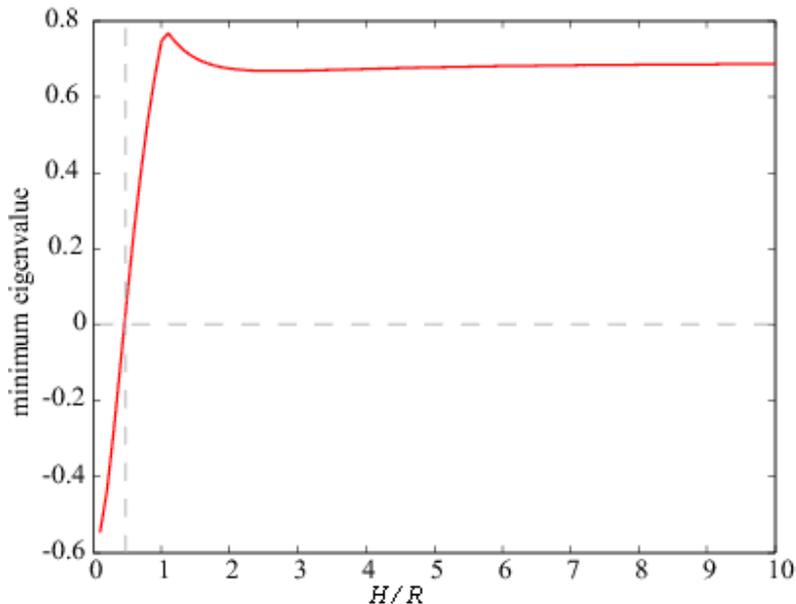


図4 条件付き安定の構造物 D_4^1 の最小固有値と形状の関係

式(1)より、自己釣合状態での各部材の force density は構造物の形状 (H と R) に依存しないことが分かる。しかし、条件付き安定の構造物の安定性は、構造物の形状に依存する。

Star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の安定性は vertical cable の接続関係に依存する。Zhang ら[3]は n が奇数で $v=(n-1)/2$ である場合に、 H/R 、材料特性および軸力のレベルにかかわらず無条件安定であることを証明した。それ以外の場合には H/R の値によって安定である可能性がある。例えば、部材の剛性が無限大であるものと仮定した場合、図 1(a) のような 4 本の strut を持つ構造物 D_4^1 の接線剛性行列の最小固有値と H/R の関係を図 4 に示す。ここで、剛体変位は拘束されているものとし、最小固有値が正のとき安定である。図より、 H/R が 0.5 より大きい場合には安定となるが、0.5 より小さい場合には不安定であることがわかる。

3. Multi-stable 挙動

条件付き安定の star-shaped prismatic テンセグリティ構造物は、ひずみエネルギーの極小値に対応していくつかの安定形状を持つ可能性がある。図 2 で示した構造物 D_4^1 は、元の D_4 対称性を持つ形状 (図 2(a)) を含めて、5 個の安定形状を持っている。本節では、この構造物を対象として、その multi-stable 挙動を数値的に追跡する。

部材 i の軸力を s_i 、長さを l_i 、断面積を A_i 、ヤング係数を E_i とする。構造物のひずみエネルギー Π は

$$\Pi = \sum s_i^2 l_i / (2A_i E_i) \tag{2}$$

のように各部材のひずみエネルギーの和と書ける。

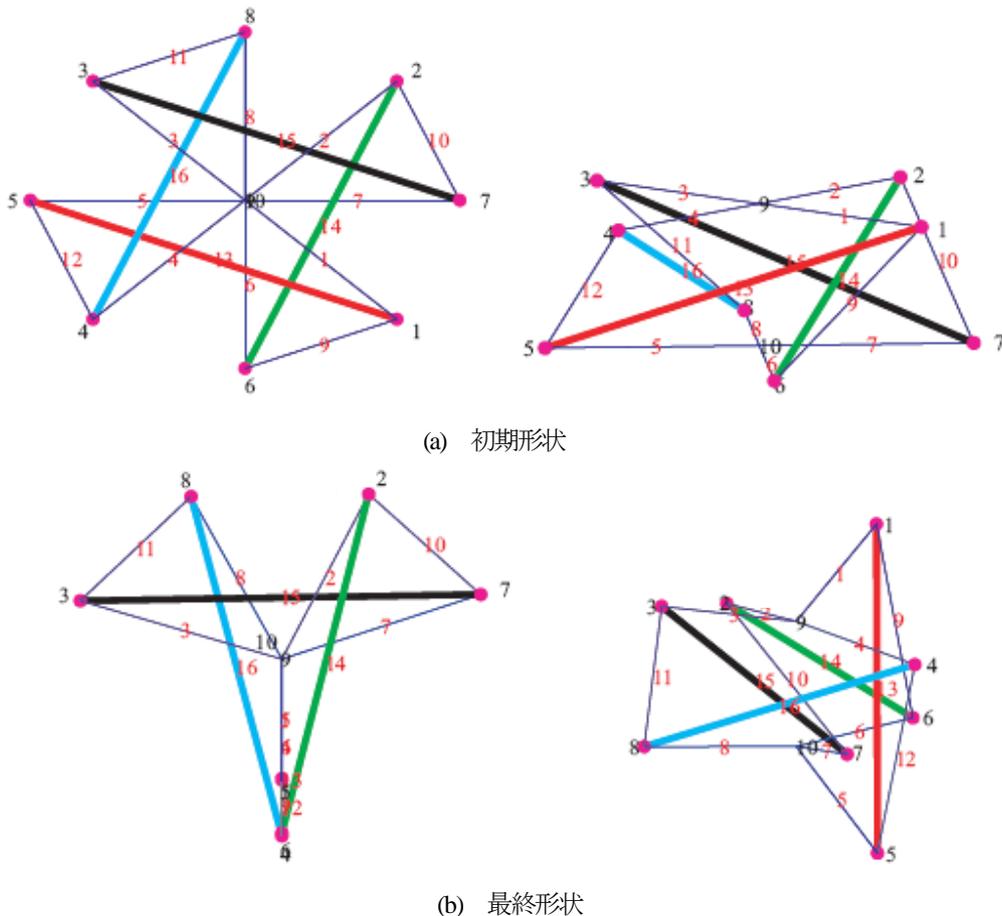


図 5 Multi-stable 構造物 D_4^1 の安定形状

$H/R=1.0$ の場合には、図4より初期の釣合い形状は安定である。各 strut の線形剛性 $A_i E_i$ を 1000 kN、cable の線形剛性を 100 N とする。構造物の剛体変位を拘束するため、下平面にある中心点 10 の xyz 方向、上平面にある中心点 9 の xy 方向および境界点 6 の x 方向の変位を拘束する。節点 4 の反時計まわり $0^\circ \sim 45^\circ$ の回転角を θ とし、 θ とひずみエネルギー Π の関係を求める。 θ を 2.25° 間隔で増加させ、Newton-Raphson 法を用いて各ステップでの釣合軸力を求める、得られたひずみエネルギーを図6に示す。

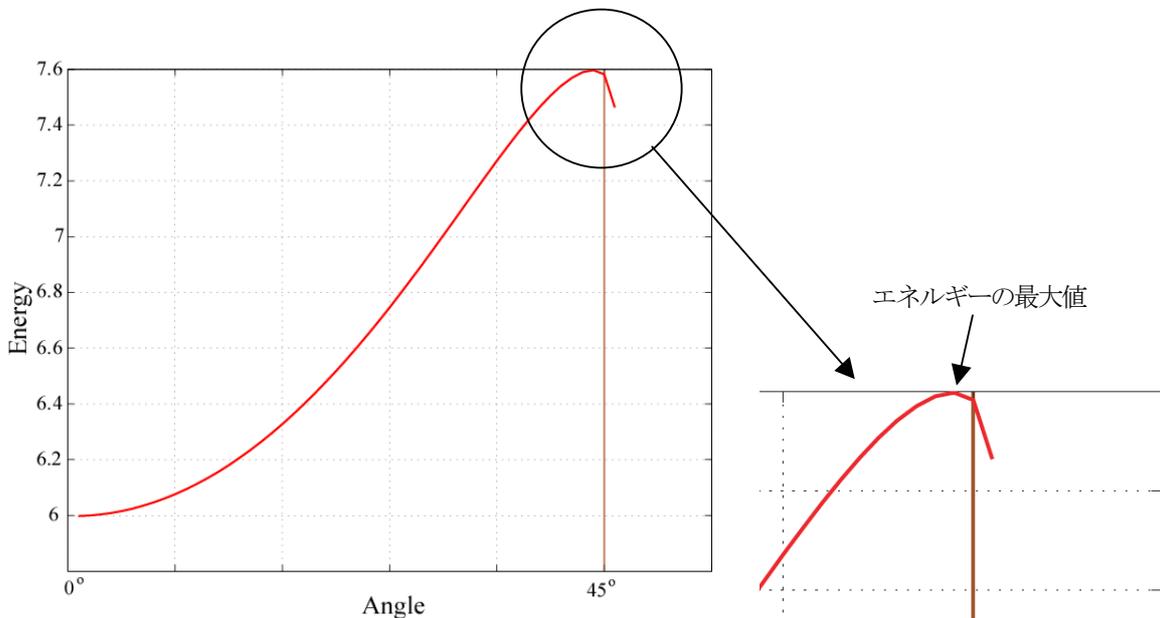


図6 回転量とひずみエネルギーの関係

節点4の回転量と構造物のひずみエネルギー Π の関係は、大きく下記のような5段階に分けられる。

- (1) 初期形状(0°): この段階では、 Π の θ に関する微分係数(曲線の傾き)はゼロなので、構造物は自己釣合い状態にある。また、 Π は極小であり、 θ の微小な変化に対して Π は増加するので、この形状は安定である。
- (2) 初期形状からエネルギーの最大値まで: この段階では、構造物は自己釣合い状態ではない。実際にこの状態まで強制回転を与えたならば、外力の除去によって初期形状に戻る。
- (3) エネルギーの最大値: エネルギーの曲線の傾きはゼロとなるが、 Π は極大であり、この状態は不安定な自己釣合い状態である。実際にこの状態まで強制回転を与えたならば、外乱の方向によって、初期形状あるいは下記の最終形状に移動する。
- (4) エネルギーの最大値を超えた状態: エネルギーの曲線の傾きはゼロでないので、構造物は自己釣合い状態ではない。実際にこの状態まで強制回転を与えたならば、外力の除去によって最終形状まで移動する。
- (5) 最終形状: エネルギーの曲線の傾きはゼロでないので、この状態は自己釣合いではないが、図2(b)あるいは図5(b)で示すように、3本のstrutが接することによって θ は増加することはできないので、 Π は減少することができず、極小値をとる。したがって、strut間の接触力によって構造物は釣合い状態にあり、安定である。

構造物 D_4^1 は dihedral 対称性を持っているので、節点4以外の他の境界点に強制回転を与えても、初期形状とは異なる釣合い形状に達することができる。したがって、この構造物は初期形状を合わせて5個の安定形状を有している。ここで、最終形状においては初期形状より対称性が低くなっている。

4. まとめ

本論では、新しい multi-stable 構造物である star-shaped prismatic テンセグリティ構造物を紹介し、その multi-stable 挙動を数値計算で追跡した。また、この multi-stable 挙動を物理的なモデルで確認した。

構造物の対称性によって、star-shaped prismatic テンセグリティ構造物の初期形状での force density を簡単に求めることができる。この種類のテンセグリティ構造物の無条件安定性は、vertical cable の接続関係で定められる。また、無条件安定でない場合、その安定性は構造物の形状（半径に対する高さの比）に依存することを示した。さらに、条件付き安定の構造物がいくつかの安定形状を持つことを明らかにした。

今後の研究では、構造物の形状および部材の材料特性などの multi-stable 挙動への影響について検討する予定である。

謝辞

本研究の一部は、第一著者が京都大学研究教育振興財団の奨学金の援助で連合王国・ケンブリッジ大学に滞在中に行われました。本研究を進めるに当たり Robert Connelly 教授（アメリカ合衆国・Cornell 大学）の助言を頂きました。ここに記して深謝致します。

5. 文献

- 1) Fuller, R. B. : Synergetics, Explorations in the Geometry of Thinking, Collier Macmillan, London, UK, 1975.
- 2) Connelly, R.: Tensegrity structures: why are they stable? Rigidity Theory and Applications, Thorpe and Duxbury (eds.), Kluwer/Plenum Publishers, 47–54, 1999.
- 3) Zhang, J.Y., Guest, S.D. and Ohsaki, M.: Star-shaped Tensegrity Structures, to be submitted to Int. J. Solids & Structures.

フィルムクッションの形態創生と粘塑性について

河端昌也

横浜国立大学大学院工学研究院, 助教授, 博士(工学), kawabata@arc.ynu.ac.jp

1 はじめに

ETFEフィルムは図1のような鎖状高分子が凝集した結晶化度の低い高分子材料で、原子間の「化学的結合」と鎖状高分子間の分子間引力や鎖のからみによる「物理的拘束」の両者が共存している¹⁾。図2のような著しい延性や粘性は結合力の弱い物理的拘束に起因する。このためフィルムの引張降伏応力と弾性率にはひずみ速度依存性があり、図3のようにひずみ速度が大きくなると降伏応力が上昇する²⁾。

膜構造の曲面形成は立体裁断によって行うのが通常であるが、延性の高いフィルムでは、その伸び特性を活用した延伸成形も曲面形成手法のひとつである。延伸の効果として、裁断溶着工程の簡略化、材料の塑性硬化による降伏点上昇が期待できる反面、厚さの減少やしわ、局所的な伸びの問題も生じうるため、延伸成形の適用範囲を明らかにすることが重要である。

ETFEフィルムの繰返引張特性は図4に示すように、降伏応力以下では弾性挙動を示し、降伏応力の約60%を超えると粘性によるヒステリシスを描きはじめる。降伏応力を超えると1回目の負荷経路で塑性ひずみを生じて伸びが大きくなるが、除荷および同一応力による2回目以降の負荷経路では、粘弾性的なヒステリシス曲線を再び描く。つまり、塑性ひずみを生じた後は比較的安定した粘弾性挙動を示すといえる。延伸成形はこの安定領域を活用するのが特徴である。

本論はETFEフィルムの粘塑性特性を活かしたパネルの曲面形成の可能性を示すことを目的としている。

2. ETFEフィルムの粘塑性特性と延伸

フィルムの延伸を制御するためには、その粘塑性特性を適切に評価することが不可欠である。高分子材料の粘性は、一般に時間依存性および温度依存性をもつことが知られており、ETFEフィルムはさらに図5のように応力依存性の非線形粘性を示すことが分かっている

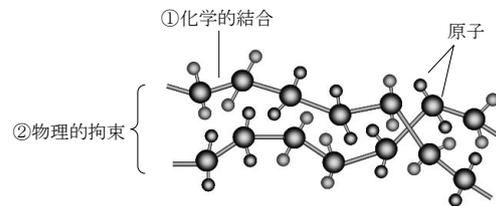


図1 高分子材料の内部構造

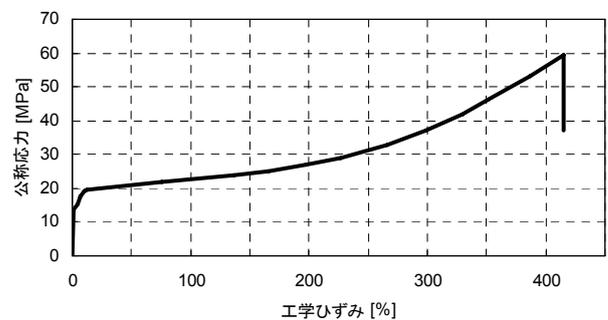


図2 ETFEフィルムの応力ひずみ曲線

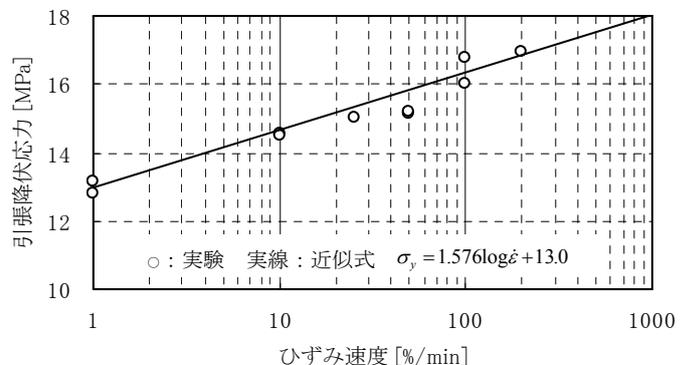


図3 ひずみ速度と引張降伏応力の関係

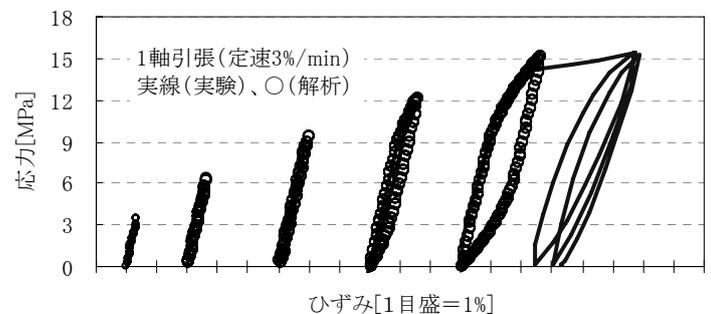


図4 漸増繰返ひずみ 3%/min(23°C)

る³⁾。ETFEフィルムの粘性モデルとして、著者らは図7の一般化Maxwellモデルと補正関数による評価手法を提案してきた⁴⁾。図4は本手法による解析結果を示したもので、実験結果と比較的良好な一致を示している。なお、15MPaの実験結果は1回目の負荷経路で塑性ひずみを生じるため解析との差異が大きくなっているが、これは一般化Maxwellモデルに塑性スライダー等を付加する事で表現可能と思われる。

図6は平面フィルムパネルを内圧で延伸して立体パネルに成形する場合のイメージである。フィルムは加圧によって粘弾性変形を生じ、降伏応力を超えると粘塑性変形、最大内圧以降の除荷経路および再負荷経路では粘弾性変形を生じて完成形状に達する。延伸後の降伏応力は初期よりも上昇し、粘塑性変形時の負荷曲線と再負荷経路の交点が新しい降伏応力に相当する。

3. 加熱加圧成形実験

異なる温度下での粘弾性特性を表す関数が、対数時間目盛に沿って平行に移動可能な材料は熱レオロジー的に単純な材料で、その性質は時間-温度換算則と呼ばれている。換言すると、高温下では常温下の長時間にわたる粘性挙動が短時間で再現されることになる。ETFEフィルムの時間-温度換算因子（任意の温度 T [K]において現象を観測する際の物理時間） $a_{T0}(T)$ は、アレニウス式を用いた次式で表すことができる。

$$\log_{10} a_{T0}(T) = \frac{1}{2.303} \frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (4)$$

ただし $R=8.314$ [J/mol/K]、気体定数)、 T_0 : 基準温度[K]、 ΔH : 活性化エネルギー[J/mol/K] (表1)

表1 活性化エネルギー

温度 °C	kJ/mol/K
-20~40	113.707
40~90	342.261
90~120	447.237

加熱加圧成形はこのようなフィルムの性質を利用した方法で、成形時の張力による外周フレームへの負荷の軽減と、クリープひずみの停留安定を短時間で完了できることが特徴である。図8、9はその様子を示したもので、2m角の正方形パネルを断熱材の保温槽で囲み、その中に加熱用の熱源と空気攪拌用の扇風機を設置し

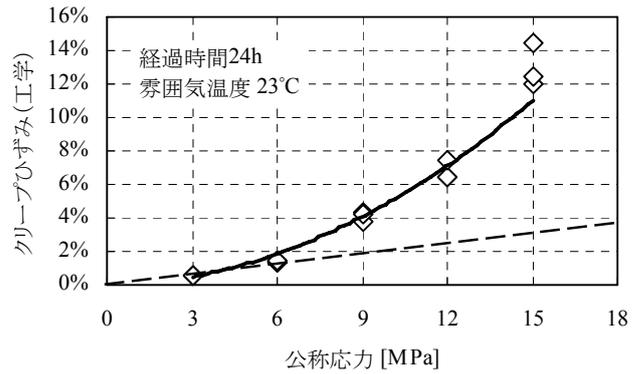


図5 クリープひずみの応力依存性

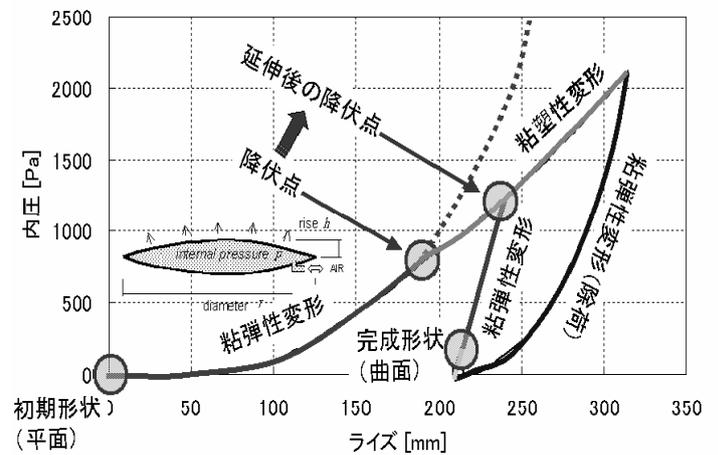


図6 フィルムパネルの塑性成型

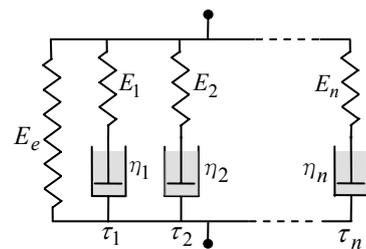


図7 一般化 Maxwell モデル

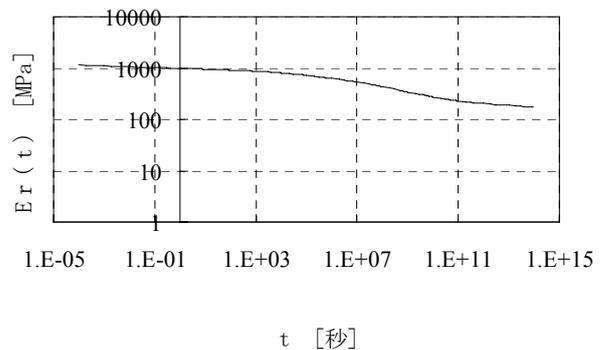


図8 緩和弾性率

ている。実験の手順は次のとおりである。

- ① 試験体取付
- ② 加熱（室温→60℃）
- ③ 加圧成形（0Pa→最大内圧→0Pa）
- ④ 冷却（60℃→室温）
- ⑤ 再加圧（0Pa→常時内圧→0Pa）

図 11 は上記の手順を模擬したフィルムの 1 軸引張試験結果である。実験は送風機の風量の関係でフィルムのひずみ速度にして 0.15%/min で延伸することになるため、引張試験も同じひずみ速度で行っている。a-b 間は、常温（約 23℃）弾性域での負荷－除荷経路である。a 点から 60℃に昇温するとフィルムに 0.6%の温度ひずみが発生する（c 点）。60℃のまま 6.5%までフィルムを伸ばし（d 点）、直ちに除荷すると 3.7%の残留ひずみが生じる（e 点）。次に常温に戻すと温度ひずみが 0.9%回復し、最終的に 2.8%の残留ひずみを得られる（f 点）。f-g-h の曲線は、f 点を起点とした常温での負荷－除荷経路を示している。図 11 の 1 軸引張試験結果から成形過程の応力変形解析を行うことも可能である。図 12 は試験体の曲面形状を直径 2m の円弧と仮定した場合のひずみとライズ比の関係を示している。図 11 との対応をとると、図 1c 点のライズは 100mm、d 点は 315mm、e 点は 238mm(この時応力 0 のため懸垂状態)、f 点は 206mm でスパンの約 1/10 に相当する。

図 13 は成形時の内圧とライズ比の関係である。除荷時の内圧が 0.15kPa 以下になると比較的大きなひずみの現象が見られ、高分子材料特有のひずみ回復が ETFE フィルムにもあることが明らかになった。常温での再加圧時は弾性を示し、曲面成形によって安定した剛性が得られていることが確認された。

図 14 はフィルム延伸後の伸びから算出した残留ひずみ分布である。測定箇所は全体の 4 分の 1 部分で、予め 100mm 間隔の格子点をフィルム表面にプロットしておき、実験終了後に各点の距離を測ることでひずみを求めている。一方、図 17 は解析での最大内圧時の応力分布図である。両者を比較すると X 方向、Y 方向ともに最大圧力時の応力分布が成形後の残留ひずみに対応していることがわかる。また、試験体四隅部分はひずみが小さく、中央軸の稜線において最大で 4%～5%の

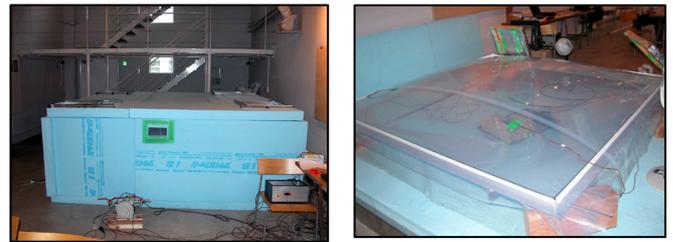


図 9 保温槽の外観（左）と試験体の様子（右）

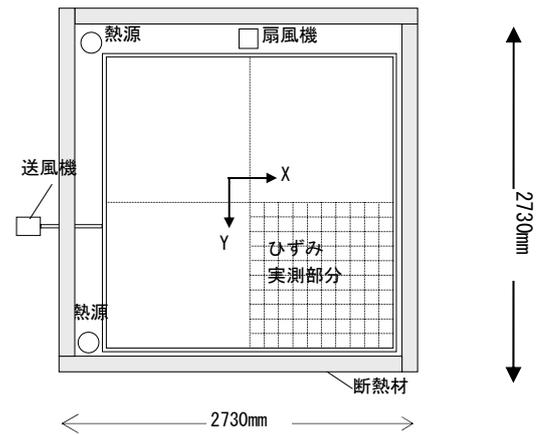


図 10 フィルム試験体と試験装置

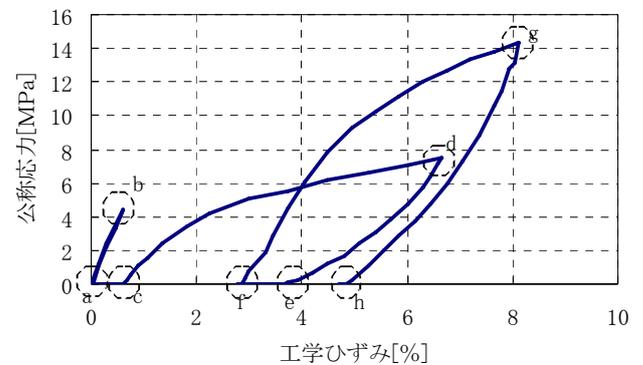


図 11 実験を模擬した 1 軸引張試験

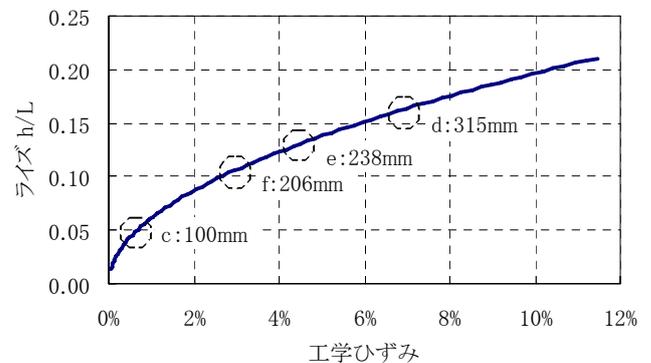


図 12 ライズ比と平均ひずみの関係

残留ひずみを生じていることが確認された。

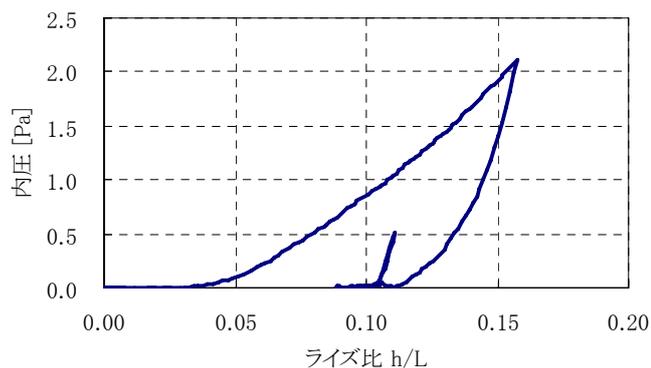


図 13 内圧とライズの関係

4. まとめ

本報では、高い延性を有する ETFE フィルムの粘塑性特性を活用したパネルの曲面形成について示し、安定した延伸効果が得られることを確認した。

参考文献

- 1) 岡小天:レオロジー入門、株式会社工業調査会、1970
- 2) 森山史朗、河端昌也: ETFE フィルムのクリープ特性 - 遅延時間の分布関数による考察 -、膜構造研究論文集 2004、pp47-51、2005
- 3) 河端昌也、森山史朗: ETFE フィルムのひずみ速度依存性と構造挙動について、膜構造研究論文集 2004、pp41-46、2005
- 4) 森山史朗、河端昌也、西川薫、小竹達也、山内優、薛学禎: ETFE フィルムパネルの加熱加圧成形に関する研究 (その 1) (その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp929-932、2005
- 5) 高分子学会編: 高分子科学の基礎 第 2 版、株式会社東京化学同人、1994
- 6) L・E・NIELSEN: 高分子と複合材料の力学的性質、株式会社化学同人、1976

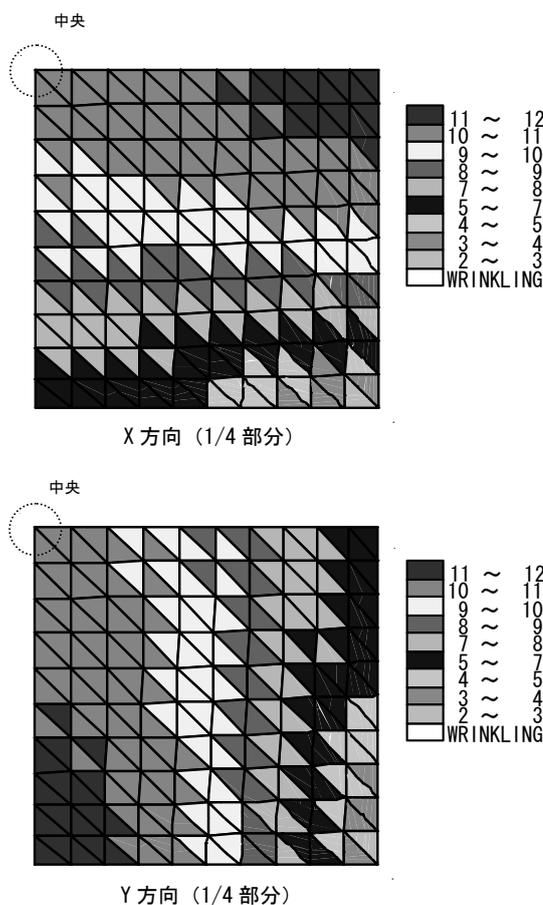


図 14: 応力分布 (N/mm²)
最大圧力時 2116Pa

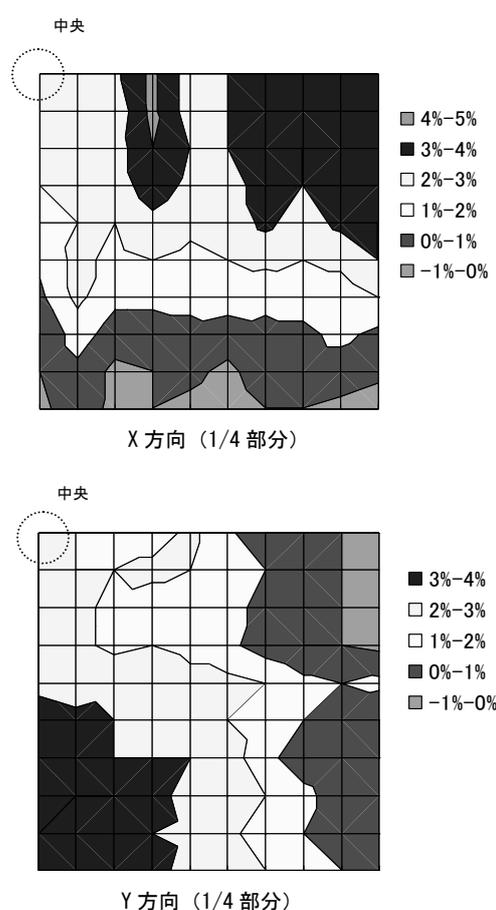


図 15: ひずみ実測値
常温・成形後

グリッドシステムを用いた遺伝的アルゴリズムによる制御部材最適探索法

中澤祥二¹⁾, 柴田良一²⁾, 島岡俊輔³⁾, 加藤史郎⁴⁾

- 1)豊橋技術科学大学 建設工学系 助手 nakazawa@tutrp.tut.ac.jp
- 2)岐阜工業高等専門学校 建築学科 助教授 ryos@rokusho.archi.gifu-nct.ac.jp
- 3)豊橋技術科学大学 機械・構造システム工学専攻 大学院生 shimaoka@st.tutrp.tut.ac.jp
- 4)豊橋技術科学大学 建設工学系 教授 kato@tutrp.tut.ac.jp

1 はじめに

近年の計算機技術や構造最適化手法の発展に伴い、力学的に優れた構造形態やユニークな構造形態を創生するためのコンピュータを積極的に利用した手法の提案がなされている^{1)~4)}。また、形態創生や形状最適化だけでなく、制御部材の最適配置問題などの組合せ最適化問題への適用もなされつつある。この種の構造最適化問題の解、または、設計者がより望ましい解を現実的な時間内に求める手法として、遺伝的アルゴリズム（以後、GA と呼ぶ）は極めて汎用性の高い探索方法であることが既往の研究^{5)~9)}から示されている。

さて、GA を用いた構造最適化手法では、世代ごとに候補解の適応度を計算する必要があり、適応度の関数が複雑な場合には、適応度の計算に莫大な演算時間を必要とする。演算時間を短縮するためには、大型計算機 PC クラスタを導入することも1つの解決策ではあるが、本研究で対象とするグリッドシステム^{11,12)}の利用も有効であると考えられる。曾我部⁹⁾は PC クラスタを用いた並列 GA を提案し、PC クラスタによる並列処理が GA の解析時間を大幅に短縮できることを示している。グリッドシステムは、HPC(ハイパフォーマンスコンピューティング)の一手法であり、安価な計算機群を用いて、多くのパラメトリック解析に利用可能なシステムである。既報¹⁰⁾では、グリッドシステムの構築例や高い演算能力を検証している。したがって、グリッドシステムを用いて演算時間のかかる適応度の計算を行い、GA と組み合わせることにより効率的な探索が可能であると考えられる。

本研究では、GA を用いて候補解を発生や評価を行い、グリッドシステムで適応度の計算を行うようなシステムを「グリッドシステムを用いた GA による最適設計システム」と呼び、本システムの有効性や実用可能性を検討する。まず、第2において、グ

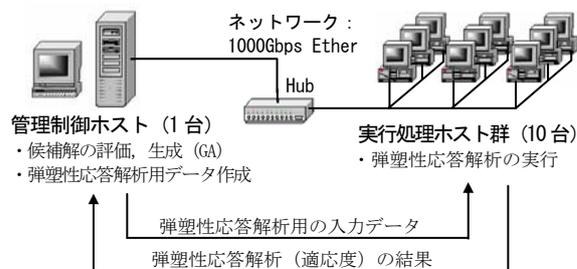


図1 グリッドシステムの概要

リッドシステムの概要やシステムの構築例を示し、グリッドシステムの演算効率の検証を行う。また、グリッドシステムの高い演算能力を利用した構造最適化問題への適用例を紹介する。第3章では、通信鉄塔の座屈拘束ブレース最適配置問題への適用例を通して、グリッドシステムを用いた GA による最適設計システムの有効性や実用可能性を検討する。

2 グリッドシステム

2.1 グリッドシステムの概要

グリッドシステムは、多くの計算機群を用いて多数のジョブを分散処理し、一定時間あたりの処理能力を向上させることができるものである。ネットワークの構成は、図1に示すように、管理制御ホスト(1台)はハブを通して、多数の実行処理ホスト群と連結されている。例えば、グリッドシステムを用いた GA による最適設計システムにおいては、管理ホストでは GA の操作に基づき生成された候補解から実行処理ホスト群で弾塑性応答解析を行うための解析データの作成を行い、実行処理ホスト群に解析データを受け渡す。実行処理ホスト群では実際に数値解析を行い、適応度を計算するための解析結果を管理ホストへ受け渡す。管理ホストでは、解析結果より適応度を計算し、候補解の評価を行う。また、適応度に基づき GA の手順に従って次世代の候補解を作成する。

2.2 Sun ONE Grid Engine によるグリッド構築例

本研究では、グリッドシステムを構築するに当たり、サン・マイクロシステムズが提供している Sun ONE Grid Engine^{注1)} (以下 S1GE と略記) を利用した。オープンソース版は無償で公開されており、容易にインストールが可能なソフトウェアである。本研究で目的とするグリッドにおいては、十分な機能を有する最適なシステムといえる。

S1GE を用いたグリッドは、管理制御ホストと実行処理ホストから構成される。管理制御ホストは、NFS(ネットワークファイルシステム)やグリッドの各種サービスを提供する必要があるため、一般に用いられている PC UNIX OS(例えば Linux, FreeBSD) を導入した。このホストは、固定的にグリッドを管理制御するための仕組みをインストールしている。

実行処理ホストは、管理制御ホストからの命令や解析データに基づいて実際に数値解析を行う計算機群である。実行処理ホストは管理制御ホストと同様に PC UNIX OS を導入することもできる。一方、通常の業務に使われている Windows の PC を一時的にグリッドシステムの実行処理ホストに転用することも可能である。例えば、S1GE を組み込んだ KNOPPIX^{注2)} CD を用意し、これを用いて PC を起動し、一時的にグリッドの実行処理ホストとして利用することができる。なお、詳細については、文献¹⁰⁾を参考にしていきたい。

2.3 グリッドシステムの検証

グリッドシステムの実用性を検証するために、大規模グリッドの例として、128 台の教育用演習端末を用いたグリッドを構築した¹⁰⁾。グリッドシステムの構成としては、1 台の管理制御ホストと 128 台の実行処理ホストであり、各ホストの仕様は表 2 に示すとおりである。ネットワークの構成は、PC およびスイッチは全て 100Mbps であり、45 台程度が 1 つの教室にあり、これらをスイッチで結合し、さらに上位のスイッチで 3 つの教室を結合している。この中から 128 台を実行処理ホストとしている。

本研究で開発したグリッドの最も期待する性能は、多数のジョブを分散処理して、スループットを向上させることである。そこで、多数のジョブを投入したときに、グリッドの起動台数の変化によって、全ジョブを処理する時間がどう変化するかを計測した。

表 2 各ホストの仕様

	管理制御ホスト	実行処理ホスト
OS	Red Hat Linux 8	KNOPPIX 3.3
CPU	Celeron433MHz	Celeron667MHz
RAM	256MB	128MB
NETWORK	100Mbps Ether	100Mbps Ether
CD 読込み	-	12 倍速

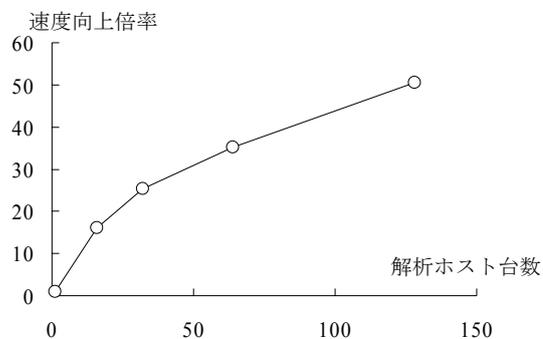


図 3 速度向上倍率の台数との関係

対象とするジョブは、有限要素法による骨組解析プログラムとし、3 次元トラス構造物の線形弾性応力解析を行った。例題として、自由度数 792 のモデルに対して、様々な荷重パターンを設定し、512 回解析を行う場合を想定した。今回用いた実行処理ホストでは、1 回の解析が約 1 分程度で、実行プログラム 66KB、入力データ 30KB、出力データ 40KB の解析である。

1 台の解析ホストで実行した場合の計算時間に対して、複数の解析ホストでグリッドを構成した場合の解析時間の短縮を速度向上倍率と定義して、台数と倍率との関係を図 3 に示す。この結果より、128 台のホストで約 55 倍の速度向上であり、8 時間半必要な解析を約 10 分で完了させたことになった。この例では、1 つの解析時間が 1 分と短いため、解析処理の分配に必要な時間の影響が大きかったものと思われる。解析の様子を観察すると、NFS で共有化されたプログラムファイルから、全 128 台が一斉に起動することになり、入力ファイルからのデータ読み込み時と併せて、この時に NFS サーバーの応答遅延が確認された。このメッセージは、サーバーのハードウェア性能によって変化するが、分散処理の場合には、全体の解析時間が長い場合には致命的な障害とはならない。

3 グリッドシステムを用いた GA による最適設計

2章で述べたようにグリッドシステムを用いることにより、適応度を効率よく計算することが可能なシステムを構築することができるが示された。本節では、「グリッドシステムを用いた GA による最適設計システム」の一例として、通信鉄塔の座屈拘束ブレース^{13)~15)}の最適配置問題への適用例を通して、本システムの有効性や実用可能性を検討する。この例題では、既設の通信鉄塔の斜材に制振部材である座屈拘束ブレースを導入し、安全限界レベルの地震動に対して安全となるような制振部材の配置を探索する。

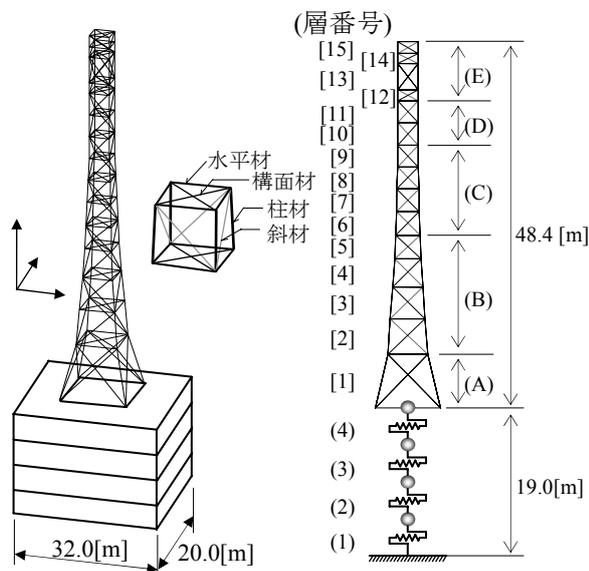
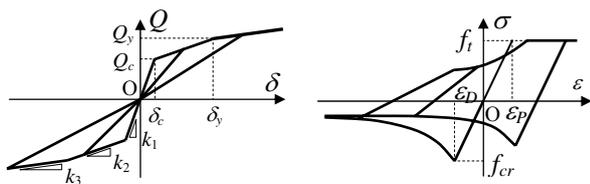


図4 下部SRC造を有する通信鉄塔の解析モデル



(a)原点指向型 (b)劣化型ブレース

図5 復元力特性

3.1 解析対象

解析対象は、図4に示すように下部に4階建てのSRC造の建屋を持ち、上部に通信鉄塔を有するモデルとする。下部建屋はせん断質点系モデルに置換し、鉄塔は3次元の立体モデルとする。

下部建屋は耐震壁の負担率が大きい建物を想定し、下部建屋の各層の復元力特性としては、図5(a)に示すトリリニア型の原点指向を採用する。本研究では、下部SRC建屋のX方向およびY方向の剛性と降伏

表3 SRC建屋の質点モデルの特性

層	質量 [ton]	k_1 [kN/cm]	k_2 [kN/cm]	k_3 [kN/cm]	Q_c [kN]	Q_y [kN]
4	1089	70099	13109	616	15190	36672
3	1094	70560	10513	49	16454	36005
2	1209	72284	11927	621	24500	39200
1	977	90405	8091	488	34300	44100

表4 既存鉄塔の断面諸元

層	使用箇所	F値 [GPa]	部材径 D [cm]	厚さ t [cm]	細長比
A [1]	柱材	323.4	35.6	1.8	62
	斜材	323.4	21.6	0.7	132
	水平材	323.4	16.5	0.5	89
	構面材	235.2	11.4	0.4	181
B [2~5]	柱材	323.4	35.6	1.6	26~40
	斜材	323.4	21.6	0.7	60~90
	水平材	323.4	16.5	0.5	54~77
	構面材	235.2	11.4	0.4	157~110
C [6~9]	柱材	323.4	35.6	1.2	24~26
	斜材	323.4	21.6	0.7	52~58
	水平材	235.2	10.2	0.3	72~82
	構面材	235.2	11.4	0.4	91~103
D [10~11]	柱材	323.4	31.9	1.0	26
	斜材	323.4	19.1	0.5	59
	水平材	235.2	8.9	0.3	82
	構面材	235.2	8.9	0.3	97~103
E [12~15]	柱材	323.4	31.9	1.0	14~33
	斜材	323.4	16.5	0.5	50~76
	水平材	235.2	11.4	0.4	64
	構面材	235.2	11.4	0.4	91

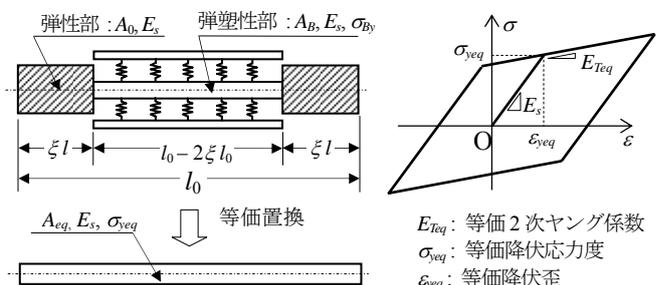


図6 座屈拘束ブレースの等価置換と復元力特性

耐力は同一と仮定する。下部建屋の各層の剛性、降伏せん断力および各層の重量を表3に示す。

上部通信鉄塔の部材は全て鋼管とし、柱材、外側フープ材（水平材）は弾性梁要素、斜材および構面材はトラス要素でモデル化する。ヤング係数は $E_s=206\text{Gpa}$ である。既存鉄塔の斜材の履歴には座屈を伴う劣化履歴特性¹⁶⁾（図5(b))を採用し、斜材の劣化特性を考慮する。各層の斜材の座屈応力度 f_{cr} は短期許容応力度（学会式）とする。既存鉄塔の部材設計断面や部材細長比を層ごとに表2に示す。

座屈拘束ブレースは図6に示すように、低降伏型の芯材と外側の管との間はモルタルで充填され、芯

材は座屈することなく、エネルギー吸収が可能な部材とする。図中において、 A_0 は鋼材の断面積であり、この部分は弾性と仮定する。 A_B は制振部分（芯材）の断面積であり、降伏を考慮し、降伏応力度 σ_{By} とする。座屈拘束ブレースのヤング係数は全ての部分において E_s とする。等価断面部材の等価断面 A_{eq} 、等価降伏応力度 $\sigma_{y_{eq}}$ 、等価2次ヤング係数 E_{Teq} および降伏軸力 N_y は次式から求めることができる。

$$A_{eq} = \frac{1}{1-2\xi+2\xi b} A_B, \quad \sigma_{y_{eq}} = (1-2\xi+2\xi b)\sigma_{By} \quad (1),(2)$$

$$E_{Teq} = \frac{1-2\xi+2\xi b}{(1-2\xi)/\eta+2\xi b} E_s, \quad N_y = A_{eq} \cdot \sigma_{y_{eq}} \quad (3),(4)$$

ここで、 b は芯材と弾性部の断面比 ($b=A_B/A_0$)、 η は芯材の2次ヤング係数と弾性ヤング係数の比であり、 $\eta=1/100$ とする。本研究では、座屈拘束ブレースの履歴はBi-Linear型の履歴と仮定する。各層に導入する座屈拘束ブレースの部材特性および降伏軸力を表3に示しておく。

3.2 入力地震動と解析手法

本研究では、構造物への水平方向入力地震動のスペクトル特性は国土交通省告示に従うものとする。1)表層地盤による増幅係数 G_s は簡易法¹⁷⁾による第二種地盤用の増幅係数を採用し、2)安全限界レベルの地震動とする。なお、弾塑性応答解析を行うための模擬地震動は、このスペクトルに適合するように作成した。

地震応答解析ではNewmark- β 法 ($\Delta t=0.005\text{sec}$, $\beta=0.25$)を用い60秒間の応答解析を行う。構造物の減衰は、下部建屋と上部鉄塔に分けて仮定する¹⁸⁾。下部建屋は下部建屋の変形が支配的な2次モードに対して3%の剛性比例型、上部鉄塔は鉄塔の応答に大きな影響を与えると考えられる1,4次モードに対して1%のレーリー減衰を仮定する。

3.3 GAを用いた座屈拘束ブレースの配置方法

(a) 設計変数

設計変数は、各層の斜材の種類とする。層内の斜材は同一と仮定すると、設計変数の数は層数15となる。本研究では、各層に導入される座屈拘束ブレースの候補が複数存在することも考慮し、個体の表現として自然数表記^{19), 8)}を採用する。本研究では簡単のため、設計変数は1および2の値をとるものとし、1は既存の斜材のまま、2は座屈拘束ブレースを導入

表5 座屈拘束ブレースの等価断面

層		A_B [cm ²]	$l_0-2\xi l_0$ [cm]	$\sigma_{y_{eq}}$ [MPa]	N_y [kN]	導入 コスト L
A	[1]	14.0	500.0	142.6	301.8	2.0
	[2]	14.0		133.4		1.0
B	[3]	14.0	300.0	142.7	301.8	1.1
	[4]	14.0		152.9		1.2
	[5]	14.0		168.1		1.3
	[6]	24.0		185.0		1.4
C	[7]	24.0	300.0	188.4	517.4	1.5
	[8]	24.0		192.1		1.6
	[9]	24.0		193.3		1.7
	[10]	24.0		207.3		1.8
D	[11]	24.0	300.0	207.3	517.4	1.9
	[12]	18.0	300.0	196.3		2.0
E	[13]	18.0	200.0	197.0	388.1	2.5
	[14]	18.0	300.0	197.8		2.1
	[15]	18.0	300.0	196.3		2.2

する場合、と仮定する。この場合、組合せの総数は $2^{15}=32768$ 通りとなる。例えば、以下の例では、第4層、12層、13層が座屈拘束ブレースとなることを表している。

$$X_k = \{ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 1 \ 1 \} \quad (5)$$

設計変数値と斜材の材料特性の対応表を各層ごとに設定する必要がある。本研究では、表3に示した座屈拘束ブレースを導入するものとする。なお、座屈拘束ブレースの断面としては、損傷限界レベルの地震入力に対して、座屈拘束ブレースが降伏しないような断面を仮定した。

(b) 適応度の定義

適応度 f はさまざまなものが考えられるが、1)柱材は座屈させない、2)座屈拘束ブレース以外の既存斜材は座屈させない、3)座屈拘束ブレースを導入する層はできるだけ少なくする、という観点に立ち多目的最適化手法の目的関数と同様に適応度を次のように仮定する。

$$f = -\sum_{i=1}^3 C_i, \quad C_i = w_i \cdot N_i, \quad i=1,2 \quad (6)$$

$$C_3 = \sum_{k=1}^{15} \delta_k L_k, \quad \delta_k = \begin{cases} 1 \dots \text{座屈拘束ブレースに取替える} \\ 0 \dots \text{既存斜材のまま} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 C_1 は柱材が座屈した場合の被害および修復に関わるコスト、 C_2 は既存斜材が座屈した場合に想定される被害およびその修復に関わるコストとする。柱および斜材の損傷やその修復に関わるコストを一般的に求めることは困難と考え、本研究では、便宜的に C_1 、 C_2 をそれぞれ座屈が起きた柱材および斜材の総数 N_1 、 N_2 に重み係数 w_i を乗じて計算をする。本研究では、重み係数を $w_1=10$ 、 $w_2=1$ と設定する。

C_3 は座屈拘束ブレースの導入コストの総和とし、式(3)より計算する。1)設置位置が高いほど導入が困難であり、2)第1層と第13層は他の層に比べてブレースの数が多いことを考慮し、第 k 層の既存斜材をすべて座屈拘束ブレースに取替えるための導入コスト L_k を表5のように仮定する。

(d) GAのパラメータ

本研究では、ランク戦略を用いて親となる個体を選択する。適応度の大きい順に候補解に順位付けをし、順位 i の個体が親個体として選択される確率 p_i を次式のように設定する。

$$p_i = \begin{cases} \frac{2(n_s+1-i)}{n_s(n_s+1)} & \dots & 1 \leq i \leq n_s \\ 0 & \dots & n_s+1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 n_s は親として選択されうる個体の順位を示し、順位 i が n_s+1 以上の個体は淘汰されることを示している。交叉は一様交叉を採用する。交叉により適応度の高い個体が消失することを防ぐために、エリート保存戦略も併用する。本研究ではエリート保存戦略として、最大適応度の個体を1つ残す。

本研究で採用した突然変異の手続きは、突然変異確率 P_m を設定し、すべての個体の桁要素に対して、突然変異を行うかどうかを確率的に決める。ある個体のある桁要素が突然変異を起す場合には、その桁要素の値をランダムに変化させる。

3.4 得られた最適配置の分析

単純GAによって得られた最適解を検討する。本研究では、3.5節で述べるHybrid GAと区別するために、局所探索を行わない通常のGAを便宜上「単純GA」と呼ぶことにする。個体数 $n=30$ 、交叉確率 $P_c=0.9$ 、突然変異確率 $P_m=0.05$ 、親として選択されうる個体の順位 $n_s=20$ とし、20世代まで計算する。初期個体集団および20世代目の個体集団の代表的な個体とその個体に対応した適応度を表6.a, bに示す。表中の1は既存斜材、2は座屈拘束ブレースを導入した層を表す。表中の*はブレースまたは座屈拘束ブレースが座屈したことを示す。20世代目の最大適応度、平均適応度および標準偏差は初期個体集団の値より大きくなり、個体集団全体が最適値に近づいていることが予想される。最も適応度の高い個体は、個体1(第1, 2層へ座屈拘束ブレースを導入する配置)であり、適応度は-3.0をとる。鉄塔の第1, 2層へ座

表 6.a 初期個体集団

個体	適応度	層														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-12.8	2*	2*	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2	1	1	1
2	-13.0	2*	2*	1	2*	2*	2	1	2	1	1	1	2	2	1	1
3	-13.2	2*	1	2*	2*	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	1
4	-16.0	2*	1	2*	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	2
5	-23.6	2*	1	1	2*	2*	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
6	-45.2	2*	1*	1*	1	1	2*	1	2	2	2*	2*	2	2	2	2
7	-58.5	1*	2*	1	2*	2*	2*	2	1	2	2	1	1	2	2	1
8	-60.5	1*	1	2*	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	2	1
9	-67.9	1*	2*	2*	1	2*	2*	2	2	1	2	1	2	1	1	2
10	-95.8	1*	1	2*	2*	1	2*	2	1	1	1	1	2	2	2	1

(最大適応度: -12.8, 平均適応度: -54.7, 適応度の標準偏差: 35.7)

表 6.b 20世代目の個体集団

個体	適応度	層														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	-3.0	2*	2*	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	-4.4	2*	2*	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	-8.4	2*	2*	1	1	1	1	2	1	1	2	1	1	1	2	1

(最大適応度: -3.0, 平均適応度: -6.6, 適応度の標準偏差: 11.0)

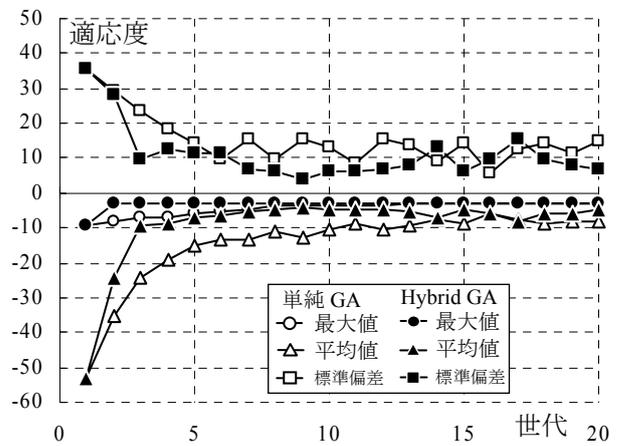


図 7 世代と平均適応度および適応度の関係

屈拘束ブレースを導入した場合、座屈拘束ブレース以外のすべての柱材および既存斜材は座屈しないことを時刻歴弾塑性応答解析より確認しており、単純GAを用いて最適解が得られたことを確認している。

単純GAの探索効率および信頼性を検討するために、乱数の初期値を変えて5回のランダムシミュレーションを行う。世代の進行に伴う個体集団の平均適応度、最大適応度および適応度の標準偏差の変化(5回の試行の平均)を図7に示す。世代が進むにつれ、個体集団の平均適応度は徐々に大きくなり、個体集団が最適値に近づいていることが確認できる。3.5節より、最適解は第1層と第2層のみに座屈拘束ブレースを導入した場合(適応度-3.0)であることを確認している。なお、5回の試行すべてにおいて、単純GAではほぼ10世代以内で最適解が得られていることが確認できる。

3.5 Hybrid GAの可能性

全体的な探索を単純 GA で行いながら、局所探索法と組合せて探索を行うことは、探索効率を向上させる上で有効な方法である^{8), 21)}。本研究では、局所探索を行わない通常の GA を単純 GA と呼び、単純 GA と局所探索法を組合せた探索法を Hybrid GA と呼び、その手法の有効性を検討している。

個体数 $n=30$ 、交叉確率 $P_c=0.9$ 、突然変異確率 $P_m=0.05$ 、親として選択されうる個体の順位 $n_s=20$ とした場合の Hybrid GA の世代の進行に伴う個体集団の平均適応度、最大適応度および適応度の偏差の変化の一例を図 7 に示す。世代が進むにつれ、個体集団の平均適応度は大きくなり、個体集団が最適値に近づく。単純 GA に比べ初期の世代から適応度の高い個体を発見し、急速に最大適応度を有する個体に収束していく。Hybrid GA は効率よく最適解を求めることが可能であることが確認できた。

4. まとめ

現実的な時間で最適解を求めるために、HPC(ハイパフォーマンスコンピューティング)の1手法であるグリッドシステムと GA を組合せた「グリッドシステムを用いた GA による最適設計システム」を提案した。また、SRC 建屋に設置された通信鉄塔の耐震補強を取り上げ、座屈拘束ブレースの最適配置問題への適用例を通して、そのシステムの有効性を検討した。既存の柱材や斜材の座屈を防ぎ、できるだけ座屈拘束ブレースの数を少なくするような評価関数を設定したところ、本システムにより最適配置を求めることができた。また、局所探索法と組合せた Hybrid GA を用いることによりさらに効率よく最適解を得ることができる。

参考文献

- 1) 大森博司, 崔昌禹: 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生, 構造系論文集, No.539, pp.87, 2001.1.
- 2) 本間俊雄, 加治広之, 登坂宣好: 免疫アルゴリズムによる構造システムの最適化と解の多様性, 日本建築学会構造系論文集, No.588, pp.103, 2005.2.
- 3) 大崎純: 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No.464, pp.119, 1994.10.

- 4) ストラクチャル・デザインの行方: 2006年度日本建築学会大会(関東)パネルディスカッション資料
- 5) D. E. Goldberg: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley, 1989
- 6) 林康裕, 護雅史: GA と樹形モデルを用いた制振構造物の創生的基本設計, 日本建築学会構造系論文集, No. 480, pp.47-56, 1996.2
- 7) 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, No.484, pp.75-83, 1996.6
- 8) 中澤祥二, 加藤史郎: ハイブリッド GA を用いた張弦梁構造のプレストレス導入部材最適配置の探索法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No.497, pp.99-105, 1997.7
- 9) 曾我部博之: 非線形感度によるロバスト性を考慮した平面骨組の最適塑性設計, —PC クラスタを用いた並列 GA の多目的最適設計への応用—, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.63-69, 2002.6
- 10) 柴田良一, 島岡俊輔, 加藤史郎, 山内祥郎, 中澤祥二: グリッドシステムによる分散処理を用いた構造最適化に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.73-78, 2005.3
- 11) 村上秀樹, 加藤史郎, 柴田良一, 中澤祥二, 杉山武, 大久保浩光, 島岡俊輔: 通信鉄塔の耐震補強に関する研究, (その2) グリッドシステムの応用によるパラメータ設定, 日本建築学会学術講演梗概集, B2, pp.137-138, 2004.9
- 12) 論報(中澤@豊橋技術科学大学)
- 13) 竹内徹, 内山智晴, 鈴木一弁, 大河内靖雄, 小河利行, 加藤史郎: 座屈拘束ブレースによるトラス鉄塔の耐震補強—実大架構繰返し実験—日本建築学会構造系論文集, No.589, pp.129-136, 2005.3
- 14) 中込忠男, 岩本剛, 加村久哉, 下川弘海, 原山浩一: 低降伏点鋼を用いた鋼管補剛平鋼ブレースの疲労特性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第530号, 155-161, 2000.4
- 15) 前田泰史, 中田安洋, 岩田衛, 和田章: 軸降伏型履歴ダンパーの疲労特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第503号, 109-115, 1998.1
- 16) 柴田道生, 中村武, 若林實: 鉄骨筋違の履歴特性の定式化—その1 定式化関数の誘導—, 日本建築学会論文報告集, No.316, pp.18-24, 1982.6
- 17) 国土交通省告示: 平12建告第1457号
- 18) 加藤史郎, 中澤祥二, 嶺岸孝志, 打越瑞昌: 減衰マトリクス of 仮定法が大スパンドームの地震応答性状に与える影響について—レーリー減衰と剛性比例型減衰に関する比較・検討—, 日本建築学会構造工学論文集, pp.159-171, 1999.3
- 19) 古谷寛, R. T. Haftka: 制御アクチュエータ位置決定問題への遺伝的アルゴリズムの応用, 第43回応用力学連合講演会, pp.11-14, 1994.1
- 20) 北野宏明編: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993
- 21) 奈良宏一, 佐藤泰司: システム工学の数理手法, コロナ社, 1996

注

- 1) <http://gridengine.sunsource.net/>: Sun ONE Grid Engine については、上記アドレスよりダウンロードが可能である。様々な UNIX 系 OS で利用可能である。
- 2) <http://unit.aist.go.jp/it/KNOPPIX/>: KNOPPIX については、上記アドレスよりダウンロードが可能である。自由に利用でき、様々な活用がある。

制約条件の操作によるテンション構造の形態解析

古田寛生¹⁾, 萩原伸幸²⁾

1)大同工業大学大学院工学研究科建築学専攻, 大学院生, dma0603@stumail.daido-it.ac.jp

2)大同工業大学工学部建築学科, 助教授, 博士(工学), hagiwara@daido-it.ac.jp

1. はじめに

テンション構造においては, 部材断面や形状だけでなく, 構造物に配置されたテンション材の張力を具体的にどのように与えるかということが問題となる。荷重を受けたときに, テンション材の張力が失われたり, 過度に大きな張力が生じたりしないように配慮する必要があるほか, 張力のバランス如何によって大きな変位が生じる場合には, 完成形状に与える影響を考える必要がある。

そこで, テンション構造の適切な形状と張力分布を模索するための一つの方法として, 部材応力等の制約条件の操作によってトラスの形状を逐次修正する手法²⁾を, 初期応力を考慮した問題を扱えるように拡張し, テンション構造の解析に適用することを考える。この解析手法は, あらかじめ何らかの初期構造形状が与えられることを前提として, 複数の制約条件を能動的に課して, これらに適合するように逐次形状変更を施していくものである(図1)。目的関数は定義されないで, この方法によって求められる構造物の特性は制約条件の与え方に依存するが, 最適化問題などの構造物の特性に関する具体的な目標は, 適切な制約条件を, 取捨選択, あるいは修正しながら繰り返し与えていくことで実現することが可能である。

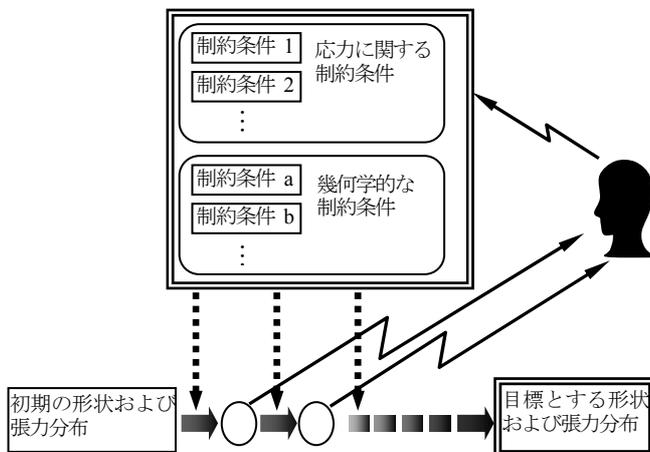


図1 解析過程の概念図

2 初期応力を考慮した形状修正の定式化

2.1 剛性方程式

初期応力を考慮すれば, 部材ごとの剛性方程式は次のように表される

$$[T]^T [K^e] [T] \{u^e\} + \bar{\sigma} A [T]^T \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \{f^e\} \quad (1)$$

ここに, $\{u^e\}$ は変位ベクトル, $\{f^e\}$ は節点力ベクトル, $[K^e]$ は要素剛性マトリクス, $[T]$ は座標変換マトリクス, $\bar{\sigma}$ は初期応力であり, それぞれ具体的には次のように表される。

$$\{u^e\} = \begin{Bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{z1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{z2} \end{Bmatrix}, \quad \{f^e\} = \begin{Bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{z1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{z2} \end{Bmatrix}$$

$$[K^e] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

(E : ヤング係数, A : 部材の断面積)

$$[T] = \begin{bmatrix} \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_1 = \frac{x_2 - x_1}{l}, \quad \gamma_2 = \frac{y_2 - y_1}{l}, \quad \gamma_3 = \frac{z_2 - z_1}{l}$$

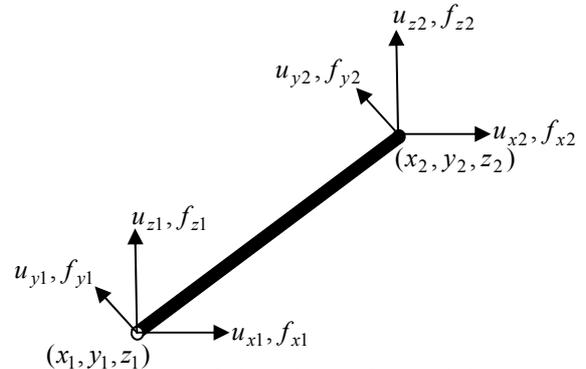


図2 部材の座標・変位・節点力

(1)式を全部材について重ね合わせ、節点に作用する荷重を考慮すれば次式のような釣合式を得る。

$$\sum_e [T]^T [K^e] [T] \{u^e\} + \sum_e \bar{\sigma}_A [T]^T \begin{Bmatrix} -1 \\ 1 \end{Bmatrix} = \{F\} \quad (2)$$

ここに、 $\{F\}$ は、節点自由度に関する荷重ベクトルを表す。

全体剛性マトリクス等を用いて、(2)式を次式のように表す。

$$[K]\{U\} + [E]\{\bar{\sigma}\} = \{F\} \quad (3)$$

ここに、 $[K]$ は全体剛性マトリクス、 $\{U\}$ は節点自由度に関する変位ベクトル、 $\{\bar{\sigma}\}$ は初期応力を並べたベクトルであり、 $[E]$ は座標変換マトリクスと部材断面積から得られる係数マトリクスである。

2.2 感度係数

構造物の形状や初期応力の修正は、種々の制約条件を満たすように行われるが、後で述べる制約条件には、応答量である変位ベクトル $\{U\}$ が含まれるため、節点座標や初期応力の変化に対する変位ベクトル $\{U\}$ の感度を計算することが必要となる。

(3)式の両辺を、節点の座標 X_i 、初期応力 $\bar{\sigma}_i$ で微分すると次のようになる。

$$\left[\frac{\partial K}{\partial X_i} \right] \{U\} + [K] \left\{ \frac{\partial U}{\partial X_i} \right\} + \left[\frac{\partial E}{\partial X_i} \right] \{\bar{\sigma}\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial X_i} \right\} \quad (4-a)$$

$$[K] \left\{ \frac{\partial U}{\partial \bar{\sigma}_i} \right\} + \{\hat{E}\}_i = 0 \quad (4-b)$$

ここに、 $\{\hat{E}\}_i$ は $\{E\}$ から初期応力 $\bar{\sigma}_i$ に関する列を抜き出して構成したベクトルを表す。

(4)式より次式を得る。

$$[K] \left\{ \frac{\partial U}{\partial X_i} \right\} = \left\{ \frac{\partial F}{\partial X_i} \right\} - \left[\frac{\partial K}{\partial X_i} \right] \{U\} - \left[\frac{\partial E}{\partial X_i} \right] \{\bar{\sigma}\} \quad (5-a)$$

$$[K] \left\{ \frac{\partial U}{\partial \bar{\sigma}_i} \right\} = -\{\hat{E}\}_i \quad (5-b)$$

すなわち、(3)式から $\{U\}$ を求め、(5)式より感度係数

$$\left\{ \frac{\partial U}{\partial X_i} \right\} \text{ および } \left\{ \frac{\partial U}{\partial \bar{\sigma}_i} \right\} \text{ を求める。}$$

2.3 制約条件

構造物に課す制約条件には、応力を指定する条件と、節点座標に関する幾何学的な条件を考える。

2.3.1 部材応力の指定条件

$\bar{\sigma}_i$ を初期応力に持つある部材の応力を σ_0 に指定する以下のような条件を考える。

$$\frac{E}{l} [-1 \quad 1] [T] \{u^e\} + \bar{\sigma}_i = \sigma_0 \quad (6)$$

節点の座標が $\{X\}$ から $\{X\} + \{\delta X\}$ に変化したときに(6)式が成立するためには、座標の修正量 $\{\delta X\}$ と初期応力の修正量 $\delta \bar{\sigma}_i$ は次式を満たす必要がある(座標の修正量のうち、上添え字 e の付くものは部材両端の節点座標に関するものを表す)。

$$\begin{aligned} & \frac{E}{l} [-1 \quad 1] [T] \{u^e\} + \sum_{j=1}^6 \frac{\partial}{\partial X_j^e} \left(\frac{E}{l} [-1 \quad 1] [T] \right) \{u^e\} \delta X_j^e \\ & + \frac{E}{l} [-1 \quad 1] [T] \sum_{j=1}^n \frac{\partial}{\partial X_j} \{u^e\} \delta X_j \\ & + \sum_{j=1}^m \frac{E}{l} [-1 \quad 1] [T] \frac{\partial}{\partial \bar{\sigma}_j} \{u^e\} \delta \bar{\sigma}_j + \delta \bar{\sigma}_i = \sigma_0 \quad (7) \end{aligned}$$

上式を整理して次式を得る。

$$\begin{aligned} & [h] [T] \left[\frac{\partial u^e}{\partial X} \right] \{\delta X\} + ([h] [T] \{u^e\} [\bar{\Gamma}] + [h] [u^*] [\Gamma^*]) \{\delta X^e\} \\ & + \sum_{j=1}^m [h] [T] \left\{ \frac{\partial u^e}{\partial \bar{\sigma}_j} \right\} \delta \bar{\sigma}_j + \frac{l}{E} \delta \bar{\sigma}_i \\ & = \frac{\sigma_0 l}{E} - [h] \{u^e\}_i \quad (8) \end{aligned}$$

ここに $[h] = [-1 \quad 1]$

$$[\bar{\Gamma}] = -\frac{1}{l} [-\gamma_1 \quad -\gamma_2 \quad -\gamma_3 \quad \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3]$$

$$[\Gamma^*] =$$

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} -(1-\gamma_1^2) & \gamma_1\gamma_2 & \gamma_1\gamma_3 & (1-\gamma_1^2) & -\gamma_1\gamma_2 & -\gamma_1\gamma_3 \\ \gamma_1\gamma_2 & -(1-\gamma_2^2) & \gamma_2\gamma_3 & -\gamma_1\gamma_2 & (1-\gamma_2^2) & -\gamma_2\gamma_3 \\ \gamma_1\gamma_3 & \gamma_2\gamma_3 & -(1-\gamma_3^2) & -\gamma_1\gamma_3 & -\gamma_2\gamma_3 & (1-\gamma_3^2) \end{bmatrix}$$

$$[u^*] = \begin{bmatrix} u_{1x} & u_{1y} & u_{1z} \\ u_{2x} & u_{2y} & u_{2z} \end{bmatrix}$$

2.3.2 部材長に関する条件

部材長に関する条件は、構造物の幾何形状の対称性、規則性などを保持するために導入するもので、ここでは、部材長を直接指定する条件と、二本の部材長を同一にする条件を考える。

[部材長を指定する条件]

l_0 を指定部材長とすれば、次のように表される。

$$(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 = l_0^2 \quad (9)$$

したがって、修正量 $\{\delta X^e\}$ に関して次の条件が課せられる。

$$\begin{aligned} \frac{2}{l} [-\gamma_1 \quad -\gamma_2 \quad -\gamma_3 \quad \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3] \{\delta X^e\} \\ = 1 - (\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + \gamma_3^2) \end{aligned} \quad (10)$$

[二本の部材の長さを同一にする条件]

部材 i と部材 j の長さが等しいとすると、これは次のように表される。

$$\begin{aligned} (x_2^i - x_1^i)^2 + (y_2^i - y_1^i)^2 + (z_2^i - z_1^i)^2 \\ = (x_2^j - x_1^j)^2 + (y_2^j - y_1^j)^2 + (z_2^j - z_1^j)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

ここに、 x_1^i, y_1^i, z_1^i および x_2^i, y_2^i, z_2^i は部材 i の両端の節点座標を、 x_1^j, y_1^j, z_1^j および x_2^j, y_2^j, z_2^j は、部材 j の両端の節点座標を表す。

したがって、修正量 $\{\delta x^i\}, \{\delta x^j\}$ (部材 i, j の節点座標修正量をそれぞれまとめたもの) に関して次の条件が課せられる。

$$\begin{bmatrix} -2(x_2^i - x_1^i) \\ -2(y_2^i - y_1^i) \\ -2(z_2^i - z_1^i) \\ 2(x_2^i - x_1^i) \\ 2(y_2^i - y_1^i) \\ 2(z_2^i - z_1^i) \\ 2(x_2^j - x_1^j) \\ 2(y_2^j - y_1^j) \\ 2(z_2^j - z_1^j) \\ -2(x_2^j - x_1^j) \\ -2(y_2^j - y_1^j) \\ -2(z_2^j - z_1^j) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\delta X^i\} \\ \{\delta X^j\} \end{Bmatrix}^T = l_j^2 - l_i^2 \quad (12)$$

2.3.3 体積を一定とする条件

形状変化に伴って、構造物の体積が変化しないようにする以下のような条件を考える。

$$\sum_e lA = V_0 \quad (13)$$

ここに、 V_0 は指定体積値である。修正量 $\{\delta X^e\}$ に関して次の条件が課せられる。

$$\begin{aligned} \sum_e \frac{A}{l} [x_1 - x_2 \quad y_1 - y_2 \quad z_1 - z_2 \quad x_2 - x_1 \quad y_2 - y_1 \quad z_2 - z_1] \{\delta X^e\} \\ = V_0 - \sum_e lA \end{aligned} \quad (14)$$

すなわち、

$$\begin{aligned} \sum_e A [-\gamma_1 \quad -\gamma_2 \quad -\gamma_3 \quad \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \gamma_3] \{\delta X^e\} \\ = V_0 - \sum_e lA \end{aligned} \quad (15)$$

2.4 一般逆行列を用いた修正量の求解

(8), (10), (12), (15) 式を構造全体についての修正量 $\{\delta \mathcal{S}\}$ (座標修正量 $\{\delta X\}$ と初期応力修正量 $\{\delta \sigma\}$ のどちらか、または両方を含むもの) についてまとめて示せば、次式のような形式となる。

$$[D] \{\delta \mathcal{S}\} = \{C\} \quad (16)$$

(16) 式は、修正量に関する全ての式をまとめたものであるが、未知数と方程式の数は、一般には一致しない。そ

ここで、(16)式の求解にあたって、一般逆行列による連立一次方程式の解の表現を利用する。

(16)式の解を $\{\delta s_0\}$ とすれば、これは $[D]$ のムーア・ペンローズ型一般逆行列を $[D]^-$ として次のように表される³⁾。

$$\{\delta s_0\} = [D]^- \{C\} + ([I] - [D]^- [D]) \{\alpha\} \quad (17)$$

ここに、 $[I]$ は n 次元の単位マトリックスであり、 $\{\alpha\}$ は未定乗数である。

解 $\{\delta s_0\}$ は $[D]^- \{C\}$ で表される特解部分と、 $([I] - [D]^- [D]) \{\alpha\}$ で表される余解部分の和で与えられる事になるが、この問題では元の形態から最も小さな変化で制約条件を満たしうる形態を求めることとして、最小ノルムを持つ解を表す特解部分の $[D]^- \{C\}$ を解とする。

(17)の第1項を用いて得られた修正を施しても、問題の非線形性より、制約条件式が完全に満たされるわけではない。したがって、これらのプロセスを修正量のノルムが十分に小さくなるまで繰り返す。

3. 解析モデル

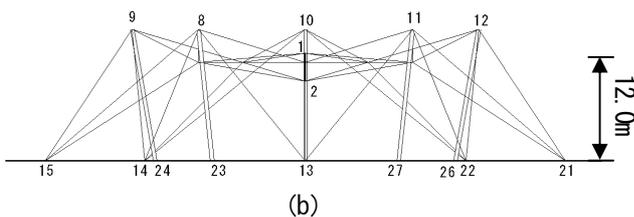
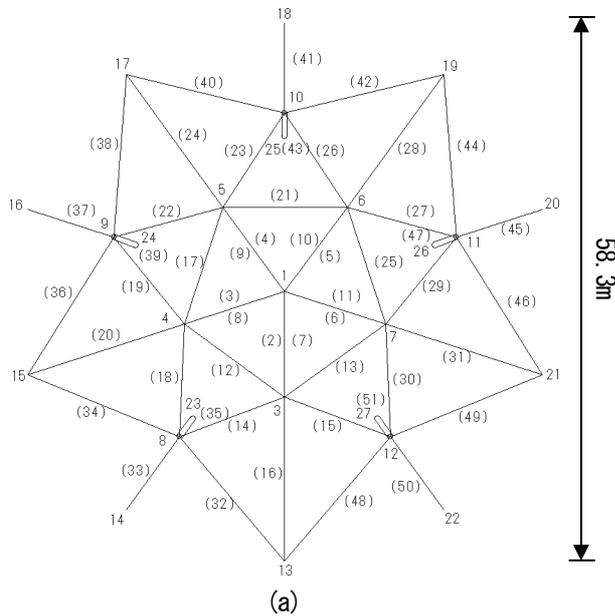


図2 解析モデル

表2 ケーブルの初期応力度

	要素	初期応力度 (kN/ cm ²)
1	(2) ~ (6)	10.4
2	(7) ~ (13), (16), (17), (20), (21), (24), (25), (28), (31), (33), (37), (41), (45), (50)	18.1
3	(14), (15), (18), (19), (22), (23), (26), (27), (29), (30)	29.7
4	(32), (34), (36), (38), (40), (42), (44), (46), (48), (49)	70.1

表3 荷重条件

節点	荷重 (kN)
1	38.2
2	1.5
3	58.4
4	58.4
5	58.4
6	58.4
7	58.4
8	48.6
9	48.6
10	48.6
11	48.6
12	48.6

表4 解析モデルの諸元

節点数	27
束材要素数	1
ケーブル材要素数	45
柱材要素数	5
スパン	58.3m
ライズ	12.0m

表5 部材の設定

	束	C1	C2	柱
直径 (cm)	14.0	3.0	7.3	50.0
板厚 (cm)	0.4	—	—	0.9
断面積 (cm ²)	17.1	5.4	32.7	138.8
単位重量 (kg/m)	13.4	4.4	26.8	109.0

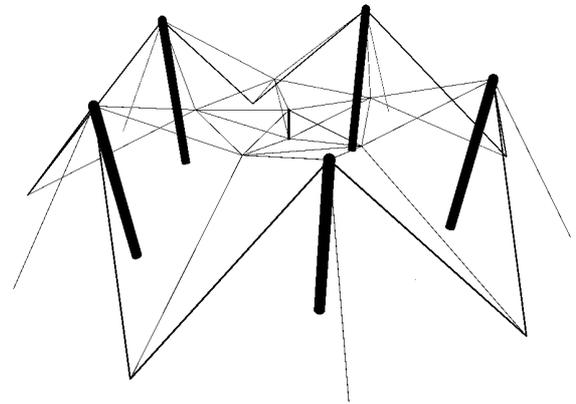
解析モデルは、ケーブルと束材・柱材（鋼管）を組み合わせた屋根状の構造物である。中央の束材の上下端の節点を形状的に拘束し、支点を除くその他の節点座標を変更する条件で解析を行った。節点および要素の配置を図2に示す。ケーブルの要素ごとの初期応力度を表2、解析モデルの諸元を表4、部材の設定を表5に示す。ここに、C1は表2の1～3の要素の部材を、C2は表2の4の要素の部材を表わす。荷重条件は、1ケースのみとし、 1444.3N/m^2 の鉛直荷重を各節点に振り分けた。節点荷重の具体的な値を表3に示す。なお、中央の五角形部分については、上側の節点は上記の条件とし、下側の節点は、束材とケーブル材の半分の重量を荷重値として設定した。解析は、ケーブル材の引張応力度に着目し、これらの最大値と最小値の差が縮まるように、逐次、応力指定制約条件を変更することを行った。部材長や体積の幾何学的な制約条件は適用していない。また、節点に作用している荷重は形状が変化しても変わらないものとした。

4. 解析結果

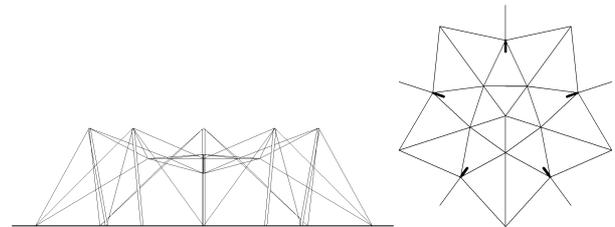
初期形状、形状が急変し始める直前のSTEP28の形状、最終形状を図3～図5の(a), (b), (c)に示す。部材に生じた最大最小応力度、その差、応力度差低減率（初期形状のものに対する）を表6～表8に示し、図6に変位の2乗和の変化を、図7に節点8における座標の変化を示す。

表6 STEP 1（初期形状）

最大応力度 (kN/ cm ²)	28.1
最小応力度 (kN/ cm ²)	2.8
最大値と最小値の差 (kN/ cm ²)	25.3



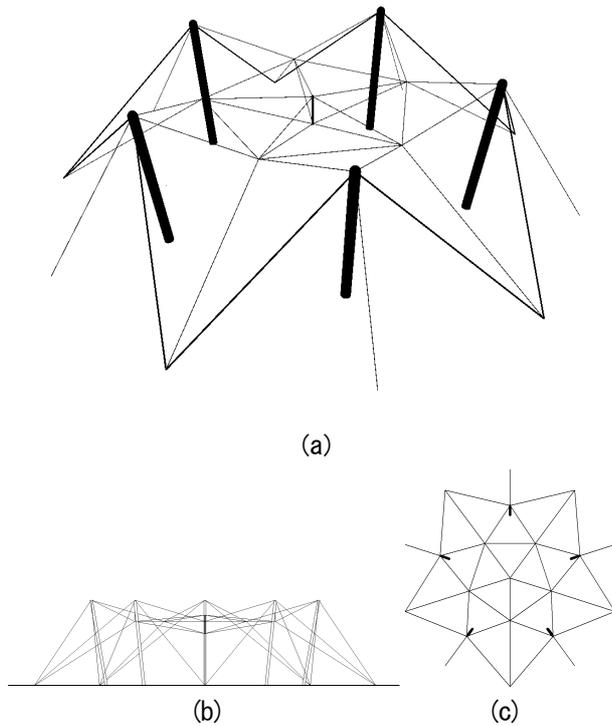
(a)



(b)

(c)

図4 STEP28の形状



(a)

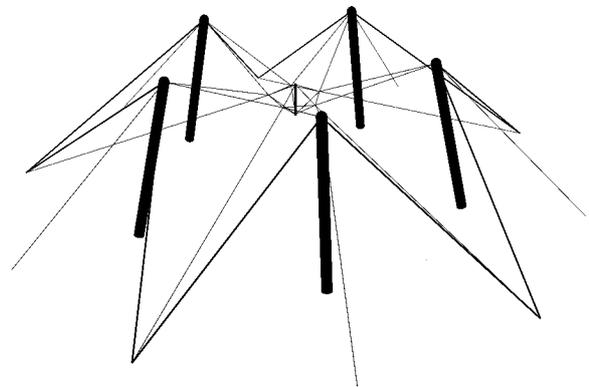
(b)

(c)

図3 初期形状

表7 STEP28

最大応力度 (kN/ cm ²)	24.2
最小応力度 (kN/ cm ²)	8.2
最大値と最小値の差 (kN/ cm ²)	16.0
応力度差低減率 (%)	36.9



(a)

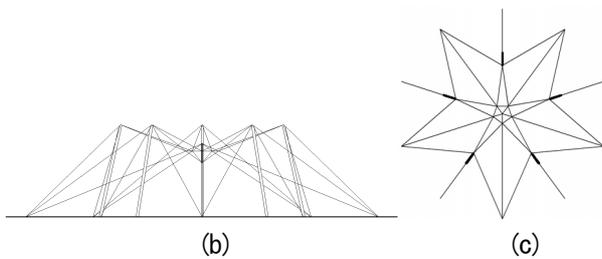


図5 STEP41（最終形状）

表8 STEP41（最終形状）

最大応力度 (kN/ cm ²)	21.0
最小応力度 (kN/ cm ²)	10.7
最大値と最小値の差 (kN/ cm ²)	10.3
応力度差低減率 (%)	59.2

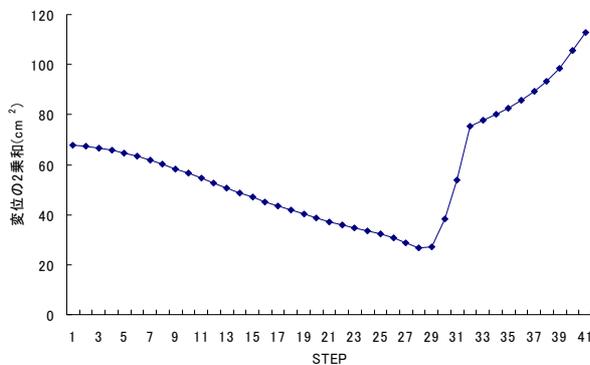


図6 変位の2乗和の変化

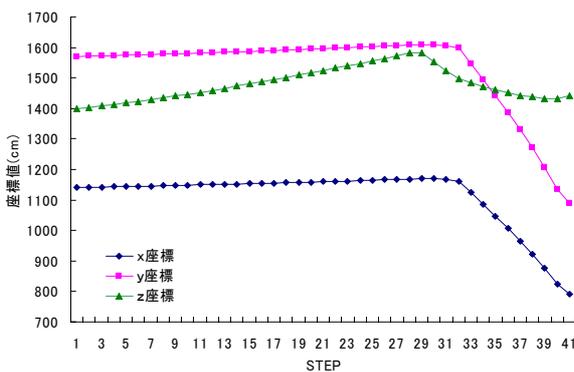


図7 節点8の座標の変化

5. 結果

形状は、STEP1 から STEP28 までは柱材が上方へ、STEP32 までは外側へ開いていく変化を示したが、STEP33 からは急激に元に戻り始め、最終段階では高さは初期値に近づき、柱材上部が内側へ入り込む形状とな

った。また、中央の五角形部分は STEP28 から急激に縮小し始め、最終段階ではかなり小さくなっている。これについては、図7の座標の動きからも確認できる。

解析は STEP41 まで行ったが、最終形状は初期形状とは大きく異なり、意図した形状とは大きくかけ離れたものとなっている。

一方、ケーブル張力の差に着目すると、初期段階では最大応力度と最小応力度の差は 25.3kN/ cm²であったが、最終段階では10.3kN/cm²まで応力を近づけることができ、初期形状の最大応力度より 59.2%低減されている。

6. まとめ

本論ではトラスの逐次形状修正手法を、初期応力を考慮したものに拡張し、制約条件（軸力）の操作によりテンション構造の形態解析を試みた。

本解析手法では目的関数を定義しないので、適切な解形状は、設計者の視点から選択される。STEP29 から大きく座標が変化したが、変位の状況から STEP28 のときに最大剛性を示していると考えられる。これらと図3～5の形状から判断すると、STEP28 のときの形状を採用することが妥当であろうと考えられる。

参考文献

- 1) 皆川洋一編：建築学構造シリーズ 建築空間構造，オーム社，2002.9.
- 2) 萩原伸幸，大森博司，松井徹哉：制約条件の操作によるトラスの形態解析—解析手法の再編と問題点の考察—，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1，pp.319-320，2002.8.
- 3) 半谷裕彦，川口健一：形態解析，計算力学と CAE シリーズ，培風館，1991.4.
- 4) 日本建築学会編：構造形態の解析と創生，応用力学シリーズ5，1998.12.
- 5) 日本建築学会編：構造形態創生の理論と応用，応用力学シリーズ8，2001.3.

位相最適化手法を用いた建築構造形態の創生

藤井大地

近畿大学工学部建築学科，助教授，博士(工学)，dfujii@hiro.kindai.ac.jp

1 はじめに

物体の境界形状だけでなく物体内部に任意の穴を開けて内部の物質の最適配置を求める位相最適化問題（図 1）は，機械分野では部品などの軽量化に新しい可能性を開き，建築分野でも力学的に合理的な形（造形）を生み出すものとして近年注目されている。

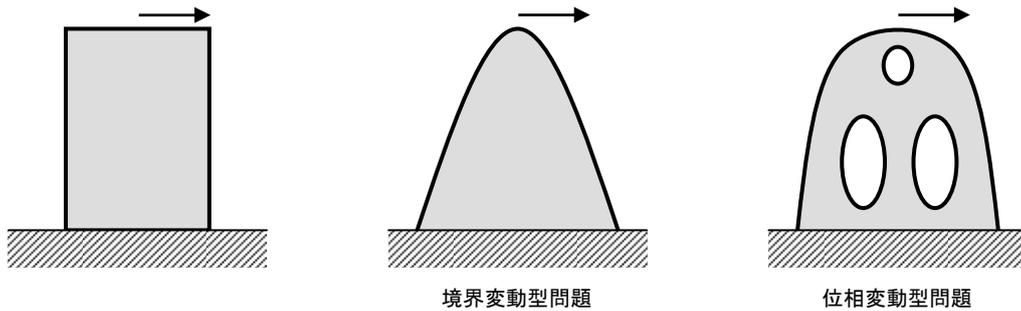


図 1 境界変動型問題と位相変動型問題

位相最適化問題は，設計領域を要素（小領域）に分割し，要素を取り去る（0）か残す（1）かの選択問題（計画問題）として定式化できる。しかし，0-1 の最適な組み合わせを求める問題は，分割数の増加に伴って組み合わせ数が急激に増大することから，厳密な最適解を得ることは難しい。そこで，0-1 を分布関数として数学的に解く方法が模索され¹⁾，1988 年に Bendsøe and Kikuchi²⁾によって，均質化法を用いてマイクロ構造の穴の大きさと角度を設計変数とする方法が提案された（図 2）。その後，位相最適化問題の解法に関する研究は飛躍的な進歩を遂げ，現在までに様々な手法が提案されている。

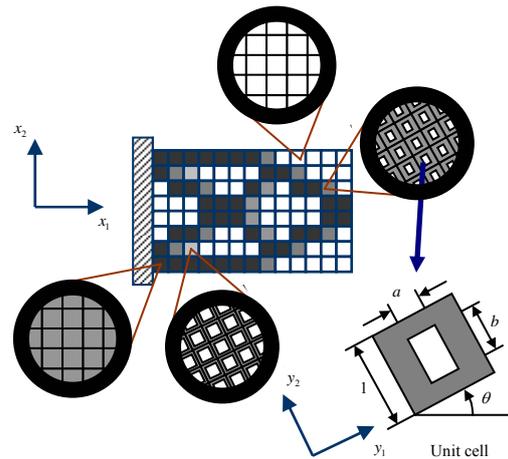


図2 均質化法を用いた位相最適化

位相最適化手法を大別すると，数学的な解法の発展として，均質化設計法（HDM）^{2),3)}と密度法（SIMP 法）⁴⁻⁶⁾が挙げられる。均質化設計法は，物質の剛性と密度の関係をマイクロ構造の穴の大きさと角度から計算するのに対して，密度法はこの関係を人工的に与える方法である。一方，発見的方法（ヒューリスティックス）の発展として，セルオートマトンを用いる方法⁷⁻⁹⁾，ESO 法¹⁰⁾や拡張 ESO 法¹¹⁾などがある。なお，GA を用いる方法も提案されているが，実用的なレベルには至っていない。

本報告では，以上のような手法の内，均質化設計法（HDM）を用いて，構造形態の創生を行った例を紹介する。位相最適化には，文献 12)に付属しているソフト（Isler）を用いた。なお，本報告では，得られた位相を Adobe Illustrator によって加工し，また，背景画像への埋め込みには Adobe Photoshop を用いている。なお，解析法の理論等は，文献 12)に示されているためここでは割愛する。

2 形態創生例

2.1 橋梁のデザイン

まず、位相最適化手法を用いて橋梁のデザインを試みた。図3～5は、設計領域を長さ260m、アーチライズ34.5mとして最適位相(2次元)を求め、これをもとに橋梁のデザインを作成したものである。各図の左上が設計条件を示しており、グレー部分が位相の設計領域である。図の左下は、得られた位相をIllustratorによって加工したものである。また、図の右は、Illustratorによって3次元化し、Photoshopによって背景に埋め込んだ図である。図3は上路橋、図4は中路橋、図5は下路橋を示す。

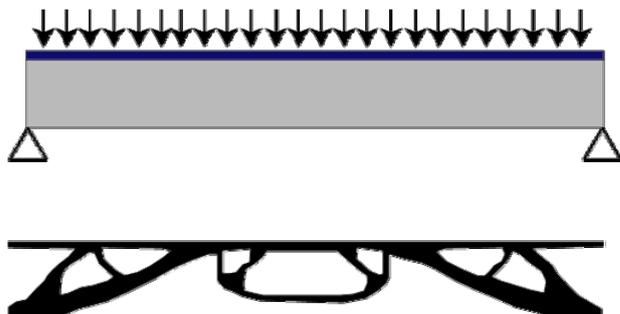


図3 橋梁のデザイン(上路橋)

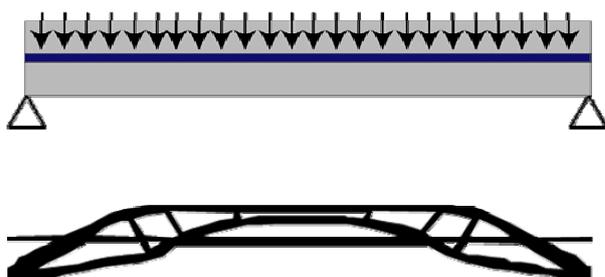


図4 橋梁のデザイン(中路橋)

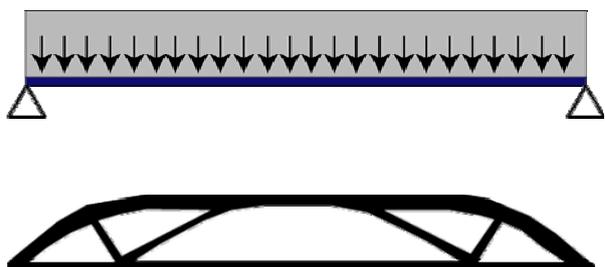


図5 橋梁のデザイン(下路橋)

2.2 ラーメン構造のデザイン

次に、1層1スパンラーメン構造のデザインを試みた。図6は、解析モデルと得られた位相およびIllustratorにより加工した図を示している。ただし、スパンと高さは6m×4m、荷重は、梁に鉛直等分

布荷重とこれの 0.2 倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。有限要素分割数は、150×70。図より、設計領域の物質体積 (%) を変化させることで、異なるデザインが得られることがわかる。

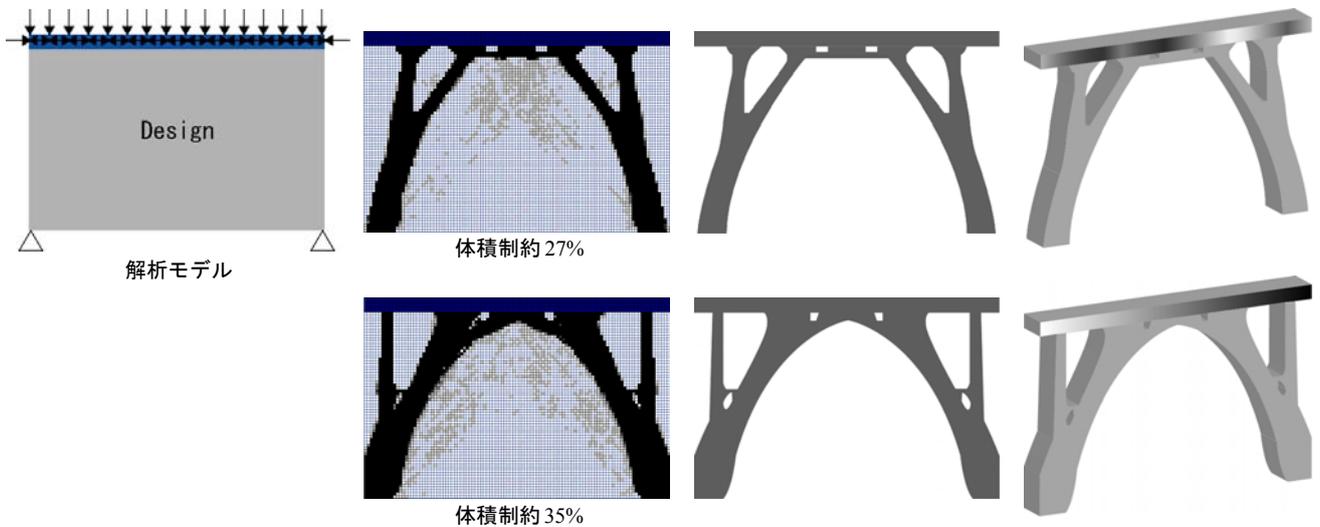


図 6 ラーメン構造のデザイン

2.3 アーチ構造のデザイン

次に、アーチ構造のデザインを試みた。図 7 は、解析モデルと得られた位相および Illustrator により加工した図を示している。ただし、設計領域は上のモデルが 9m×5m、下のモデルが 9m×15m、荷重は鉛直等分布荷重とこれの 0.2 倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。図より、物質体積 (%) を変化させることで異なる形状のアーチデザインが得られることがわかる。



図 7 アーチ構造のデザイン

2.4 オフィスビルのデザイン（芥川プロジェクトモデル）

オフィスビルの設計例として、まず、大森ら¹³⁾によって拡張 ESO 法により形態創生されたモデルによる解析を試みた。図 8 は、解析モデルと位相および Illustrator により加工した図を示している。ただし、左面（高さ 1120cm，幅 650cm），右面（高さ 1120cm，幅 775cm），荷重は、梁に鉛直等分布荷重とこれの 0.2 倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。図より、体積制約 35% のモデルでは、大森らの位相との類似性が見られることがわかる。

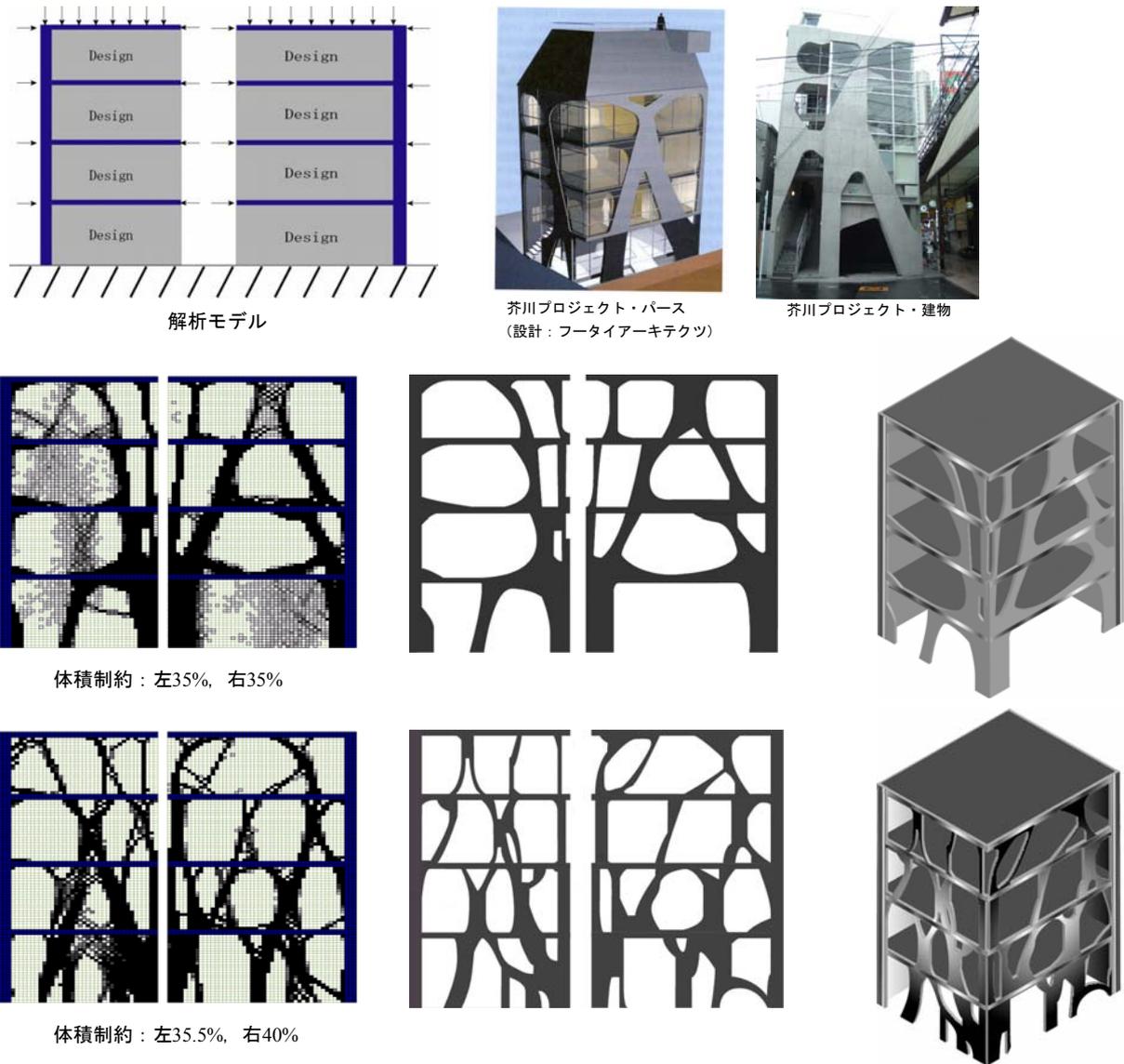
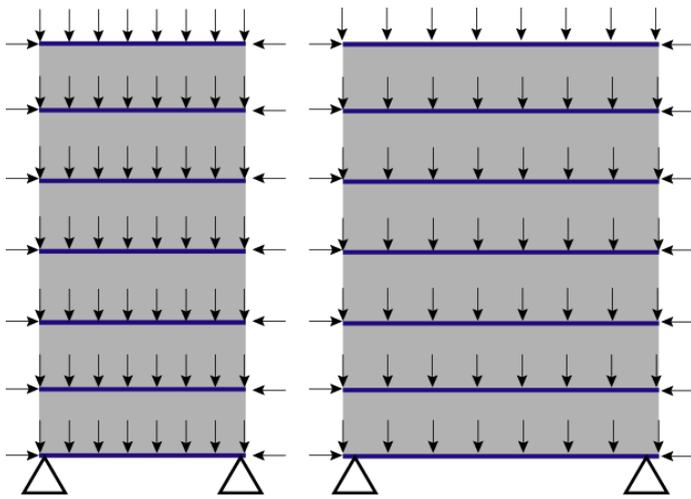


図 8 オフィスビルのデザイン（芥川プロジェクトモデル）

2.5 オフィスビルのデザイン（トッズ表参道モデル）

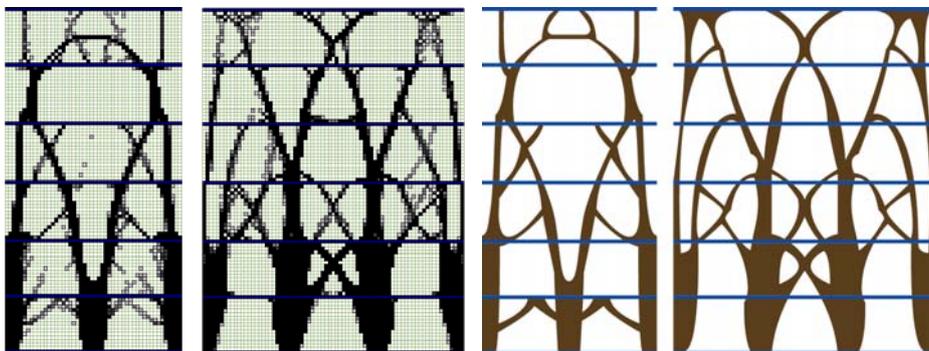
次に、伊東豊雄設計のトッズ表参道ビルを参考に、中層ビルのデザインを試みた。図 9 は、解析モデルと位相および Illustrator により加工した図を示している。ただし、左面は高さ 24m 幅 12m，右面は高さ 24m 幅 18m，荷重は、梁に鉛直等分布荷重とこれの 0.2 倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。図より、位相最適化による創生では、トッズ表参道ビルのような樹木の枝の形態とは多少異なる形態が得られることがわかる。



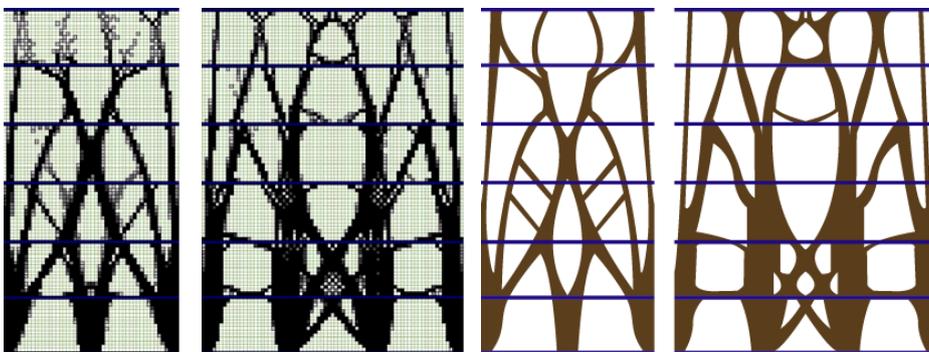
解析モデル



トッズ表参道ビル (設計: 伊東豊雄)



体積制約 (左面29.5%, 右面34%)



体積制約 (左面36%, 右面38.5%)

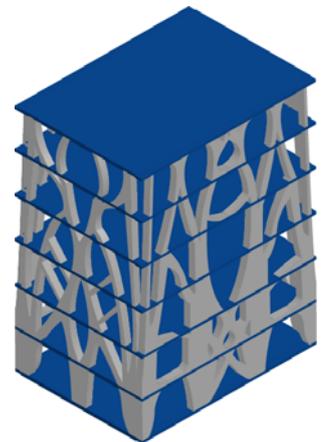


図9 オフィスビルのデザイン (トッズ表参道モデル)

2.6 高層ビルのデザイン

次に、ジョン・ハンコックセンタービル (右写真) のような高層ビルをイメージしたモデルによるデザインの創生を試みた。図10は、2つの解析モデルと位相およびIllustratorにより加工した図を示している。ただし、荷重は、梁に鉛直等分布荷重とこれの0.2倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。図より、解析モデルの両側に柱を設ける場合と設けない場合でかなり位相が異なることがわかる。



ジョン・ハンコックセンタービル

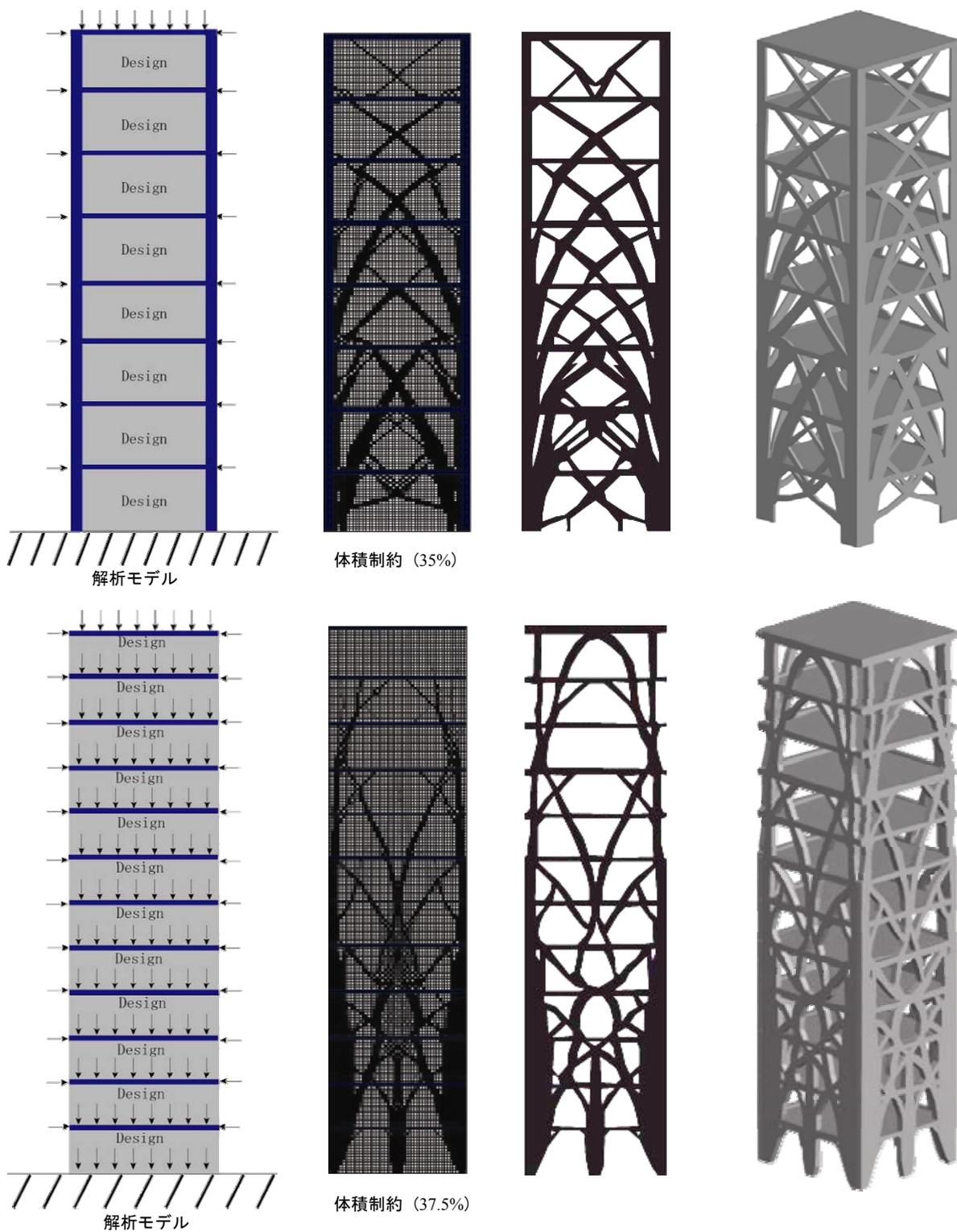


図 10 オフィスビルのデザイン（高層ビル）

2.7 低層ビルのデザイン

次に、ホームセンターや大型スーパーのような低層ビルをイメージしたモデルによるデザインの創生を試みた。図 11 は、2つの解析モデルと位相および画像処理した図を示している。ただし、荷重は、梁に鉛直等分布荷重とこれの 0.2 倍の水平分布荷重を左右両方向から加えている。

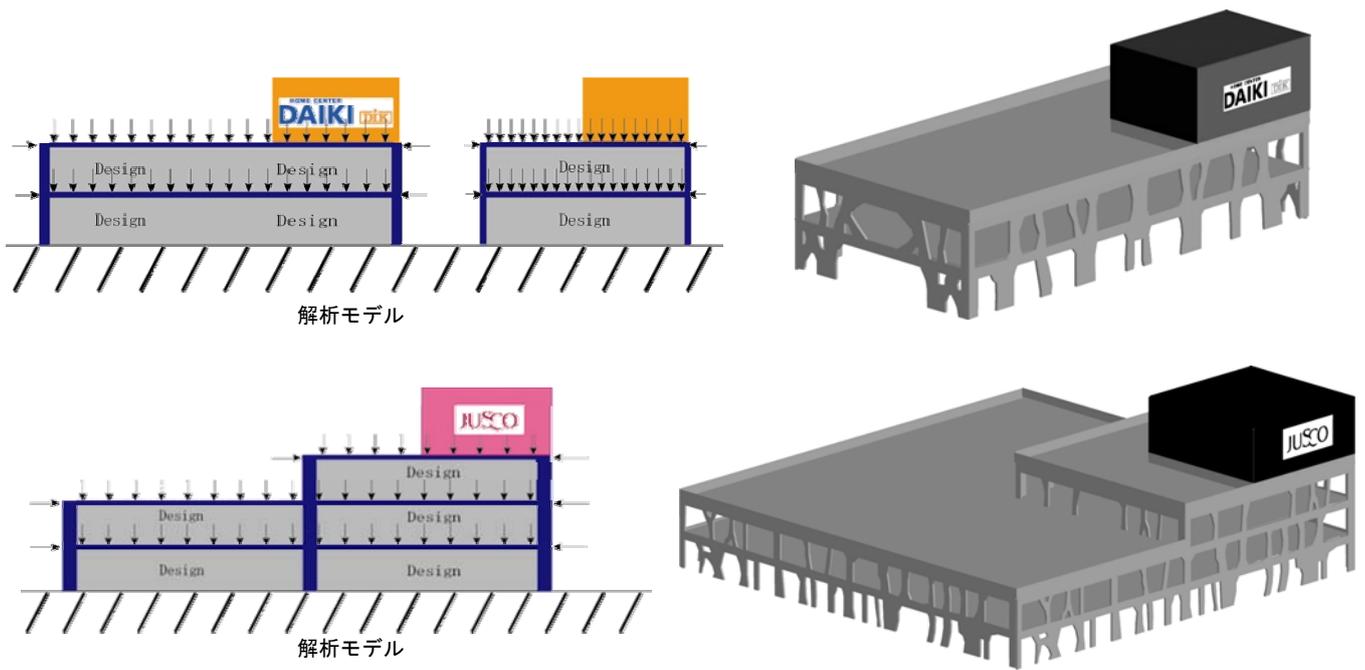


図 11 低層ビルデザイン

2.8 街のデザイン

最後に、図 12, 13 は、以上のような位相最適化手法を用いた様々な構造形態のデザインを組み合わせ、一つの街を形成した場合、どのようなイメージになるかを検討してみたものである。図より、少し異様な雰囲気ではあるが、実現不可能ではないように思われる。

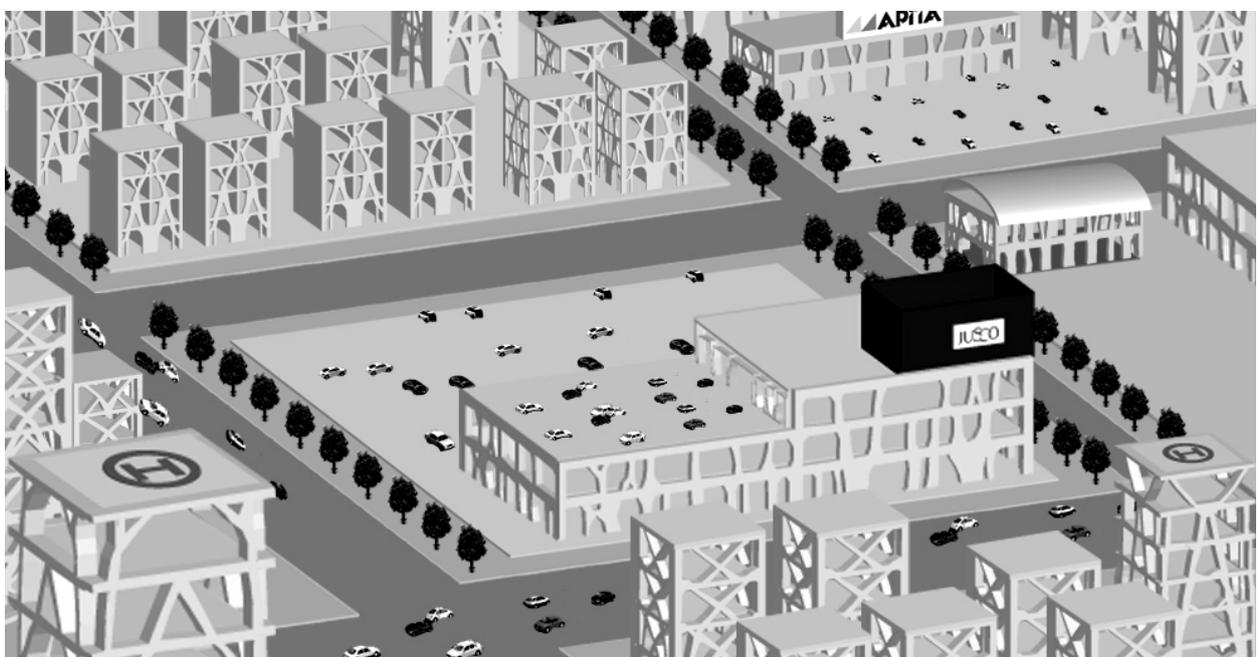


図 12 トポロジータウン (その 1)



図 13 トポロジータウン（その 2）

3 まとめ

本報告では、位相最適化手法の一つである均質化設計法を用いて、様々な建築物の構造デザインを創生してみた。その結果、設計条件、荷重条件、物質の体積制約などを変えることによって、様々なデザインを創生できることが明らかになった。今後、施工技術等が進歩すれば、構造形態の自由度は広がり、新しい構造形態の街を形成することも夢ではないと思われる。

謝辞： 本報告の内容は、近畿大学工学部 2004 年度卒業の島名章信君と 2005 年度卒業の西岡篤臣君の卒業論文の内容を引用したものである。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Bendsøe, M. P. and Kikuchi, N: Generating Optimal Topologies in Structural Design using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.71, pp.197-224, 1988
- 3) K. Suzuki and N. Kikuchi, A homogenization method for shape and topology optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.93, pp.291-318, 1991
- 4) Bendsøe, M. P., Optimal shape design as a material distribution problem, Struct. Optimiz., **1**, 193-202, 1989.
- 5) Zhou, M. and Rozvany, G.I.N., The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **89**, 309-336, 1991
- 6) Yang, R.J. and Chuang, C.H., Optimal topology design using linear programming, Computers & Structures, **52**(2), 265-275, 1994
- 7) 北 栄輔, 豊田哲也, 野村壮史, セルラ・オートマタを用いた構造物の設計, 日本機械学会論文集 A, **64** (622), pp.1717-1724, 1998.
- 8) 本間俊雄, 自律分散アプローチによる逆問題の計算法 — 自律分散有限要素法の提案と応用 —, 日本建築学会構造系論文集, No.526, pp.69-76, 1999.
- 9) 三井和男, セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, No.555, 2002.
- 10) Xie, Y.M., G.P. Steven, Evolutionary Structural Optimization for Dynamic Problems. Computers and Structures, Vol. 58, No. 6: pp. 1067-1073, 1996.
- 11) 大森博司, 崔昌禹, 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生. 日本建築学会構造系論文集, Vol. , No. 539: pp. 87-94, 2001.
- 12) 藤井大地著, パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002
- 13) 大森博司, 本間俊雄, 特集 建築形態の数理「構造形態の解析から創生へ」, 建築雑誌, Vol. 118, No. 1507, pp. 20-23, 2003. 7

GA 系解法による解の多様性を考慮した構造形態の創生

堀切秀作¹⁾, 本間俊雄²⁾

1) 鹿児島大学理工学研究科建築学専攻建築計算工学研究室, horikiri@com.aae.kagoshima-u.ac.jp

2) 鹿児島大学工学部建築学科, 助教授, 工博, honma@aae.kagoshima-u.ac.jp

1. はじめに

構造物を設計する際、力学的な観点から一つあるいは複数の目標を設定していく。掲げた設計目標に沿った存在可能な解(許容解: feasible solution)、中でも大域的最適解を含む局所最適解や比較的评价の高い解(優良解)を探索することは、設計者に豊富な選択肢を与えることとなり、多様な構造形態の創生において重要なファクターと成り得る^{1,4)}。

大域的最適解の探索手法には、生物集団の環境に対する適応的な進化過程を模倣した遺伝的アルゴリズム(genetic algorithms: GA)⁵⁾が注目され、現在、広く認知されている。この GA 系解法の 1 つである ISGA(GA with immune system)^{3,4)}は、大域的最適解だけでなく、多様な優良解探索を行うことができ、種々の構造形態を生み出せる可能性を有する。

本論文では、ISGA の解法の特徴を把握するため、2 変数関数の最大値問題や、線形・非線形構造物の形態創生問題に適用する。

本論文の構成は以下の通りとする。まず、ISGA のアルゴリズムを説明し、GA のベンチマーク問題として多く利用されている単一目的最適化問題(single-objective optimization problem: SOP)を想定した 2 変数関数の最大値探索問題や、互いに相反する(トレードオフ)関係にある目的関数を持つ多目的最適化問題(multi-objective optimization problem: MOP)を想定した 2 つの 2 変数関数を取りあげる。これらにより得られた解の特性に基づき、2 次元問題のトラス構造と剛接骨組構造(線形)、さらには 3 次元問題の複合ケーブル構造(非線形)へ適用し、ISGA の特徴を示す。

2. 解の多様性探索機能を導入した GA (ISGA) の計算法³⁾

2.1 ISGA の計算アルゴリズム

計算手順は以下の通りである(図 1)。本アルゴリズムは、単一・多目的最適化問題に関わらず適用可能である。
 1) 初期個体群の生成: 乱数を用いて解候補である初期探索個体群を生成する。

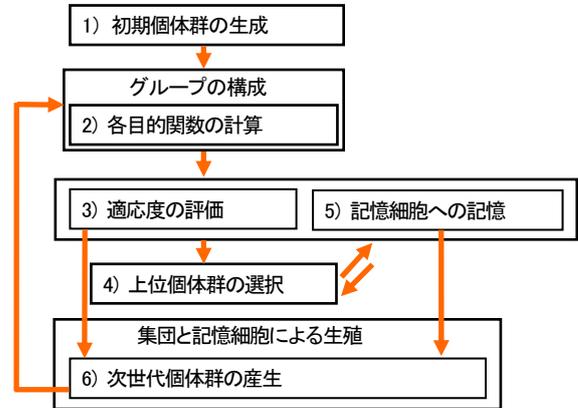


図 1 ISGA の計算流れ図

2) 各目的関数の計算: 集団内にある各個体の目的関数値を計算する。

3) 適応度 $F(i)$ の評価: ①各個体が集団の中で支配される(i より優越な)個体数 $S(i)$ を求める(強度の算出)。第 t 世代での集団 \mathbf{P}_t と記憶細胞 $\bar{\mathbf{P}}_t$ に含まれる全ての個体 j を用いて算出する強度 $S(i)$ を次式で定義する。

$$S(i) = \bigcup \left\{ j \mid \left(f_k(\mathbf{x}_j) \leq f_k(\mathbf{x}_i), k=1,2,\dots,l \right), i \in \mathbf{P}_t, j \in \mathbf{P}_t \cup \bar{\mathbf{P}}_t \right\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{x}_i = (\mathbf{A}_i \mathbf{R}_i)^T$ は個体 i に対応する設計変数ベクトル、 \cup は条件を満たす個体のカウント演算子である。 $l = 2$ の時、即ち f_1, f_2 の 2 つの目的関数の場合、図 2.a で示す目的関数空間内において、 i 自身を含むハッチング部個体数が強度に相当する。②集団を後述する手順により、設計変数空間内でグループ $G_s (s=1,2,\dots,r)$ に分ける(グループ構成の計算自体は 2)の段階で行う)。③各個体 i が同グループ内で支配される個体の強度の総和を次式のように計算し、それを適応度 $F(i)$ とする。本論では、適応度が小さい程高い評価を与える。

$$F(i) = \sum_{\substack{j \in \mathbf{P}_t \\ f_k(\mathbf{x}_j) \leq f_k(\mathbf{x}_i)}} S(j) \quad \left(i \in \mathbf{P}_t, i, j \in G_s, \mathbf{P}_t (= \mathbf{g}_s) \subset (\mathbf{P}_t \cup \bar{\mathbf{P}}_t) \right) \quad (2)$$

図 2.b は適応度を示す(中白抜き \circ は、同一グループではないことを意味する)。設計変数空間と目的関数空間の関係は図 3 の通りである。

4) 上位個体群の選択: 算出した適応度に基づき、評価の高い順に全個体群の中から上位個体群率 $H\%$ を記憶細胞候補とする。

5) 記憶細胞への記憶: 記憶細胞候補と記憶細胞(解集合)

を一緒にし、記憶細胞とする。記憶細胞の個体数が設定した数を超える場合、端切り法 (archive truncation method) により個体を削除し、記憶細胞の個体数を制限する。

6) 次世代個体群の産生 : 求めた適応度に基づき、個体集団 \mathbf{P}_t と記憶細胞 $\bar{\mathbf{P}}_t$ から次世代個体群 \mathbf{P}_{t+1} を産生する。

2.2 個体集団のグループ化

ISGA は適応度の評価時に個体集団のグループ化を行い、局所的に優れた個体に高い評価を与える。グループ化は次の手順による。

1) 集合の生成 : 集団 \mathbf{G}_l に含まれる各個体 j を要素とする集合 \mathbf{g}_l を考える。

$$\mathbf{g}_l = \{j : \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_{l_i}\} \quad (3)$$

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

$$d^*(\mathbf{g}_m, \mathbf{g}_n) = \frac{1}{t_m \cdot t_n} \sum_{i \in \mathbf{g}_m, j \in \mathbf{g}_n} d(i, j) \quad (4)$$

ここで、 $d(i, j)$ は個体 i - 個体 j 間に関する設計変数空間上の無次元化した距離を意味する。

3) 集合の統合 : 最小距離を持つ2つの集合を同一集合とし、2)に戻る。以上の操作を指定されたグループ数に達するまで繰り返す。なお、初期値は1個体1グループとする。

2.3 端切り法による個体の削除

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、以下の手順により個体を削除する (図4)。

1) 最短距離にある個体の選択 : 設計変数空間上で最も隣接する2個体を探す。その際、空間の端にある個体は選択せずに残す。

2) 個体の削除 : 選択した2個体の内、それぞれもう1つの隣接する個体との無次元化した距離を比較し、近い方の個体を削除する。

再び1)へ戻り、設定された個体数 (記憶細胞の数) になるまで以上の操作を繰り返す。

2.4 ISGA 計算アルゴリズムの特徴

本アルゴリズムを図5の山登りのイメージを用いて説明すると次のようになる。各個体は、設計変数の近いグループ毎に集団で高い (優良解) 方向に登り始める (探索)。高さ位置が異なっても各個体は良い評価値が得られ、山登りは続けられる。上位個体群選択率 $H\%$ は、適応度の評価が高い順に全個体群の $H\%$ の個体を記憶細胞候補とする。図5で示すように、ラインより上が上位個体群となる。個体 (解) が設計変数空間上で一箇所に集まったら

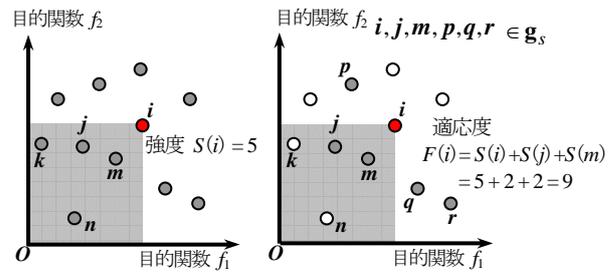


図2 強度 $S(i)$ と適応度 $F(i)$ の計算法

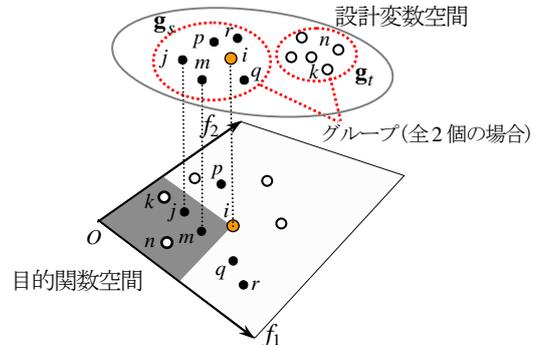


図3 グループと個体の位置関係

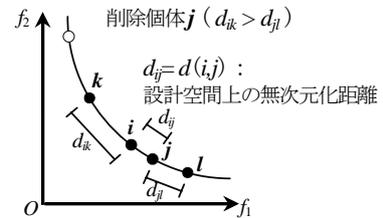


図4 端切り法

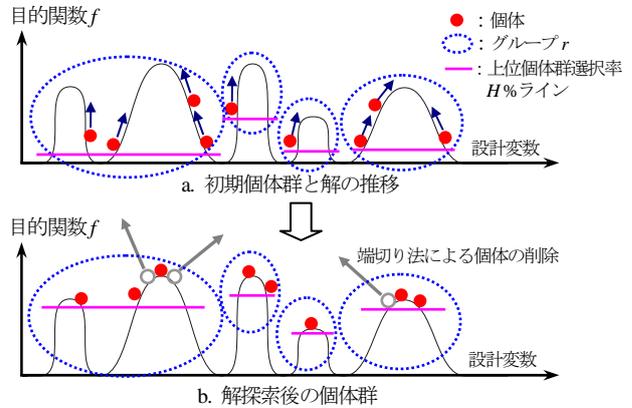


図5 ISGA の解探索概念図

個体の間隔 (密度) を下げ、平均化する。このニッチ操作が端切り法に当たる。結果的に高低差関係なく頂上 (大域的最適解や局所最適解) 及び頂上に近い解 (比較的评价の高い解) が捉えられる。

なお、強度の計算法には、パレートランキング方式の適応度算出手順を採用している。この強度概念を用いた適応度は、SPEA (strength pareto evolutionary algorithms)⁶⁾ と同様にグループ (クラスタ) を構成し、グループ内だけで算出する。SPEA2 (strength pareto evolutionary algorithms 2)⁷⁾ は端切り法を目的関数空間上の個体間距離で実施し

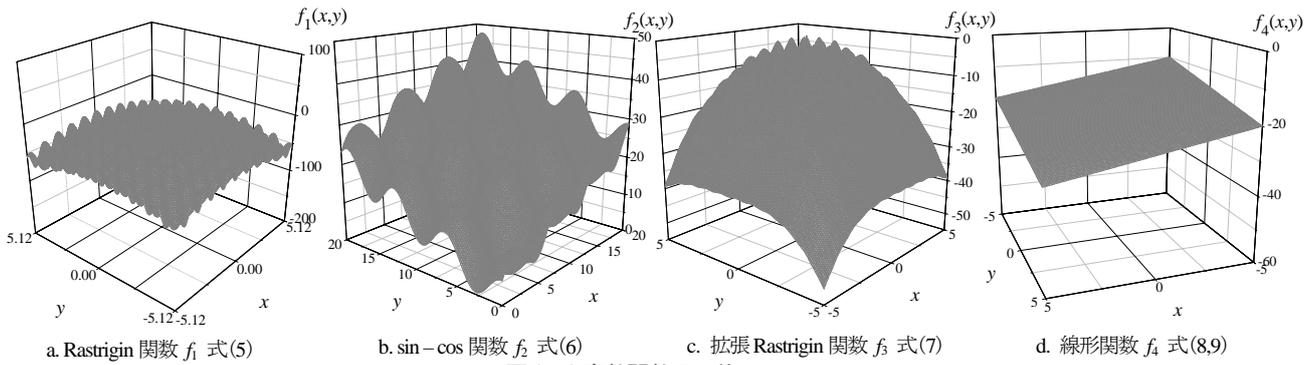


図6 2変数関数の形状

ているのに対し、ISGA では設計変数空間上の個体間距離を導入している。これは次の理由による。1つの目的関数空間の解の位置において、設計変数が一組だけであるとは限らない。従って、目的関数空間上で端切り法を行うと解の多様性を失う可能性が生じる。

ISGA の計算アルゴリズムは、従来の GA で設定するパラメータの他に2つの値設定が必要になる。1つはグループ数 r の設定、もう1つは記憶細胞候補を決定する上位個体群選択率 H % である。 r は局所的に優れた解の選択に関係し、 $r=1$ の適応度は絶対評価となる。 H により記憶細胞候補のサイズを決定し、 r の与え方で相対的な解の範囲が定まる。

3. 2変数関数ベンチマーク問題への適用

ISGA の基本的な計算特性を把握するため、次の4つの2変数関数を用い、最大値探索問題を想定する。

$$f_1(x, y) = -20 - x^2 + 10 \cos(2\pi x) - y^2 + 10 \cos(2\pi y) \quad (-5.12 \leq x, y \leq 5.12) \quad (5)$$

$$f_2(x, y) = x + y + 4(\sin x + \cos y) + 1 \quad (0.0 \leq x, y \leq 20.0) \quad (6)$$

$$f_3(x, y) = -\sqrt{20 + (x-1)^4 - 10 \cos(2\pi x) + (y-1)^4 - 10 \cos(2\pi y)} \quad (-5.0 \leq x, y \leq 5.0) \quad (7)$$

$$f_4(x, y) = -20 - x - y \quad (-5.0 \leq x, y \leq 5.0) \quad (8)$$

$$(0.0 \leq x, y \leq 20.0) \quad (9)$$

式(5) (Rastrigin 関数)と式(6) (sin-cos 関数)はアルゴリズムを確認する SOP のベンチマークとして利用されている。式(7) (拡張 Rastrigin 関数)と式(8) (線形関数)、または式(6)と式(9)の組み合わせにおいて、同種的设计変数 x, y に異なる関数値(評価値)を与えることから MOP に対応する。各式の形状は図6で示すように式(5)-(7)は多峰性関数である。これらの4つの関数に対し、設計変数 x, y は各々16 bit の2進数でコード化する。SOP は SGA (standard GA), IA (immune algorithms)⁸⁾と、MOP は SPEA2 の解と比較を行い、各解法で用いた計算パラメータは同一となるように表1のように設定した。世代数は全ての解法において100世代としている。

表1 各解法における計算パラメータ

	ISGA (SOP)	ISGA (MOP)	SGA	IA	SPEA2
個体(抗体)数	200	200	200	200	200
交叉率	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
交叉方法	2点交叉	2点交叉	2点交叉	2点交叉	2点交叉
突然変異率	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
選択方法	トーナメント	トーナメント	トーナメント	トーナメント	トーナメント
エリート戦略	—	—	有	—	—
T_{p1}	—	—	—	0.3	—
T_{s1}	—	—	—	0.1	—
T_{s2}	—	—	—	0.1	—
T_s	—	—	—	0.1	—

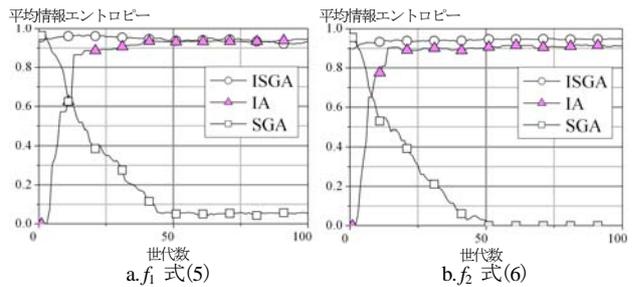


図7 世代毎の平均情報エントロピーの推移

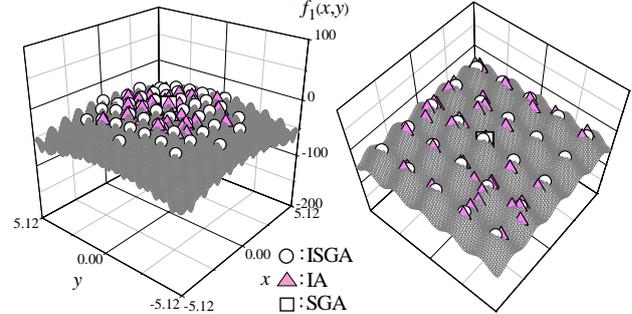


図8 SOPにおける各解法の比較 (f_1 式(5))

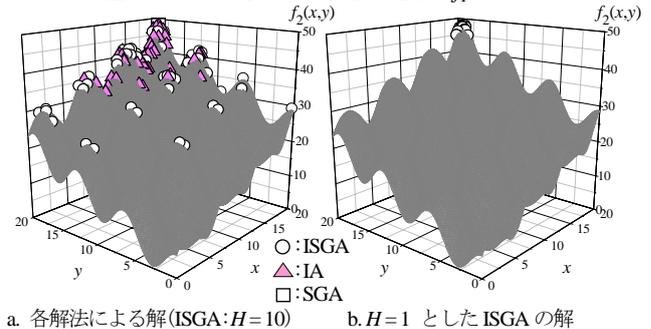


図9 SOPにおける各解法の比較 (f_2 式(6))

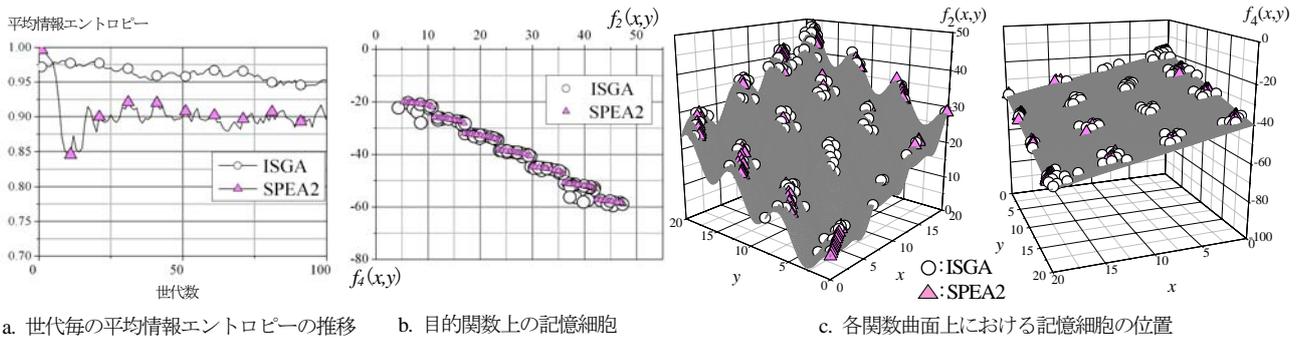


図 10 MOPにおける各解法の比較 (f_2 式(6), f_4 式(9)) (ISGA:H = 20)

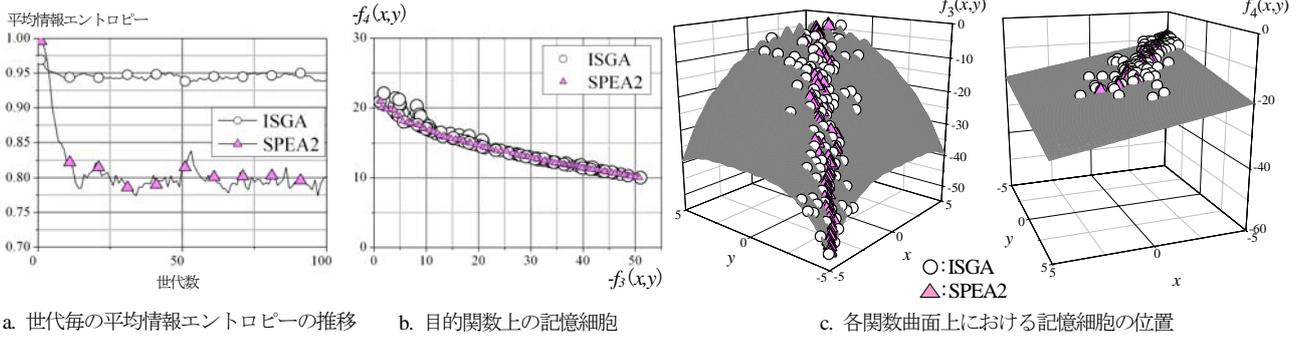


図 11 MOPにおける各解法の比較 (f_3 式(7), f_4 式(8)) (ISGA:H = 20)

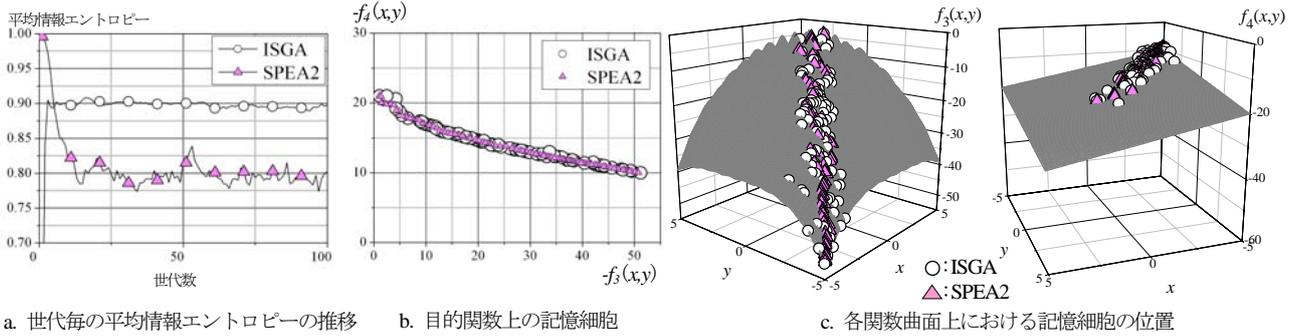


図 12 MOPにおける各解法の比較 (f_3 式(7), f_4 式(8)) (ISGA:H = 1)

集団の多様性を表す指標として平均情報エントロピー $H(N)$ による多様度を用いる⁸⁾。ここで N は個体数を示す。2進数型の遺伝子の場合は $0.0 \leq H(N) \leq 1.0$ となり、 $H(N) = 0$ の時全ての個体が同じになることを意味する。

SOP の計算結果を図 7-9 に示す。図 8 (グループ数 $r = 10$, 記憶細胞数 $M = 50, H = 10$)、図 9 ($r = 10, M = 50, H = 1$ or 10) は、記憶細胞の個体(解)を各多峰性関数(式(5), (6))上にプロットし、図 7 で各解法の世代毎の平均情報エントロピーの推移を表している。図 8, 9 共に SGA の解は上位個体が同一解となった。ISGA は優良解を探索しており、 $H(N)$ の推移からも解の多様性が読み取れる。また、図 9 では H の値を変化させることで比較を試みている。 $H = 1$ とすると、SOP では大域的最適解へ収束する傾向がある。 H の値を大きくすることで、比較的评价の高い解まで探索し易くなる。

MOP の計算結果を図 10-12 に示す。図 10 ($r = 15, M =$

$50, H = 20$) は式(6), (9)、図 11 ($r = 15, M = 50, H = 20$)、図 12 ($r = 15, M = 50, H = 1$) は式(7), (8) の目的関数空間上に記憶細胞の個体(非劣解集合、アーカイブ個体群)をプロットし(図 11, 12 は各関数を $-f_3, -f_4$ として最小値探索問題としている)、各解法の世代毎の平均情報エントロピーの推移を表している。なお、SPEA2 の記憶細胞数は ISGA と同様に $M = 50$ としている。図 11.b, 12.b から、各目的関数間にトレードオフと呼ばれる相反関係が確認できる。図 10.c, 11.c から、SPEA2 と比べ ISGA はパレート最適フロント周辺の局所最適解や評価の高い解を得られている。また、設計変数空間 (x, y) 上の距離概念で端切り法を用いた意味も数値的に確認できた。図 11, 12 では SOP と同様、 H の値を変化させることで比較を試みている。MOP では、 $H = 1$ とすると SPEA2 と同様にパレート最適フロントへ収束する傾向があり、 H の値を大きくすることで比較的评价の高い解まで探索し易くなる。

これらの結果をまとめると次のようになる。まず、グループの数 r と上位個体群選択率 $H\%$ の設定は問題の内容により各々異なる。目的関数空間の峰密度が高く、局所的な解が存在し得る場合は r の値を大きくする必要がある。 H の値は、小さくすると最大値付近の探索領域を狭め、大きくすることで探索領域が広がり、評価の高い解が得易くなる。ただし、ここではベンチマークとして、設計変数が同一種で関数形状が既知の問題を扱っているため、パラメータ r, H の値は設定し易い。種類が異なる設計変数を設定する一般の問題では、目的関数空間の状況が未知である。そのため、通常、 $H=30$ 程度から始めると良い。また、 M を増やすことにより、パレート最適フロントを網羅し、かつ局所的な解も捉え易くなる。

4. 構造形態創生問題

構造形態創生問題として、2次元のトラス構造と剛接骨組構造、3次元の複合ケーブル構造の最適化問題に ISGA を適用した例を示す。まず、SOP であるトラス構造の上弦節点変位指定問題をベンチマーク問題として取りあげる。次に、線形・2次元問題における MOP として、3つの目的関数を設定したトラス構造物を扱う。そして、剛接骨組構造物において、種々の優良解が得られる例を示し、最後に非線形・3次元問題における MOP として複合ケーブル構造に適用する。また、MOP では目的関数の1つに許容応力度を導入することで許容応力度設計とする。GA 系解法のパラメータは主に表1の値を利用し、世代数や ISGA のパラメータ (r, M, H) などは問題毎に設定する。

4.1 トラス構造のベンチマーク問題

図13で示す解析モデルは荷重作用点1,2,3が荷重作用後も水平の状態を維持するように、下弦節点a,b,cの鉛直方向座標 (Y_a, Y_b, Y_c) を設計変数(水平座標固定)として扱う上弦節点変位指定問題である(節点数8, 要素数13)。各節点の取り得る範囲は次の通りである。

$$-1.0 \leq Y_a = Y_c \leq 1.0, \quad -1.0 \leq Y_b \leq 1.0 \quad (m) \quad (10)$$

ここでは解析モデルの形状と荷重の対称性を考慮し、節点a,b,cの鉛直方向座標 $Y_a = Y_c, Y_b$ をそれぞれ10bitの2進数でコード化する。自重は無視し、上弦節点1,2,3に $P=9.8\text{ kN}$ を与える。また、部材断面積は全て 10.0 cm^2 とする。上弦節点が常に水平となるように指定する目的関数 $f(x, y)$ は、上弦節点1,2,3の鉛直方向変位を v_1, v_2, v_3 とすると次式で設定できる。

$$f(x, y) = (v_1 - v_2)^2 + (v_1 - v_3)^2 + 1 \quad (11)$$

この目的関数が1のとき、水平を保持する。

解析結果は図14.aに示す。近似解は、セル・オートマトン法系の解法である自律分散有限要素法によるものである⁹⁾。ここでは、ISGA, IA, SGA, 近似解と比較を行うものとする。各解法のパラメータ設定は2変数関数での結果を考慮し、世代数:100, $M=20$ (SGAでは上位20個体), $r=15, H=30$ とした。ISGAは解空間を幅広く網羅した個体(解)を探索している。ISGAにより得られた形状例を図中に示す。 M の数を徐々に増やすと、図14.a,b,cのように近似解を覆い尽くしていく。

4.2 トラス構造の多目的最適化問題¹⁰⁾

図15で示す2次元トラス構造(節点数6, 要素数10)のMOPにISGAを適用する。ここではISGAとSPEA2による解を比較する。このモデルは部材総重量、最大応力度比、最大節点変位の3つの目的関数を最小化するMOPである。トラス部材が同一材種で構成されるとき、重量最小化は総体積の最小化問題として扱える。部材断面積の取り得る範囲は $64.516 - 33032.192 \times 10^{-6}\text{ mm}^2$ とし、各部材断面積を2進数の9bitで表現する。制約条件である許容応力度や弾性係数、荷重は表2のように与える。各目的関数と制約条件は次式に示す。

$$\begin{cases} \text{minimize} & f_1(\mathbf{A}) = \mathbf{R}^T \mathbf{A} \\ & f_2(\mathbf{A}) = \max_j \sigma_j(\mathbf{A}) / \sigma_a \\ & f_3(\mathbf{A}) = \max_j \delta_j(\mathbf{A}) \\ \text{subject to} & \sigma^L \leq \sigma_j(\mathbf{A}) \leq \sigma^U \end{cases} \quad (12)$$

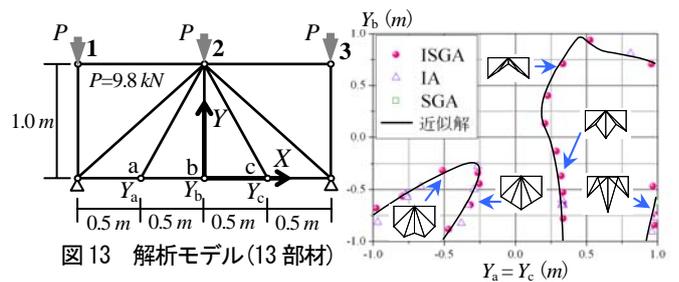
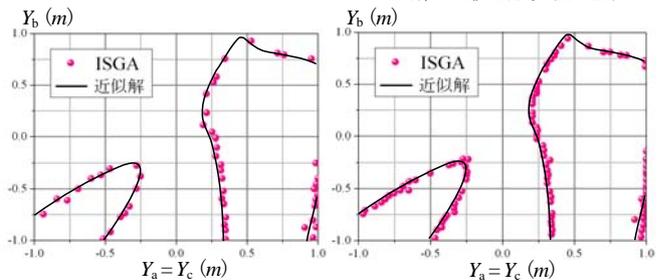


図13 解析モデル(13部材)

a. 解の比較と形状 ($M=20$)



b. $M=50$ とした ISGA の解

c. $M=100$ とした ISGA の解

図14 上弦節点変位指定問題の解の比較

$$\sigma_a = \begin{cases} \sigma^L & \text{if } \sigma_j(\mathbf{A}) < 0 \\ \sigma^U & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

ここで、 \mathbf{A} :部材断面積ベクトル、 \mathbf{R} :部材長ベクトル、 σ_j : j 部材応力度、 δ_i : i 節点変位、 σ_a :許容応力度を表す。

図 16-19 は解析結果を示す。ISGA と SPEA2 の比較を行うものとし、各解法のパラメータは、世代数:5000、 $M=200$ 、 $r=50$ 、 $H=1$ or 30 とした。図 16, 18, 19 は目的関数空間に ISGA, SPEA2 の解個体を各々プロットしており、図 17 は図 16 で得られた形状例を表す。なお、形状例の実線の太さは断面積比を示す。

4.3 剛接骨組構造の多目的最適化問題

図 20 は上路橋梁モデルを考慮した 2 次元剛接骨組構造(節点数 32, 要素数 39)の解析モデルである¹¹⁾。部材は同一材種, 同断面積, 同断面形状を用い、部材総重量(部材総体積)および最大応力度の最小化を目標とした MOP である。

$$\begin{cases} \text{minimize} & f_1(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \mathbf{R}^T \mathbf{A} \\ & f_2(\mathbf{A}, \mathbf{R}) = \max_j \sigma_j(\mathbf{A}, \mathbf{R}) / \sigma_a \\ \text{subject to} & \sigma^L \leq \sigma_j(\mathbf{A}, \mathbf{R}) \leq \sigma^U \end{cases} \quad (14)$$

$$\sigma_a = \begin{cases} \sigma^L & \text{if } \sigma_j(\mathbf{A}, \mathbf{R}) < 0 \\ \sigma^U & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 \mathbf{A} :部材断面積ベクトル、 \mathbf{R} :部材長ベクトル、 σ_j : j 部材応力度、 σ_a :許容応力度を表す。

設計変数は部材断面積及び下弦各節点の座標(x, y)である。全部材を矩形断面とし、奥行きを 6m と想定することから、部材断面積の代わりに部材せいが設計変数となる。また、下弦部材の節点は必ず全スパンの内分点となることを考慮して、下弦部材長さの比率を表すパラメータ α を設計変数とする。このパラメータ α と下弦部材 j の長さの x 方向成分 l_{xj} との関係は次式のようになる。

$$l_{xj} = L \times \frac{\alpha_j}{\sum_k \alpha_k} \quad (16)$$

したがって、部材せい 1~51m (9 bit)、下弦部材パラメータ 1~128 (7 bit)、下弦節点の鉛直座標 -60~59.0625m (7 bit) が設計変数となり、単位体積重量、弾性係数、許容応力度、荷重は表 3 のように与える。各解法のパラメータは、世代数:30000、 $M=100$ 、突然変異率:0.03、交叉率:0.7、 $H=1$ と設定し、 $r=10, 25, 100$ と変化させ、各々 5 回試行し結果を比較する(図 22-24, case1-5)。また、個体数:300、 $M=300$ 、 $r=25$ 、 $H=30$ と変化させた結果を示す(図 25)。

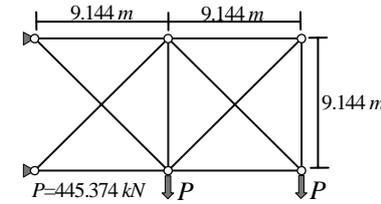


図 15 10 部材トラス構造解析モデル

表 2 解析モデルデータ

	設定値
許容応力度 $\sigma^L = -\sigma^U$	172.25×10^3 (kN/mm ²)
弾性係数	68.9 (kN/mm ²)
荷重	445.374 (kN)

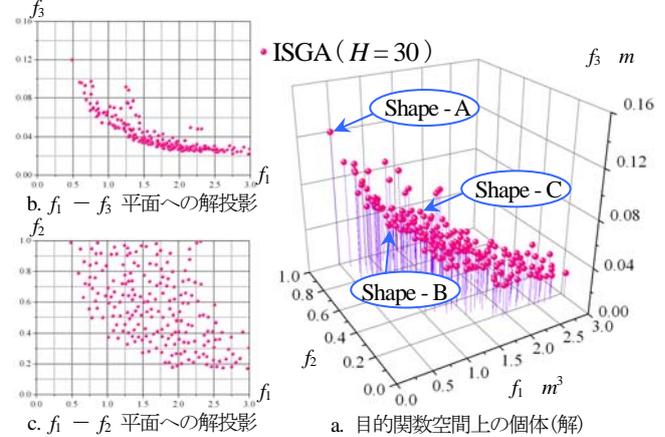


図 16 10 部材トラス構造解析結果 (ISGA : H = 30)

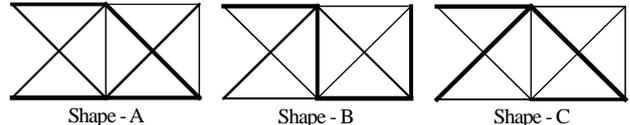


図 17 10 部材トラス構造の形態創生 (ISGA)

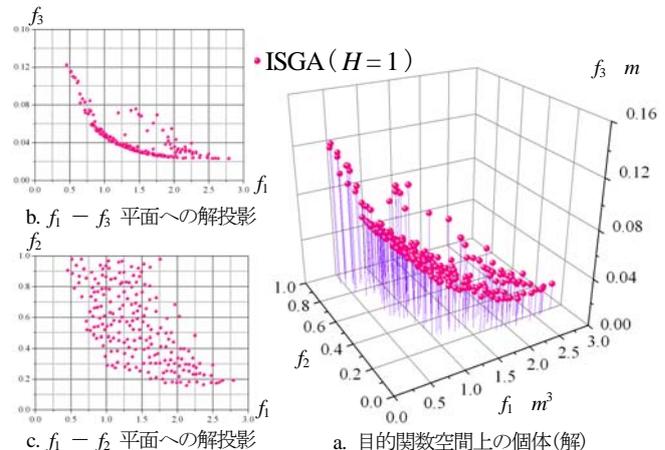


図 18 10 部材トラス構造解析結果 (ISGA : H = 1)

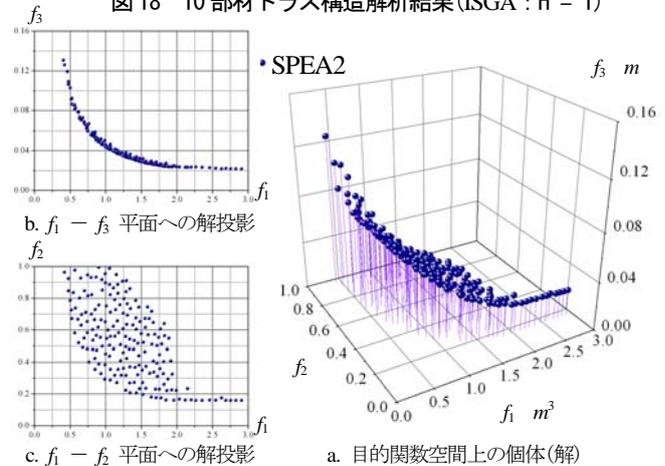


図 19 10 部材トラス構造解析結果 (SPEA2)

結果、図 22-24 のように、目的関数空間上で滑らかな曲線上に個体(解)が得られ、曲線は試行ごとに異なった。図 21 では得られた形状例を、図 22 - 24 中には、1 回の試行で得られた形状例を示す(ここでは Type A - C の形状を持つパレートフロントを示し、断面積比を実線の太さで表す)。また、図 25 では H や M の値を変化させることで帯状に解探索を行っている。

4.4 複合ケーブル構造の最適設計^{12),13)}

幾何学的非線形を考慮した 3 次元複合ケーブル構造の初期形状解析に ISGA を適用する。解析モデルは図 26.a(Model-A), b(Model-B) で示す。各モデルは表 4 のパラメータで構成され、各モデル共にケーブル材には構造用スパイラルロープ 1×169 を、ストラット材には一般構造用炭素鋼鋼管 No.58 を用いる。各目的関数は次式のようになる。

$$\begin{cases} \text{minimize} & f_1(x) = 1/\det[\mathbf{K}] \\ & f_2(x) = \max N_j(x)/N_a \\ \text{subject to} & \sigma_L \leq \sigma_j(x) \leq \sigma_U \end{cases} \quad (17)$$

なお、許容軸力 N_a として破断強度の 70% を用いる。

この問題は接線剛性マトリクスの行列式の最大化と軸力比の最小化を目的関数とする MOP である。設計変数は各部材長さとし、これによりケーブルに張力を与え初期釣り合い状態を決定する。使用する初期張力は範囲 $[Y_{Lower}, Y_{Upper}] = [5, 1275] \text{ kN}$ で、8 bit の 2 進数によりコード化を行い、256 種類となる。各ケーブルの初期張力は 0 - 255 の整数 n を用い、次式で与える。

$$N_{0j} = N_{Lower} + \frac{Y_{Upper} - Y_{Lower}}{255} n \quad (18)$$

解析に用いた ISGA のパラメータは世代数:500, 突然変異率:0.005, $M = 200$, $r = 20$, $H = 30$ とした。解析結果を図 27, 28 で示す。図 27 で表すように、目的関数空間でトレードオフ関係が確認できるパレートフロントが得られた。また、図 28 は各モデルにおいて得られた形状例を示す(濃い実線はスカラット材、薄い実線はケーブル材を示し、ケーブル材の太さは軸力比を表す)。

4.5 考察

ISGA を用いた構造問題の数値実験により次のことがまとめられる。

4.5.1 トラス構造のベンチマーク問題

結果を設計変数空間で表現しているため、解空間全体を網羅していることが確認できた。これは設計変数空間で端切り法を用いているためである。さらに、 M の値を

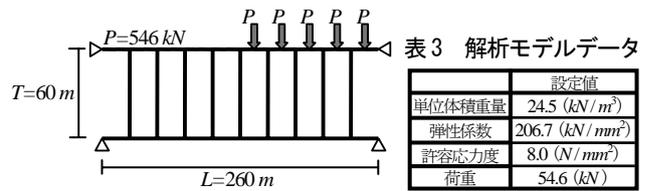


図 20 39 部材骨組構造解析モデル

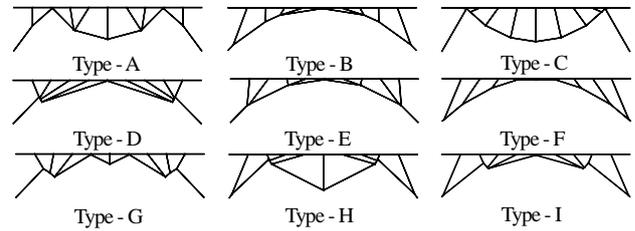


図 21 39 部材骨組構造の形態創生 (ISGA)

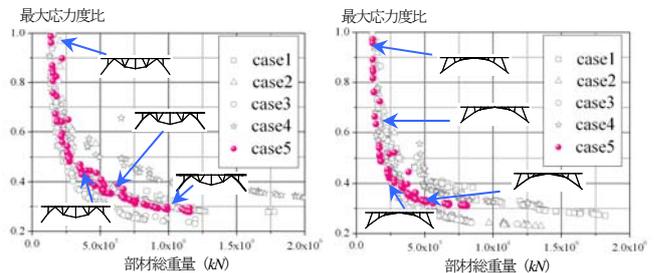


図 22 解析結果 ($r = 10, H = 1$) 図 23 解析結果 ($r = 25, H = 1$)

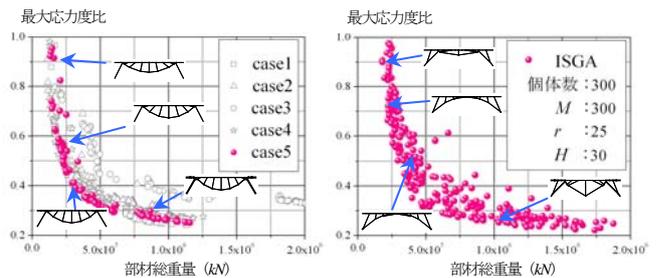


図 24 解析結果 ($r = 100, H = 1$) 図 25 帯状の ISGA の解

表 4 複合ケーブル構造における解析モデルデータ

	Model-A	Model-B	構造用スパイラルロープ 1×169	一般構造用炭素鋼鋼管 No.58
スパン(m)	100	100		
境界部からのライズ(m)	5	10		
総節点数(個)	112	112		
ケーブル部材(本)	192	288		
ストラット部材(本)	48	48		
総要素数(本)	240	336		
ヤング係数(N/mm ²)			1.60×10^5	2.10×10^5
Φ (mm)			80.00	406.40
断面積(mm ²)			3930.00	196.20
厚さ(mm)			—	16.00
破断荷重(kN)			5660.00	—
断面 2 次モーメント(mm ⁴)			—	3.74×10^8
単位質量(kg/m)			32.20	154.00

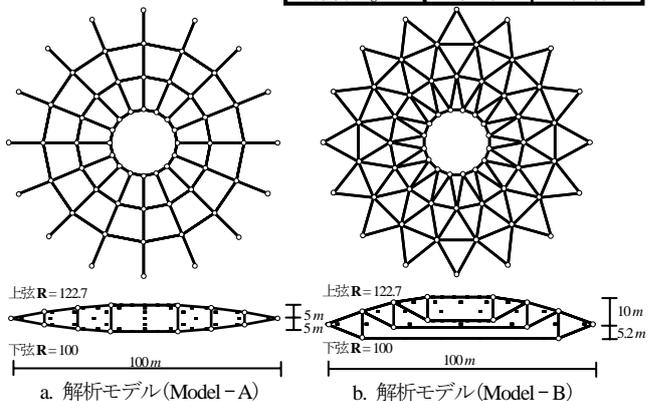


図 26 複合ケーブル構造解析モデル

増やしていくことで、等分布に解密度を高めることを可能とする。

4.5.2 トラス構造の多目的最適化問題

$H = 1$ とすると、ISGA は SPEA2 で得られたパレート最適フロントへと近づいていく。しかし、ISGA は設計変数空間で端切り法を用いるため、目的関数空間で密度の平均化を行う SPEA2 の解と完全には一致しない。また、SPEA2 とは異なり、パレート最適フロントと同時に他の曲面の存在を発見することができる。これは局所最適解が構成するパレートフロントであり、ISGA は優良解探索が行えている。

4.5.3 剛接骨組構造の多目的最適化問題

突然変異率を 0.01 - 0.03 にし、 H の値を小さくすることで、試行毎に異なる多様なパレートフロントを探索することができる。さらに、1 回の試行で得られる個体の構造形状は力の流れが同じ形式である形態を構成する。また、 H 、 M の値を増やすことで、帯状に幅広く多様なパレートフロントの探索が行えることを確認した。なお、突然変異率を遺伝子長の逆数に 1.0 - 1.5 を乗じた値を用いると、目的関数空間上で綺麗な帯状の解を得ることができ、その内側のラインに SPEA2 の解が重なる。

4.5.4 複合ケーブル構造の最適設計

Model - A より Model - B にはパレートフロント付近での解探索が見られた。これは、Model - A には比較的评价の高い局所最適解が存在しないためである。また、各モデルともに、張力状態の似た釣合状態に収束した。目的関数に変位や固有周期を取り入れることで、本論で得られた以外の釣合状態に収束する可能性がある。

4.5.5 構造形態創生問題のまとめ

ISGA は設計変数空間でグループを構成することで優良解を得やすくし、また、設計変数空間での端切り法により、解の多様性を失わない探索が行える。さらに、ISGA の重要な設計パラメータである r 、 H 、 M の特徴を、構造形態創生問題へ適用することで示し、パラメータ設定の全体的な傾向が把握できた。

5. おわりに

2 変数関数のベンチマーク問題における SOP、MOP の結果に基づき、構造形態創生問題へ適用することで、本論で扱った ISGA の多様な優良解探索の特性が示せた。今後は、得られた ISGA の特性を基に、多くの構造形態創生問題に展開していきたい。

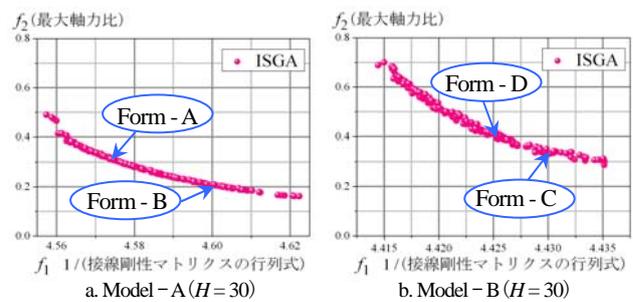


図 27 複合ケーブル構造解析結果

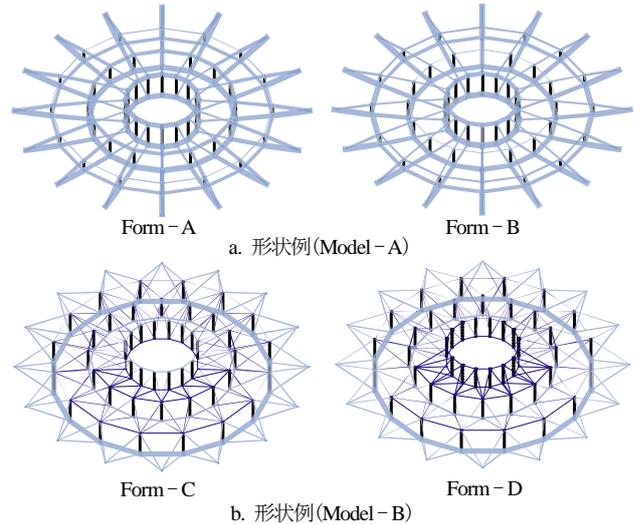


図 28 複合ケーブル構造の形態創生 (ISGA)

参考文献

- 1) 本間俊雄: 生物的アプローチによる形態発想支援システムの試み, 空間構造におけるコンピュータ利用の新しい試み, p.2-17, 日本建築学会, 2005.3
- 2) 本間俊雄: 生物的アプローチによる形態発想支援システムの試み, 空間構造におけるコンピュータ利用の新しい試みと将来展望セミナー資料, p.1-8, 日本建築学会, 2005.10.28
- 3) 本間俊雄, 野端憲太: 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 (投稿中)
- 4) Toshio Honma and Kenta Nozui : A Procedure on the Genetic Algorithms with Diversity of the Solution and Structural Morphogenesis, International Workshop on Computational Morphogenesis 2006, p.13, 2006.10.12
- 5) 伊庭奇志: 遺伝的アルゴリズムの基礎 - GA の謎を解く -, オーム社出版, 1994.9.20
- 6) E. Zitzler and L. Thiele : Multiobjective Evolutionary Algorithms, A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 3(4), 257-271, 1999
- 7) E. Zitzler, M. Laumanns and L. Thiele: SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm, In Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich, 2001
- 8) 本間俊雄, 加治広之, 登坂宣好: 免疫アルゴリズムによるトラス構造物の多目的最適化と解の多様性, 日本学術会議・日本建築学会構造工学論文集, 49B, 309-317, 2003.3
- 9) 本間俊雄, 登坂宣好: 反復計算法による構造物の形態解析と最適化, 日本建築学会構造系論文集, 502, 69-76, 1997.12
- 10) 高田豊分: 多目的遺伝的アルゴリズムを応用したトラス構造物の最適設計, 計算工学講演会論文集, 8, 327-330, 2003
- 11) 高田豊文, 大崎純: 橋梁の設計・骨組, 構造形態の創生と最適化セミナー資料, pp.35-41, 日本建築学会, 2005.1
- 12) Toshio Honma and Nobuyuki Ataka: Geometrically Nonlinear Structural Analysis by FEM Using the Coordinate Value on a Deformed Body, International Information Institute 7(5) 569-584 2004.9
- 13) 本間俊雄, 合田雄策, 安宅信行: 座標値を未知量とした有限要素技術による張力構造解析の一方法, 日本建築学会構造系論文集, 602, 161-169, 2006

ホメオスタシス法による曲面構造形態の創生に関する研究

木村俊明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, kimura@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

両端を固定された鎖は常に自然に正しい形をとる。これはカテナリー曲線と呼ばれ、この懸垂形を天地逆にすればシェル構造にとって最も効率の良い力の伝達方式を持つ構造曲線を得ることができる。このような構造曲線を有する曲面構造は吊り下げ曲面と呼ばれ、実現する方法としては A.Gaudi や F.Otto の模型による逆さ吊り実験が有名である。また H.Isler は得られた曲面形状をもとに、数多くのコンクリートシェルを設計していることが知られている。

Oscar A.Andres は、曲面形状を得るための実験的手法として、Homeostatic Model Technique(以下 HMT) を提案している [1]。HMT は逆さ吊りの原理と生物の生体維持の法則である *Homeostasis* を基礎概念とした手法である。またこの手法は、Gaudi, Isler らの手法と異なり、熱可塑性を有するプラスチックを用いて曲面形状を決定する点、加熱時間など違いによって多様な形状を得ることが可能な点に特徴がある。本研究ではこの HMT により得られる曲面形状を数値解析により効率的に求めることを目的としている。

2 Homeostatic Model Technique

2.1 手法の概要

生体が環境への適応や生命維持のために営む動的な平衡状態を *Homeostasis*(恒常性) と言う。この語はアメリカの生理学者 Walter B.Cannon が提案した言葉で、不均衡な環境下において人間だけでなく、自然界のあらゆる生物に見られる現象といわれている。HMT はその *Homeostasis* と逆さ吊りの原理に基づいた、実験的な形状決定手法である。この方法の具体的な手順は、まず載荷したプラスチック板を吊るしてオープンで熱を加えることを行う。その後、プラスチック板が形状変化した時に取り出して冷却し、天地逆にすることで曲面形状を得るというものである。この手法の一連の流れによって、プラスチック板がかたちを維持するために、熱による不均衡な環境下において平板から曲面形状に、曲げ抵抗から軸力抵抗に形態が変化する。このことが生物における *Homeostasis* と相似しており、手法の名前に由来していると言える。HMT で用いるプラスチック板の様子を示した写真を図 1(a) に、加熱する前、加熱後のプラスチック板の様子を示した写真を図 1(b), (c) に示す。また HMT により得られる曲面形状の例を図 2 に示す。

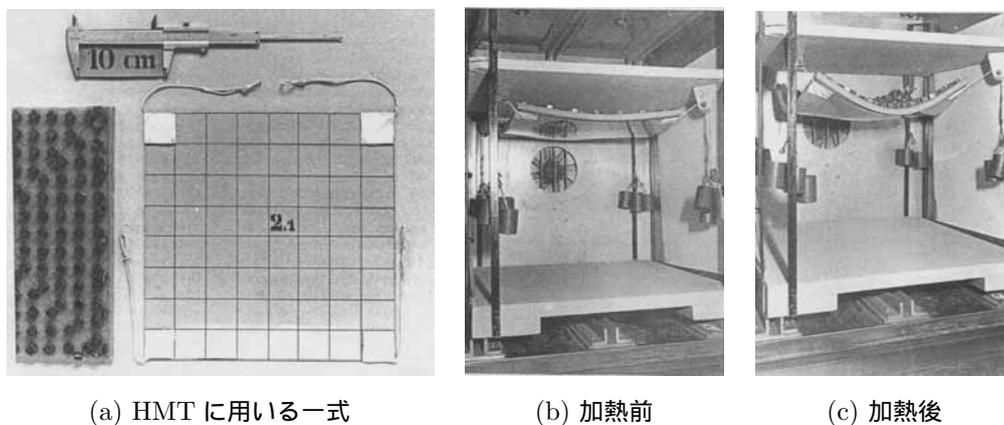
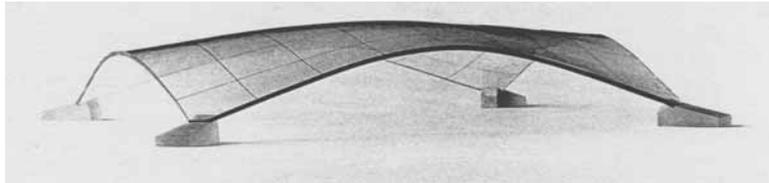
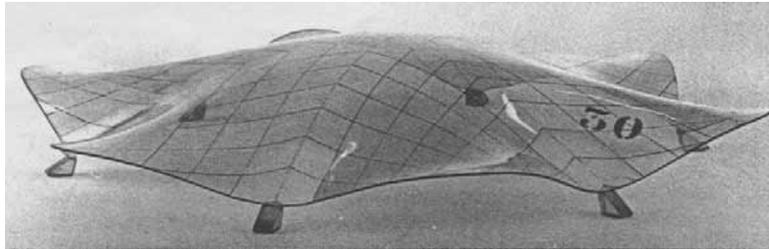


図 1 HMT 諸元 [2]



(a) 矩形境界 4 隅拘束モデル



(b) 多角形境界 6 点拘束モデル

図 2 HMT により得られる曲面形状の例 [3]

2.2 手法の特徴

HMT と同様に逆さ吊りの原理に基づいた実験的な曲面形状決定手法である H.Isler の手法と比較すると、以下に示される特徴をあげることができる。2 つの手法の比較を表 1 に示す。

表 1 からわかるように、HMT は設計者の意思で任意の時間、熱を加えて曲面形状を得ることができるという特徴がある。これはこの手法が設計者の意思により、多様な曲面形状を決定することが可能であることを示している。またそれに伴い、HMT により得られる曲面形状は多少の曲げ応力の混入を許容していることを示している。

表 1 2 つの手法の比較

比較対象	H.Isler による手法	HMT
手法の概念	逆さ吊りの原理	逆さ吊りの原理, 生物恒常性
用いる素材	布	プラスチック
載荷時の素材の挙動	一意的	時間依存

3 数値解析例

3.1 解析手法

通常、プラスチック板の熱変形を考慮して数値解析を行う場合には材料非線形解析を扱うことが考えられる。しかしながら本研究では効率的に数値解析を行うためにプラスチック板の熱変形を弾性範囲の微小変形の蓄積によるものとみなし、静的線形解析を繰り返す方法を採用した。解析手順の流れを以下に示す。

- Step1 : 設計領域, 荷重, 境界条件を設定する。
- Step2 : 静的線形解析を行い, 節点変位を求める。
- Step3 : 得られた節点変位を節点座標に加える。
- Step4 : Step2 ~ Step3 を任意回数繰り返し, 曲面形状を更新する。
- Step5 : 最終的に得られた曲面形状を反転し, 出力する。

3.2 解析モデル

HMT より得られた曲面形状と本手法による数値解析で得られた曲面形状を比較する。比較対象は Andre の発表論文 [3] に示されている曲面形状とする。このモデルは $1.0 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^2$ の荷重を載荷して得られた、 $360\text{mm} \times 360\text{mm}$ の矩形境界を有する、ライズ 53.73mm 、シェル厚 2.4mm の曲面形状である。本研究での解析モデルは比較対象と同じ条件に設定するが、境界条件は、各支持条件の違いによる影響を調べるためそれぞれピン支持、固定支持、ローラー支持とした場合で数値解析を行う。また数値解析は HMT によって得られた曲面形状のライズと同じ 53.73mm の曲面形状が得られた時点で停止とする。解析モデルを図 3(a), (b) に、比較対象とする曲面形状のパラメータを表 2 に示す。

本節で示す曲面形状の比較は断面線を同一スケールで重ね、断面形状を比べることにより行う。断面線はシェル頂点を原点にとり、図 3(c) に示す座標軸において示すこととする。また、曲面形状の断面線は図 3(d) に示す位置で切断し、図中の各番号と対応するように SECTION1-1 から SECTION9-9 まで示す。

表 2 比較対象パラメータ [3]

形状	$360\text{mm} \times 360\text{mm}$ 矩形境界
ライズ	53.73 mm
シェル厚	2.40mm
荷重	$1.0 \times 10^{-4} \text{ N/mm}^2$

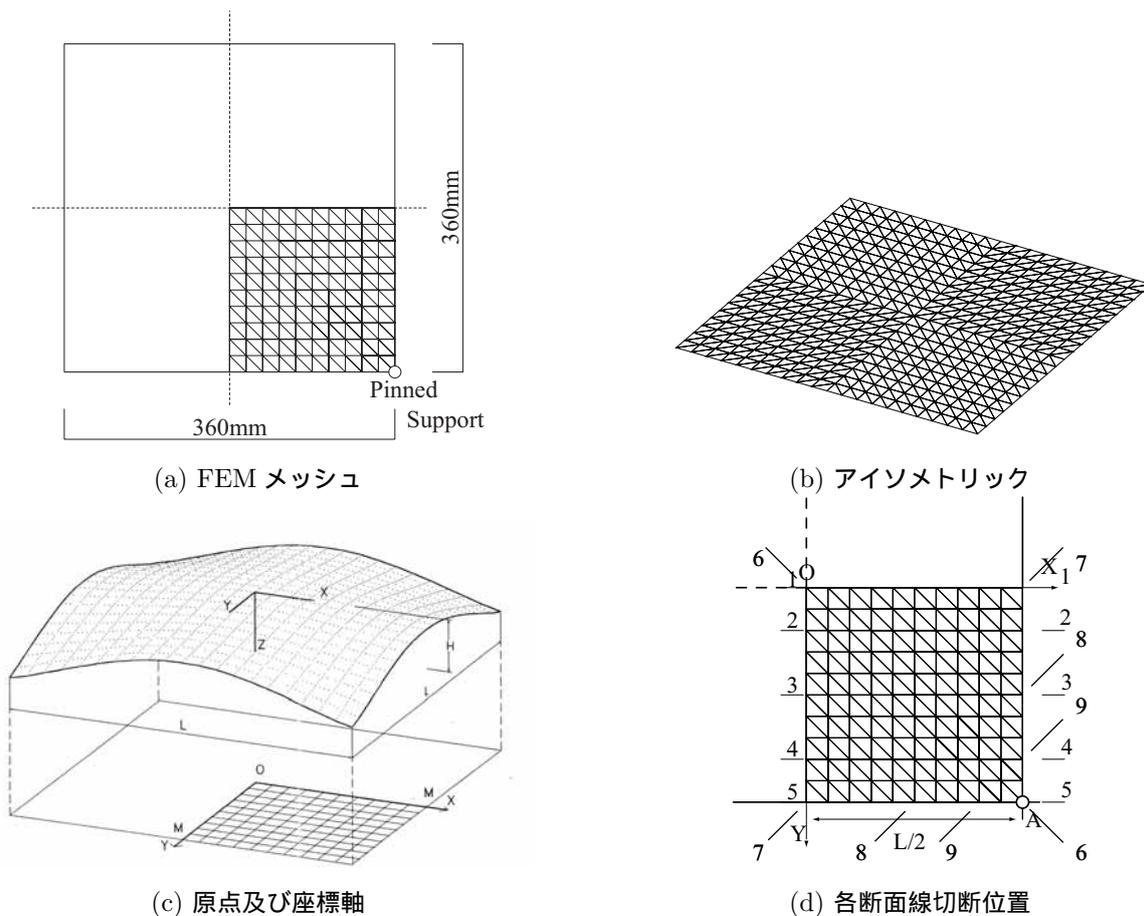


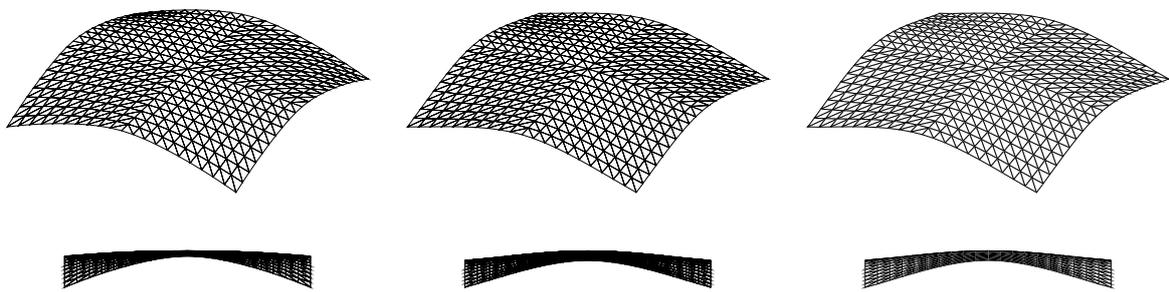
図 3 解析モデル

3.3 解析結果

図 4(a) から (c) に境界条件をピン支持とした場合、固定支持とした場合、ローラー支持とした場合の曲面形状 (アイソメトリック、立面図) を示す。図 5 から図 7 にそれぞれの境界条件において数値解析を行い、得られた形状の断面線を用いて比較した図を示す。HMT により得られた形状の断面線を破線で、数値解析により求めた形状の断面線を実線で示す。

境界条件をローラー支持とした場合、得られた曲面形状は HMT によるものと大きく異なっている。これは境界条件をローラー支持としたことによって数値解析の段階で鉛直方向に比べて、水平方向の変形が大きく生じたことが原因であると考えられる。

一方、境界条件をピン支持、固定支持とした場合では得られた曲面形状の断面線は HMT によるものとほぼ同様であることがいえる。これより、境界条件をピン支持と固定支持とした場合において、本手法によって得られた曲面形状と HMT による曲面形状はほぼ同様であり、HMT による曲面形状を数値解析により効率的に求めることができたと言える。



(a) 境界条件：ローラー支持 (b) 境界条件：ピン支持 (c) 境界条件：固定支持
 図 4 数値解析により得られた曲面形状

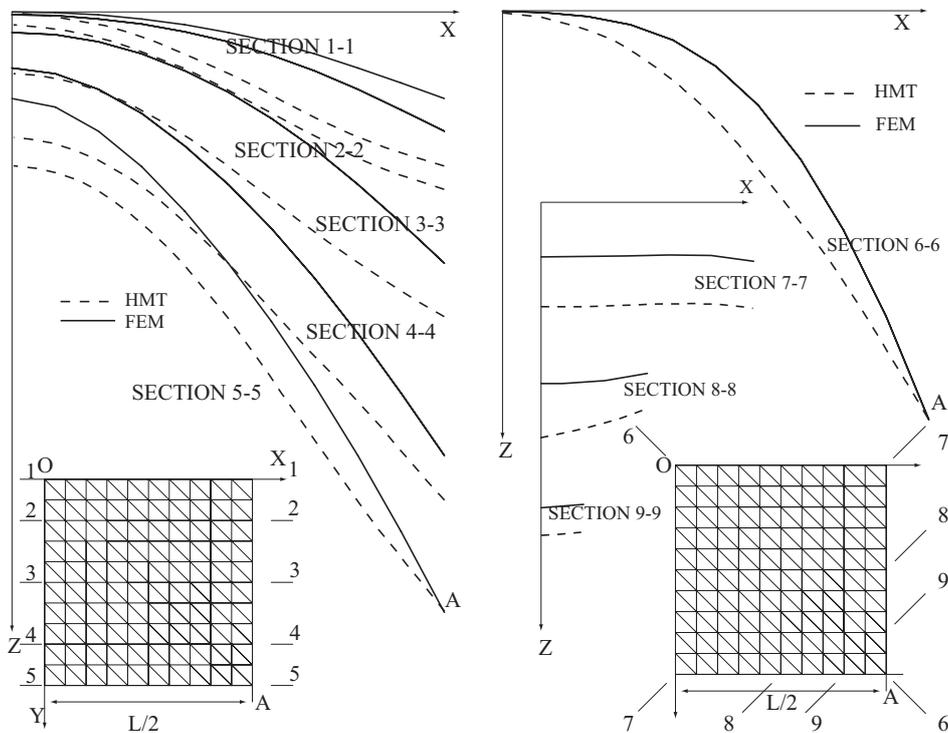


図 5 断面形状の比較 (境界条件:ローラー支持)

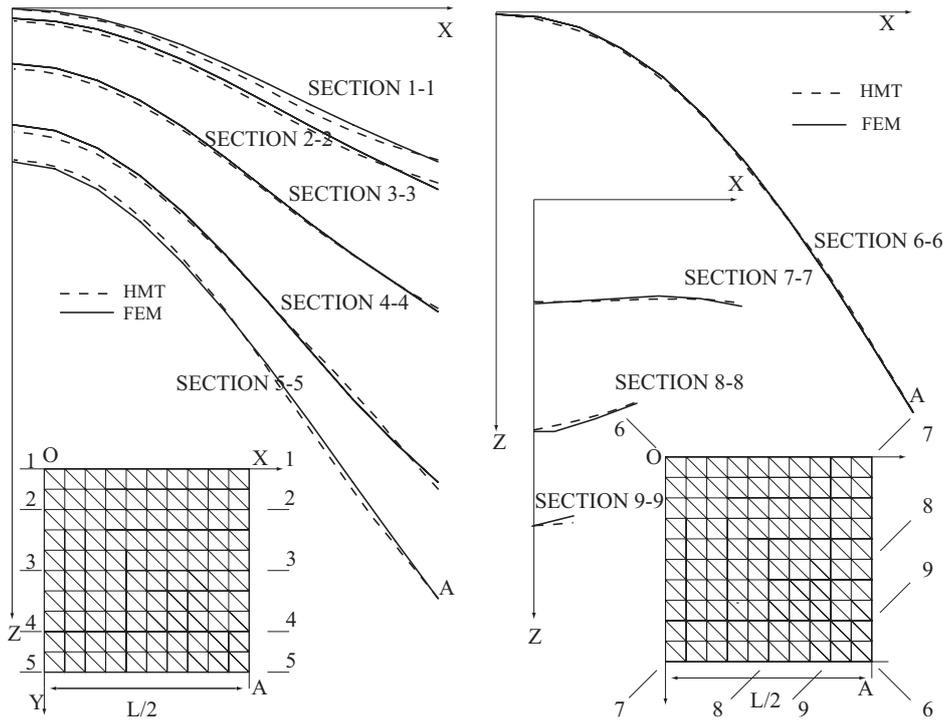


図6 断面形状の比較 (境界条件:ピン支持)

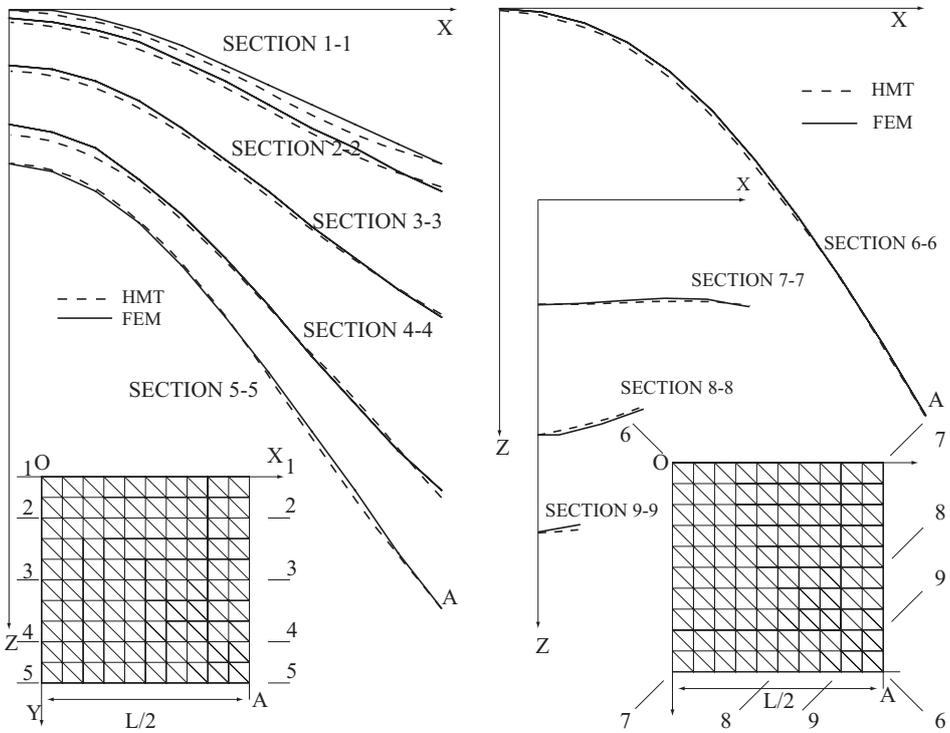


図7 断面形状の比較 (境界条件:固定支持)

4 結

HMTにより得られる曲面形状を数値解析により求めることを目的として、本研究ではHMTにおける吊り下げ時の熱変形を区分的な線形変形の積み重ねとみなし、静的線形解析を繰り返す解析手法を採用し、数値解析を行った。その結果、HMTによる曲面形状とほぼ同様の断面形状を有する曲面形状を数値解析により得ることができた。また、これよりHMTによる曲面形状を数値解析により効率的に求めることが可能であることを示した。

参考文献

- 1) Oscar A.Andres : Experimental Design of Shell Structures, Proc. International Association for Shell and Spatial Structures Tokyo and Kyoto, Proc. International Association for Shell and Spatial Structures Tokyo and Kyoto, pp.845-854, 1972.
- 2) Oscar A.Andres, N.F.Ortega : An Extension of Gaudi's Funicular Technique to the Conception and Generation of Structural Surface, Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures, Vol.3, pp.161-172, 1994.
- 3) Oscar A .Andres, N.F.Ortega, C.A.Schiratti : Comparison of Two Different Models of a Shell Roof, Proc.of International Association Shell and Spatial Structures, Atlanta, pp.320-329, 1994.

付帯条件付きの極小曲面と膜構造形態に関する研究

柯宛伶¹⁾, 川口健一²⁾

1) 東京大学工学部建築学研究科, 修士課程, wanling@iis.u-tokyo.ac.jp

2) 東京大学生産技術研究所, 教授, 工博, kawaken@iis.u-tokyo.ac.jp

1 はじめに

膜構造を代表とする張力構造の形状決定法は計算機の発達に伴い、過去に多くの数値解析法が提案されてきた。動的緩和法 (dynamic relaxation method) や応力密度法 (force density method) などがその代表であり、今日でも頻繁に使われている。これらの方法は非線形の不安定問題を安定的に解くことのできる優れた方法であるが、反面、その為に特殊な経験や技巧を要する方法でもある。

極小曲面は膜構造の理想形状としてよく知られた概念であり、プラトーの石鹼膜実験の解法によってプラトー問題としても知られている。同時に、変分法分野での数学的問題としても多くの研究があり、数学的に解かれた形態も多く存在する。

しかし、固定境界の形状のみが与えられた極小曲面形状は、しばしば望ましい建築形状と一致しなかったり、極小曲面形状そのものが存在しない場合もある。この様な場合、ケーブル等の付加的な部材の追加が極小曲面形状の改善に役立つことも多い。

本報告では、以上の様に、既に解法があり数学分野でも歴史のある極小曲面問題に対して、最も簡単に数値解析的な解を得る為の方法と、簡単な付帯条件付きの問題への応用について述べる。本報で示す手法は一般逆行列を用いた最急降下法 (一般化最急降下法) であり、逐次的に曲面面積を減らして行くことにより、安定的かつ直接的に極小曲面形状が得られる大変簡便な手法である。さらに本報では本手法を用いて、付帯条件を適切に設定することで、純粋な極小曲面では得られない形状が得られる例について石鹼膜実験と数値解析例の結果により示す。

2 理論

2.1 一般化最急降下法

n個の変数を持つ関数

$$S = f(q_1, \dots, q_n) \quad (1)$$

を最小化することを考える。S の最小値を与える変数 (q_1, \dots, q_n) を最急降下法により求めるには各変数の変化 Δq_i を、その時点の勾配 (gradient) に比例させて、

$$\Delta q_i = -\frac{\partial f}{\partial q_i} \cdot \alpha \quad (2)$$

として逐次更新する。 α は適当な増分値である。これが通常最急降下法である。この方法をもう少し一般化して解釈すると、S の増分 ΔS を

$$\Delta S = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \vdots \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta S = \mathbf{A} \Delta \mathbf{q} \quad (4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial q_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

のように線形化し、これを Moore-Penrose 型一般逆行列

列 $\mathbf{A}^+ = \frac{1}{\|\mathbf{A}\|^2} \mathbf{A}^T$ を用いて特解を採用したもの、

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{A}^+ \Delta S = \frac{1}{\|\mathbf{A}\|^2} \mathbf{A}^T \Delta S \quad (6)$$

と考えることができる。Moore-Penrose 型一般逆行列による特解はノルム最小解を与えるので、もっとも短距離で指定の増分値を達成するという意味で最急降下方向に一致している。この考え方では、 ΔS に希望の

増分値 ΔS を指定すれば、(2)式の α は、 $\frac{\Delta S}{\|\mathbf{A}\|^2}$ とし

て計算できることになる。

極小曲面問題は変分問題として汎関数の停留条件を元にして取り扱われる場合が多いが、本報では停留条

件そのものは用いずに直接的数値解法を採用する。

内挿関数 ϕ_1, \dots, ϕ_n を用いて曲面形状を次式で近似する。

$$\mathbf{r} = q_1 \phi_1 + \dots + q_n \phi_n \quad (7)$$

曲面の面積 S は

$$S = \iint \sqrt{EG - F^2} d\alpha_1 d\alpha_2 \quad (8)$$

を積分することで得られる。曲面近似に関しては変分法や重み付き残差法等による様々な近似法も可能であるし、 ΔS を適宜いくつかの領域に分けて評価することも可能である。ここに、 α_1, α_2 は曲面形状を表す二つのパラメータ、 E, F, G は曲面の第一計量である。

α_1, α_2 と (7) 式の ϕ_1, \dots, ϕ_n の関係は内挿の仕方によって適宜与えられる。従って (5) 式の \mathbf{A} を予め定式化すれば、(6) 式において ΔS として適当な負の増分を指示することで、与えられた初期形状より逐次面積のより小さい形状を求めていくことができる。 S に極小値(停留解)が存在すれば、その解の近くで、 $\mathbf{A} \approx \mathbf{0}$ 、即ち $\|\mathbf{A}^2\| \approx 0$ となるので、そこで計算を終了する。

2.2 付帯条件付きの極小曲面

以上が、関数 S の極小値を求める方法であるが、ここへ、ケーブル長などの付帯条件を導入することを考える。この様な付帯条件が m 個あるとして、これを次式で表す。

$$g_i(q_1, \dots, q_n) = 0 \quad (i = 1, \dots, m) \quad (9)$$

増分形式に書き直して、(3) 式と連立すると、

$$\begin{bmatrix} \Delta S \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial S}{\partial q_n} \\ \frac{\partial g_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial q_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \vdots \\ \Delta q_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる。これをまとめて、

$$\Delta S = \mathbf{A} \Delta \mathbf{q} \quad (11)$$

と書くと、ムーア・ペンローズ型一般逆行列 \mathbf{A}^+ を用いて、

$$\Delta \mathbf{q} = \mathbf{A}^+ \Delta S \quad (12)$$

と解くことができる。(11) 式の解の存在条件は次式で表されるので、

$$[\mathbf{I} - \mathbf{A}\mathbf{A}^+] \Delta S = \mathbf{0} \quad (13)$$

が成り立たなくなった時点で極小値に至ったと判断し計算を終了する。ここに、 \mathbf{I} は単位行列である。

2.3 付帯条件反力

極小曲面が形成され、停留解に至ると、付帯条件には反力が発生する。付帯条件 $g_i = 0$ に対する反力を λ_i と

すると、各々の反力 λ_i は

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial q_1} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_1}{\partial q_n} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} \frac{\partial S}{\partial q_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial S}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (14)$$

より計算できる。



写真1、Catenoid Membrane



写真2、Catenoid Membrane with Cables-1

3 石鹸膜実験と数値解析の検証

3.1 石鹸膜実験 1

数値解析に先立ち、簡単な石鹸膜実験を行った。直径 **10cm** の平行な二つのリングを距離 h cm だけ離して、この間に石鹸膜を形成するという典型的なカテナイド問題である。まず $h=6$ cm として、そのまま石鹸膜を形成したものが写真 1 である。さらに、 $h=6$ cm のまま上下のリング間に等間隔に長さ **12cm** の糸を **8** 本張った状態で石鹸膜を形成したものが写真 2 である。

結果を見ると、糸を入れた膜 (写真 2) の形は糸のないカテナイド (写真 1) の形の膜構造とかなり違う事が分る。建築的には写真 2 のような形が好まれる場合も多い。**12cm** の長さの糸 (付帯条件) から反力を得ることで、写真 1 とは大きく異なった形状が得られることが分る。

3.2 数値計算例 1-1

3.1 の極小曲面形状決定問題に対し、2 節で提案した数値解析手法を適用した結果を示す。曲面の近似は三角形要素で行い、石鹸膜実験 1 と同じ境界条件を使って、上と下の二つリングの直径は **10cm**、 $h=6$ cm とする。節点数 **312**、面積分割数 **576** とした。初期形状は円柱状に設定した (図 1、2)。解析の結果は下の図 3、4 のようになった。解析ステップと曲面面積の変化を図 5 に示す。初期面積 **187.95cm²** より、極小値 **174.36 cm²** まで直線的に減少している様子が分る。

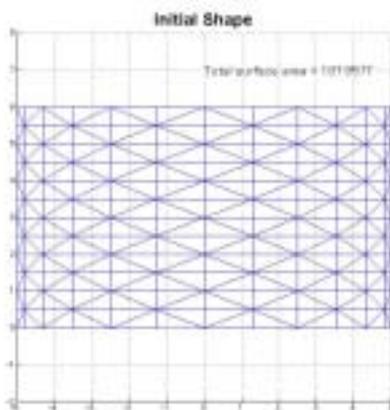


図 1、Initial Shape 1-1-1

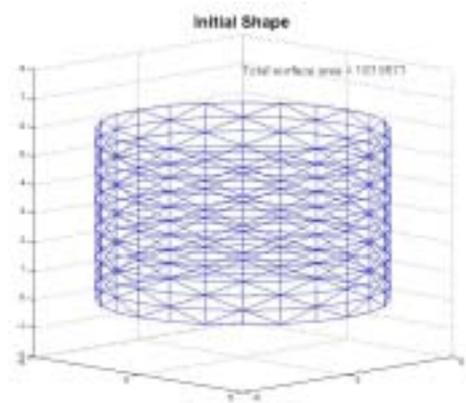


図 2、Initial Shape 1-1-2

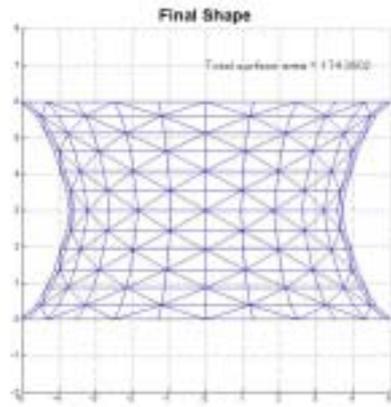


図 3、Final Shape 1-1-1

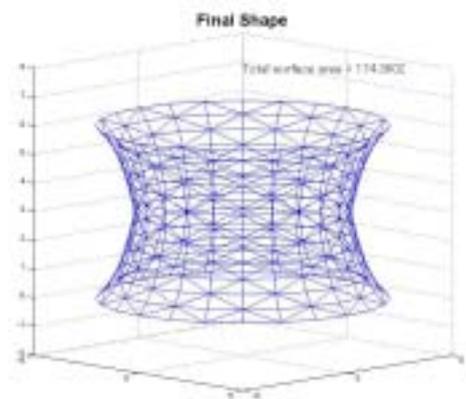


図 4、Final Shape 1-1-2

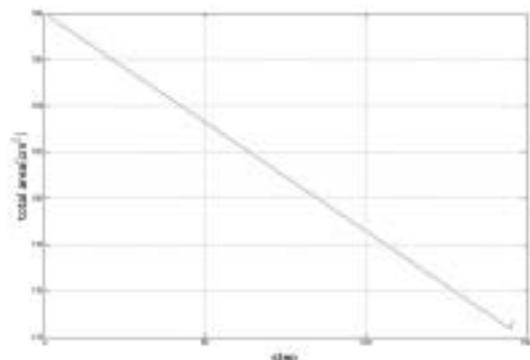


図 5、Change of Total Area 1-1

3.3 数値計算例 1-2

3.1と同じ条件で、リングに設定した頂点を固定点とし、上と下のペアの固定点間を結ぶ8本のケーブル(長さ12cm)を付帯条件として与え数値計算を行った。

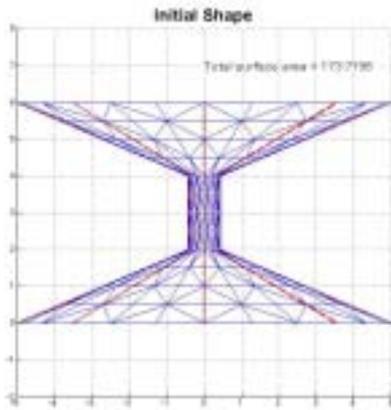


図6、Initial Shape 1-2-1

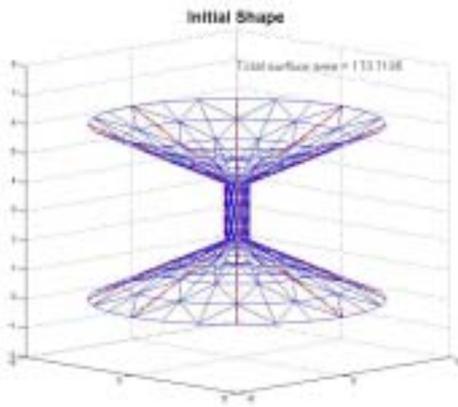


図7、Initial Shape 1-2-2

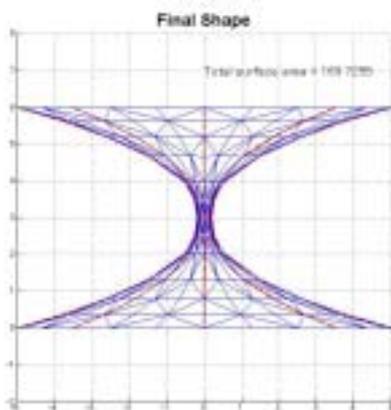


図8、Final Shape 1-2-1

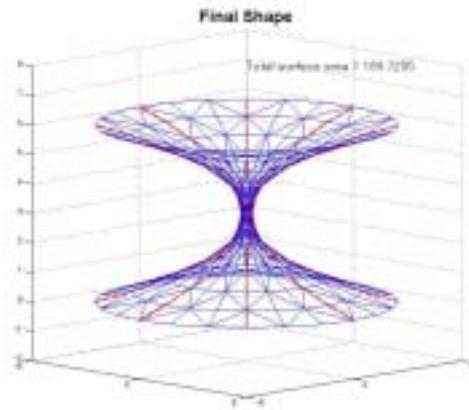


図9、Final Shape 1-2-2

初期形状を図6、7、最終形状を図8、9に示す。最終形状は3.1の実験結果とほぼ同じになることが分る。

解析ステップと曲面面積の変化を図10に示す、初期値173.72cm²から極小値169.73cm²まで減少している。極小値における付帯条件反力を表1に示す。これは膜の単位長さ当りの張力を1とした時の比を示している。

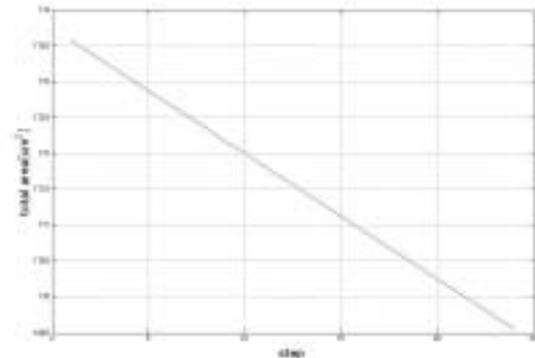


図10、Change of Total Area 1-2

表1、Length and λ of Cables-1

Cable	Initial Length	Final Length	λ
1	12	12.00421644	1.735957
2	12	12.00420487	1.742522
3	12	12.00421644	1.735957
4	12	12.00420487	1.742522
5	12	12.00421644	1.735957
6	12	12.00420487	1.742522
7	12	12.00421644	1.735957
8	12	12.00420487	1.742522
Total	96	96.03368522	

unit of length : cm

3.4 石鹸膜実験 2

カテナイドの形の極小曲面は既往の研究によると、リングの距離と直径の比が**0.65**を超えると存在しなくなることが分かっている。この事実を検証するため、リングの距離と直径の比を**1**を目標とする石鹸膜実験を行った。直径**10cm**のカテナイド石鹸膜のリング間距離を **$h=6\text{cm}$** より徐々に離していくと、 **$h=6.5\text{cm}$** を越えた時、石鹸膜は各リングに円盤のように二枚に別れた。以降は **$h=10\text{cm}$** を越えても変化はない。(写真3)



写真3、Catenoid Membrane Split into Two Plates

この問題では **$h=6.5\text{cm}$** を越えた場合、純粋な極小曲面は**2枚の円盤形状以外**に存在しない。しかし、付帯条件の導入によりこれ以外の極小曲面を実現することができる。同じ直径**10cm**の二つリングの間の距離を**10cm**として、上下のリングにペアの固定点を設定して長さ**12cm**の**8本**の糸で互いに結んで実験を行った。結果を写真4に示す。



写真4、Catenoid Membrane with Cables-2

3.5 数値計算例 2-1

石鹸膜実験 2 の糸のない場合に相当する数値解析を行った。この場合は実験でも見たように膜が**2枚に別れる状態が唯一の安定な解**である。しかし、図11、12に示すような円柱形の初期状態から出発すると、数値計算上は要素間の連続性がある為、図13、14の様な形状に至って終了する。

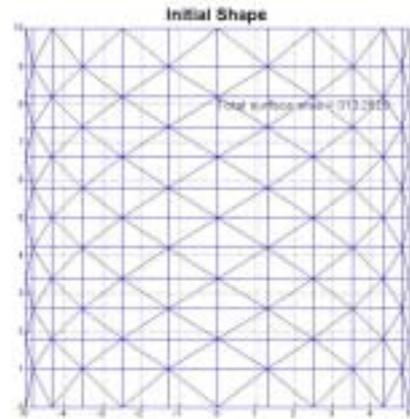


図11、Initial Shape 2-1-1

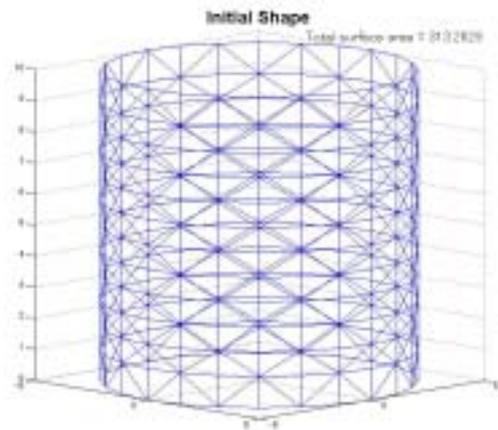


図12、Initial Shape 2-1-2

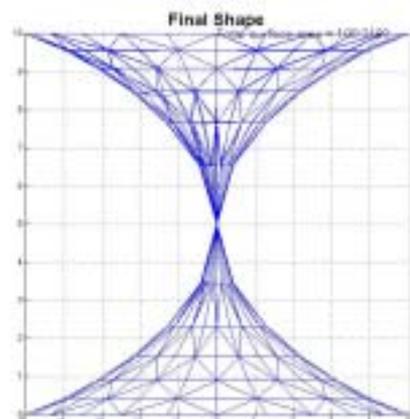


図13、Final Shape 2-1-1

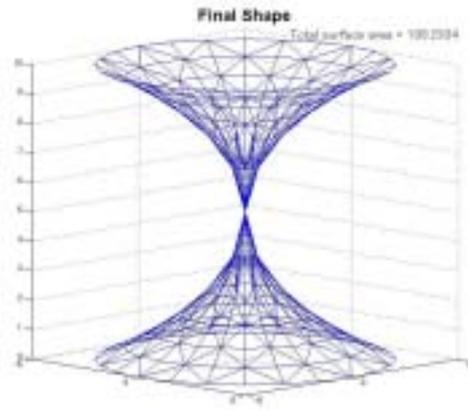


図14、Final Shape 2-1-2

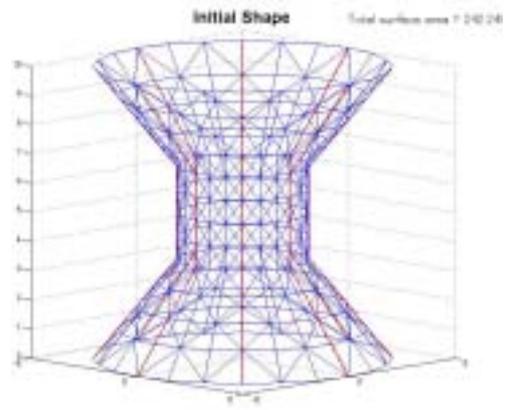


図17、Initial Shape 2-2-2

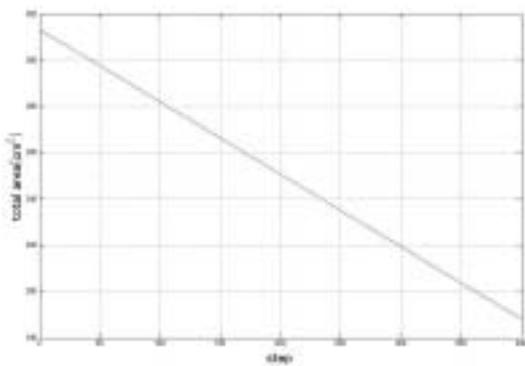


図15、Change of Total Area 2-1

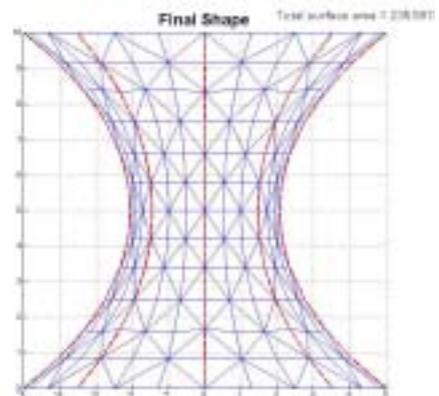


図18、Final Shape 2-2-1

3.6 数値計算例2-2

石鹼膜実験 2 で、糸の付帯条件がある場合についても数値解析を行った。付帯条件とするケーブル（長さ12cm）8本を導入し、リング間距離は10cmとした。

図16、17に示す初期形状から数値解析を行った。結果を図18、19に示す。最終形状は石鹼膜実験の結果（写真4）とよく似ている。解析ステップと曲面面積の関係を図20に示す。面積は初期の242.25cm²から235.60cm²に直線的に減少している。

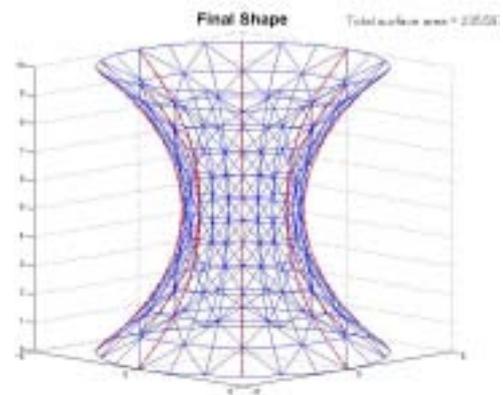


図19、Final Shape 2-2-2

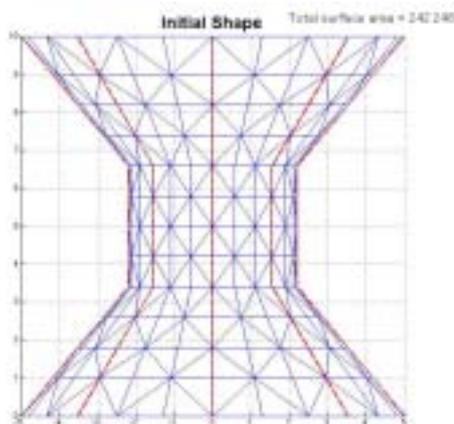


図16、Initial Shape 2-2-1

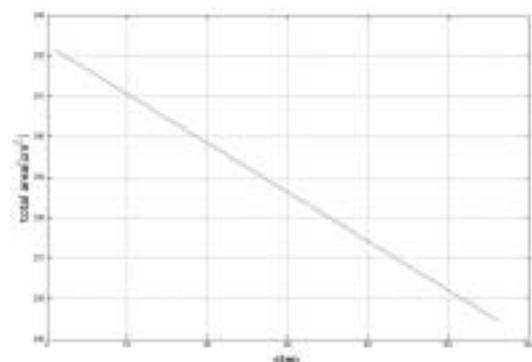


図20、Change of Total Area 2-2

表2、Length and λ of Cables-2

Cable	Initial Length	Final Length	
1	12	12.0065205	4.06909
2	12	12.0067365	4.06593
3	12	12.0065205	4.06909
4	12	12.0067365	4.06593
5	12	12.0065205	4.06909
6	12	12.0067365	4.06593
7	12	12.0065205	4.06909
8	12	12.0067365	4.06593
Total	96	96.05302783	

unit of length : cm

最終状態における付帯条件反力の値を表 2 に示す。
表 1 の値に比べ大きい値となっていることが分る。

4 まとめ

一般逆行列を用いたノルム最小解を用いる一般化最急降下法によって簡便かつ安定的に極小曲面を求めることができることが分った。また、付帯条件を導入することで、元来解の存在しない領域の解を得ることができることが分り、本手法はこれらの数値解を求めることにも有効であることが分った。

参考文献

[1] H.-J.Schek. The force density method for form finding and computation of general networks. Computer methods in applied mechanics and engineering 1974; 3:115-134.

[2] Peter Singer, Dieter Strobel, Rosemarie Wagner. Some remarks on determination of tensioned structures. ECCOMAS 2004.

[3] M.R.Barnes. Application of dynamic relaxation to the design and analysis of cable, membrane and pneumatic structures. International Conference on Space Structures, Guildford, 1975.

[4] M.R.Barnes. Form finding and analysis of prestressed nets and membranes. Computers & Structures 1988; 30: 685-695.

[5] Kawaguchi Ken' Ichi, (Unpublish)
"Application of Generalized Inverse Matrix",
University of Tokyo, Tokyo.

構造最適化法を用いた建築構造創生支援ソフトウェアの開発

田村 尚士¹⁾, 伊藤 智幸²⁾, 大森 博司³⁾

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

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

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

1 序

建築構造物はその多くが工場で製作された規格品, つまり離散的な値をとる部材によって構成されている。数学的に離散変数を扱うことは非常に困難であり, 設計変数が増えれば計算負荷は爆発的に増加する。しかし, 構造設計者は限られた時間内で可能な限り多くの要求条件を満足した「設計解」を見出さなければならない。経済設計の強い要請がある一方で性能設計への移行あるいは環境への配慮などの社会的要求から, 構造設計者の負担は増える一方である。

本研究は, 材料特性, 荷重条件および構造物の全体的な形状を構造設計者が入力すれば目的の構造物に対して設計者の要求を満足する優良解を自動的に求めることのできる, 実務レベルで使い易い構造創生支援ソフトウェアの開発を目標としたものである。

2 構造創生支援ソフトウェア

本研究で開発する建築構造創生支援ソフトウェアの流れを図 1 に示す。本ソフトウェアは, 目的とする構造物の設計条件やGAパラメータの入力を扱うユーザインターフェース部分, 応力解析, 断面算定および二次設計を扱う構造解析部分および部材断面情報の進化操作を扱うGA部分の3つの構成となっている。

各世代において部材断面情報からJIS規格で定められた鋼材単価を用いてコストの算出を行い, 得られた設計解の評価を行う。それぞれの評価値によって次世代に生成する設計解に影響を与え, 設定した世代まで計算を行う。計算終了時に最も優良な設計解のコスト, 重量, 部材断面情報および構造解析結果を出力し, 確認を行うことができる。またデータの入力を行うユーザインターフェース部分は, 既存の市販構造計算ソフトとの互換性を持っており, データの入出力による省力化や解析性能が保障されたソフトでの性能確認を行うことができるように設計されている。

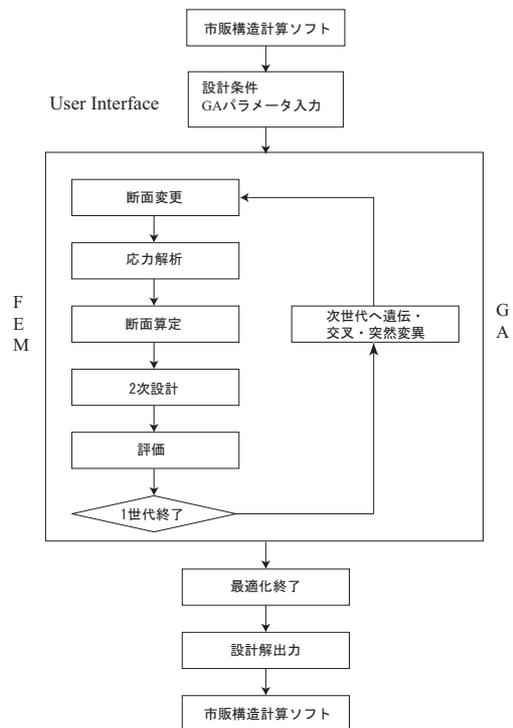


図1 構造創生支援ソフトウェアの流れ

3 解析手法

本報では, コスト最小化を目的とする単一目的最適化とコスト最小化・耐力最大化を目的とする多目的最適化を行う。そのため, それぞれの最適化を行う手法および定式化を以下に示す。

3.1 最適化法

3.1.1 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm, GA)とは Hollandにより考案され, 生物の進化の法則を模倣した人工モデルで, 非線形性を有する問題や, 組合せ爆発を起こすような問題に対し有用とされる手法である。この遺伝的アルゴリズムは遺伝・交叉・突然変異を繰り返す事で, 大域最適解の探索と短時間でより良い解を求める事の二つのバランスをうまくとることが可能であるという特徴を持ち, GAを用いた構造最適化問題に関する研究も多く存在する¹⁾。

3.1.2 定式化

本報では最適化問題を構造物のコスト最小化問題として式 (1) で与える。

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \text{fitness} = \frac{1}{C} \prod_i \gamma_i \\ & \text{subject to} \quad g_i \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

- fitness : 個体の適合度関数
- g_i : i 番目の制約条件
- C : 構造物の総材料コスト
- γ_i : 制約条件 i に対するペナルティ関数

構造物の総材料コストである C は、式 (2) で求められる。

$$C = \sum_i \rho_i l_i a_i c_i \quad (2)$$

- i : 部材番号
- ρ_i : 部材の単位体積重量
- l_i : 部材長
- a_i : 断面積
- c_i : 単位重量あたりの鋼材単価

なお、制約条件として用いる条件を表 1 に示す。

表 1 制約条件	
応力	許容応力度以下
層間変形角	1/200 以下
剛性率	6/10 以上
偏心率	15/100 以下
たわみ	1/250 以下

さらに本報では、鋼構造物の最適設計において、実務的な構造設計での利用を考慮し、図 2 に示すような仕口・継手の設計を考慮した制約条件を設ける。

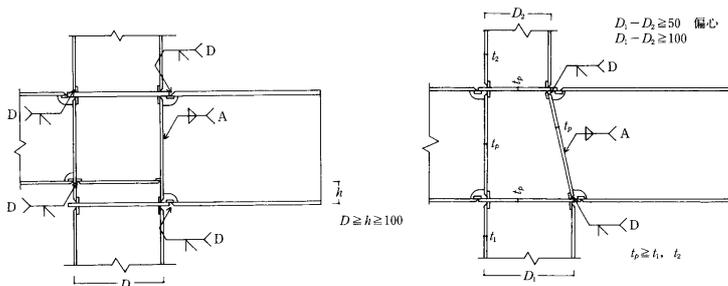


図2 仕口・継手の設計方法

本研究で行ってきた骨組の最適設計に関する研究²⁾では、上層の柱よりも下層の柱の断面の径が小さくなり、上層と下層の柱の径の差が大きいという計算結果が得られており、仕口・継手の設計や施工性を考慮するために、式 (3) に示すような接合部に関する制約条件を設定する。

$$D_L - D_U \leq 50(\text{mm}) \quad (3)$$

D_L : i 層における下層柱の外径

D_U : i 層における上層柱の外径

3.2 多目的最適化法

3.2.1 多目的遺伝的アルゴリズム

多目的最適化とは、複数の評価基準を同時に考慮しながら最適解を探索する問題のことであり、「ある評価値を改善するためには、少なくとも他の1つの評価値を改悪せざるを得ないような解」の集合であるパレート最適解を求めることを目的とする。多目的最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズムは現在最も主要な手法である。多目的遺伝的アルゴリズムとは、遺伝的アルゴリズムを用いて、パレート最適性、すなわち解の優越関係に基づいて選択演算を行い、近似パレート最適解を求める発見的解法である。多目的遺伝的アルゴリズムによれば、1度の探索で多数の解が得られるため、複数の条件を同時に考慮する必要がある建築設計のプロセスに都合が良く、設計者は多数の設計解の存在を確認できる。なお本報では多目的遺伝的アルゴリズムには、Zitzlerら³⁾によるPareto最適解集合の探索性能が特に優れているSPEA2(Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2)を採用している。

3.2.2 定式化

多目的最適設計を行う上で、コスト最小化と耐力最大化を目的とし、次式に適合度関数を示す。ここで、最大層間変形角を耐力の評価値とする。制約条件は前述と同様である。

$$\text{minimize} \quad \text{fitness}_{\text{Cost}} = \frac{C}{\prod_i \gamma_i} \quad (4)$$

$$\text{minimize} \quad \text{fitness}_{\text{Drift}} = \frac{\max(\theta_i)}{\prod_i \gamma_i} \quad (5)$$

$\text{fitness}_{\text{cost}}$: コストに関する適合度関数

$\text{fitness}_{\text{drift}}$: 層間変形角に関する適合度関数

θ_i : 構造物の各方向、各層の層間変形角

4 鋼構造物の最適設計

4.1 計算対象

計算対象とする構造物は図3に示す1×3スパン，3層の鉄骨造ラーメン構造の事務所ビルである。

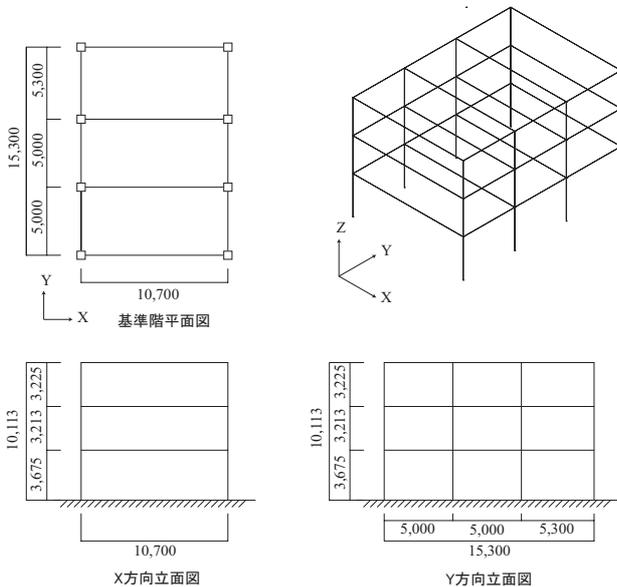


図3 計算対象

長期荷重時と短期荷重時の計算を行い，短期荷重には地震力を想定し，X方向，Y方向に対し各層の重心に地震力を作用させる。

使用可能部材は，柱はJIS規格より抽出した表3に示す角形鋼管18種の中から選択するものとし，梁は表4に示すH形鋼20種から部材を選択する。また構造物の部材グループ化方法は，各部材に対する床負担面積より，一層毎に柱を2種，X方向梁を2種，Y方向梁を1種とし，構造物全体で15種類のグループ化を行った。また表2に示すGAパラメータを用いてコスト最小化問題を解いている。コストの算出方法は市場実態調査に基づく「建設物価」より該当する鋼材の材料単価を用いており，純粋な材料コストのみに着目するものとし，大きな要因となり得る人件費，施工費あるいは基礎部の費用はひとまず考慮外とする。

鋼構造計算	ルート2
アルゴリズム	遺伝的アルゴリズム
設計変数	15
個体数	50
世代数	500
交叉率	0.8
突然変異率	0.1

表3 角形鋼管選択部材リスト

シリーズ	No	H	B	t	r	A(m ²)
200 × 200	102	200	200	6	12	45.63
	103	200	200	8	16	59.79
	104	200	200	9	18	66.67
	105	200	200	12	24	86.53
250 × 250	106	250	250	6	12	57.63
	107	250	250	9	18	84.67
	108	250	250	12	24	110.53
	109	250	250	16	32	143.16
300 × 300	110	300	300	6	12	69.63
	111	300	300	9	18	102.67
	112	300	300	12	24	134.53
	113	300	300	16	32	175.16
350 × 350	114	300	300	19	64	195.78
	115	350	350	9	18	120.67
	116	350	350	12	24	158.53
	117	350	350	16	32	207.16
	118	350	350	19	64	233.78
	119	350	350	22	77	263.71

表4 H型鋼選択部材リスト

シリーズ	No	H	B	t ₁	t ₂	r	A(cm ²)
200 × 100	4	198	99	4.5	7	11	23.17
	5	200	100	5.5	8	11	27.15
250 × 125	6	248	124	5	8	12	32.67
	7	250	125	6	9	12	37.65
300 × 150	8	298	149	5.5	8	13	40.8
	9	300	150	6.5	9	13	46.78
350 × 175	10	346	174	6	9	14	52.68
	11	350	175	7	11	14	63.14
400 × 200	13	396	199	7	11	16	72.15
	14	400	200	8	13	16	84.11
450 × 200	16	446	199	8	12	18	84.3
	17	450	200	9	14	18	96.76
	18	456	201	10	17	18	101.27
500 × 200	19	496	199	9	14	20	101.27
	20	500	200	10	16	20	114.23
	21	506	201	11	19	20	131.29
600 × 200	22	596	199	10	15	22	120.45
	23	600	200	11	17	22	134.41
	24	606	201	12	20	22	152.47
	25	612	202	13	23	22	170.65

4.2 計算結果

最適化計算で得られた結果を表5および図4，5に示す。図5は各層の部材配置と断面形状の鋼材番号を表

表5 解析結果

Cost(yen)	Weight(ton)	Fitness
149.09×10 ⁴	15.8	0.067074

しており，その鋼材番号は表3，4に対応する。また図4は使用部材の外形を模式的に表現している。

得られた設計解は，1層，3層においては中柱に断面の大きい角形鋼管を配置することで外力に抵抗し，2層においては外柱に断面の大きい角形鋼管が配置されている。梁に関しては，スパン長の大きなX方向に大断面の梁が配置されている。地震力は上層になるにつれ，小さくなり，できるだけコストを減少させるために，上層では応力に対応した比較的小さい断面形状が選択されている。

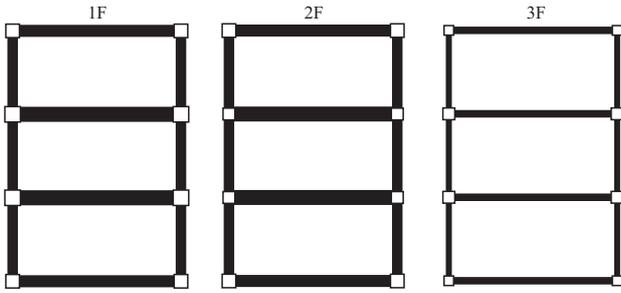


図4 設計解の断面形状

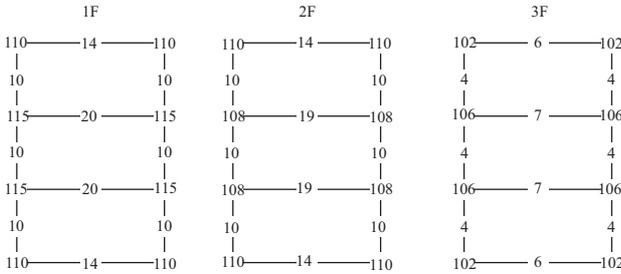


図5 設計解の断面形状(部材番号)

表6 設計解の層間変形角

X方向		Y方向	
1F	1/288	1F	1/286
2F	1/224	2F	1/224
3F	1/237	3F	1/263

表6は得られた設計解の両方向の層間変形角を示し、制限値である1/200を満足しており、他の制約条件に関しても全て制限値を満足している。

図6,7はそれぞれ最適化計算における適合度の推移とコストの推移を示している。初期世代では、制約条件を満足するために、断面の大きな部材を選択し、コストが増大しているという推移となっている。コストがピークに達したあとは、制約条件を満足するような断面の小さい部材の選択や配置により、コストが減少し、約120世代で最も適合度の高い設計解を得ることができている。なお、この最適化計算の計算時間はおよそ20分程度であった。

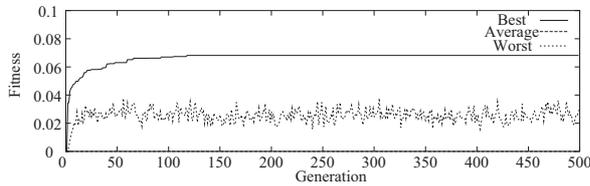


図6 適合度の推移

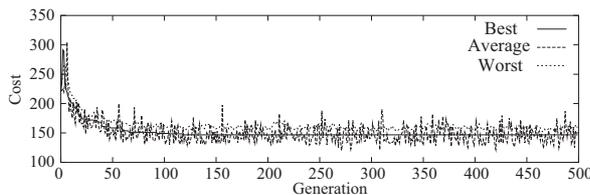


図7 コストの推移

4.3 コストと構造性能の関係性

最適化計算によって得られた設計解は、コスト最小解であり、その変形性能は比較的制限値に近い値であった。コストを減少させようとするれば、変形が大きくなり、コストと耐力には相関関係があると考えられる。建築設計のプロセスにおいて、建設コストと耐力の関係は非常に重要な関係であり、経験や試行錯誤によって、様々な要素を考慮した上で設計案が決定される。

最適化計算中に得られた設計解を保存したデータを用いて建築設計のプロセスで重要な関係となるコストと耐力の関係を考察する。ここで、最大相間変形角を耐力の評価値とする。

図8は各設計解のコストと最大相間変形角をプロットしたものであり、制約条件を全て満足している約2000個の設計解である。

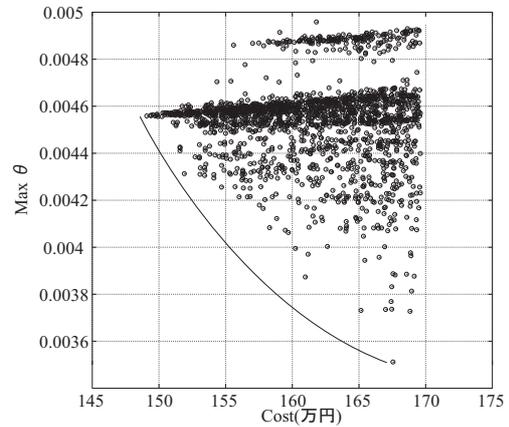


図8 コストと最大層間変形角の関係

図8より、各設計解のコストが同値であっても、最大層間変形角は幅広く分布しており、逆に最大層間変形角が同値であっても、コストは幅広く分布している。

多種多様に存在する設計解から、同じコストであれば高い性能を、または同じ性能であれば低いコストをもつ設計解を選択することは建築物の価値を高め、建築設計のプロセスでは重要であると考えられる。しかし、図8の細線で示すようにコストを減少させるためには、層間変形角を増大せざるをえず、コストと層間変形角の関係は、トレードオフであり、パレート曲線を形成することがわかる。

従来の最適設計では、一つの目的関数の最適化を行っていたが、建築設計の構成要素は多種多様であるため、複数の目的関数を扱う多目的最適設計による設計支援システムの確立が重要であると考えられる。

5 鋼構造物の多目的最適設計

前節で示したように、コストと層間変形角にはトレードオフの関係があり、多目的最適化を行うことでそのパレート曲線を得ることができる。本節は、コストと層間変形角の二つの目的関数の最小化問題を扱い、多目的最適設計によって得られる設計解やパレート曲線の考察を行う。

5.1 計算対象

対象とする構造物は第4節における図3であり、計算条件は同様のもとする。多目的最適化法として、SPEA2を用い、表7に示すパラメータを設定して、多目的最適化を行う。

表7 SPEA2パラメータ

鋼構造計算	ルート2
アルゴリズム	SPEA2
設計変数	15
探索母集団数	100
アーカイブ母集団数	100
世代数	500
交叉率	0.8
突然変異率	0.1

5.2 計算結果

表8は、計算終了世代におけるアーカイブ母集団のコストに関する結果を示し、表9は最大層間変形角に関する結果を示している。

表8 解析結果(コスト)

$MAX_{Cost}(\text{yen})$	$AVERAGE_{Cost}(\text{yen})$	$MIN_{Cost}(\text{yen})$
319.876×10^4	226.1895×10^4	154.439×10^4

表9 解析結果(最大層間変形角)

MAX_{Drift}	$AVERAGE_{Drift}$	MIN_{Drift}
0.004795	0.002198	0.001501

コストに関して、最小値と最大値の差は約150万円であり、幅広く設計解を得ることができ、最小値については前節のコスト最小解に近い値となっている。最大層間変形角に関して、最大値は制限値の0.005(1/200)に近い値となり、最小値は制限値の1/3以下の変形性能の1/666に抑えることができている。

またSPEA2による各世代のアーカイブ母集団を図9~14に示す。初期世代では、パレート解は目的関数空間上にそれほど存在せず、アーカイブ母集団には劣解が含まれている。世代が進むにつれ、進化計算によりパレート解が増えていき、各目的関数値の最小化が行われ、パレート解集合を得ることができている。

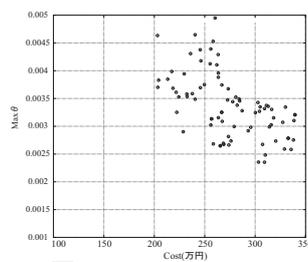


図9 Generation 10

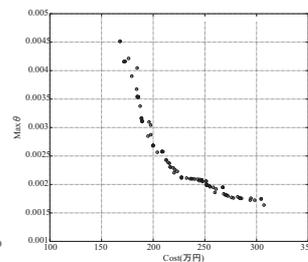


図10 Generation 50

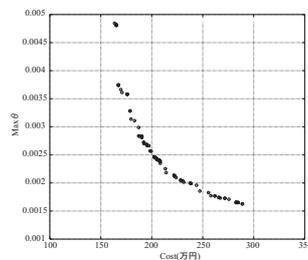


図11 Generation 100

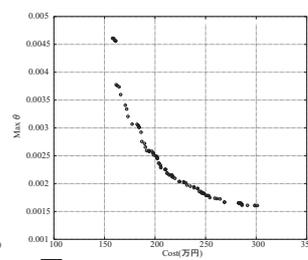


図12 Generation 200

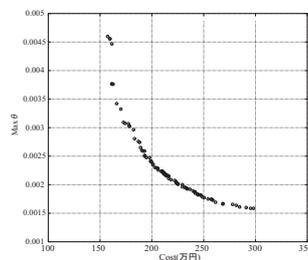


図13 Generation 300

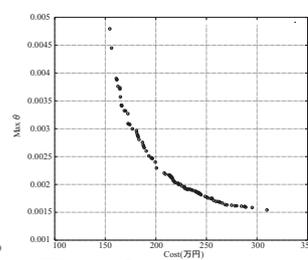


図14 Generation 500

図15, 16および表10はコスト最小解の断面形状および変形性能であり、図17, 18および表11は層間変形角最小解の断面形状および変形性能である。

コスト最小解は、1層, 2層において外形350mmの角形鋼管を外柱に配置され、外形300mmの角形鋼管を中柱に配置されており、3層においては、下層とは異なり、断面の大きな角形鋼管を中柱に配置され、この構造システムによって、コストを減少させ、外力に抵抗する設計解となっている。

層間変形角最小解は、各平面ごとに同形の角形鋼管が配置され、各柱が均一に応力を負担し、外力に抵抗する構造システムとなり、層間変形角や他の構造性能の安全率の高い設計解となっている。

多目的最適設計によって得ることができたパレート解集合には、コスト最小解や層間変形角最小解以外にも多種多様な平面配置、立面配置および構造性能をもつ設計解の存在を確認しており、設計者はそれらのパレート解集合から意思決定を行い、任意に設計解を選択することになる。多目的最適設計によって、設計者は一度に多くの情報を得ることができると考えられる。

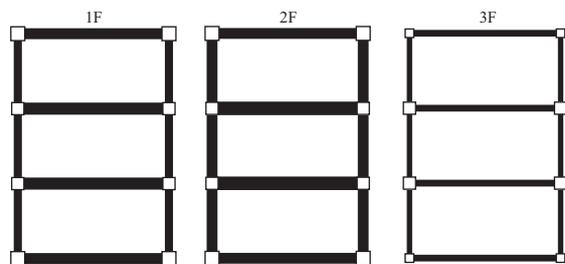


図15 コスト最小解の断面形状

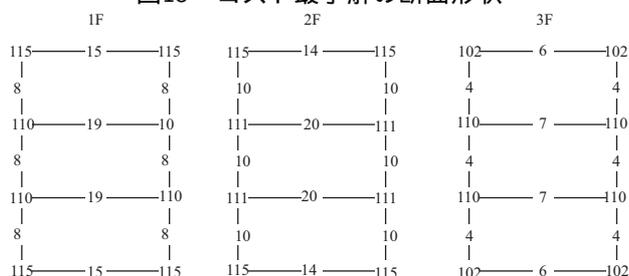


図16 コスト最小解の断面形状(部材番号)

表 10 コスト最小解のデータ

Cost(yen)		154.439×10 ⁴	
X方向	1F	1/277	1F 1/232
	2F	1/261	Y方向 2F 1/212
	3F	1/269	3F 1/277

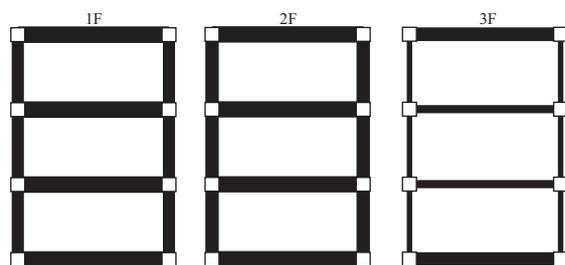


図17 層間変形角最小解の断面形状

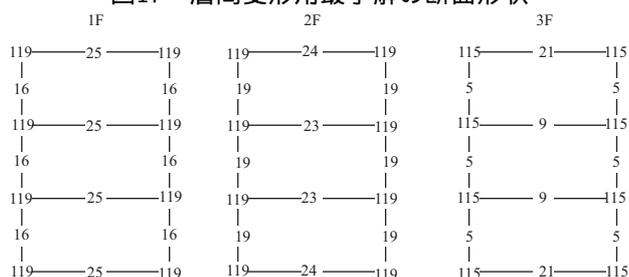


図18 層間変形角最小解の断面形状(部材番号)

表 11 層間変形角最小解のデータ

Cost(yen)		319.876×10 ⁴	
X方向	1F	1/737	1F 1/738
	2F	1/671	Y方向 2F 1/671
	3F	1/868	3F 1/868

6 結

本報では、実務レベルで使い易い鋼構造物の建築構造創生支援ソフトウェアを提案し、それを用いて、コスト最小化を目的とする最適設計およびコスト最小化、耐力最大化を目的とする多目的最適設計を行い、得られた設計解およびパレート解集合の考察を行った。コストと耐力には、トレードオフの関係があり、多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的な手法によって、パレート解集合を得ることができた。

得られたパレート解集合には、幅広く多種多様な設計解が存在しており、構造設計のプロセスにおいても、多目的最適設計を用いることで、設計者は実行可能設計領域の中にどのような設計解が存在するかを把握することが可能であると考えられる。

今後は建築構造創生支援ソフトウェアの汎用性を高め、様々な解析モデルに対して、最適化を行い、ソフトウェアの安定性を高めることが課題である。また、保有水平耐力計算を考慮した鋼構造計算ルート3に対して、最適設計および多目的最適設計を行い、鋼構造物全体に対して適用可能な建築構造創生支援ソフトウェアの開発を課題とする。

謝辞： 本研究を行うにあたり、飯島建築事務所の飯嶋俊比古氏および同事務所諸氏に多くのご協力・ご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大森博司, 鬼頭伸彰: 遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造物の形態創出, 日本建築学会構造系論文集, No.520, pp.85-92, 1999.
- 2) 石山達士, 田村尚士, 大森博司: 遺伝的アルゴリズムによる鋼構造物の最適設計に関する研究(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)構造 I, pp.355-358, 2005.
- 3) E. Zitzler, M. Laumanns, and L. Thiele. SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Gloriastrasse 35, CH-8092 Zurich, May 2001.

異種接合部を有するブレース付き骨組の形状最適化

萩下 敬雄¹⁾, 大崎 純²⁾

1) 京都大学大学院工学研究科, 大学院生, 修士(工学), is.hagishita @archi.kyoto-u.ac.jp

2) 京都大学大学院工学研究科, 助教授, 博士(工学), ohsaki @archi.kyoto-u.ac.jp

1 序論

本論では、部材の接合条件とブレースの種類・配置を設計変数とする最適化を行う。Hayalioglu and Degertekin¹⁾及びKameshki and Saka²⁾は、すべての梁両端の接合条件を同一とし、一様に接合部の回転剛性を変化させて、遺伝的アルゴリズムにより最適化を行った。Xu and Grierson³⁾は、接合条件を設計変数と見なすが、各階の梁両端の接合条件をグループ化し、接合部の回転剛性を階ごとに変化させて、数理計画法により最適化を行った。梁両端に複数の種類の半剛接合を解候補として設定した場合、骨組部材の接合部の回転剛性は、曲げモーメントの大きさに応じて調整することができ、曲げモーメントを分散させることが可能である。したがって、本論では、各梁部材の両端の接合条件を独立な設計変数として設定する。ブレースの最適設計については、Takewakiら⁴⁾のように、適切な地震動を考慮し、ブレースの種類(X型ブレース)を固定し、骨組部材の剛性とブレースの剛性を最適化した研究がある。しかし、ブレースの種類・配置を最適化の対象とした研究は著者らの知る限り存在しない。ブレース付き骨組は、水平層間変位を減少させることができ、純ラーメン架構に比べ、骨組の総重量を小さくすることができるが、ブレースの種類(X型、K型、V型ブレース等)や配置を適切に選択しなければ、ブレース、及びラーメン架構部が有効に機能しない。したがって、本論では、ブレースの種類・配置も設計対象とし、離散設計変数の最適化問題を解く。また、設計問題の規模が大きくなることから、ヒューリスティックスを用いて最適化を行う。

ヒューリスティックスについては、文献1)~3)のように、遺伝的アルゴリズム(GA)が利用されることが多いが、本論では、比較的新しいヒューリスティックスである、スキヤッタサーチ(Scatter Search)、及びリアクティブタブーサーチ(Reactive Tabu Search)という2つの手法を用いる。

また、解析は、軸力変動、残留応力、段階的塑性化、半剛接合を考慮することができる修正塑性ヒンジ(Refined Plastic Hinge)法を用いる^{5,6)}。

2 ヒューリスティックス

構造最適化において一般的に利用されるGAでは、“交叉・突然変異”により、解集合の多様化と局所探索を実現しており、目的関数値を減少させる方向のみでなく、増加させる方向にも遷移させることで、大域的な近似最適解を得ることができる。しかし、GAにおいては、以下のような問題がある⁷⁾。

- 1) 同時に保持する解の数が多いので、多くの計算量を必要とする
- 2) 解が乱数の初期値に依存する。
- 3) 前もって設定するパラメータが多い。

本論では、上記の問題点を改善した手法として、スキヤッタサーチ(SS)および、リアクティブタブーサーチ(RTS)により最適化を行う。これらのヒューリスティックスでは、自動リスタートを行うことができ、パラメータを自動的に調節することが可能である。また、SSについては、明示的に解の多様化を調整することができるという長所がある。

2.1 スキヤッタサーチ(Scatter Search : SS)

SSは、1977年にGloverにより整数計画問題に対するヒューリスティックスとして、提案された手法である。近年利用されているSSは、1998年に提案されたSSテンプレートをもととしている⁸⁾。SSは、ハイブリッドのヒューリスティックスと呼ばれ、レファレンスセット(Reference Set : RefSet)と呼ばれる解集合を用いて、探索空間の多様化と局所探索の強化のトレードオフを有効に利用した手法である。コンピュータビジョンの分野において、SSを最適化に利用した例⁹⁾があるが、構造最適化の分野に適用された研究例は見られない。

SSは、以下の5つの方法からなるが、これらの方法は、問題に応じた実装が必要となる。

① Diversification Generation Method

単純なクラスタリングの考え方を利用し、体系的に多様な解集合P(PSet)を生成する。ここで、生成される解集合の要素数(PSize)は、RefSetの要素数(b)の5倍程

度とする。後述する RTS のリスタートでもこの方法を用いる。

② Improvement Method

①で生成された PSet の各要素の解の評価値を向上させるために、単点探索の貪欲法を用いて局所探索を行う。

③ Reference Set Update Method

①と②により生成される PSet のうち、評価の高い解 b_1 個と多様性のある解 b_2 個を抽出し、RefSet を生成する。RefSet の要素数 $b (=b_1 + b_2)$ は多くとも 20 個程度とする。多様解抽出法については、次節で述べるクラスタリングを用い、各クラスター中心からの距離が最も小さくなる要素を代表解として抽出する。

④ Subset Generation Method

③で生成した RefSet から⑤での解の結合のために、部分集合を作成する。

⑤ Combination Method

④で生成した新しい部分集合について、解を結合し、新たな解を生成する。部分集合(2つの場合)を構成する解 x' と x'' の線形結合により、結合解 x_1, x_3 を生成する方法を式(1)に示す。生成された解は Pool 集合に蓄積される。

$$\begin{aligned}
 x_1 &= x' - d, & x_2 &= x' + d, & x_3 &= x'' + d \\
 d &= r \frac{x'' - x'}{2}, & r &= \text{random}[0,1)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

この方法より生成される結合解集合(Pool 集合)に対し、もとの RefSet を含め、③の方法を適用する。

上記の 5 つの方法を用いた SS テンプレートは、次のようになる(図 1)。

- Step 1. ①Diversification Generation Method により、解 x を生成し、②Improvement Method により改善し、PSet に加える。これを、PSet の個数が PSize になるまで繰り返す。
- Step 2. PSet から評価値の高い解 b_1 個と多様性を確保するための解 b_2 個を抽出し、RefSet を生成する。
- For (Iter=1,..MaxIter←繰り返し回数の上限)**
- Step 3. ③Reference Set Update Method により、評価の高いものから b_1 個、クラスターの代表値 (各クラスター中心から最も近い要素 : 次節参照) b_2 個により RefSet を更新する。
- While (news subset $\neq \phi$ ←新しい部分集合がない)**
- Step 4. ④Subset Generation Method により、RefSet 集合の部分集合を生成する。
- Step 5. ⑤Combination Method により、各部分集合要

- 素の結合解を生成させる。
- Step 6. ②Improvement Method を生成解に適用する。Pool 集合に生成解を加える。
- Step 7. Step 4 に戻る。

End While
If (Iter < MaxIter and 優良解 b_1 個の更新なし) then
 Step 8. RefSet 集合から多様解 b_2 を削除し、①Diversification generation method で新たに多様解 b_2 を生成させ、RefSet に加える。Step3 に戻る
Else Step3 に戻る。
End if
End for

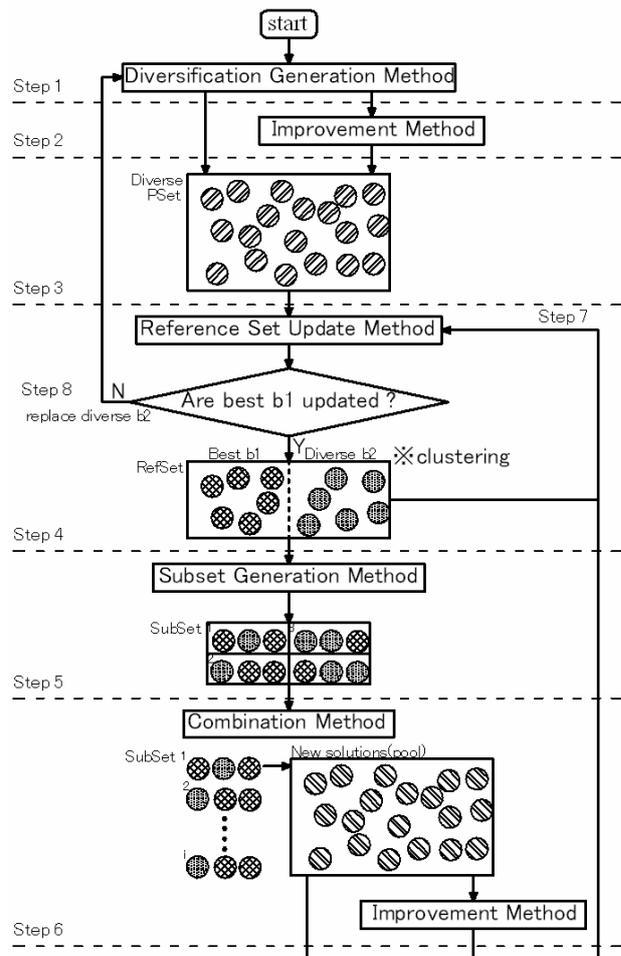


図 1 SS テンプレート

2.2 クラスタリング (clustering)

SS の ③ Reference Set Update Method では、RefSet の多様解を生成する際に、クラスター数(b_2 個 : 多様解の数)を指定してクラスタリングを行い、それぞれのクラスター中心に最も近い要素を代表解として抽出する。以下では、適用したクラスタリング手法の概要を述べる。

クラスタリングはデータマイニング手法¹⁰⁾の一つであり、記述型モデルに分類される。クラスタリングアル

ゴリズムは、分割型(Partition)アルゴリズム、階層型(Hierarchical) アルゴリズムに分類される。本論では、単純な階層型アルゴリズムを適用する。例として、平面上の n 個の点の集合 $S = \{x(1), x(2), x(3), \dots, x(n)\}$ を m 個のクラスターに分類するアルゴリズムを以下に示す。ここで、 $D(C_i, C_j)$ はクラスター C_i の要素と C_j の要素間の、ユークリッド距離の最小値である。

For ($i = 1, \dots, n$, let $C_i = \{x(i)\}$)

While(there is more than m clusters)

- Step 1. Calculate $D(C_i, C_j)$ for all possible pairs.
- Step 2. Choose minimum $D(C_k, C_l)$, and let $C_k = C_k \cup C_l$.
- Step 3. Remove cluster C_l .

End While

End For

上記のアルゴリズムを 9 個の 2 次元データに適用した例を図 2 に示す。

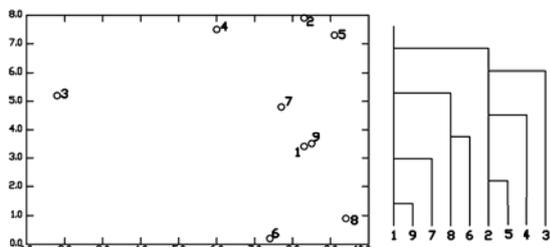


図 2 クラスタリングの適用例

昇順の単一リストからなる設計変数に対しては上記の手法をそのまま適用できるが、4 節で述べるブレースの候補リストのように、X、K、V ブレースの複合リストとなる場合は、候補解間の距離が解の相違度を適切に表さない。よって、骨組断面の設計変数に関するクラスタリング、X、K、V ブレースに関するクラスタリングを区別してクラスタリングを行う (図 3)。

2.3 リアクティブタブーサーチ (Reactive Tabu Search)

タブーサーチ(TS)は AI に基づく単点探索のヒューリスティックスであり、Glover により考案された。TS では、調整可能で柔軟なメモリを体系的に利用して、大域最適解を求める。単純なタブーサーチのアルゴリズムは次の通りである¹¹⁾。

- Step 1. 初期解 S を生成する。
- Step 2. 近傍解集合 $N(S)$ を生成する。
- Step 3.1 $N(S)$ 集合のうち、タブーでない解を抽出し、そのなかの最良解を S' とする。 S' が 1 つでも存在すれば、 S' で解を更新し、Step 4 に進む。
- Step 3.2 Step 3.1 で解が更新されない場合、 $N(S)$ 集合のう

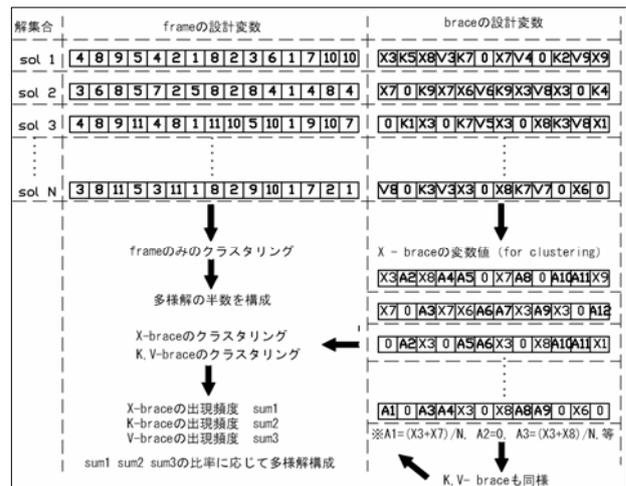


図 3 複合リストに対するクラスタリング

ちタブーとなる解を抽出し、そのなかの最良解を S'' とする。 S'' が希求水準 (現在の最良解よりも優良であることを満たせば、解を更新し、Step 4 に進む)。

Step 3.3 Step 3.1、Step 3.2 において、解が更新されない場合 $N(S)$ 集合の最良解で解を更新し、Step 4 に進む。

Step 4. Step 3 で得られた解をタブーリストに追加する。終了条件(繰り返し回数が上限に達する)を満たさなければ、Step 2 へ戻る。

短期メモリは最近求められた解の集合であり、そのメモリのサイズを小さくすれば局所最適解に早く収束するが、サイズを大きくすると、探索点が定まらず、近似解の評価値を低下させる。一方、長期メモリは、解が繰り返される頻度をカウントし、解の繰り返しが多くなったときに、局所最適解から抜け出す操作 (リスタート) を行うために用いられる。本論では、上記の特性を利用し、短期メモリの長さを得られた解の特性をもとに調整するリアクティブタブーサーチ¹²⁾(RTS)を用いて最適化を行う。RTS では、上記の基本アルゴリズムの Step 2 の前の部分に以下に示す、短期メモリのチェック Step 2.1 を挿入する。

Step 2.1 サイクリング(解の繰り返し)をチェックし、繰り返しが起こった場合は、タブーリストのサイズを増やす。

リストのサイズ変更が少ない場合はリストのサイズを減少させる。解の繰り返し回数が多い場合、リスタートする。

本論では、SS の①の方法を適用し、解の繰り返しの長さ(間隔)に応じた再スタートを実装した。これにより、乱数シードを変えて手動で最適化を何度も行う必要がな

くなり、単点探索ヒューリスティクスと解集合を保持するヒューリスティクスを比較することが可能になる(図4)。

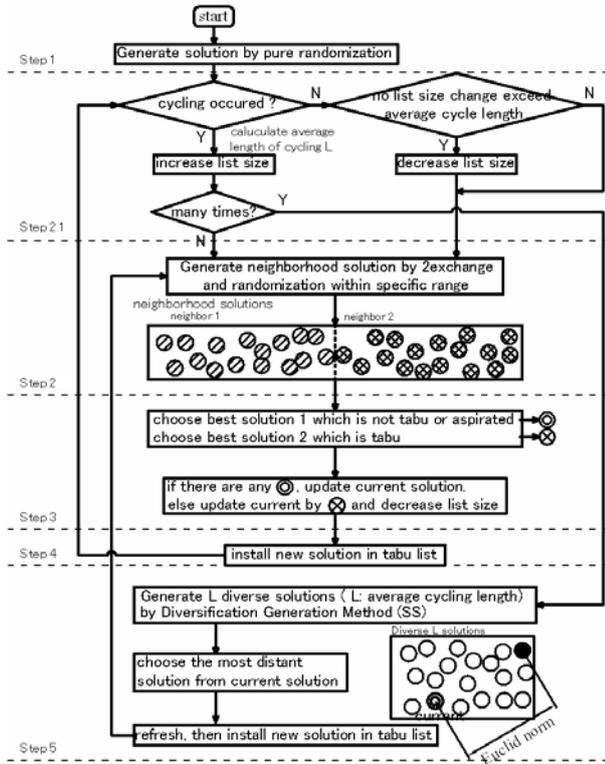


図4 RTSのアルゴリズム

3 修正塑性ヒンジ法 (Refined Plastic Hinge Method)

実設計においては、単純な塑性ヒンジ法や弾性解析を用いて構造設計が行われているが、性能設計の観点からは、直接的に非線形解析を用いて性能を評価することも可能である。Chen⁶⁾は、LRFDと同等の解析結果を得ることができる修正塑性ヒンジ法(Refined Plastic Hinge)を提案した。この手法の概要を以下に述べる。

3.1 部材モデル

修正塑性ヒンジ法は、通常塑性ヒンジ法に、軸力変動の影響、残留応力と段階的塑性化の影響、接合部の非線形性等を考慮できる解析法である。ここでは、局所座標に移動座標を用いるものと仮定し、局所座標系での剛性方程式のみについて述べる。作用力 M_A 、 M_B 、 P (A端とB端の曲げモーメントと軸力) の増分と変位 θ_A 、 θ_B 、 e (A端とB端の回転角と部材の伸び) の増分の関係は、次式で表される。

$$\begin{pmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{pmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{pmatrix} S_1 & S_2 & 0 \\ S_2 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 A は部材断面積、 L は部材長、 I は断面2次モーメント、 E はヤング係数、 S_1 、 S_2 は軸力効果を考慮するための安定関数である。

例えば、A端が塑性化したとき、作用力と変位の関係は以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{pmatrix} = \frac{EI}{L} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & (S_1 - S_2^2/S_1) & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ S_2/S_1 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta M_{pcA} \quad (3)$$

ここで、 ΔM_{pcA} は、軸力変動によるA端の塑性曲げモーメントの変化量である。B端が塑性化した場合、A、B端がともに塑性化した場合についても同様に定式化できる。残留応力の影響については、 E を調整することによって考慮し、軸力の大きさに応じて、下式を用いて剛性 E を E_t に低下させる。 $P < 0.5P_y$ では、 $E_t = E$ とする。

$$E_t = 4 \frac{P}{P_y} E \left(1 - \frac{P}{P_y}\right) \quad \text{for } P > 0.5P_y \quad (4)$$

ここで、 P_y は降伏軸力である。

次に、段階的降伏については、次式で定義される α をA端、B端について算出し、 η をそれぞれについて求める。ただし、 $\alpha = 0.5$ から段階的に塑性化すると仮定し、 $\alpha \leq 0.5$ では、 $\eta = 1.0$ とする。

$$\alpha = \frac{P}{P_y} + \frac{8M}{9M_p} \quad \text{for } \frac{P}{P_y} \geq \frac{2M}{9M_p}$$

$$\alpha = \frac{P}{2P_y} + \frac{M}{M_p} \quad \text{for } \frac{P}{P_y} < \frac{2M}{9M_p} \quad (5)$$

$$\eta = 4\alpha(1-\alpha) \quad \text{for } \alpha > 0.5$$

ここで、 M_p は全塑性モーメントである。

η と E_t を用いて、A端、B端ともに、 α の値が0.5以上となった(塑性化が始まった)場合の剛性方程式は、以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{pmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{pmatrix} \eta_A \{S_1 - S_2^2/S_1(1-\eta_B)\} & \eta_A \eta_B S_2 & 0 \\ \eta_A \eta_B S_2 & \eta_B \{S_1 - S_2^2/S_1(1-\eta_A)\} & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\theta}_A \\ \dot{\theta}_B \\ \dot{e} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで、 η の添字A、BはA、B端での値である。

A、B両端に半剛接合を考慮した場合は、剛性方程式は、以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} \dot{M}_A \\ \dot{M}_B \\ \dot{P} \end{pmatrix} = \frac{E_t I}{L} \begin{pmatrix} S_{ii} & S_{ij} & 0 \\ S_{ji} & S_{jj} & 0 \\ 0 & 0 & A/I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{\theta}_A - \dot{M}_A/R_{kA}) \\ (\dot{\theta}_B - \dot{M}_B/R_{kB}) \\ \dot{e} \end{pmatrix} \quad (7)$$

ここで、 R_{kA} 、 R_{kB} は、それぞれ、A 端、B 端での接合部の回転接線剛性とする。また、 S_{ij} 、 S_{jj} は、式(6)の η と弾性時の安定関数より更新された安定関数とする。

本論では、上記の手法が実装されたプログラム PAAP を利用して解析を行う。

3.2 接合部モデル

等辺山型鋼による4つの接合形式(図5)及び、剛結合に近い接合である T-stub といわれる接合形式の合計5つを設計候補とする。

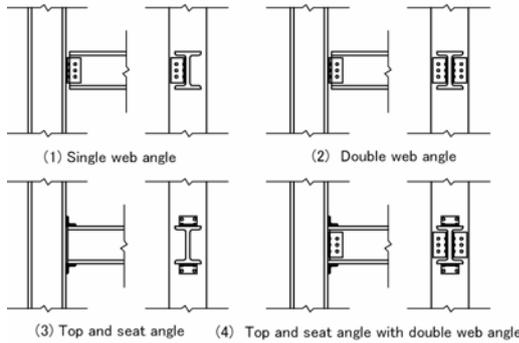


図5 梁-柱の接合形式

接合部の $M-\theta$ 関係はChen⁶⁾により考案された3パラメータの級数モデルを用いる。表1を用いて算出した $M-\theta$ 関係を図6に示す。

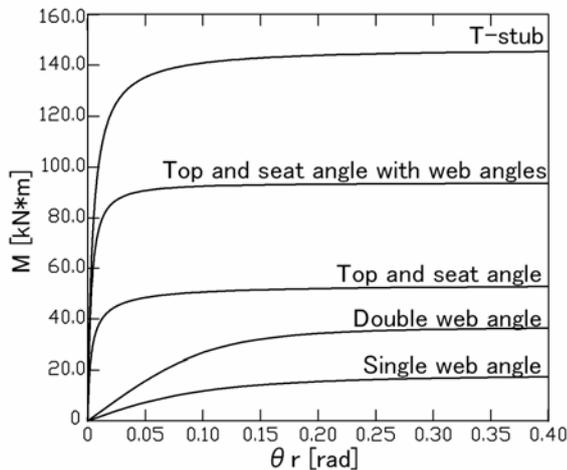


図6 接合部の $M-\theta$ 関係

4 設計問題の設定及び定式化

設計対象は図7に示す4層6スパン平面骨組とし、全層に、75kN/mの等分布鉛直荷重を載荷する。

地震荷重の高さ方向分布は{1.00, 1.15, 1.35, 1.67}とし、ヤング係数 $E=2.0 \times 10^6$ [N/mm²]、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏強度 $F_y=235$ [N/mm²]とする。部材断面リストを表2に示す。

層間変形角に関する制約(1/200)および、終局耐力 P_u に関する制約は、次式のように設定する。

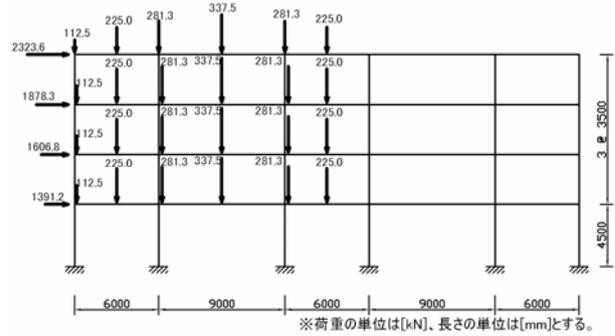


図7 4層6スパン骨組

表1 接合部の3つのパラメータ

種別	M_U [kNm]	R_{θ} [kN・m/rad]	N
1 Single-web angle	18.39	164.08	1.8
2 Double-web angle	36.78	328.16	2.7
3 Top and Seat angle	53.95	23409.36	0.8
4 Top and Seat angle with web angle	93.91	26786.79	1.2
5 T-Stub	170.00	58600.00	2.0

表2 部材断面

骨組断面 (中幅系H鋼)		X-brace 断面 (溝型鋼)		K,V-brace 断面 (等辺山形鋼)	
1	150×100	1	75×40	1	65×65
2	200×150	2	100×50	2	75×75
3	250×175	3	125×65	3	90×90
4	300×200	4	150×75	4	100×100
5	350×250	5	180×75	5	120×120
6	400×300	6	200×80	6	130×130
7	450×300	7	200×90	7	150×150
8	500×300	8	250×90	8	175×175
9	600×300	9	300×90	9	200×200
10	700×300	10	380×100	10	250×250
11	800×300				
12	900×300				

$$f_i = \frac{d_i}{d_{a,max}} - 1.0 \leq 0.0 \quad (i=1,4) \quad (8)$$

$$g = \frac{P_0}{P_u} - 1.0 \leq 0.0$$

ここで、 d_i は層間変位、 $d_{a,max}$ は(階高)×1/200の値、 P_0 は基本荷重である。

4.1 異種接合部を有する骨組の設計問題(問題1)

接合条件を表す設計変数を図8のように定める。C-1~C-12と部材断面を最適化する問題を問題1とする。

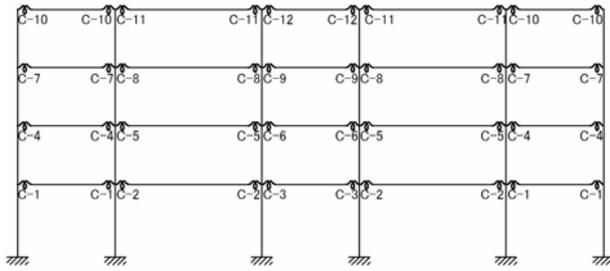


図8 接合条件を表す変数

4.2 ブレース付き骨組の設計問題(問題2)

ブレースの種類と配置を表す設計変数を図9のように設定する。ブレースの種類として、X、K、V型ブレースの3種を考慮し、変数①~⑫と部材断面を最適化する問題を問題2とする。

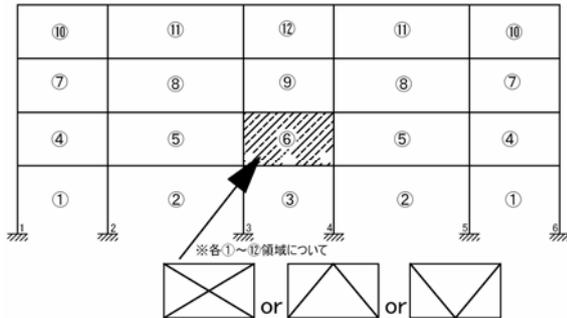


図9 ブレースの種類と配置を表す変数

4.3 異種接合部を有するブレース付き骨組の設計問題(問題3)

上記の問題1の接合条件に関する設計変数と問題2のブレースの種類・配置に関する設計変数をすべて含む設計問題を問題3とする。

設計問題1~3に対し、接合部のコストを骨組重量に加え、制約条件によるペナルティを課した目的関数 M' を次のように与える。

$$M' = \sum_{i=1}^{nf} m_f(X_i) + \sum_{j=nf+1}^{nf+nc} \beta(X_j) m_f(X_j) + \sum_{k=nf+nc+1}^{nf+nc+nb} m_b(X_k) + k_1 \max\left\{\left(\frac{P_0}{P_u} - 1\right), 0\right\} + k_2 \sum_{l=1}^4 \max\left\{\left(\frac{d_l}{d_a} - 1\right), 0\right\} \quad (9)$$

ここで、 nf は骨組部材の数、 nc は半剛接合の数、 nb はブレース部材の数である。また、 m_f は骨組部材の重量、 m_b はブレース部材重量、 k_1 、 k_2 はペナルティ係数である。

β は、設計変数の値に応じて、接合部によるコストの

割増しを算出する関数であり、文献1)、2)により次式で定める。ヒンジに近い接合では、部材重量の0.125の割増し、そして、剛接合に近い場合は、部材重量の0.350の割増しとなる。

$$\beta(X_i) = \beta_i R_i + \beta_0, \quad \beta_i = \frac{0.225}{S_i}, \quad \beta_0 = 0.125 \quad (10)$$

ここで、 R_i は接合部の初期回転剛性であり、 S_i は、接合部の種類に応じた値であり、表4による。

表.4 各接合条件に対する S_i の値

種別	S_i [kN*mm/rad]
1 Single-web angle	85×10^6
2 Double-web angle	113×10^6
3 Top and Seat angle	226×10^6
4 Top and Seat angle with web angle	282×10^6
5 T-Stub	452×10^6

5 最適化の結果

5.1 異種接合部を有する骨組の最適化

図10~図12に問題1に関するSS、RTSによる最適化の履歴図、及びSSによって得られた近似最適解を示す。

SSでは、解析回数が73336回(88回の繰返し)で目的関数が244[kN]となったが、その後、100回の繰返しまで、目的関数は減少しなかった。RTSは570回の繰返しで目的関数が、288[kN]となったが、その後、1500回の繰返しまで、目的関数は減少しなかった。

近似最適解は、柱については、大きなせん断力が作用する内側の柱の方が外側の柱よりも剛性が大きく、梁は、大きなせん断力が作用する1、2層では、層間変位を小さくするために、上層よりも梁両端の接合部の回転剛性と梁の剛性は大きく、作用せん断力の小さい2、3層では、梁両端の接合部の回転剛性と梁の剛性は小さくなるという傾向がある。

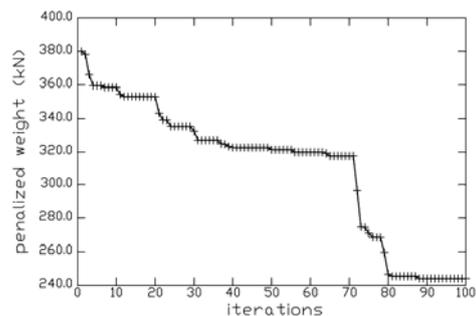


図10 SSによる最適化の結果(問題1)

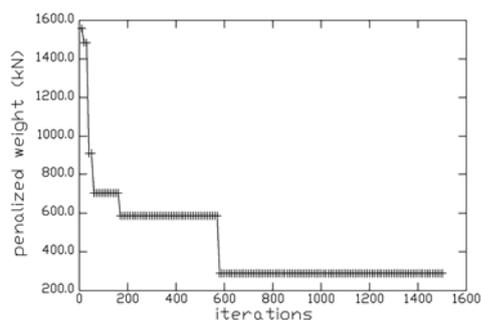


図 11 RTS による最適化の結果(問題 2)

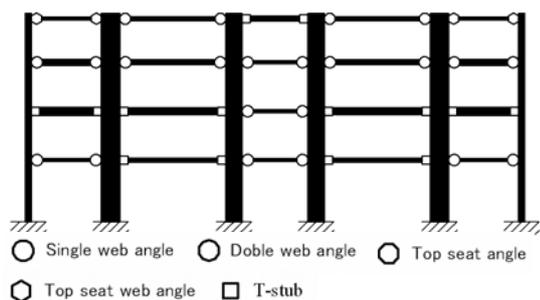


図 12 近似最適解(問題 1)

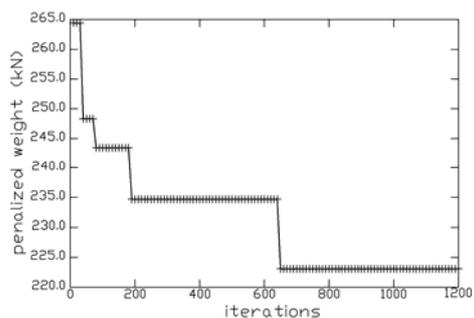


図 14 RTS による最適化の結果(問題 2)

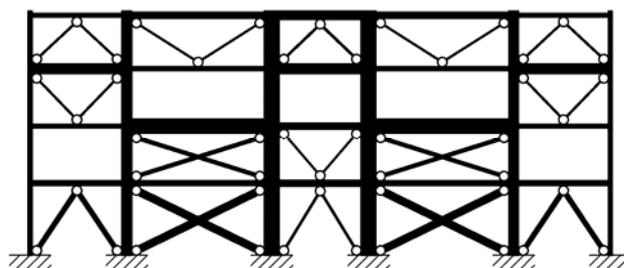


図 15 近似最適解(問題 2)

5.2 ブレース付き骨組の最適化

図 13～図 15 に問題 2 に関する SS、RTS による最適化の履歴図、及び SS によって得られた近似最適解を示す。

SS では、解析回数が 51272 回(49 回目の繰返し)で目的関数値が、183[kN]となり、その後、100 回目の繰返しまで目的関数値が減少することはなかった。RTS では、650 回の繰返しで、目的関数値が 223[kN]となったが、その後、1200 回の繰返しまで、目的関数値が減少することがなかった。

近似最適解は、柱については、大きなせん断力が作用する内側の柱の方が外側の柱よりも剛性が大きく、ブレースの配置は、大きなせん断力が作用する 1、2 層では、上層よりも剛なブレースが配置され、作用せん断力の小さい 2、3 層では、剛度の小さいブレースが配置される傾向がある。また、スパンの大きなパネルには、X ブレース、小さなパネルには、K、V ブレースが配置される傾向がある。

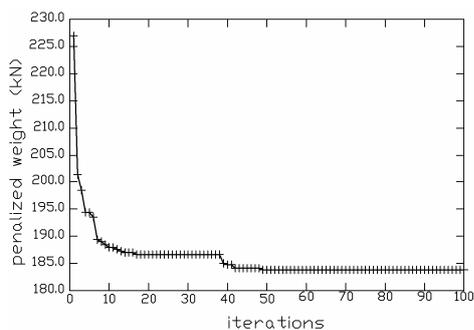


図 13 SS による最適化の結果(問題 2)

5.3 異種接合部を有するブレース付き骨組の最適化

図 16～図 18 に問題 3 に関する SS、RTS による最適化の履歴図、及び SS によって得られた近似最適解を示す。

SS では、解析回数が 111072 回(88 回目の繰返し)で目的関数値が、242[kN]となり、その後、150 回目の繰返しまで目的関数値が減少することはなかった。RTS では、190 回の繰返しで、目的関数値が 313[kN]となったが、その後、770 回の繰返しまで、目的関数値が減少することがない。

近似最適解は、柱については、大きなせん断力が作用する内側の柱の方が外側の柱よりも剛性が大きく、ブレースの配置と骨組の剛性については、問題 1 と問題 2 の近似最適解特徴の両方の特徴を持つ解となり、梁の剛性を大きくして、層間変位を小さくする要求と剛なブレースを配置して、層間変位を小さくするという要求にトレードオフが生じたと考えられる。

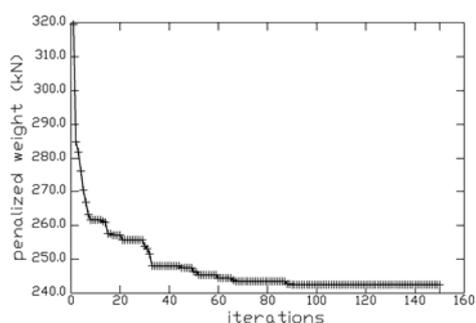


図 16 SS による最適化の結果(問題 3)

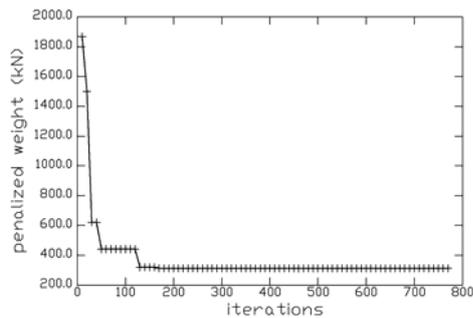


図 17 RTS による最適化の結果(問題 3)

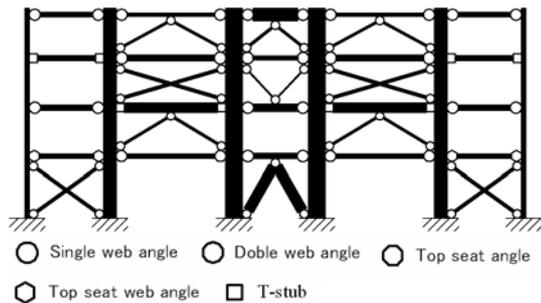


図 18 近似最適解(問題 3)

6 結論

本論では、SS と RTS による構造最適化のアルゴリズムを提案し、それらを、従来は直接的な設計変数とみなされなかった接合条件とブレースの種類・配置を設計変数とした問題に適用した。また、SS については、多様解の生成時に単純なクラスタリングアルゴリズムを用いて改良を行った。さらに、RST には、体系的なリスタートを行うために、SS の多様な初期解生成法を用いた。なお、解析では、幾何学的非線形と材料非線形の両方を考慮した修正塑性ヒンジ法を用いた。

最適化の結果より、本論で実装した SS と RTS を比較すると、SS の方が RTS よりも良好な解が得られることが分かった。

4 節で設定した 3 つの問題に対する近似最適解の特徴は、柱については、3 つの問題とも、外柱よりも内柱の方が剛性が大きくなる傾向があった。ブレースの配置と骨組部材の剛性は、大きいせん断力が作用する下層では、剛なブレースが配置され、梁の剛性は大きくなる傾向があった。さらに、半剛性接合を設定した場合、骨組の剛性に応じた接合種類が選択された。

ブレースの配置問題については、上層部においても剛性の小さいブレースが配置されることがあったが、これは、ブレース部材の接合コストを見込まなかったことが原因と考えられる。

今後は、問題設定、解析手法、最適化手法に更なる改

善が必要である。

参考文献

- 1) M. S. Hayalioglu, S. O. Degertekin. : Minimum cost design of steel frames with semi-rigid connections and column bases via genetic optimization, *Comput Struct*, Vol.83(21), pp. 1849-1863, 2005
- 2) E. S. Kameshki, M. P. Saka. : Optimum design of nonlinear steel frames with semi-rigid connections using genetic algorithm, *Comput Struct*, Vol.79(17), pp. 1593-1604, 1999
- 3) Lei Xu, Donald E. Grierson. : Computer-Automated Design of Semirigid Steel Frameworks, *J of Struct Engng, ASCE*, Vol.199, No.6, pp.1740-1759, 1993
- 4) I. Takewaki, J. P. Conte, S. A. Mhin, K. S. Pister. : Probabilistic Multi-Objective Optimal Design of Seismic-Resistant Braced Steel Frames Using Aroma Models, *Comput Struct*, Vol.41(4), pp. 687-707, 1991
- 5) S. Pezeshk, C. V. Camp, D. Chen : Design of Nonlinear Framed Structures Using Genetic Optimization, *J of Struct Engng, ASCE*, Vol.126, No3 pp.382-388, 2000
- 6) W. F. Chen, Seung-Eock Kim. : LRFSD Steel Design Using Advanced Analysis, CRC Press, 1997
- 7) Sadiq M. Sait. et al 著、白石洋一 訳 : 組合せ最適化アルゴリズムの最新手法、丸善株式会社、2002
- 8) Manuel Laguna, Rafael Marti. : Scatter Search ; methodology and implementations in C, Kluwer Academic, 2003
- 9) Oscar Cordon, Sergio DamaSet al : 3D Inter-subject Medical Image Registration by Scatter Search, *International Journal of computer vision*, pp.90-103, Springer, 2005
- 10) David Hand, Heikki Mannila, Padhraic Smyth. : Principles of Data Mining, MIT Press, 2001
- 11) Roberto Battiti, Giampietro Tecchiolli. : The Reactive Tabu Search, *ORSA Journal of Computing*, Vol.6, No.2, 1994
- 12) A. K. Dhingra, W. A. Bennage. : Discrete and Continuous Variable Structural Optimization Using Tabu Search, *Engng Opt*, Vol.24, pp.177-196, 1995

■ ソフト事例紹介（招待講演）

平板の形態生成と補強を学ぶ教育用ソフトの開発

石井 恵三¹⁾

1) 株式会社くいんと 代表取締役社長 博士(工学) E-Mail : ishii@quint.co.jp

1 はじめに

連続体の位相最適化の研究は、1988年にデンマーク工科大学のM. P. Bendsoe教授とミシガン大学の菊池昇教授により発表された論文¹⁾で幕を開けた。Bendsoeらの論文は、従来のトラス構造を空間に最適配置する方法とは異なる、全く新しい概念を提案した。設計領域を、対象とする構造体の変化を包含する充分大きなものに緩和し、そこに小さな穴が無数にあいた多孔質体を仮定した。この多孔質体を連続体として扱うために、ミクロとマクロの挙動の関係を記述する均質化法を導入して、領域内に制約された材料を最適配置することで最も剛性の高い位相形態の決定を実現した。

この方法の有用性を印象づけたのは、ミシガン大学のSuzuki, Kikuchi²⁾で、位相最適化では必ずと言ってよいほどよく用いられる、Michell³⁾によって示されたコート掛け問題（いわゆるミッチェル・トラス）を連続体で見事に再現した。

その後、連続体の位相最適化に関する研究は菊池のグループ、Bendsoeのグループを筆頭に様々な機関で発展し、著者ら^{4),5),6)}も参加した。そして、これらの研究成果を盛り込んだ商用プログラム⁹⁾もいくつか開発されている。

さて、構造物を設計する場合に基本となる重要な項目の一つに、拘束点と荷重負荷点の間の力の流れ（Load Path）を知ることが挙げられる。設計者は力の流れが分かれば、無駄な部分と必要な部分を直感的に理解できる。材料力学、構造力学を学ぶ学生に、構造体のどこかを押さえ、どこかに力を掛けた場合に、どこが必要で、どこが無駄かを考えさせた上で、その結果を絵で示すことができれば、それを見た学生は何故そうなるかの理屈を考え、再び材料力学や構造力学の基本に立ち返り、自分なりの理屈を考え結論を見出すであろう。この繰り返しが、構造を設計する時に必要とされる、いわゆる‘設計の勘どころ’を養うことになるのではなかろうか。設計の第一歩は少ない質量（重量）で高い剛性の構造体を作ることであると思う。

デンマーク工科大学のO. Sigmund教授のWEBに入

ると（<http://www.topopt.dtu.dk/>）簡単な構造の位相最適化が遊び感覚で実行でき、利用者はリアルタイムでその結果を見ることができる。我国でも、同様の趣旨の教科書⁸⁾が出版されている。

過去に著者らはこれらを参考に、Bendsoeらが提唱した連続体の位相最適化が前述のような理由で学生のものづくり教育に役立つのではないかと考え、平面応力問題について、ほぼリアルタイムで位相最適化計算を行い、同時に最適位相形態に収束して行く過程（材料が集まって剛性の高い構造体を形成して行く様子）を、ビジュアルに見せることで、より高い学習効果を期待する教育用位相最適化プログラム⁹⁾を開発した。このプログラムを3つの大学の授業で試験的に使用した結果、出てきた位相形態に対し理由付けをするためにグループで議論を繰り返した後、材料力学の教科書を読み返すという光景が見られた。さらに学生の興味は、

- ・同じところに面外荷重が負荷された場合、面内荷重と面外荷重では結果がどう違うのか？
 - ・薄い板を補強する場合はどうするのか？
 - ・3次元固体モデルでもやりたい
 - ・静荷重ではなく振動にも強い位相形態は？
- とエスカレートした。

以上の背景から、(財)東京都中小企業振興公社の平成17年度東京都中小企業新製品・新技術開発助成金を受け、面外荷重を考慮でき、且つ薄板の補強も考慮できる位相最適化のプログラムを開発したので紹介する。

2 節点の仮想材料密度を設計変数とした位相最適化

2.1 CAMDの概要

従来の位相最適化プログラムの大きな問題として長い間議論されてきた‘チェッカーボード現象’の取り扱いについて、松井と寺田は連続的材料分布の節点補間によるトポロジー最適化手法：CAMD¹⁰⁾を提案した。以下にその概要を紹介する。

松井らは連続体の位相最適化問題によく現れる一種の数値不安定現象であるチェッカーボード（蜜な材料と疎

な材料が交互に配置される状態)は、要素毎に独立に設定される離散変数が原因と考え、設計変数を節点毎に定義することで、変数の値が領域内の要素間では C_0 連続になるような分布を仮定した。

領域内は多孔質体を仮定し、多孔質体を構成する微視構造は、Bendsoe, Kikuchi, Suzukiらが用いた正方形のセルに正方形または長方形の穴をあけた異方性を仮定するものではなく、ほぼ等方な性質を持つハニカム状の六角形の穴あき構造を仮定し、この穴の大きさを設計変数とするが、上述したように領域内では連続分布を仮定した。

そして領域内の任意の場所における多孔質体のマクロ平均的な材料定数を計算するために均質化法を導入した。以降は文献^{1),2)}に示されたものと同様な手法に従い穴の大きさを最適化する。計算が収束後、決定した設計変数の穴の大きさから割り出された残りの材料の分布を濃淡表示して目的の位相形態を得る。ここで示された計算例では、得られた位相形態は非常に鮮明であり、またチェッカーボード模様は全く現れていない。

この文献を参考に、さらに簡略化する方法を述べる。

2.2 仮想材料密度の導入

松井らが使用した六角形のハニカム状のユニット・セル形状はほぼ等方性材料の性質を持つので、ここではこのユニット・セルを使用せず、穴の大きさの代わりに、穴を除いた残りの材料と元の材料の体積比(=仮想材料密度)を設計変数として定義した。

領域全体に分布するこの仮想材料密度を以下のように離散化する。

$$\rho = \sum_{i=1}^m \rho_i N_i \quad (1)$$

ここで、 ρ_i は節点*i*の仮想材料密度、 N_i は領域全体の中で節点*i*に関する形状関数、 m は総節点数である。

ある場所のマクロ平均的な縦弾性係数は等方性を仮定し、次式のように仮想材料密度のべき乗に比例するものを考える。(本プログラムでは $p=3$ とした)。

$$E = \rho^p E_0 \quad (2)$$

E_0 はフルに充填された材料の縦弾性係数を示す。こうすることで、均質化法を適用して穴の状態に応じた多孔質体のマクロ材料定数を計算する過程が省略できる。

目的関数は平均コンプライアンス、制約関数を質量(体積)とした場合、最適化問題は自己随伴形式となり、最

適化式は次のように簡単になる。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize}_{\rho_i} (\mathbf{u}^T \mathbf{f}), \\ & \text{s.t.} \quad \sum_e V_e(\rho) - V_0 \leq 0, \quad 0 < \rho \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u} は仮想変位、 \mathbf{f} は外荷重、 V_e は要素*e*の密度を考慮した材料の量、 V_0 は制約する材料の量とする。目的関数、制約関数の設計変数に対する微分(設計感度)をそれぞれ以下に示す。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \rho_i} &= - \int_{\Omega} \varepsilon^T \frac{\partial D_m^H(\rho)}{\partial \rho_i} \varepsilon N_m d\Omega \\ \frac{\partial V}{\partial \rho_i} &= \int_{\Omega} N_i d\Omega \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 C は平均コンプライアンス、 ρ_i は節点*i*の仮想材料密度、 ε は要素内仮想歪、 D^H は要素*m*における応力-歪関係式、 N_m は要素*m*の形状関数、 Ω は節点*i*が関係する領域、そして V は要素の質量を示す。

2.3 低次平板有限要素

平板の有限要素は、面内挙動を記述する平面応力部分と面外挙動を記述する板曲げ部分を重合させて作成する。

板曲げ挙動は板厚に汎用性を持たせるために、Reissner-Mindlinの定式化がよく用いられる。この定式化は面外剪断変形を考慮するので、薄い板から比較的厚い板までを広範囲に扱うことができる。しかし、離散化した領域内の未知量は C_0 連続であり、 C_1 連続を要求するKirchhoffタイプの要素に比べ、板厚が薄くなるにつれ(低次要素では特に)‘剪断ロッキング’という実際の挙動より硬くなる現象が現れる。このロッキング現象を回避するために、過去に様々な工夫が成されてきたが、ここでは著者らが開発した方法¹¹⁾を採用した。また、面内挙動を示す平面応力部分についても、アスペクト比(要素形状の縦横比)が大きくなった場合や形状が歪んだ場合のロッキング現象を回避するために、著者らが開発した非適合モードを用いた低次要素¹²⁾を採用した。

3 開発したプログラムの概要

ここでは、開発したプログラムの概要を2つの例題の計算過程を紹介することで説明する。

<例1> 計算モデルは図1に示す、縦:400mm、横:400mm、厚さ:3.0mmの平板とする。以下の2ケースについて、モデル周囲の面外変位を拘束し、板中央部に垂直集中荷重を負荷して、体積を領域の40%

に制約した場合の最も剛性の高い位相形態を求める。

(A) 基本板厚：0.0mm，設計板厚：3.0mm の場合
(板全体の位相最適化を行うケース)

(B) 基本板厚：1.0mm，設計板厚：3.0mm の場合
(真中の板厚 1.0mm はそのまま残し，裏表にそれぞれ 1.0mm の厚さの補強を施すケース)

(A),(B)について，操作要領を順を追って説明する。

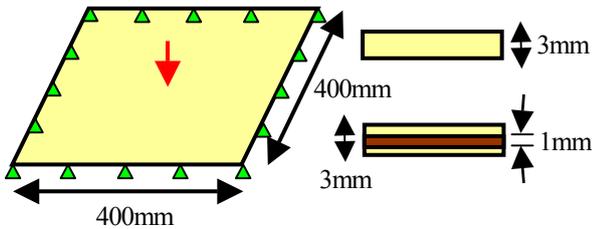


図1 平板モデル

図2にプログラムを起動したときの初期画面を示す。

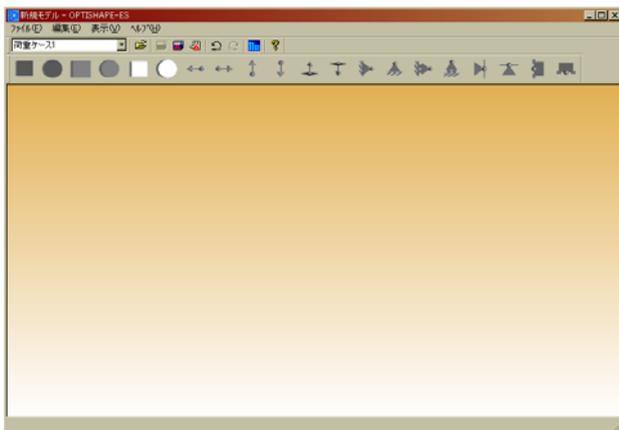


図2 初期画面

2段目のアイコンは左から順番に A①荷重ケースの設定，A②ファイルのオープン，A③選択した図形の消去，A④全ての図形の消去，A⑤全ての図形を選択，A⑥変更を元に戻す，A⑦変更を繰り返す，A⑧解析を実行，A⑨バージョン情報を示す。

3段目は，同様に B①矩形設計領域，B②円形設計領域，B③矩形非設計領域，B④円形非設計領域，B⑤矩形無効領域，B⑥円形無効領域，B⑦面内左向き荷重，B⑧面内右向き荷重，B⑨面内上向き荷重，B⑩面内下向き荷重，B⑪面外上向き荷重，B⑫面外下向き荷重，B⑬完全拘束（縦），B⑭完全拘束（横），B⑮スライド拘束（縦），B⑯スライド拘束（横），

B⑰ピン拘束（縦），B⑱ピン拘束（横），B⑲対称軸拘束（y），B⑳対称軸拘束（x）である。

ステップ1) 設計領域の作成

B①のアイコンをクリックし，描画領域に移動したらマウスの左ボタンを押したまま任意の位置から正方形（縦 400mm×横：400mm）の設計領域を作成する。（図3参照）

ステップ2) 拘束条件の設定

周辺の面外変位を拘束するので，B⑰，B⑱のアイコンを使って拘束条件を設定する。

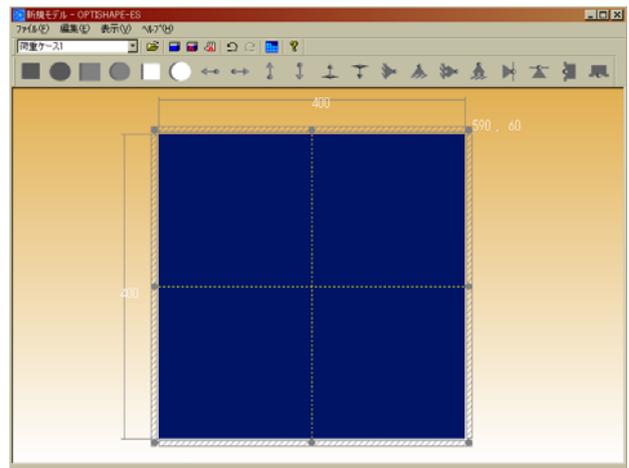


図3 設計領域

先ずモデルの底辺に拘束を与えるために，B⑱アイコンをクリックし，正方形の左下角に置いて，右角までラバーバンドで伸ばし離す。次にモデルの左辺に拘束を付加するために，B⑰のアイコンをクリックし，左上角に置いて，左下角までラバーバンドで伸ばし離す。対辺は，例えば四角形の上の辺に対する拘束条件の設定は，B⑱のアイコンをクリックし画面内に置くと，三角形マークの底辺が下になるが，図4に示す上部の丸いマーク（オレンジ色の矢印が示す先）をクリックすると三角形の向きが上下反転する。

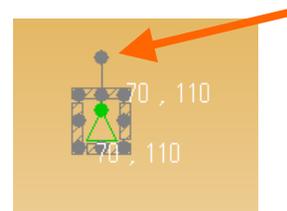


図4 拘束マークの反転

拘束条件を設定し終わった画面を図5に示す。

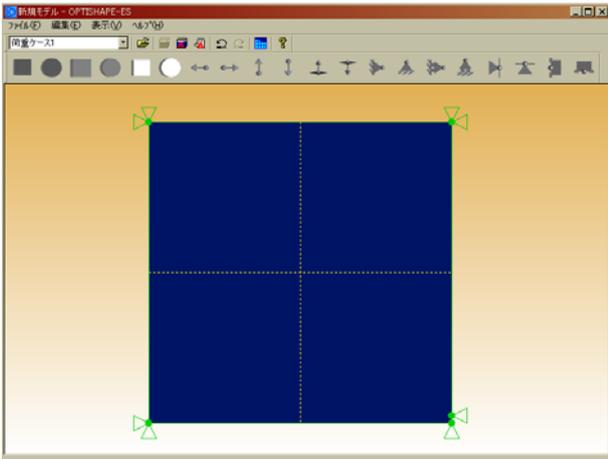


図5 拘束条件設定後の画面

ステップ3) 荷重の設定

四角形の真ん中に、面の裏側から表側に向かって集中荷重を与える。B⑩のアイコンをクリックし、四角形の中心部（2つの破線がクロスした位置）に置くことにより荷重が負荷される。（図6）

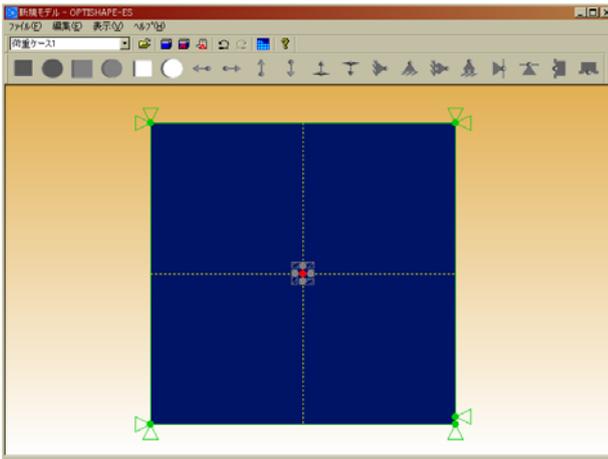


図6 拘束、荷重設定後の画面

ここで、荷重値は単位荷重が、材料定数はヤング率： 21000Kg/mm^2 、ポアソン比：0.3 がプログラム内で自動設定される。

ここまでで、応力解析に必要なデータは完了し、次に最適化の制御データを与えるためにA⑧のアイコンをクリックし解析実行画面（図7）に移る。

ステップ4) 最適化条件の設定

図7の右下の‘解析実行’ボタンを押すと体積制約値の定義画面が表示されるので、スライドバーを操作して制約値を30%に合わせ、OKボタンを押す。

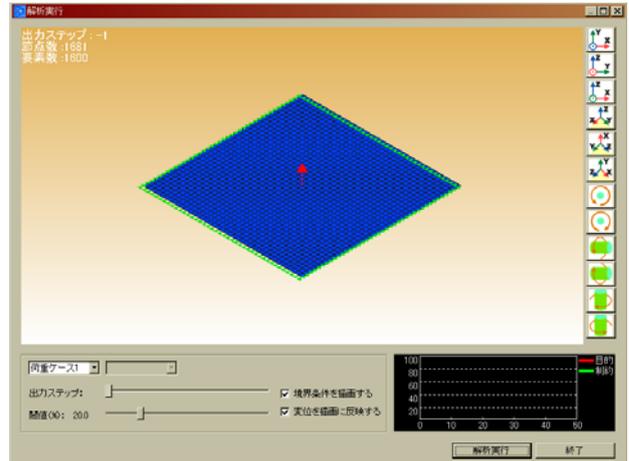


図7 解析実行画面

次に、モデルの板厚を入力する。面外に荷重が負荷されたモデルに、基本板厚、設計板厚共に有限な値を入力すると、板の補強レイアウトを求めることができる。基本板厚部分は設計対象にはならず、基本板厚より大きい設計板厚として入力された設計空間に、制約された体積の材料が配置される。

基本板厚に0.0を入力した場合は、板全体が設計領域となり、通常の位相最適化が行われる。

(A) の場合：基本板厚：0.0，設計板厚：3.0
即ち、板厚3.0mmの設計空間に30%の材料を残して最適位相形態を求める。

(B) の場合：基本板厚：1.0，設計板厚：3.0
即ち、厚み方向の中心に1.0mmの板があり、この板の外側（裏表）にそれぞれ裏側：1.0mm，表側：1.0mmの設計空間を設け30%で補強を行う。(B)の場合の画面を図8に示す。

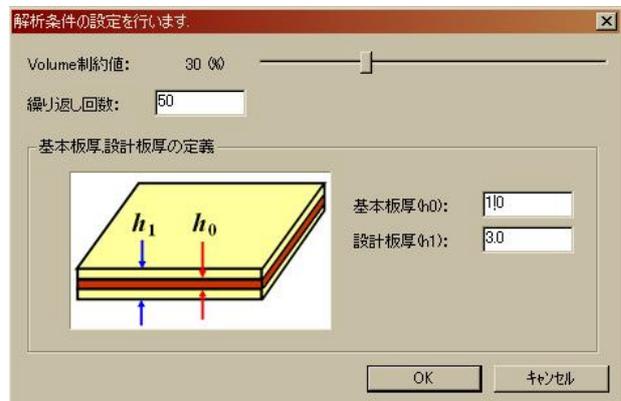


図8 板厚、体積制約、繰り返し回数を入力画面
基本板厚に値が入力されているので補強あり

ステップ5) 最適化実行

図8の下部にあるOKボタンを押すと、位相最適化計算が始まり、画面上に最適化の進行状況が刻々と表示される。図9に全体の位相最適化(A)が終了した時の画面を示す。右下のグラフは、目的関数(赤:平均コンプライアンス)、制約関数(緑:体積)の正規化した値の履歴を示す。

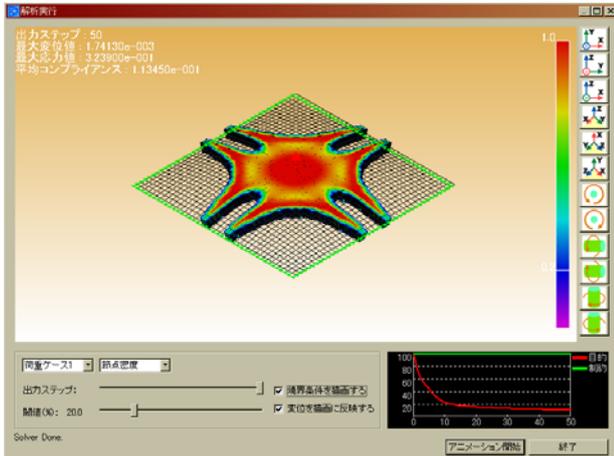


図9 (A) の場合の計算終了画面

同様に1mmの板に補強を行う場合(B)の終了画面を図10に示す。

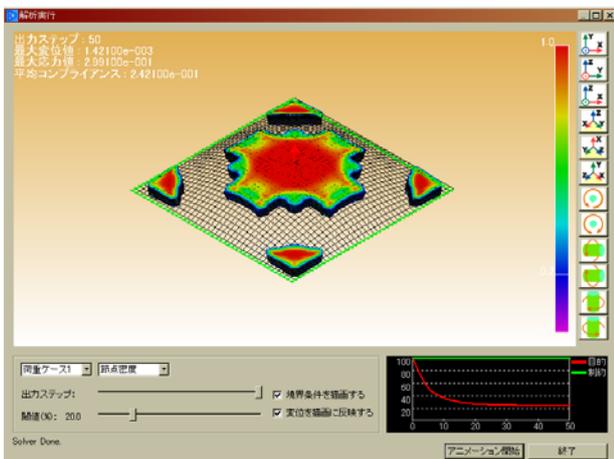


図10 (B) の場合の計算終了画面

図9に示す結果は、板厚方向の中心部に非設計領域を持たないので、拘束部と荷重負荷部の材料分布は繋がるが、図10の結果は、板厚中心部にははじめから厚さ1mmの板が存在しているので、裏表に図に示すような補強レイアウトが現れ、拘束部分と荷重負荷部分は必ずしも繋がっていない。

両ケース共に、目的関数である平均コンプライアンス(外力の成す仕事)は大幅に減少しており、制約体積は限界付近で変化していないので、同じ重さで初期状態(制約値の材料密度が均質に分布した状態)と比較して剛性は十分確保できたといえる。

<例2>ここでは面内のみに荷重が負荷される場合の興味深い例を紹介する。

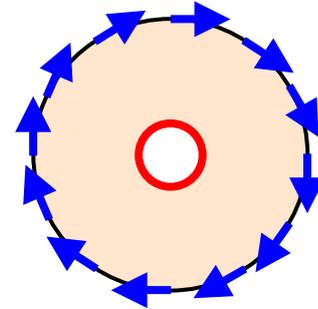


図11 面内荷重(青色の矢印)のみを負荷したモデル

図11に示すモデルについて、中心部(赤い丸の部分)を拘束し、外周に荷重を円周方向に負荷する。制約体積を領域の30%に設定し、平均コンプライアンスの最小化を行う。荷重は面内のみなので平面応力問題になり、基本板厚は0.0、設計板厚を1.0とする。<例1>と同様の操作をしてモデルを作成し、計算繰り返し回数を50回に設定して位相最適化を行った結果を図12に示す。

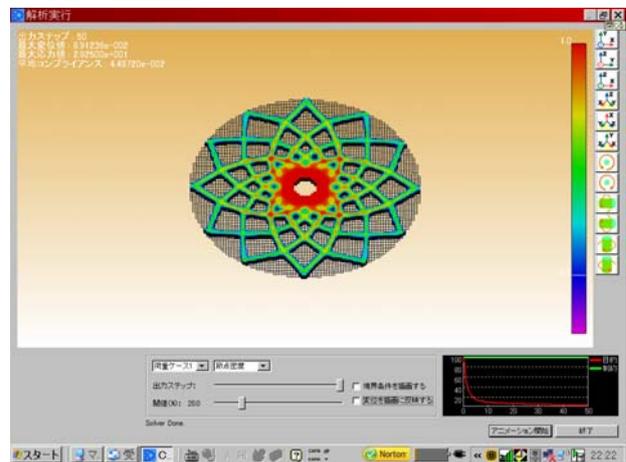


図12 位相最適化後の画面

図13に示す写真は、今から約500年前にかの天才芸術家ミケランジェロがイタリアのカンピドリオ広場にデザインした模様である。レオナルド・ダビンチも数々の絵にメッセージを残したと言われているが、図12と図13を見比べれば不思議な感覚に襲われる。Michell³⁾

が示した有名なトラス構造(図14)も、この図形の1/12と同じになる。強い形は構造的に安定しており、芸術として美しいということであろうか？



図13 カンピドリオ広場に描かれた図形

<http://www.abcgallery.com/M/michelangelo/michelangelo68.html>

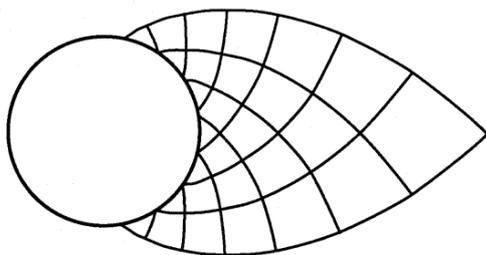


図14 ミッチェルのコート掛け問題¹³⁾

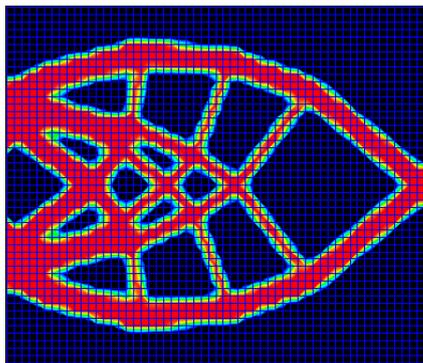


図15 OPTISHAPE-E で計算したコート掛け問題

4 おわりに

教養課程に在学する大学生や高専の学生が、自分で簡単に操作しながら、与えた境界条件と軽量化の目安である体積を制約した場合の最も高剛性の形態を算出する位相最適化プログラムを開発した。実際に、3つの大学で授業に使ってみたが、学生はプログラムを使う前と後で

それぞれのカタチの違いを検討し、意味づけを試みていた。この考察の過程こそが大事であり、CAE教育の一つの候補となり得ることを実感した。

謝辞：本ソフトを開発するにあたりミシガン大学の菊池昇教授に貴重な助言をいただいた。また、GUI部分は英山寛之氏が開発した。記して謝辞としたい。

参考文献

- 1) Bendsoe, M. P. & Kikuchi, N. : Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method, *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng.* 71, pp.197-224, 1988.
- 2) Suzuki, K. & Kikuchi, N. : A homogenization method for shape and topology optimization, *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng.* 93, pp.291-318, 1991.
- 3) Michell, A.G.M. : The limits of economy of material in frame-structures, *Phil. Mag.* 8, pp. 589-597, 1904.
- 4) 石井恵三, 青村茂, 菊池昇: フレームベース・ユニットセルを用いた位相最適化の研究, *日本機械学会論文集 (C)* 67-654, pp.499-506, 2001.
- 5) 石井恵三, 青村茂, 藤井大地: フレームベース・ユニットセルを用いた位相最適化の開発 (第2報 対象構造の固有振動数と体積を制約した剛性の最大化), *日本機械学会論文集 (A)* 67-664, pp.1898-1905, 2001.
- 6) 石井恵三, 青村茂: 等断面を有する構造物の位相最適化, *日本機械学会論文集 (A)* 68-675, pp.1658-1665, 2002.
- 7) Bendsoe, M. P. & Sigmund, O. : *Topology Optimization Theory, Methods and Applications*, Springer, pp.154, 2002.
- 8) 藤井大地: パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002.
- 9) 石井恵三, 英山寛之: 大学教育に用いる位相最適化プログラムの開発, *日本機械学会第18回計算力学講演会講演論文集*, pp. 107-108, 2005.
- 10) 松井和巳, 寺田賢二郎: 連続的材料分布の節点補間によるトポロジー最適化手法, *日本機械学会論文集 (A)* 69-684, pp.1257-1264, 2003.
- 11) Kikuchi, F. & Ishii, K. : An improved 4-node quadrilateral plate bending element of the Reissner-Mindlin type, *Computational Mechanics*, Vol.23, pp.240-249, Springer, 1999.
- 12) Kikuchi, F. & Ishii, K. : Development of a 4-node non-conforming plane stress element, *International Conference on Computational Engineering Science*, Costa-lica., pp.363-368, 1997.
- 13) Suzuki, K. : *Shape and Layout Optimization using Homogenization Method*. Ph.D. Dissertation, The University of Michigan, 1991.

製造業における設計者向け CAE ソフトを利用した最適化計算の事例

飯嶋 保男¹⁾, 森 光寛²⁾

1) 株式会社構造計画研究所 SBD 営業部, iijima@kke.co.jp

2) 株式会社構造計画研究所 SBD 営業部, morim@kke.co.jp

1 製造業における製品設計環境

今日の製造業において 3 次元 CAD は、ごく当たり前の設計ツールになりつつある。その運用のレベルは様々であり、自動車メーカーや家電メーカーなどのいわゆる大企業においては、3 次元 CAD が完全に設計の中心になり、2 次元 CAD をほとんど使用しない状況も珍しくない。また、それ以外の中小企業においても、何らかの形で 3 次元 CAD が導入されているケースが多数派となっている。

設計を取り巻くツールについて「CAD/CAM/CAE」という言葉が一般的に使用される。それぞれ CAD=設計、CAM=製造、CAE=解析を行うためのツールを指す。これは、設計～性能確認～製造までを完全にコンピューター上で行うことを想定した言葉とも言える。

2 設計者 CAE とは

数年前まで建築構造設計において高層建築の振動解析が一部の解析先任者の業務であったのと同様に、製造業においては CAE が解析先任者のものであり、設計者と解析者は別の人間が担当していた。10 年ほど前から「設計者 CAE」という言葉が広まり始め、今日では一般的に通用するようになっていく。実際の設計現場においても実現している企業が増えつつある。

設計者 CAE の要点としては①設計自身が行う②設計工程の早い段階で方向付けをする③設計案の比較検討が目的で必ずしも高い計算精度は求めない、といったことが挙げられる。つまりは、設計の初期段階で CAE を利用して適切な方向付けをし、後戻りを少なくする。これによって最終的には設計期間の短縮を図ろうとするものである。

3 最適化計算の事例

設計者 CAE ツールの 1 つである「COSMOSWorks」を利用した最適化計算の事例を紹介する。

3.1 問題の概要

図 3-1 に示すように支持・載荷されている片持ち梁ブラケットの最適形状を計算する。最適化の条件を次のとおりとする。

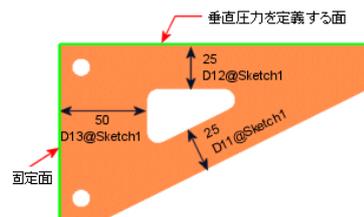


図 3-1 初期条件

1) 設計目的

製品の体積を最小化すること。

2) 設計変数

図 3-1 に示す 3 箇所の寸法の上限值および下限値を設定する (表 3-1)。

3) 制約条件

Von-Mises 応力の最大値、最大変位、固有振動数に対して制約条件を設定する (表 3-2)。

表 3-1 設計変数 (mm)

寸法名	下限値	上限値
D11@Sketch1	10	25
D12@Sketch1	10	25
D13@Sketch1	20	50

表 3-2 制約条件

項目	制限値
von-Mises 応力の最大値	3E8[N/m ²]
合成変位の最大値	0.21[mm]
固有振動数の下限値	260[Hz]
固有振動数の上限値	400[Hz]

3.2 計算手法

本ソフトにおける最適化計算手法は実験計画法に基づいている。

今回の問題においては設計変数の数が3である。それらの変数を上限値、下限値とさらには上限値と下限値の中間値に設定する。各設計変数の、設計目的である体積の最小化に対する、感度を測定する。1つの設計変数を中間値に固定して、他の2つの設計変数を上限値と下限値の場合の計算を行う。これを3つの変数についてそれぞれ組み合わせ計算を行う。これらの感度測定の結果から、最適な設計変数の組み合わせを計算する。

以上の計算プロセスにおいて、設計変数（CAD形状）の変更、計算メッシュの再構築、FEM解析というサイクルの繰り返し、および最適寸法の算出という一連の処理は完全に自動的に行われる。

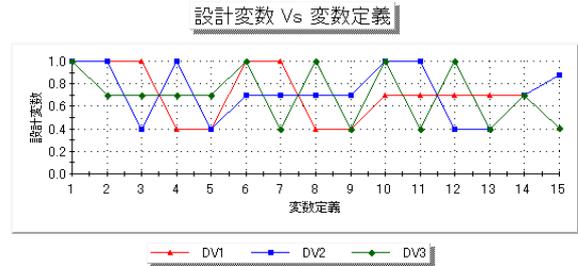


図 3-2 設計変数の組み合わせ

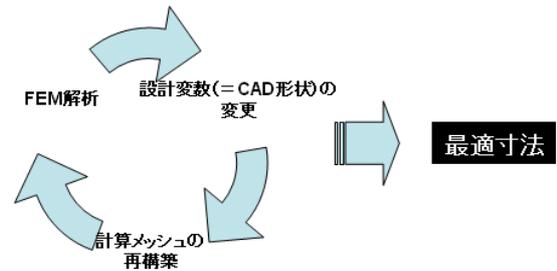


図 3-3 処理の流れ

3.3 計算結果

最適化計算の結果を図 3-4 に示す。与えられた条件を満足しながら適切に体積の最小化がなされている。今回の問題においては、結果的に変位が下限値に近い値となっており、設計を決定付ける要因となっているということも理解することができる。

4 まとめ

近年、製造業で普及している設計者向け CAE ソフトの最適化機能を利用して、片持ちブラケットの最適化計算を実施し、適切な解が得られることを確認した。

設計変数サイクル結果詳細					
繰り返し回数 = 15					
目的関数	現在	初期値	最適値		
体積	7.0745E-005	0.00010658	7.0745E-005		
設計変数					
設計変数	現在の値	最適値	下限値	上限値	単位
DV1	10.154	10.154	10	25	mm
DV2	21.917	21.917	10	25	mm
DV3	20.229	20.229	20	50	mm
制約条件					
タイプ	表示成分	現在の値	下限値	上限値	単位
応力	VONMises 応力	2.2261E+008	0	3E+008	N/m ²
変位	URES合成変位	0.20571	0	0.21	mm
モード	1次	274.78	260	400	Hz

図 3-4 最適化計算の結果

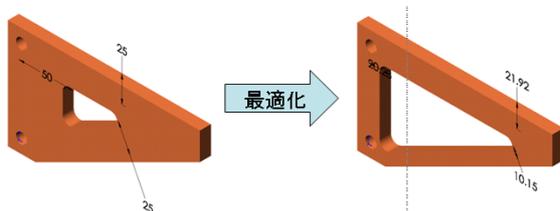


図 3-5 初期設計と最終設計

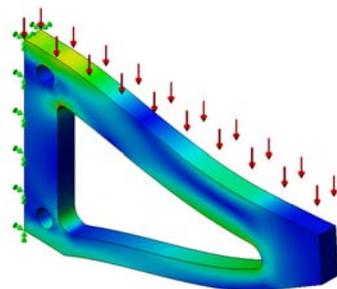


図 3-6 最終設計の応力解析

製造性と評価のし易さを考慮したトポロジー最適化結果の生成

由 渕 稔

アルテアエンジニアリング株式会社 技術担当取締役 yubuchi@altairjp.com.jp

1 はじめに

近年、ますます厳しくなる構造物の軽量化への要求に答えるため、自動車や航空宇宙等の業界では、設計での試行錯誤回数削減のための適切な初期設計案および過去の経験からは得られなかったような斬新な設計案の案出を目的として、設計の初期段階でトポロジー最適化を適用することが珍しくなくなってきている。

トポロジー最適化の結果は、設計に携わる技術者によって評価・判断され、概念設計のためのアイデアとして使用される。しかし従来のトポロジー最適化においては、例えば、中間的な密度結果を持つ要素が多く発生し、そこに部材を配置するべきかどうかの判断が困難となるような結果を生成したり、鋳造では製作できない中空構造のような結果を生成したりする場合のように、結果を直接設計に活かせないような場合が多く見られた。このような問題を解決するため、トポロジー最適化から生成される結果を、より評価しやすく（すなわち、結果の評価が評価者に依存しないように）、かつ、より製造しやすく改善するために導入された一連の機能が製造用制約条件機能である。

本稿では、構造最適化プログラムである Altair OptiStruct に搭載されている製造用制約条件機能を事例とともに紹介し、また、簡単な構造物を用いて、トポロジー最適化によって生成される構造に、これらの機能がどのような影響を与えるかも比較する。

2 製造用制約条件

前述のように、従来のトポロジー最適化の弱点とされていたのは、トポロジー最適化が生成する結果に関して、

- 結果の判断・評価が難しい。
- 製造が困難な構造を生成する。

というような問題が起こる場合がある、ということであった。

結果が各有限要素の密度によって表現されるトポロジー最適化結果において、中間的な密度を持つ要素が多く発生した場合、最適化によって生成される形状はユーザーが設定する表示のための密度しきい値に大きく依存

することになる。この問題を回避するには中間密度要素の生成を極力抑制する必要がある。

後者の問題は、種々多様な原因が考えられる。例えば、型抜きによる製造には不向きである空洞が生成される場合、非対称な境界条件が原因で対称であるべき構造に対して非対称な形状が生成される場合、実際には製造が難しいような細い部材が生成される場合、等である。

このような問題を解決するために OptiStruct には以下のような製造用制約条件機能が導入されている。

- 最小部材寸法制御
- 最大部材寸法制御
- 型抜き方向制御
- パターングルーピング
- パターン反復

次章からこれらの機能を個々に紹介する。

3 最小／最大部材寸法制御機能

骨組み構造のレイアウトを設計するためのアイデアを得るためにもトポロジー最適化はよく利用されている。このためには、結果から“部材”が明確に認識できる必要がある。これは、

- 評価しにくい中間密度の領域
- 製造しにくい細い部材
- 広く分布した高密度領域

が生成されることを抑制する必要があることを意味している。

最小部材寸法制御機能は、ユーザーが指定する幅（立体的場合は径）以下の“細い”部材の生成をできる限り抑制する機能である。この機能はまた、中間密度要素の生成も抑制する機能も併せ持っている。最大部材寸法制御は、逆に、指定した値以上の“太い”部材の生成を抑制する。この機能により、骨組み構造として認識することが困難となる広く分布した高密度領域の生成を抑制することが可能となる。

図1から図3に、最小部材寸法制御を適用した簡単な事例を示す。このモデルでは、左側の辺に対称性考慮のための境界条件が適用されており、下変中央に集中荷重、

下辺右端に拘束条件が与えられている。

図1は最小部材寸法制御を適用していない場合の結果である。細い部材が生成されており、また、一部に中間密度を持つ要素があることが分かる。

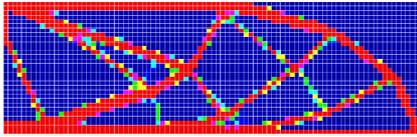


図1 最小部材寸法制御非適用（デフォルト）

図2と図3では共に最小部材寸法制御が適用されているが、異なる寸法値を与えている。より大きな値がより単純な構造を生成していることが分かる。

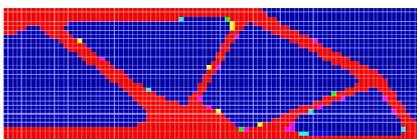


図2 最小部材寸法制御適用（D=60）

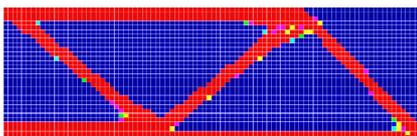


図3 最小部材寸法制御適用（D=90）

図4には、最大部材寸法制御を考慮したトポロジー最適化を自動車のステアリングナックル部分に適用した事例を示す。部材として認識しやすい構造が生成されていることが分かる。

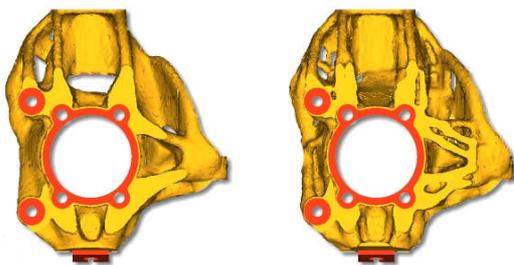


図4 最大部材寸法制御適用例（左：非適用、右：適用）

図5から図6に、エンジンマウントのブラケットにトポロジー最適化を適用した事例を示す。

図5左は、既存部品であり、図5右に示すトポロジー最適化のための設計空間は、この既存部品を覆うようにして作成されている。

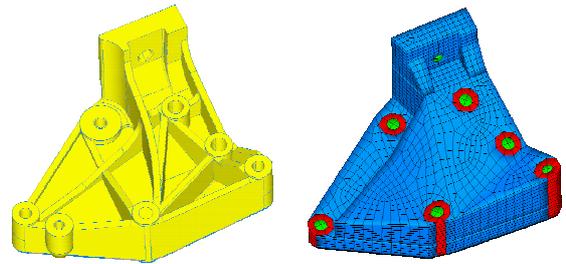


図5 既存部品とトポロジー最適化用設計空間

図6に、トポロジー最適化結果を示す。最小部材寸法制御機能が単純で評価しやすい部材配置を提案していることが分かる。

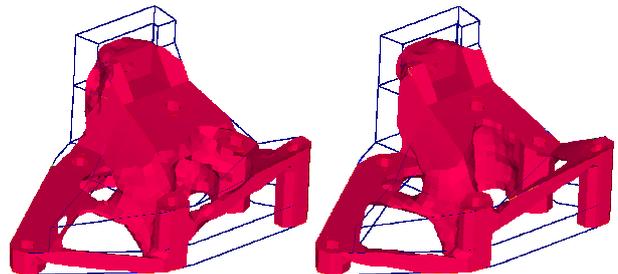


図6 トポロジー最適化結果

（左：最小部材寸法制御非適用、右：適用）

4 型抜き方向制御機能

従来のトポロジー最適化では、例えば図7に示すサスペンションアームのように、構造部材が振りを受ける場合に、 casting等の型抜きを前提とした方法では製造できない中空のボックス形状の構造を生成することが多い。このような場合に、型抜き方向を指定することによりオーバーハングや内部の空洞の生成を抑制する機能が型抜き方向制御機能である。

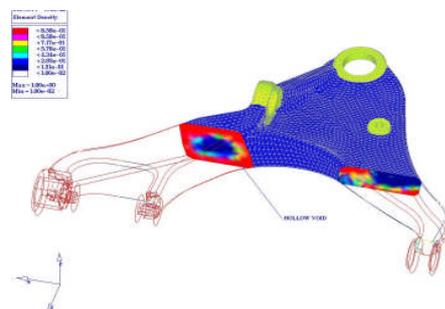


図7 サスペンションアームのトポロジー最適化

型抜き方向制御機能を燃料電池の蓋に適用した例を図8および図9に示す。型抜き方向制御を適用しなかった場合（図9左）に生成される“屋根”が、適用した場合（図9右）には発生していないことが分かる。

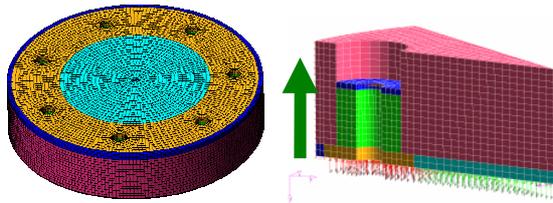


図8 燃料電池蓋モデルの設計空間と抜き方向

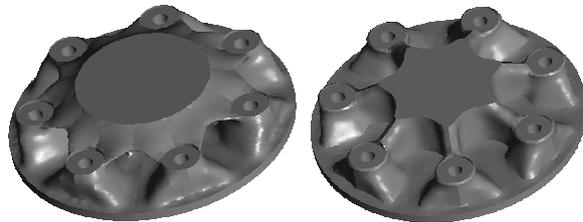


図9 トポロジー最適化結果
(左：型抜き方向制御非適用、右：適用)

5 パターングループング機能

パターングループングと呼ばれているのは、荷重や拘束等の解析条件およびメッシュ分割が対称となっていない場合でも、トポロジー最適化の結果に対称性を持たせることのできる機能である。この機能には、3面まで対称面が指定可能な面対称機能および周方向に任意分割数が指定可能な周期対称機能が含まれている。

図10と図11に立方体構造に2面対称条件を適用した例を、図12にタイヤホイールに周期対称条件を適用した例を、それぞれ示す。

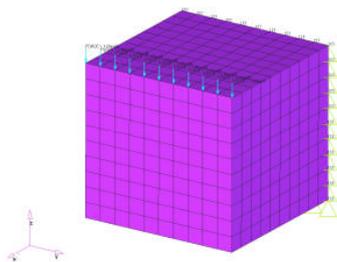


図10 立方体モデルと境界条件

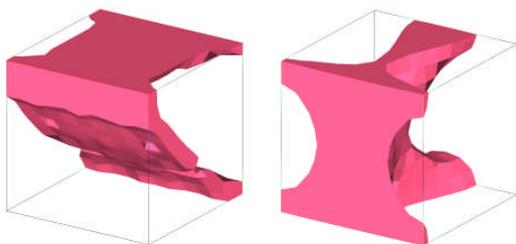


図11 2面対称条件の下でのトポロジー最適化結果
(左：対称性非適用、右：適用)

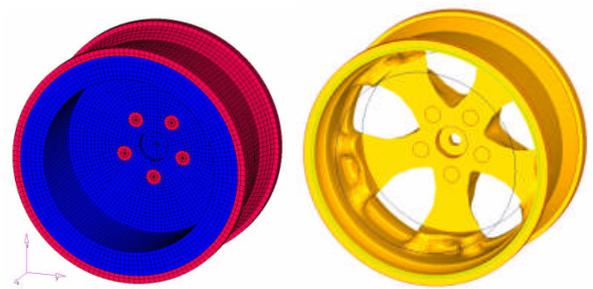


図12 タイヤホイールへの周期対称性の適用
(左：設計空間、右：トポロジー最適化結果)

6 パターン反復機能

パターン反復機能は、指定された複数の領域に同じトポロジー最適化結果を生成させる機能である。これらの領域はメッシュ分割が同一である必要はなく、また、大きさも異なっても良い。

図13および図14に、パターン反復機能を航空機の主翼内に配置されるリブに適用した事例を示す。各リブは配置場所や大きさが異なるため、トポロジー最適化においては異なる結果が得られるが(図14左)、パターン反復機能を適用することにより、全く同じ部材配置を得ることができ(図14右)、製作時の効率を高めることが可能となる。

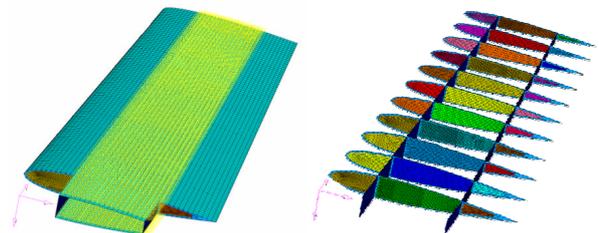


図13 航空機の主翼モデル
(左：外観、右：リブ(設計空間)と主桁)

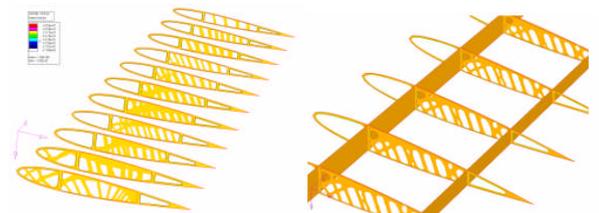


図14 トポロジー最適化結果
(左：パターン反復非適用、右：適用)

次に、一部に共通な構造を持つ異なる車種に、パターン反復機能を利用して同時にトポロジー最適化を適用した例を図15および図16に示す。一方の車種のある領域をマスターとし、共通の部分構造を持つもう一方の車種

の対応する領域をスレーブとして同時に解析することにより、両車種に共通で、かつ最適な構造を得ることができる。

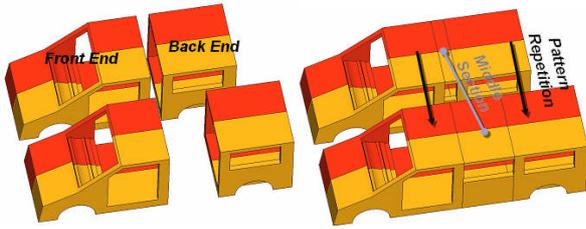


図 15 異なるモデルへのパターンング反復機能の適用

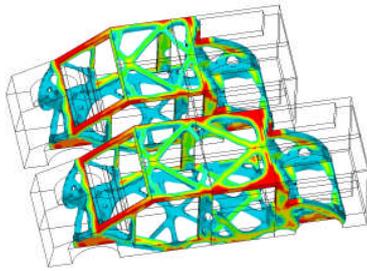


図 16 トポロジー最適化結果

7 押し出し成型制約機能

押し出し成型制約機能は、トポロジー最適化結果において、指定された線分（曲線も可）に沿って一定の断面形状を生成する機能である。もちろん、長手方向の境界条件や荷重条件が一定である必要はない。

図 17 と図 18 に、典型的な適用例を示す。

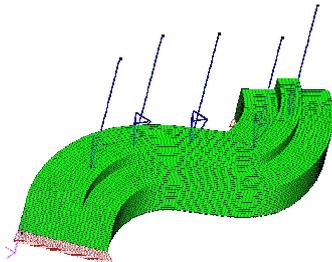


図 17 トポロジー最適化設計空間

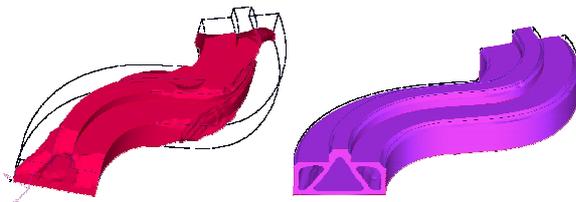


図 18 トポロジー最適化結果

(左：押し出し成型制約非適用、右：適用)

8 各製造用制約条件が生成する結果の比較

ここでは、これまでに説明した各製造用制約機能が構造の生成にどのように影響するかを二つの簡単なモデルを用いて比較検証を行う。

8.1 振りを受ける板におけるリブ形状の生成

図 19 に示す、下部に設計空間を配置した板に振り荷重を与え、トポロジー最適化により生成されるリブ形状が、製造用制約条件によりどのように変化するかを比較する。

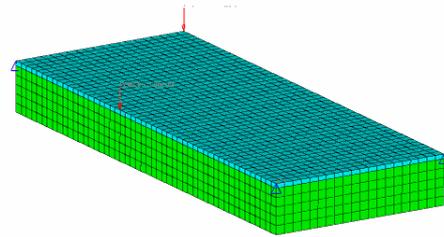


図 19 振りを受ける板

ここでは上面の板部分は非設計空間とした。板の3つの端点を固定し、残りの点に上下方向の荷重を与えている。なお、図 19 に示すように、非対称なリブ形状を生成させるために付加的な荷重も加えている。また、最適化は、体積制約（20%）の下でコンプライアンスの最小化を行っている。

このモデルに対して以下のような製造用制約条件をそれぞれ与えた。

- ケース 1) 適用なし
- ケース 2) 最小部材寸法制御
- ケース 3) 型抜き方向制御
- ケース 4) 型抜き方向制御+面対称 (XZ 面)
- ケース 5) 型抜き方向制御+面対称 (YZ 面)
- ケース 6) 型抜き方向制御+2面対称
- ケース 7) 押し出し成型制約

図 20 に、各ケースのトポロジー最適化結果の“裏側”の俯瞰図と平面図を示す。

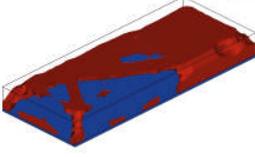
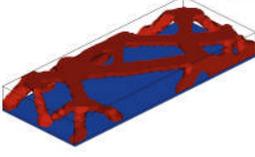
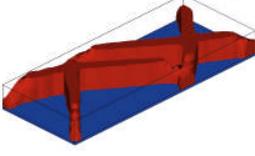
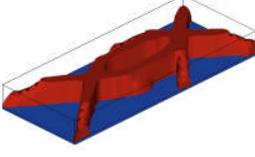
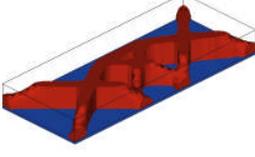
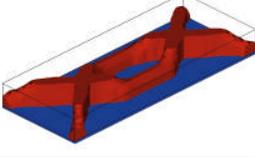
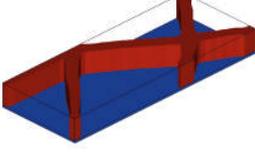
	俯瞰図	平面図
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

図20 各製造用制約条件に対するトポロジー最適化結果

このような捩り変形が主となるような構造物において予想されるように、ケース1および2では共に、設計領域の外縁に材料が集まっている。この二つの結果を比較することにより最小部材寸法制御機能の効果が分かる。図21に示すように、最小部材寸法制御を適用することにより中間密度の領域が激減し、結果が部材として認識することができるようになってきていることがわかる。

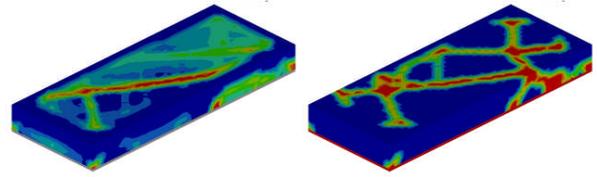


図21 最小部材寸法制御適用の効果
(左：非適用、右：適用)

ケース3以降は、型抜き方向制御もしくは押し出し成型制約を適用しているため、全て“リブ”が形成されている。図22は、型抜き方向制御と押し出し成型制約により生成されるリブの形を比較するために結果を再掲したものである。押し出し成型制約の場合、リブの高さを揃えるため、より多くの材料が必要となり、より単純な形を構成することが分かる。

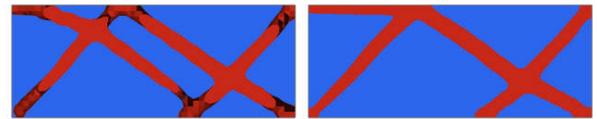


図22 型抜き方向制御（左）と押し出し成型制約（右）の結果比較

最後に、比較の対象とはならないが、このモデルにパターン反復機能を適用した例を図23に示す。ここでは、設計領域を3分割し、同じ形状を生成するように指定している。

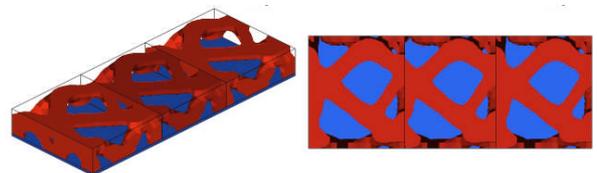


図23 パターン反復適用

8.2 コンロッドのトポロジー最適化

図24に示すコンロッドをイメージした簡単なモデルを作成し、von-Mises 応力制約の下、体積を最小化することによりトポロジー最適化を実行した。ここでも、いくつかの製造用制約条件を適用し、それぞれの影響を比較している。

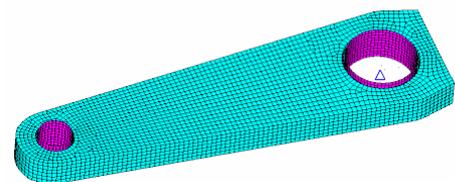


図24 コンロッドモデル

このモデルでは、シャフトとピンは剛体としてモデル

化し、コンロッドとの境界には一般化ギャップ要素を配置して接触境界を表現した。シャフトの中心は拘束し、圧縮および引張り荷重をそれぞれピンの中心に与えた。

ここでは、以下の製造用制約条件を適用し、トポロジー最適化結果を比較した。

- ケース 1) 適用なし
- ケース 2) 最小部材寸法制御
- ケース 3) 型抜き方向制御
- ケース 4) 押し出し成型制約
- ケース 5) 押し出し成型制約+フリー形状最適化

図 25 に、各ケースのトポロジー最適化結果の俯瞰図と平面図を示す。

	俯瞰図	平面図
1		
2		
3		
4		
5		

図 25 各製造用制約条件に対するトポロジー最適化結果

力の流れが元々明確であるモデルであったため、最小部材寸法制御の効果はあまりでていない。また、振りや曲げの現象をまったく考慮していないため、材料が外縁に集まることもなく、型抜き方向制御の効果もそれほどでていない。

押し出し成型制約を用いた場合は、型抜き方向制御と

は異なり、表面がへこむような形で削られることはないため、ケース 5 ではその効果が表現できるように、表面にフリー形状最適化を適用して表面形状の変化も考慮している。

蛇足ではあるが、参考に応力制約値の変化が結果形状にどのように影響するかも図 26 に示しておく。ここでは、ケース番号が上がるにしたがって制約値が厳しくなっている。

	応力制約値の結果に対する影響
1	
2	
3	
4	

図 26 応力制約値の変化による結果の変化

9 最後に

構造物の軽量化要求に対するひとつの答えとなると思われるトポロジー最適化において、実際の設計に活用されるための鍵となる機能である製造用制約条件機能について概観し、事例を紹介した。

トポロジー最適化結果は設定された条件に対して非常にセンシティブであり、条件を少し変更するだけで生成される形状が劇的に変化することも稀ではない。ここで示したように、製造用制約条件もその例外ではなく、設計の目的や最適化の条件に応じて適切なものを選択することが重要である。

参考文献

- 1) Altair OptiStruct, User's Manual v8.0, (2006) Altair Engineering Inc., Troy, MI
- 2) Zhou, M., Shyy, Y.K., and Thomas, H. : Topology Optimization with Manufacturing Constraints, Proceedings of the 4th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization, Dalian, China.

遺伝的アルゴリズムを用いた構造物最適化

萩原 あづみ¹⁾, 古井 佐土志²⁾

1)サイバネットシステム メカニカル CAE 事業部 PIDO 室, azu-hagi@cybernet.co.jp

2)サイバネットシステム メカニカル CAE 事業部 PIDO 室, s_furui@cybernet.co.jp

1 はじめに

構造最適化という、建築においては位相最適化問題というのが非常によく取り扱われる問題かと思われる。これらについては既にあらゆる所で論じられているので、

本論文では OPTIMUS による最適化の中で蓄積された、機械分野で用いられるアプローチを応用して構造物を 3 次元的に捕らえ、その位置や荷重といった情報に対する最適化に取り組むこととする。

2 ポールたわみ量解析

2.1 問題定義

大空間建築などで多用されるケーブルを仮定し、ポールを 3 方向からケーブルで繋げたモデルを考える。

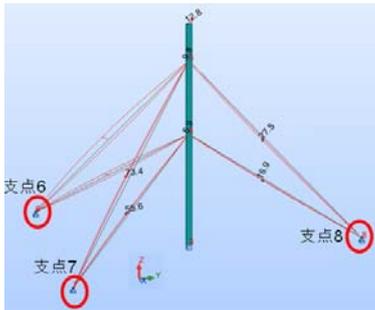


図 1. ポールおよびケーブル

2.2 入力条件

- ①ポール支店は完全固定
- ②ケーブル支店はピン固定
- ③建築条件により、支店 6 及び 7 は固定とする
- ④支店 6 及び 7 とポールを結ぶケーブルには初期張力が働いているものと仮定
- ⑤荷重は自重及び風加重を模擬した-Y 方向への等分布荷重

以上の値を入力値とし、ポールのたわみ量のある 3 次元建築・土木向け解析ソフトを用いて算出。

2.3 最適化条件

設計変数：

- ①支店 8 の位置 (X 座標)

②支店 8 の位置 (Y 座標)

③支店 8 とポールを繋ぐケーブルの張力

目的関数：ポール先端のたわみ量最小化

	初期値	min	max
X(m)	0.00	-2.00	2.00
Y(m)	9.00	8.00	10.00
張力(kN)	100.00	50.00	150.00

表 1.設計変数

3 最適化手順 -OPTIMUS-

表 1 の値を踏まえて最適化ツール・OPTIMUS を用い下記の手法を用いて最適値が得られる組み合わせを探索する。

3.1 実験計画法(DOE)/応答曲面法(RSM)

実験計画法は応答曲面モデルと共に利用され、指定された目的に対する設計変数の影響の中で、より多くの洞察を得るために不連続なデータを連続的な関数として近似する。応答曲面の作成は対象となる入力値と出力値の関係を推定した数学モデルで、代数多項式を推定の方法とした最小二乗法による回帰などがあり、2 次のテイラー級数を近似関数として使用した場合は次式ようになる。

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_i \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

\hat{y} ：応答曲面から算出される応答値

x ：設計変数の値

最小二乗法は、実験で得た応答値 y と \hat{y} で定義される残差の 2 乗を最小化する係数 β の組み合わせを決定する。この決定した係数 β を評価することで、直接的に

- ① 応答に対して最も影響の大きい設計変数は何か?
- ② 各設計変数は応答に対してどの様な寄与をするか?
- ③ 重要度の低い設計変数はどれか?
- ④ 複数の応答の同時最小化(最大化)は可能か?

といった情報が得られる。

3.2 遺伝的アルゴリズム(GA)

生物の進化過程の特徴である生物の多産性・自然淘汰(選択)・繁殖・突然変異をもとに発展したアルゴリズムである。1 点探索ではなく多点探索であり、確率的手法に

基づく。また、従来の数的手法と比較すると以下の利点を備えている。

- ①個体を対象にするため、各個体間に連続性をもつ必要がなく、離散変数を扱うことができる。
- ②解の改善のために変数の微係数を求める必要がない。このため、感度解析を行う必要もなく、構造解析で問題となる解析回数の削減が大幅に可能となる。

GA では染色体の固体から新しい個体へ移すために、交叉・突然変異・反転のような遺伝的な操作と共に、ある種の自然選択を用いる。適応度の高い染色体はより適応度の低い染色体より多くの子孫を生産し、交叉は2つのシングル染色体の有機体間における生物学的な組み換えを模倣することにより、2つの染色体の一部を交換する。初期の個体生成から次世代の生成への過程は次式の基本概念に基づく。

初期生成：λ 個の個体を持つ世代を生成

次世代の生成：

$$V_m^{(k+1)} = X_m^{(k)} + \alpha \cdot (X_{r1}^{(k)} - X_{r2}^{(k)}) \quad (2)$$

$m : 1, \dots, \lambda$

$r1, r2$ はランダムに選出

$r1 \neq m, r2 \neq m$

α : 重みファクター

4 実験結果

4.1 DOE/RSM

3水準要因計画を用いて27個のサンプルデータを取得。この値をもとに得たたわみ量の近似式 (RSM) は次式となった。

$$\begin{aligned} \text{たわみ量} = & 97.54 - 3.46e^{-14} X - 10.17Y - 73.14F + \\ & 38.48X^2 + 2.931e^{-14} XY + 4.707e^{-14} XF + 1.916Y^2 - \\ & 1.7336YF + 16.11F^2 \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式により得た設計変数と目的関数の3次元プロットを図2に、それぞれの係数をプロットした各設計変数の寄与度を図3に示す。寄与度を見ると、本問題では張力 F と Y の位置がたわみ量に影響していると推測される。

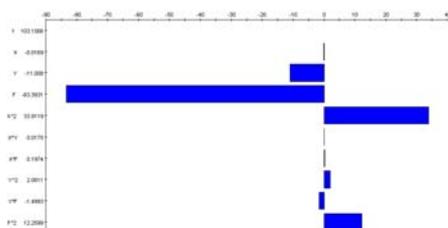


図 2.たわみ量に対する寄与率

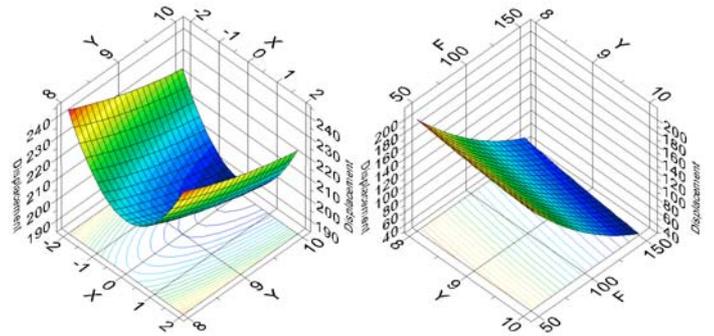


図 3.応答曲面 3次元プロット

4.2 最適化計算結果

遺伝的アルゴリズムを用いて最適化計算を行った結果、得た最適値を表 2 に示す。なお、最適化計算時の繰り返し演算は(3)式によって行った。

	初期値	最適値	CAE結果
X(m)	0.00	0.00	0.00
Y(m)	9.00	9.93	9.93
張力(kN)	100.00	148.23	148.23
たわみ量(mm)	1055.13	66.30	67.20

表 2.最適化計算結果

初期値での計算結果に対して最適値ではたわみ量が94%低減され、ポールのたわみ量が最小となるケーブル位置及び張力が抽出された。また、最適値での計算結果はあくまでも応答曲面による推測値のため、解析ソフト側に最適値を入れて計算したところ、たわみ量は0.9(mm)の誤差範囲内に収まり、精度の高い応答曲面が作られた事も証明された。

5 まとめ

今回は DOE の段階では CAE,最適化を実行する際には RSM を使用し、毎回の計算では CAE を起動することなく短時間で精度の良い最適解の探索を行うことができた。このように構造物の最適化に関しても今まで機械的なアプローチに多用されていた手法を取り入れることで、効率的な設計・最適な設計に繋がる感触を得た。

今回は簡易モデルでの取り組みであったが、今後は更に複雑な形状の構造物を3次元的に捕らえ、複雑な解空間に対して大いに遺伝的アルゴリズムを活用できるテーマに取り組む所存である。

参考文献

- 1) 山川宏：最適設計ハンドブック,朝倉書店,2003

<http://www.cybernet.co.jp>

■形態創生コンテスト 2006

■形態創生コンテスト2006

□ コンテスト概要

1. コンテストの主旨

構造形態創生のアルゴリズムや考え方を用いた、「新しいかたち」や「独創的なアイデア」を評価するコンテストを実施しました。様々な分野の多くの人に参加して頂き、構造形態創生のおもしろさや可能性を感じてほしいというのが、開催主旨です。そのため、コンピュータプログラムによらない方法でかたちを創生するアイデアも可能としています。

2. 審査基準

審査は、主に次の二つの観点で行いました。

フェーズ1；創生された形態（かたち）の独創性、合理性、美しさ

フェーズ2；形態創生プロセスのアイデア性、独創性

3. 課題（テーマ）

課題は以下の2テーマとし、自由に選択できるようにしました。

【テーマA】；「アーケードの構造形態を創生する」

【テーマB】；「都市機能を活性化させる『構造のかたち』を考える」

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 2006」ホームページ <http://www.aij.or.jp/aijhomej.htm/WG> に掲載しました。

4. 審査委員（敬称略，50音順）

審査委員長 ；大森博司（名古屋大学大学院）

審査員 ；川口 衛（川口衛構造設計事務所）

斎藤公男（日本大学）

元結正次郎（東京工業大学）

5. コンテストの経緯

2006年5月20日 ；建築雑誌2006年5月号に応募要項掲載

2006年6月15日 ；応募要項に関する質疑締め切り

2006年7月24日 ；応募エントリー締め切り

2006年9月25日 ；応募締め切り

2006年10月3日 ；一次審査（日本建築学会会議室にて）

2006年10月5日 ；一次審査結果の通知

2006年11月15日 ；コロキウム構造形態の解析と創生2006にて二次審査および表彰

6. 応募状況

エントリー数 ；12件

作品提出数 ；6作品

エントリーNo	タイトル	所属	氏名（○は代表者）
2	ボロノイ分割を用いた形態創生	大林組東京本社設計本部設計部 構造設計グループ	○中村吉秀 渡辺哲巳 森洋一 山中昌之
3	カテナリーを基にした水平力に 対抗する形態の模索	大同工業大学大学院 工学研究科建築学専攻	○古田寛生 増田卓朗
6	セルオートマトンを利用した 創発的形態創生	東京農工大学工学教育部 情報コミュニケーション工学専攻	○佐藤俊介
7	「創」～進化による可能性～	鹿児島大学工学部建築学科	○坂中玲子 堀切秀作 工藤玲 ウ・レ・ビ・ック・フーオン
11	ハニカムエアクッション壁の 形態創生について	横浜国立大学大学院工学府 社会空間システム学専攻建築学コース	○平嵩雄 櫻井佑美
12	自然と調和するアーケード	福井工業大学工学部 建設工学科建築学専攻	○漆崎西仁

□ 講評

(本講評は1次審査の際の審査委員会での意見を集約、構成したものである)

全体として、応募作品数は少なかったものの、予想しなかった提案が多く、非常に喜ばしいことであった。学生による提案が大半を占め、自由な発想、アイデアが感じられた。一方で、提案シートに、提案者の独創的なアイデアがどこであるか、明解に示されていないのは残念であった。

応募者の方々への参加に感謝すると共に、今後の益々のご活躍に期待する。

エントリーNo2 ボロノイ分割を用いた形態創生 (入選作品)

ボロノイ分割の手法そのものは、古くからある手法で特に目新しくないが、立体的な構造に使うというアイデアは非常に面白い。特にツリーは、さらに発展できる可能性を含んでいる。

本提案は、ボロノイ手法で無作為に得られた形態を初期形態として、応力条件に適合するような修正を加えるという手順をとっているが、最初から応力を制約条件として形態を創生するような提案も考えられよう。

エントリーNo3 カテナリーを基にした水平力に対抗しうる形態の模索 (入選作品)

荷重条件や構造安定性を考慮しながら、形態を決めていく手順が丁寧に描かれていて、わかりやすい。応募者の構造設計に対する理解が感じられる。ただ、カテナリーの採用や最終的なアーケードの千鳥配置などは設計者が恣意的に決定しており、そこに偶発性のある規則が考慮できると面白い。

エントリーNo6 セルオートマンを利用した創発的形態創生

形態創生のプロセスは丁寧に書かれているので、本コンテストの課題であるアーケード他の具体的な形態の例を提示して頂けると、本手法の有効性がより明確に見えてきたのではないかと思う。

セルオートマトンの状態遷移ルールなどは、形態に及ぼす影響を見越して、設計者が選定していくことが重要であろう。

エントリーNo7 「創」～進化による可能性～ (入選作品)

形態創生の手法やデザインへの適用方法について簡潔にまとめられており、パースで鮮やかに描かれたアーケードの創生過程がよくわかる。ただ、創生された梁部分だけ見れば軸力系であるのに、それを支持する柱部分は曲げ系として処理されているのは残念である。

今回はアーケードの梁への適用のみであったが、屋根のデザイン(骨組)や柱をも含めて一体的に適用することで、より合理的で魅力的な形態が得られたのではないだろうか。

エントリーNo11 ハニカムエアクッション壁の形態創生について (入選作品)

実験的に形態や模様を創出する手法で、偶然性にも期待できて、アートとしても非常に面白い。ライティングを施すアイデアも面白い。エアクッション壁のせん断強度の試験も行なわれており、非常に現実味もある。そのせん断強度をうまく利用できる形態の提案(ストーリー)ができると、より良いものになるであろう。

エントリーNo12 自然と調和するアーケード

乱数を用いた梁の架け方の検討であるが、アルゴリズムに関する説明が少なく、内容が伝わりきれていないのが残念である。アルゴリズムに基づく形態と構造的な合理性との関係なども今後、検討されると良いと思う。

日本建築学会

主催： 構造委員会 シェル・空間構造運営委員会 空間構造における計算機応用小委員会

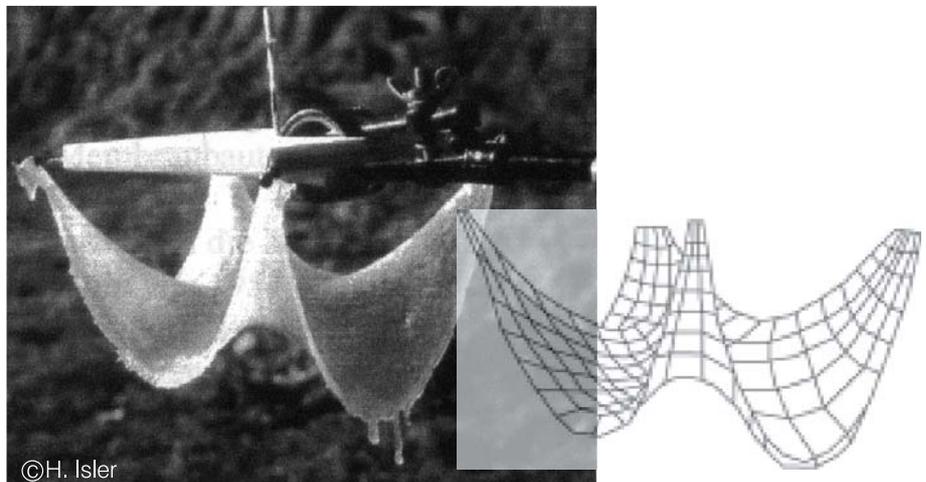
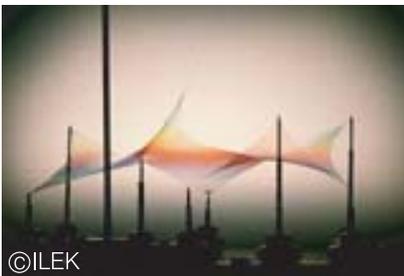
共催： 構造委員会 応用力学運営委員会 構造形態の創生と最適化小委員会

形態創生コンテスト 2006

コロキウム

構造形態の解析と創生2006

<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s17/>



【テーマA】 「アーケードの構造形態を創生する」

【テーマB】 「都市機能を活性化する『構造のかたち』を考える」

■審査員

審査委員長；大森博司（名古屋大学大学院）

審査員 ；川口 衛（川口衛構造設計事務所）

齋藤公男（日本大学）

元結正次郎（東京工業大学）

■表彰

優秀作品（若干）

入選作品（若干）

審査委員会により優秀作品を決定します。入選作品、優秀作品には同コロキウムの席上で賞状を授与します。これらの作品は「コロキウム構造形態の解析と創生2006」論文集に収録し、コロキウム会場に掲示するほか、「建築雑誌」および日本建築学会シェル・空間構造運営委員会ホームページに掲載する予定です。

■審査基準

1；創生された形態（かたち）の独創性，合理性，美しさ

2；形態創生プロセスのアイデア性，独創性

■応募資格

日本建築学会個人会員（準会員を含む）または会員を代表者としたグループとします。

■応募エントリー

応募希望者は代表者の氏名・所属・電話番号・FAX番号・E-mailアドレスをコンテスト事務局E-mailアドレスまで申し込んでください。

■提出期限

2006年9月25日（月）郵送の場合は当日の消印有効

■詳細は、上記インターネットホームページをご参照ください。

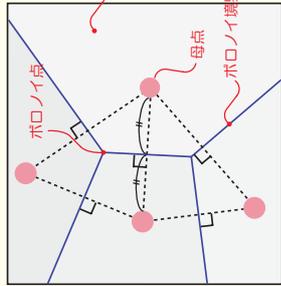
■コンテスト事務局E-mailアドレス； collo-contest@aae.kagoshima-u.ac.jp

ボロノイ分割を用いた形態創生

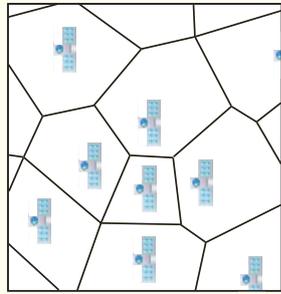
ボロノイ分割とは？

ある距離空間上の任意の位置に配置された複数個の点（母点）に対して、同一距離空間上の他の点がどの母点に近いかによって領域分けされた図のことである。特に二次元ユークリッド平面の場合、領域の境界線は、各々の母点の二等分線になる。
 ～出典：フリー百科事典「ウィキペディア」～

支配領域に分割することから、学区の決定などの都市計画分野のほか、施設の最適配置・商圏分析などにも用いられる。母点の配置を変えることで、間接的に領域を操作することができる。



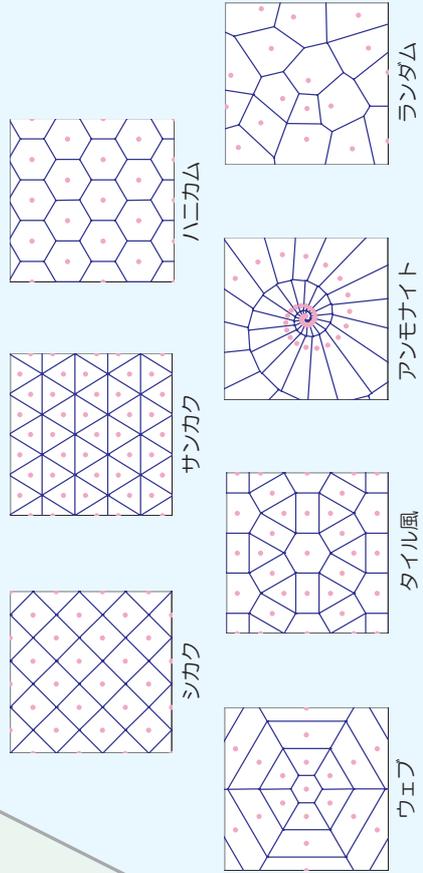
ボロノイ分割の定義



学区分割のイメージ

ボロノイパターン

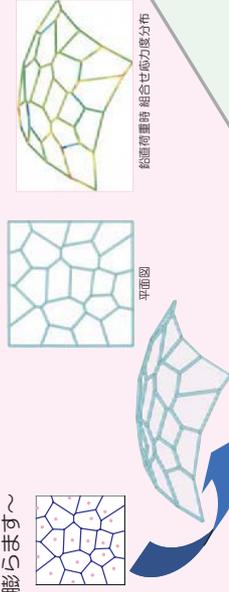
ボロノイ分割により様々な幾何学的図形が生成される。規則的な母点配置により、規則的なパターンが生まれる。



ボロノイでストラクチャ！

ボロノイ分割により生成された平面図形を応用することで、構造物の形態創生を行う。ボロノイ分割の母点は、トポロジーを決定するための仮想的な点になる場合と、節点として現実的な意味を持つ場合がある。

曲面形状 ～膨らます～



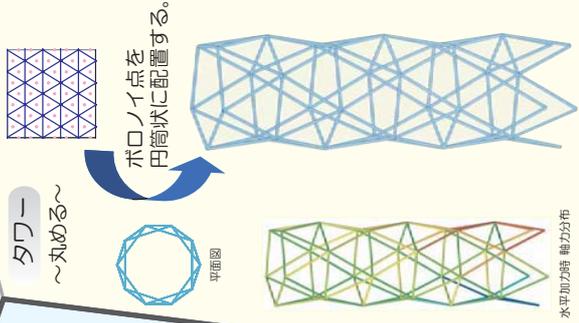
ボロノイ点を曲面上に配置する。

ツリー ～森をつくる～



母点に幹を立て、ボロノイ点に向かって枝を生やす。

タワー ～丸める～



ウエブ

タイル風

アンモナイト

ランダム

水平加わった時 軸力分布

平面図

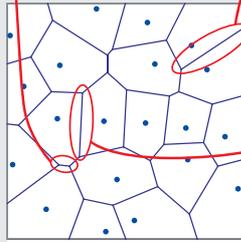
立面図

ボロノイ分割を用いた形態創生

構造的合理性の向上

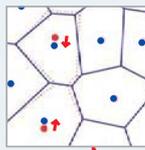
創生された形態における部材長を調整することで構造的合理性の向上を図る。部材長変更のルールとして、以下の3つを適用する。

初期形状



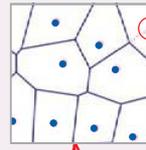
部材長を長くする時

ルール1. 部材を定義している母点を近づけることで、部材長を長くする。



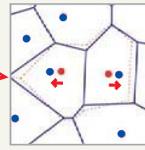
外周に取付く部材長を短くする時

ルール3. 部材が外周に取付く節点に母点を設けて、部材長を短くする。

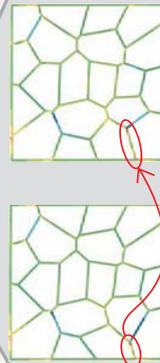


部材長を短くする時

ルール2. 部材を定義している母点を遠ざけることで、部材長を短くする。

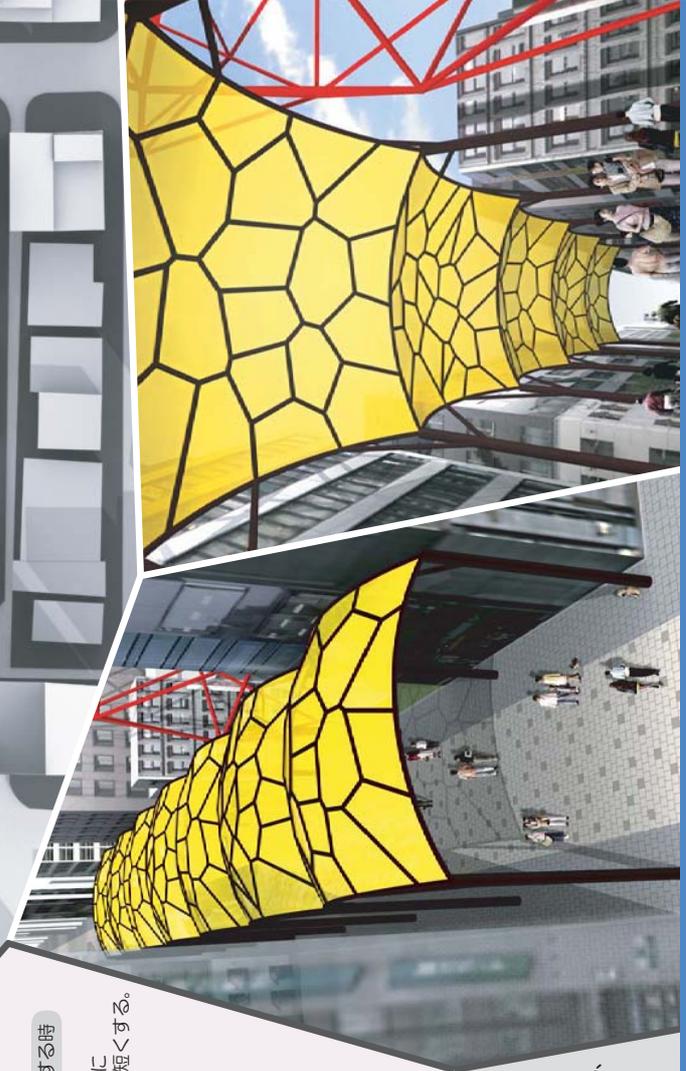
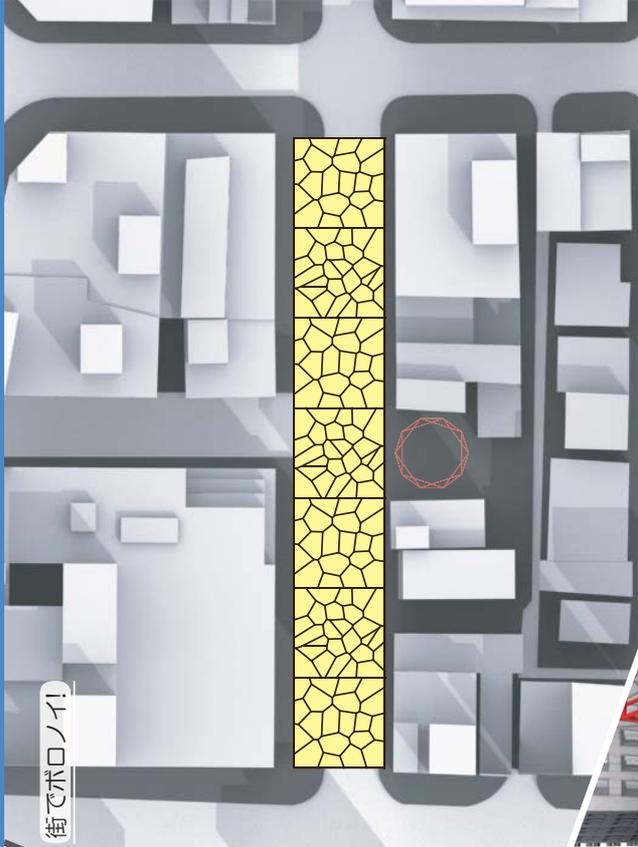


応力解析例



上記ルール1を適用して最も応力の大きな1部材の部材長を変更して解析を行ったところ、応力の最大値は減少した。しかし、全体の力の流れが重要な要素であるので、当該部材のみではなく他の部材長の調整を行うことで、さらに応力の低減が図れる。

街でボロノイ!

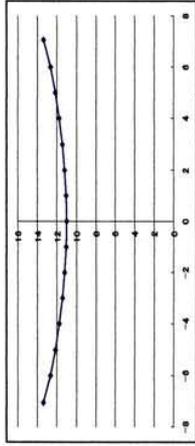


カテナリーを基にした水平力に対抗しうる形態の模索

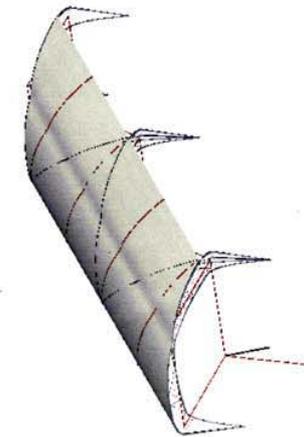
大同工業大学 古田寛生 増田卓朗

主旨: 合理的な形態の一つであるカテナリーを基にして、新たな形態を模索する。従来の鉛直荷重に対して合理的なカテナリーに手を加え、水平力を考慮した形態を求める。またケーブルを、柱が負担するアーチのストラット処理と、水平面剛性の補剛の両者の役割を果たすように配置する。

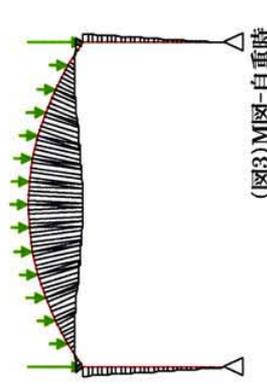
基本となるカテナリーの形状を求める際にフレーム同士を補剛、かつアーチのストラットを相殺する役割を果たす水平ケーブルを張る。自重に対して求められる形状(図1)を高さ6mの柱の上に載せアーチとして都合の良い格好にし、基本軸策形状とする。(図2)図2の時点での柱にかかるせん断力は1500Nであったので、柱1本に対して表裏2本のケーブルを取り付けることとしてケーブル1本あたりの張力を860Nと設定した。



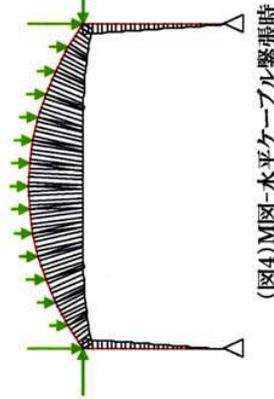
(図1)



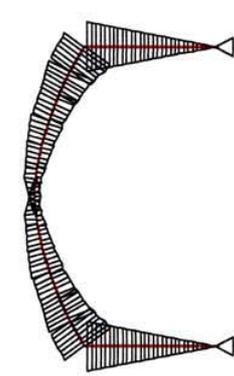
(図2)基本軸策形状



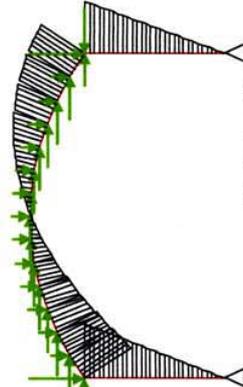
(図3)M図-自重時



(図4)M図-水平ケーブル緊張時



(図7)

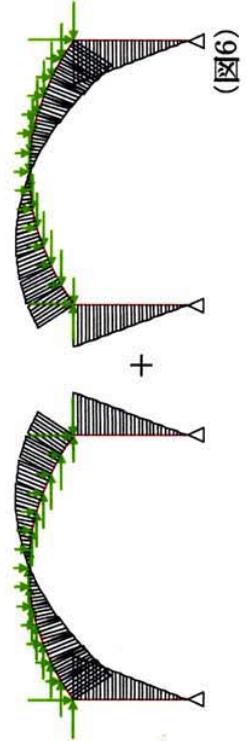


(図5)M図-地震力



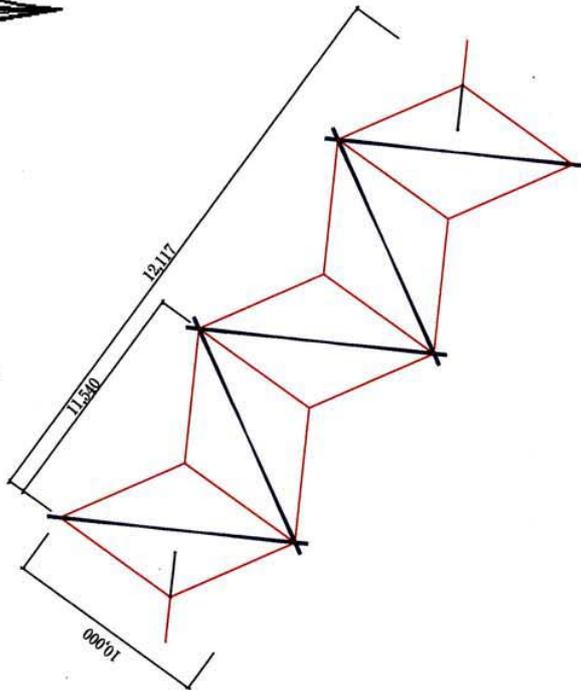
(図8)フレーム

基本軸策形状に自重をかけた場合(図3)、ケーブルを張った場合(図4)、地震力をかけた場合(図5)の曲げモーメント図を求め、地震力に対する曲げモーメントにはフレームのせいを変えらることで合理的に抵抗できるように考える。図5では地震力が一方向しか考慮されていないので反転させて重ね合わせる(図6)。これより各部の曲げモーメント分布の包絡線(図7)を求め、この結果よりフレーム(図8)の形状を得る。



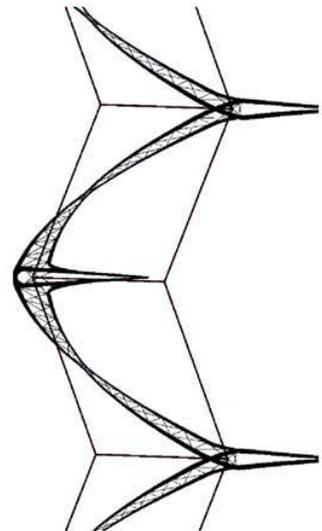
(図6)

既存のアーケードは並列にフレームが配置されている場合が多く、この場合桁行方向の力に対して必ずしも強いとはいえない。この状況を回避する目的で、フレームの柱を千鳥配置とし、水平面の剛性をケーブルで補剛する方法を試みる。(図9) (図10) 屋根面の面内剛性の向上とストラスト処理といった構造上の役割とともに、従来のアーケードのイメージを払拭するような視覚的な新鮮さとインパクトを与えることも狙いである。

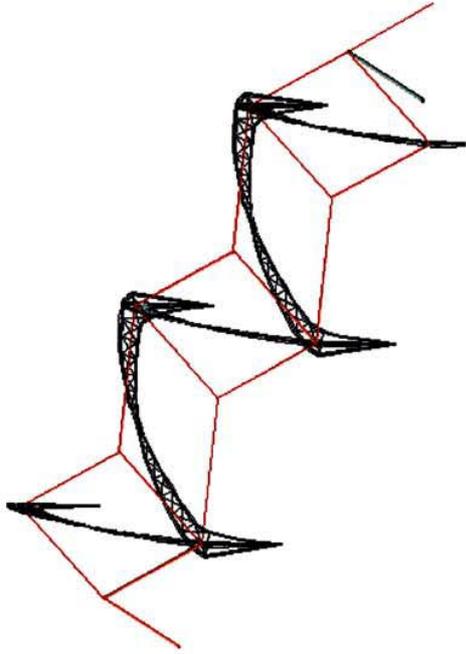


(図9) 屋根伏図

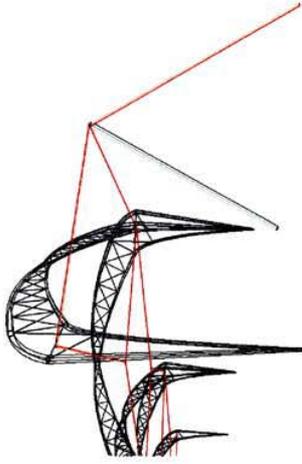
ケーブルの反力処理はアーケード内においては地面に降ろさず水平ケーブルとしてフレーム相互で自己完結させる。(図11) ケーブルの反力処理を地面に依存しないので内部空間及び歩行スペースの確保が可能。



(図11)

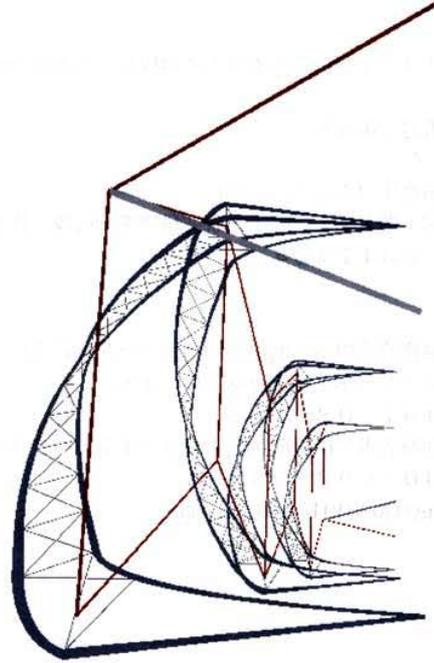


(図10)



(図13)

アーケード端部ではケーブルの端を地面に留めるが、そのまま降ろすとアーケードのエントランスやアプローチ部分の通行の妨げになる恐れがある。そこで傾斜した柱を介して地面へ降ろす。歩行空間を確保すると共に意匠的にもアーケードのファサードとエントランスに変化を付加する意味合いも兼ねる。(図12) (図13)



(図12)

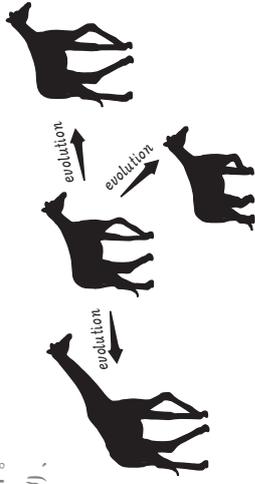
参考文献：藤井大地、Excel で解く構造力学、丸善
使用プログラム：Excel で解く構造力学付属プログラム

創

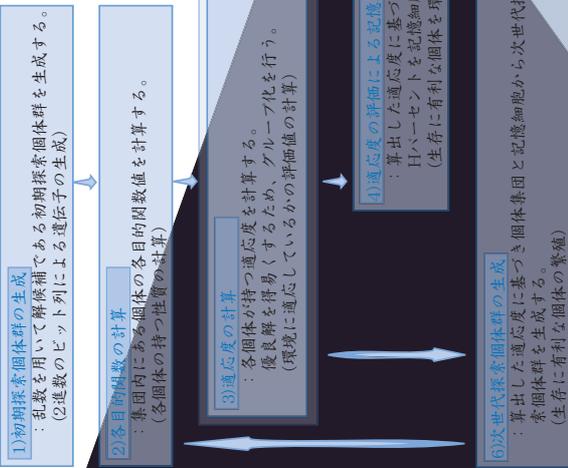
～進化による可能性～

地球上に現存する生物。
それは環境に適応すべくして生じた進化過程の一片。
種の保存を担う進化には多くの可能性を秘めており、
そこには多種多様な生物の存在が許されている。
生存競争・自然淘汰の結果が
合を生きさしている。

力学的な観点による目標に沿って
構造物は進化し続け、
結果、力学的環境に適応した形態を生成し出す。
多種多様な形態の選択・創造により、
構造物の形態創生を図る。



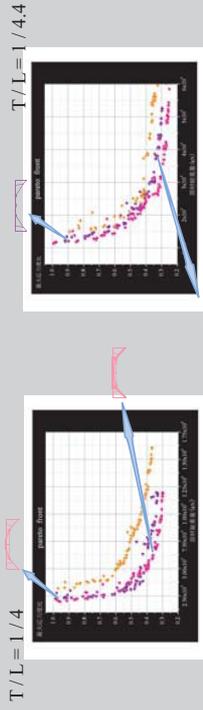
ISGA Algorithm



Plan
構造物の設計において、
厳密な大域的最適解だけでなく実現
可能な複数の解候補が設計者に豊かな
選択肢を与えらる。即ち、大域的最適解、
局所的最適解を含む、比較的高い
解(優良解)が求められている。
多様性のある解探索ができる
アルゴリズムにより骨組部の優良化を
行い、選択・創造することとて
アーケードの形態創生を提案する。

設計変数は部材特性と節点位置に関する情報を未知量ベクトル A, R とし、
目的関数は部材総重量、最大応力度比の最小化を図る多目的問題として扱う。
制約条件: $A^L \leq A \leq A^U, R^L \leq R \leq R^U$
目的関数: $F(A, R) = \{f_1(A, R), f_2(A, R)\} \rightarrow \min$
 $f_1(A, R)$: 部材総重量, $f_2(A, R)$: 最大応力度比

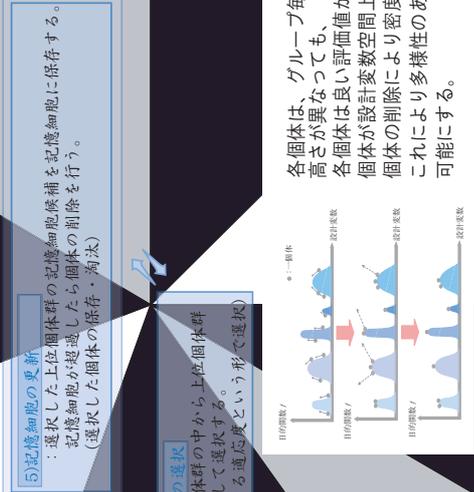
目的関数である部材総重量・最大応力度比はトレードオフの関係にあるため、
優良解はパレートフロントと呼ばれる超曲面を構成する。
ここでは形状の獲得を目標としているため、
比較的得易い上路橋梁モデルを初期形状に計算を行うものとする。



パレートフロントは各々特性を持ち、類似した形状を示す。

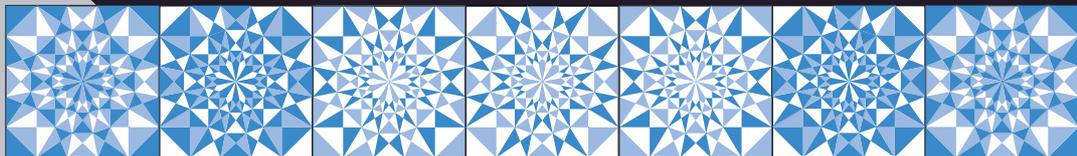


パラメーターや初期形状の設定を変化させることで
種々のパレートフロントの探索を可能とする。
得られた形状の中から任意に選択し、骨組部を創造する。

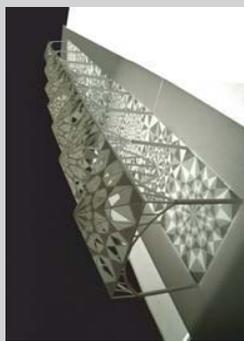


各個体は、グループ毎に集団で高い方向に登る。
高さが異なっても、
各個体は良い評価値が得られ、登り続ける。
個体が設計変数空間上で一ヶ所に集まったら、
個体の削除により密度を下げる。
これにより多様性のある解を捉えることを
可能にする。

ISGAのアルゴリズムは下記の文献を参考とする。
本間俊雄, 野端憲太: 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 (投稿中)
堀切秀作, 本間俊雄: GA系解法による解の多様性を考慮した構造
形態の創生 (コロキウム構造形態の解析と創生2006 発表予定)



屋根のデザイン



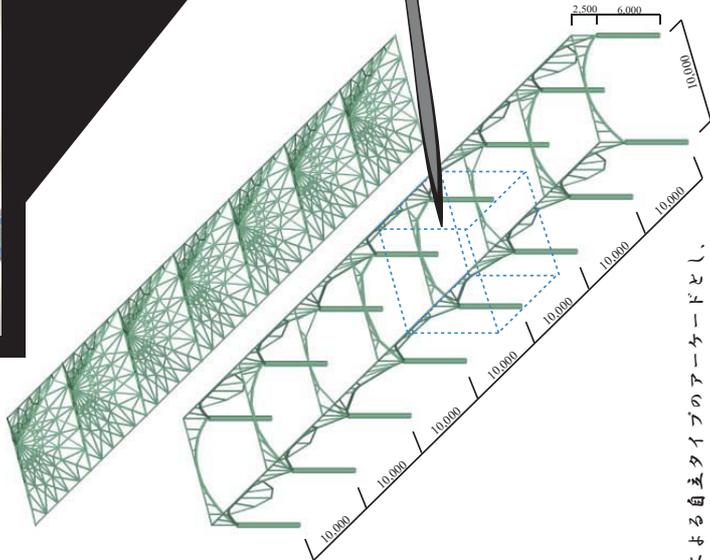
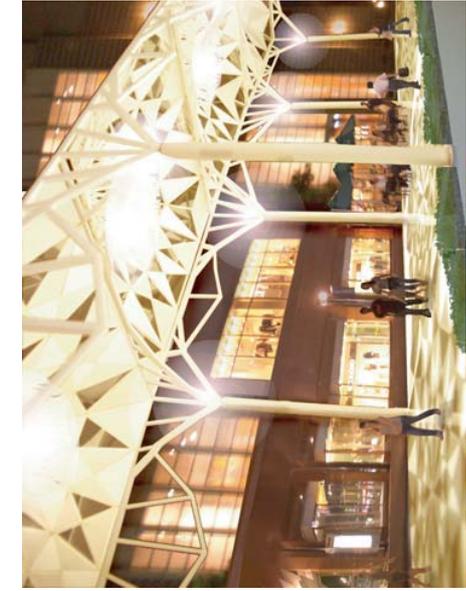
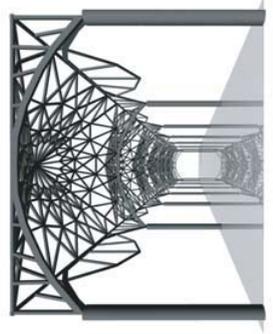
デザインにあたって・・・

GA手法の一つであるISGAから得られた数種の梁形状を用い、ダイナミックかつ繊細なアーケード空間を提案する。

70mにわたるアーケードは、中央に向かうほど空間をより広く見せる効果を持つ。入口付近の梁にはインパクトのあるふくらみ型の形状を用い、梁間、指行方向とも、徐々にシヤープにするこことして中央部ほどすきりとした空間となる。

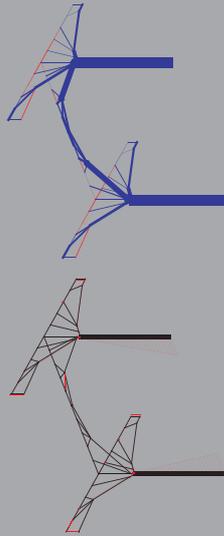
また、屋根部において、使用する屋根材（透明ガラス・すりガラス・陶磁）の割合を変えて徐々に採光を多くし明るさが増す。

梁形状の多様性と、各屋根・梁のデザインの違いを組み合わせることにより、シンボルがながらも変化に富んだアーケードを創出する。



柱による自立タイプのアーケードとし、梁はピン支持で柱と結合する。また、地震荷重は工キスパンジョイントにより、隣接する建物には力を流さない。

自重・風荷重(吹上げ 1000 N/m^2)において・・・



青：引張力
赤：圧縮力

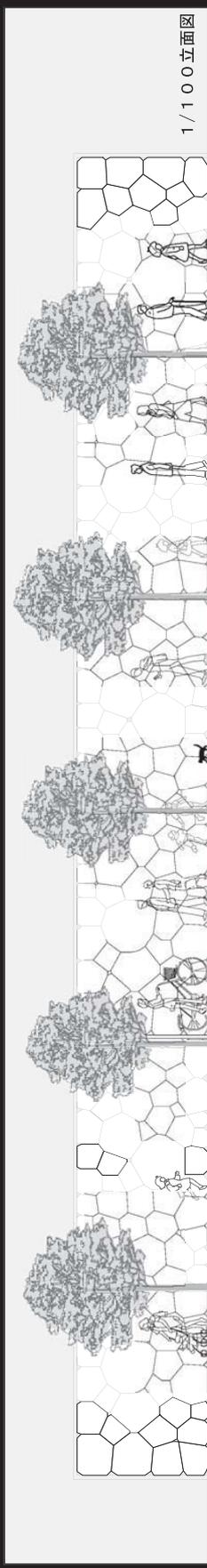
柱部は応力の負担が大きく、屋根(梁)のアーチ部は軸力に依存しているためモジュールは小さい。柱材にはコンクリート充填鋼管を、梁材には一般構造用炭素鋼管を用いて断面を決定し、地震荷重(自重 $\times 0.2$)、積雪荷重(700 N/m^2)においても同様に解析を行う。

多様なアーケード構成の魅力



ハニカムエアクッション壁の形態創生について

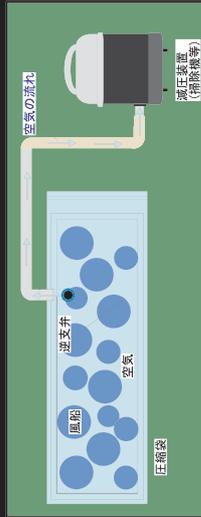
ハニカムエアクッション壁とは空気とやわらかい膜で構成され、弾力のある、親しみのもてる壁である。壁の表面にみられる形態には1つとして同じ形がなく、様々な形が密接にそして複雑につながり、どことなく有機的である。この形態から放つ光は、都市に見られる単調で人工的なものとは異なり、やわらかく変化のある光であり、人々に癒しと刺激を与え、都市に表情をもたせる。



□形態創生プロセス（1/10模型制作）

「圧縮袋の中に木枠を入れ、

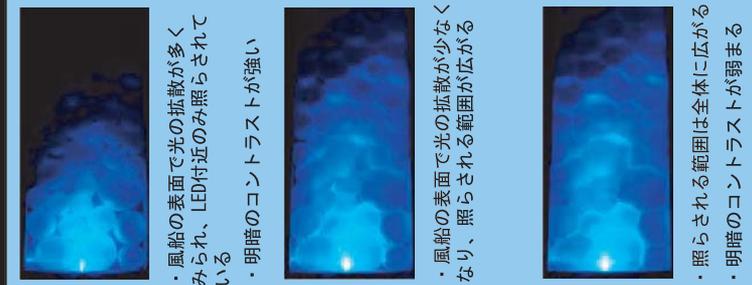
その中に風船を適当に配置し、
減圧を行なう」



図A 壁立面の変化



図B 壁表の変化



図C 光の変化

□形態創生の考え方

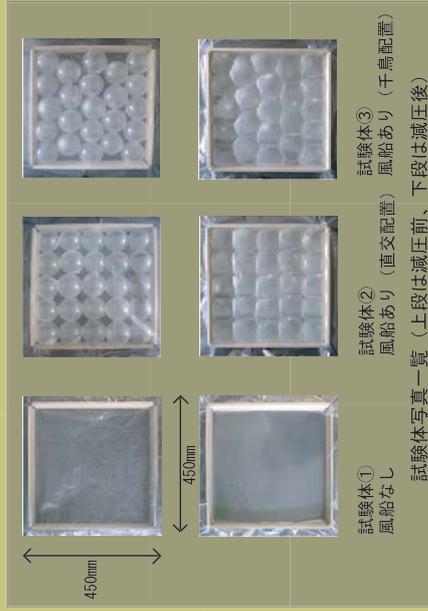
袋の中の風船は周りの空気が減圧されることにより、隙間を埋めていくように変形し、全体の形態を創りあげる。そうしてできた各々の風船の形は、周りの袋や風船の大きさ・位置関係の影響を受けながら、それぞれの最適な形態になっている。

□構造的合理性

- ・圧縮袋内の減圧より風船の差圧が上昇するが、風船は圧縮袋および隣接する風船からの収縮力を受けて応力が抑えられるため、破裂の危険が少なくと考えると考えられる。
- ・風船の圧密によって接触面積と接触圧が上昇し、風船間のせん断剛性（ずれ抵抗力）が高まる。

せん断変形実験

4辺をピン接合した木枠を圧縮袋にいれ、中に風船を配置し、空気を抜き最大限に減圧した試験体を試験機に設置し、荷重と変位の計測を行なった。



千鳥配置の千鳥配置の千鳥配置



木枠の中に風船を密に配置することで、風船を配置しない試験体に比べて高いせん断強度が得られた。また、風船の配置の仕方によりせん断剛性の違いがみられ、特に千鳥配置の試験体ではハニカム構造を形成しているため、高い強度を發揮した。

風船単体の強度は低いですが、風船同士が互いに密接に結びつき、影響し合う状態にすることで、全体として高い強度を發揮！！

形態創生コンテスト 2006

セルオートマトンを利用した創発的形態創生

東京農工大学 情報コミュニケーション工学専攻 佐藤俊介

1 提案方法のコンセプト

本方法では、セルオートマトンを利用し、従来のような最適(または準最適)な形を導くのではなく、新奇的なイメージを与えて、デザイン形成の発想を支援するプログラムを提案する。

建築における形態創生の研究の多くは、応力計算などを行なうことによって実現しているが [1]、この場合、力学の原理に従った形態しか生み出されない。よって、力学的にバランスの取れた左右対称の形のように、ある程度決まった形が導出されることが多くなってしまふ。

そもそも、セルオートマトンなどの考えの基になっている「創発」とは、「新しい機能や形質、行動を示す秩序が形成されること」[2]を示しており、新しいイメージを導くことに有効な方法であると考えられる。これらは、松岡 [3]らの研究においても検証されている。

そこで、ランダムな状態から秩序ある形を導くセルオートマトンの特徴的な動作を利用して、形態創生を行なうのが提案する方法である。プログラムでは、状態遷移ルールを多数決ルールとすることにより、一定の要素が集まったユニットを導き、それらが構成されることにより全体が形成される。

2 設定条件

セルオートマトンの状態遷移ルールは、多数決ルールを適用している。多数決ルールとは、注目セルの周囲に1が多ければ1に、0が多ければ0に変化するルールである。同じ状態のセルが集まることにより、形態の要素がただ無秩序に拡散するのではなく、ある程度の大きさのユニットを形成することができる。ユニットがあることによって、形態のイメージがしやすくなっている。

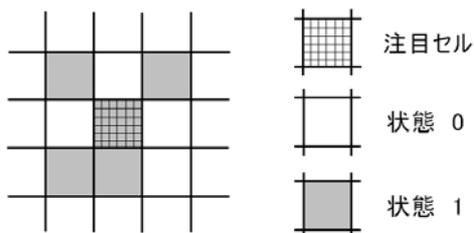


図 1: 多数決ルール

図 1 は、二次元セルオートマトンの例であるが、これをノイマン近傍における、多数決ルールを適用した場合、注目セ

ルの次の状態は0(要素なし)となる。提案しているプログラムでは、三次元のセルオートマトンを実行しており、例と同じくノイマン近傍の多数決ルールによって状態を決定している。

なお、セルの初期状態は、設定された空間内全体で、ランダムに決定されているが、この状態が決定されるランダム確率によって最終形態が大きく変化する。よって、この確率を調節することで様々な形態を導くことが可能となる。次より示す実行例では、40%の確率で要素を発生(状態1)させている。

3 創生された構造形態

プログラムを実行して導かれた構造形態の例を次の図 2 に示す。

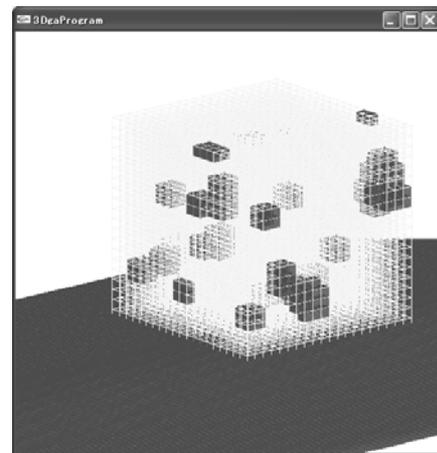


図 2: 実行結果の例

図 2 の形態は、多数決ルールによって形成された要素のかたまりであるユニットが複数現れている。この実行結果の状態では、そのまま実際の建築として実現させるのは難しいが、この形態を基にデザインを考えることにより、発想が支援される。ユニット間を頭の中でつなげてみたり、少しずらして考えてみたりすることによって、より良い形態のイメージが導かれる。もちろん何度でも試行できるので、ユーザが適切でないと判断したら、プログラムの実行を繰り返せばよい。

また、最終的なユニットの数やユニットの大きさなどに制限を与えれば、様々な形態をとる可能性がありながら、よりユーザの条件に合ったデザインを導くことが可能である。

4 形態創生のプロセス

次に形態創生のプロセスを示す。図3から図6の四枚は経過順に並んでいるが、tの値は、ステップ数を示している。それぞれのセルは、ステップごとに状態を遷移させている。

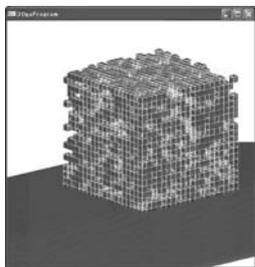


図3: t = 0

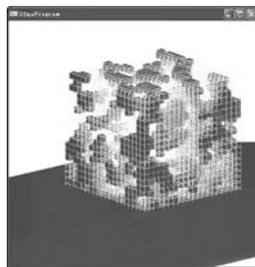


図4: t = 2

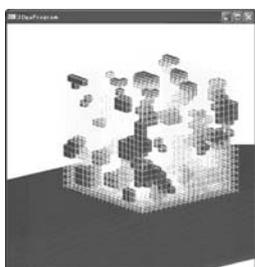


図5: t = 4

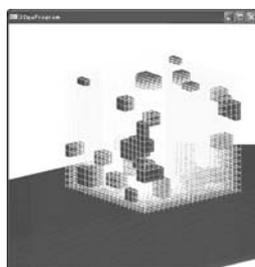


図6: t = 8

図3はランダムに決定された初期状態である。その後、ステップが進むにつれて、全体的には要素が減り、いくつかのユニットが残り、形態を構成しているのがわかる。実行した結果、t=8以降は状態遷移が収束することがわかった。初期状態の要素の発生確率が40%と同じことから、図2とユニットの数などはほぼ同程度だが、その配置には違いが見られる。このように同じ設定でも、異なる形態を提示することができ、よりユーザーの好みに合ったものを導出することができるのである。

5 提案方法の有効性

実行結果からもわかるように、本プログラムによって導かれる形態は、従来のものとは異なり、新奇的なデザインを提案している。

また、あらかじめ考えている形態のイメージが全くないときだけではなく、例えば、要素の大きさはこれくらい、とか、要素の数や距離はこれくらい、といったあいまいなイメージがあるときに、それをプログラムの条件に反映することができる。その条件を満たすまで試行を繰り返せばよいのである。このように、はじめはランダムのみの一見建築の形態とは結びつかないデザインからでも、そこからイメージを膨らませることで新たな条件を加えていき、より良い形態を導いてゆくことが可能である。

はじめに詳細な条件を設定してしまうと、一定な形態しか

導出されなくなってしまうので、新しい形態を導くことが難しい。まずはイメージを先行させ、それを固めてから条件を加えることによって、創発の特長を活かした面白くて新奇的なデザインが創生できるのではないかと考えている。このように、自らのイメージによって、ユーザーがプログラムの設定を変えながら設計することは、「情報化時代の建築設計のあり方に関する提言」[4]の「都合の良い編集をしない、デフォルトを信じない」や「目的地のイメージを持つ」にも合致している。プログラムについての理解がなければ設計することはできないし、コンピュータの表示する形態を信じ込むのではなく、ユーザーの求める形が表示されるまでユーザー主体でコンピュータを利用するからである。

6 プログラムの改善点

本プログラムには、あいまいなイメージからスタートし、徐々に明確な形を導ける特長がある。よって、ユーザーの要求に応じて設定を変更できるように様々な機能を付与し、システムとしての利便性を高めなければならないだろう。例えば、対話型GAを組み込むことによって、短い計算時間でもユーザーの好みに合った形態を導けるようにすることなどを検討している。

最後に、力学的条件に関して今回は触れなかったが、もちろん実際には無視することはできないだろう。ただし、従来のような、力学的条件を満たすものしか導かないのではなく、まずイメージが先行してから、その形に応じて力学的な変形をすることができないかと考えている。もちろん、その処理によってはじめのイメージからかけ離れてしまう可能性もあるが、力学的な処理は、ユーザーの要求の一部としてプログラムに導入することを考えている。

参考文献

- [1] 三井和男、大崎純、大森博司、田川浩、本間俊雄『発見的最適化手法による構造フォルムとシステム』コロナ社、2004
- [2] 上田完次『創発的シンセンスの方法論』日本学術振興会 未来開拓学術研究推進事業研究成果報告書、2001
- [3] 井上全人、松岡由幸「生物過程を模倣した多様解導出のための形状生成方法」『デザイン学研究 vol.48 No.3』日本デザイン学会、2001
- [4] 「『情報化時代の建築設計のあり方に関する特別調査委員会』報告」『建築雑誌 vol.120 No.1538』日本建築学会、2005
- [5] 「コンピュータの功罪」『建築雑誌 vol.119 No.1518』日本建築学会、2003
- [6] 「建築形態の数理」『建築雑誌 vol.118 No.1507』日本建築学会、2003

自然と調和するアーケード

・ 設計主旨

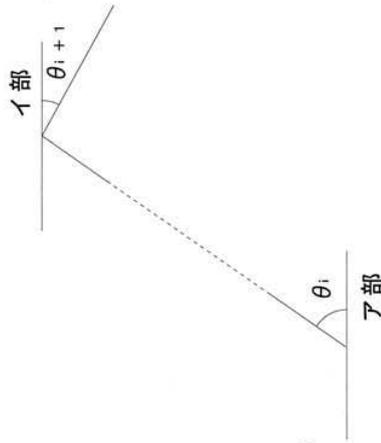
自然と調和するよう、木の枝が不規則に伸びていき、その隙間から光が射し込むような形態をイメージした。

・ 屋根梁形態創生アルゴリズム

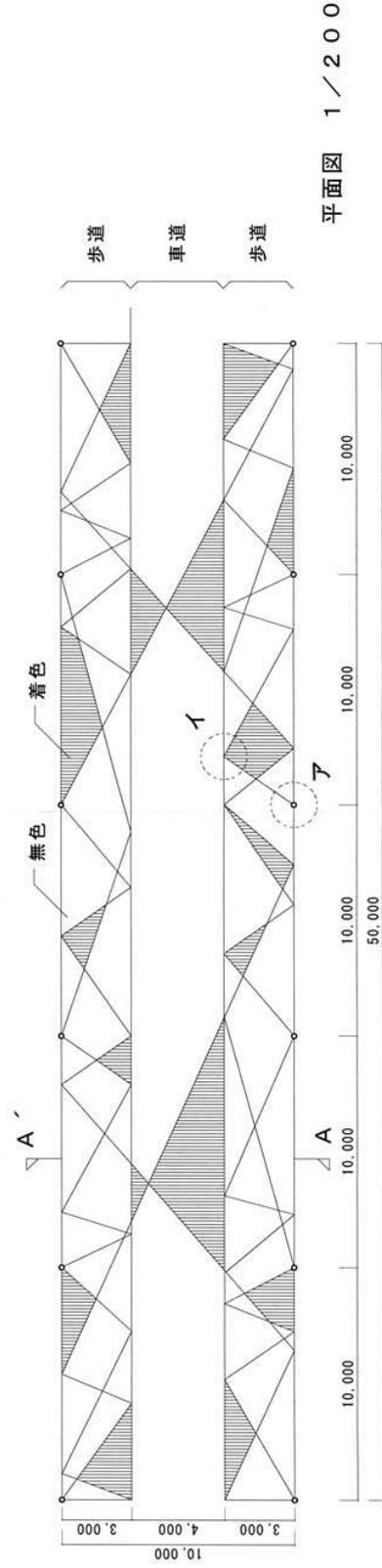
ランダムな形態実現のため、乱数表を使用し形状作成を実行した。乱数表の数字を次式に当てはめて、角度 θ_i を設定した。

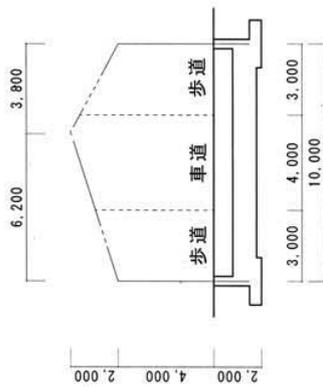
$$\theta_i = \frac{\text{乱数}}{100} \times 90 \pm \alpha_i \text{ (度)}$$

α_i : 調整定数 (適設な形状作成のため設定)



・ 創生された屋根構造形態





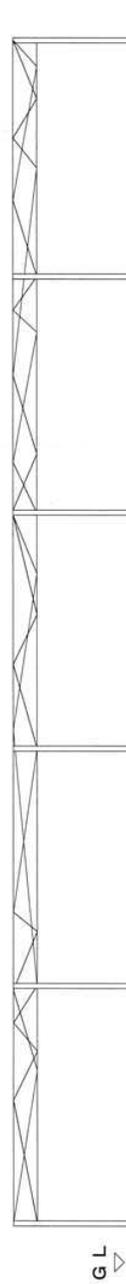
・ 設定条件

- i 高さ 4m
- ii スパン 10m
桁行方向の支持点間隔 10m
桁行方向の長さ 50m
- iii アーケードは柱による自立タイプ
- iv 建築材料
 - ① 柱 : $\Phi - 318.5 \times 7.9$ (STK400)
 - ② 屋根梁 : $H - 244 \times 175 \times 11$ (SS400)
 - ③ 基礎梁 : RC造 ($B \times D = 400 \times 1000$)
 - ④ 屋根材料 : ポリカーボネード t30

・ 荷重条件

- 自重
- 積雪荷重 (700 N/m^2)
- 地震荷重 (自重 $\times 0.2$)
- 風荷重 (吹上げ 1000 N/m^2)

A-A' 断面図 1 / 200



立面図 1 / 200

■文献・ソフトウェア リスト

建築構造形態創生関係文献リスト

建築構造形態創生と比較的関連の深い研究分野の主要著書・論文を紹介する。リストアップの方針は以下のとおりである。

- ・ 原則として 1990 年以降の文献のみ。
- ・ 「形態創生」に直接関係する研究のみ論文を含めるものとし、その他の分野の文献は、著書、レビュー、特集のみとする。
- ・ 骨組部材の剛性の最適化を目的とする構造最適化は、「形態創生」に含めない。
- ・ 読者が容易に入手できる著書や論文を対象とし、日本語の会議論文や梗概は建築学会主催のシンポジウムのみとする。また、建築学会大会梗概集は除く。

構造形態創生に関する研究は、数学から生物科学までを含む極めて多くの分野と関連するので、それらの文献を網羅することは極めて困難である。したがって、以下では、「形態解析」、「形状最適化」、「発見的手法」などを中心に文献をリストアップする。各分野の概要は次のとおりである。

形態解析（シェル・空間構造、張力構造）

膜構造物やケーブルネットなどの張力導入によって安定化される構造物の釣り合い形状、あるいは荷重が作用したときの形状を求める手法であり、変分法などの数学と関連が深い。例えば、膜構造物において外力が作用しない等張力の釣り合い曲面は極小曲面といわれ、変分問題の典型的な解であり、汎関数の最小化によって定義されるので、最適化との関連も深い。

形状最適化（構造最適化）

連続体シェルやトラスなどの剛な構造物の形状を最適化する手法であり、機械工学や航空工学での構造最適化の1つの分野として発展してきた。連続体の形状、曲面の形状、トラスや骨組などの離散系構造物の部材配置（トポロジー）・形状の最適化になど分けられる。

発見的手法

遺伝的アルゴリズムや擬似焼きなまし法などの確率統計的探索法の総称であり、進化的手法、人工生命の手法、確率的手法、ソフトコンピューティングなどにも分類される。情報工学、生物科学、物理学、数学などの多くの分野から融合して発展してきた分野である。

1. 最適化一般

1. 1 数理計画法

1. 中山弘隆, 谷野哲三: 多目的計画法の理論と応用, 計測自動制御学会, 1998.
2. 茨木俊秀, 福島雅夫: 最適化の手法, 1993.
3. 柏村孝義, 白鳥正樹, 于 強: 実験計画法による非線形問題の最適化, 朝倉書店, 1998.
4. 福島雅夫: 数理計画法入門, システム情報制御ライブラリー, 朝倉書店, 1996.
5. 久保幹雄: 組合せ最適化とアルゴリズム, 共立出版, 2000.
6. 大野勝久, 田村隆善, 伊藤崇博: Excel によるシステム最適化, コロナ社, 2001.
7. 奈良宏一, 佐藤泰司: システム工学の数理的手法, コロナ社, 1996.
8. 矢部 博, 八巻直一: 非線形計画法, 朝倉書店, 1999.
1. 坂和正敏: 離散システムの最適化: 一目的から多目的へ, 森北出版, 2000.

1. 2 その他

2. 日本建築学会 編: 建築最適化への招待, 丸善, 2005.
3. 日本機械学会 編: 形態とデザイン, 培風館, 1993.
4. 加藤直樹, 大崎 純, 谷 明勲: 建築システム論, 造形ライブラリー3, 共立出版, 2002.
5. 大崎 純, 最適化ソフトウェア: 建築ソフトのフロンティア, 建築雑誌, Vol.117(1487), pp. 4-5, 2002.

2. 構造最適化

1. J. S. Arora: *Introduction to Optimum Design*, Academic Press, 2004.
2. R. T. Haftka, Z. Gürdal and M. P. Kamat: *Elements of Structural Optimization (Solid Mechanics and Its Applications)*, Kluwer, 1992.
3. 山川 宏: 最適化デザイン, 培風館, 1993.
4. J. S. Arora (Ed.): *Guide to Structural Optimization*,

- ASCE, 1997.
5. S. Burns (Ed.): *Recent Advances in Optimal Structural Design*, ASCE, 2002.
 6. M. P. Kamat (Ed.): *Structural Optimization - Status and Promise, Progress in Astronautics and Aeronautics*, No. 150, AIAA, 1993.
 7. 山川 宏 編: 最適設計ハンドブック, 朝倉書店, 2003.
 8. 大崎 純: 建築・土木のための構造最適化入門, CRC ウェブセミナー, CRC ソリューションズ, <http://www.civil-eye.com/report/kouza/osaki/overview.htm>, 2005.
 9. J. Blachut and H. Eschenauer (Ed.): *Emerging Methods for Multidisciplinary Optimization*, CICM Course and Lectures, No. 425, Springer, 2001.
 10. L. Kalamkov and A. G. Kolpakov: *Analysis, Design and Optimization of Composite Structures*, Wiley, 1997.
 11. K. K. Choi and N. H. Kim: *Structural Sensitivity Analysis and Optimization - 1. Linear Systems, 2. Nonlinear Systems and Application*, Springer, 2005.
 12. N. V. Banichuk: *Introduction to Optimization of Structures*, Springer, 1990.
 13. R. T. Marler and J. S. Arora: Survey of multi-objective optimization methods for engineering, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 26(6), pp. 369-396, 2004.
3. 形態創生全般
1. 構造形態の解析と創生, 応用力学シリーズ 5, 日本建築学会, 丸善, 1998.
 2. 構造形態創生の理論と応用, 応用力学シリーズ 8, 日本建築学会, 丸善, 2001.
 3. M. P. Bendsøe and O. Sigmund: *Topology Optimization - Theory, Methods, and Applications*, Springer, 2002.
 4. M. P. Bendsøe and O. Sigmund (Ed.): *Proc. IUTAM Symp. on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, Springer, 2005.
 5. 特集「建築形態の数理」, 建築雑誌, Vol. 118(1507), 2003.
 6. Special Issue of Structural and Design optimization, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 194, 2005.
 7. Special Issue of Topology Optimization in Structural Mechanics, *Struct. Multidisc. Optim.*, 21(2), 2001.
 8. M. Beckers and C. Fleury: A primal-dual approach in truss topology optimization, *Comp. & Struct.*, Vol. 64, pp. 77-88, 1997.
 9. G. I. N. Rozvany (Ed.): *Topology Optimization in Structural Mechanics*, CISM Courses and Lectures, No. 374, Springer, 1997.
 10. U. Kirsch: Efficient reanalysis for topological optimization, *Structural Optimization*, Vol. 6, pp. 143-150, 1993.
 11. M. Kočvara: Topology optimization with displacement constraints - a bilevel programming approach, *Struct. Opt.*, Vol. 14, pp. 256-263, 1997.
 12. M. P. Bendsøe: *Optimization of Structural Topology, Shape, and Material*, Springer, 1995.
 13. U. Kirsch, *Design-Oriented Analysis of Structures*, Kluwer, 2002.
 14. 山邊友一郎, 河村 廣, 谷 明勲: 知的人工生命の手法を用いた建築的立体構造形成, 日本建築学会構造系論文集, No. 506, pp. 193-199, 1998.
4. トラス・骨組の形状・トポロジー
4. 1 全般
1. B. H. V. Topping: Shape Optimization of Skeletal Structures - A Review, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 109(8), pp. 1933-1951, 1993.
 2. 大崎 純: トラスの形状とトポロジーの最適化, 建築の研究, 建築研究振興協会, No. 158, pp. 20-22, 2003.
 3. L. Lamberti, C. Pappalettere: Move limits definition in structural optimization with sequential linear programming - Part II, Numerical examples, *Comp. & Struct*, Vol. 81, pp. 215-238, 2003.
4. 2 骨組
1. 高田豊文, 小浜芳朗, 宮村篤典: 多層 RC 立体架構に対する連層耐震壁の最適配置に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No. 522, pp. 93-98, 1999.
 2. 藤井大地, 松本慎也, 藤谷義信, 菊池昇: グラントストラクチャー法による骨組構造物の位相最適化, 構造工学論文集, Vol. 46B, pp. 1-8, 2000.
 3. 藤井大地, 鈴木克幸, 大坪英臣: 最適化手法 CONLIN を用いた骨組構造の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 548, pp. 59-66, 2001.

4. 小阪郁夫, 浅野康弘: 建築構造物のコンプライアンス最小設計法に対する重みつき最小二乗法の適用, 構造工学論文集, Vol. 48B, pp. 9-14, 2002.
4. 3 トラス・空間骨組
 1. W. Achtziger: Truss topology optimization including bar properties different for tension and compression, *Struct. Opt.*, Vol. 12, pp. 63-74, 1996.
 2. M. P. Bendsøe, A. Ben-Tal and J. Zowe: Optimization method for truss geometry and topology design, *Struct. Opt.*, Vol. 7, pp. 141-159, 1994.
 3. A. Ben-tal and M. P. Bendsøe: A new method for optimal truss topology design, *SIAM J. Opt.*, Vol. 3(2), pp. 322-358, 1993.
 5. A. Ben-tal and A. Nemirovski: Potential reduction polynomial time method for truss topology design, *SIAM J. Opt.*, Vol. 4(3), pp. 596-612, 1994.
 6. D. Bojczuk and Z. Mróz: Optimal topology and configuration design of trusses with stress and buckling constraints, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 17, pp. 25-35, 1999.
 7. G Cheng: Some aspects of truss topology optimization, *Struct. Opt.*, Vol. 10, pp. 173-179, 1995.
 8. G Cheng and X. Guo: ϵ -relaxed approach in structural topology optimization, *Struct. Opt.*, Vol. 13, pp. 258-266, 1997.
 9. G Cheng and Z. Jiang: Study on topology optimization with stress constraints, *Eng. Opt.*, Vol. 20, pp. 129-148, 1992.
 10. K. Dems and W. Gatkowski: Optimal design of a truss configuration under multiloading conditions, *Struct. Opt.*, Vol. 9, pp. 262-265, 1995.
 11. U. Kirsch: On singular topologies in optimum structural design, *Struct. Opt.*, Vol. 2, pp. 133-142, 1990.
 12. J. M. Oberndorfer, W. Achtziger and H. R. E. M. Hornlein: Two approaches for truss topology optimization: a comparison for practical use, *Struct. Opt.*, Vol. 11, pp. 137-144, 1996.
 13. S. Ohkubo K. Asai: A hybrid optimal synthesis method for truss structures considering shape, material and sizing variables. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 34, pp. 839-851, 1992.
 14. O. S. Smith: An interactive system for truss topology design, *Adv. Eng. Software*, Vol. 27, pp. 167-178, 1996.
 15. O. S. Smith: Topology optimization of trusses with local stability constraints and multiple loading conditions - a heuristic approach, *Struct. Opt.*, Vol. 13, pp. 155-166, 1997.
 16. T. Nakamura and M. Ohsaki: A natural generator of optimum topology of plane trusses for specified fundamental frequency, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 94(1), pp. 113-129, 1992.
 17. M. Ohsaki: T. Nakamura and M. Kohiyama, Shape optimization of a double-layer space truss described by a parametric surface, *Int. J. Space Struct.*, Vol. 12(2), pp. 109-119, 1997.
 18. M. Ohsaki: Simultaneous optimization of topology and geometry of a regular plane truss, *Comput. & Struct.*, Vol. 66(1), pp. 69-77, 1997.
 19. M. Ohsaki, T. Nakamura and Y. Isshiki: Shape-size optimization of plane trusses with designer's preference, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 124(11), pp. 1323-1330, 1998.
 20. M. Ohsaki, K. Fujisawa, N. Katoh and Y. Kanno: Semi-definite programming for topology optimization of trusses under multiple eigenvalue constraints, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 80, pp. 203-217, 1999.
 21. 寒野善博, 大崎 純, 藤澤克樹, 加藤直樹: 半正定値計画法を用いた指定座屈荷重係数を有するトラスのトポロジー最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 541, pp. 113-119, 2001.
 22. Y. Kanno, M. Ohsaki and N. Katoh, Sequential semidefinite programming for optimization of framed structures under multimodal buckling constraints, *Int. J. Struct. Stability and Dynamics*, Vol. 1(4), pp. 585-602, 2001.
 23. 小河利行, 大崎 純, 立石理恵: 線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシエルの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 579, pp. 129-136, 2003.
 24. M. Ohsaki and N. Katoh: Topology optimization of trusses with stress and local constraints on nodal

- stability and member intersection, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 29, pp. 190-197, 2005.
25. 大崎 純, 中村恒善, 瀧 正哉: 多成分設計用地震動に対する応答ひずみ-加速度制約設計トラス列生成法, 日本建築学会構造系論文集, No. 456, pp. 39-50, 1994.
 26. 高田豊文, 松岡貴士: 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, No. 598, pp. 87-91, 2005.
 27. G. I. N. Rozvany: On design-dependent constraints and singular topologies, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 21, pp. 164-172, 2001.
 28. M. Stolpe and K. Svanberg: A note on stress-constrained truss topology optimization, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 25, pp. 62-64, 2003.
 29. M. Stolpe and K. Svanberg: A stress-constrained truss-topology and material-selection problem that can be solved by linear programming, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 27, pp. 126-129, 2004.
 30. 大森博司, 山本憲司: 応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究 (その 2: スペースフレームへの適用), 日本建築学会構造系論文集, No. 503, pp. 77-83, 1998.
 31. 大森博司, 石原 競, 八木孝憲: 極小曲面の数値解析法に関する研究, 膜構造研究論文集, Vol. 7, pp. 57-64, 1993.
 32. 陳 沛山, 川口 衛: スペース・フレームの最大座屈荷重形態, 日本建築学会構造系論文集, No. 489, pp. 41-46, 1996.
 33. 山本憲司, 皆川洋一, 大森博司: 座屈荷重を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 564, pp. 95-102, 2003.
 34. 山本憲司, 皆川洋一, 大森博司: 剛性行列のブロック対角化を利用した線形座屈荷重を目的関数とする単層トラスドームの形状最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 578, pp. 51-58, 2004.
- #### 4. 4 遺伝的アルゴリズム
1. 三井和男, 登坂宣好: 遺伝的アルゴリズムの空間構造形態解析への応用, 日本建築学会構造系論文集, No. 484, pp. 75-83, 1996.
 2. D. E. Grierson and W. H. Pak: Optimal sizing, geometrical and topological design using a genetic algorithm, *Struct. Opt.*, Vol. 6, pp. 151-159, 1993.
 3. P. Hajela and E. Lee: Genetic algorithms in truss topological optimization, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 32(22), pp. 3341-3357, 1995.
 4. Y. Nakanishi and S. Nakagiri: Optimization of frame topology using boundary cycle and genetic algorithm, *JSME Int. J., Ser. A.*, Vol. 39(2), pp. 279-285, 1996.
 5. S. Rajeev and C. S. Krishnamoorthy: Genetic algorithms-based methodologies for design optimization of trusses, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 123, pp. 350-358, 1997.
 15. P. Hajela and N. Sangameswaran: A coupled algorithmic and heuristic approach for optimal structural topology generation, *Comp. & Struct.*, Vol. 36(5), pp. 971-977, 1990.
 16. W. M. Jenkins: Towards structural optimization via the genetic algorithm, *Comp. & Struct.*, Vol. 40(5), pp. 1321-1327, 1991.
 17. M. Ohsaki: Genetic algorithm for topology optimization of trusses, *Comput. & Struct.*, Vol. 57(2), pp. 219-225, 1995.
 18. 大崎 純: 遺伝的アルゴリズムに基づく不連続コスト関数を有する構造物の最適設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 464, pp. 119-127, 1994.
 19. 大森博司, 河村拓昌, 鬼頭伸彰: 遺伝的アルゴリズムを用いたトラス・トポロジーの最適設計, 計算工学会講演論文集, 1998.
 20. 大森博司, 鬼頭伸彰: 遺伝的アルゴリズムを用いたトラス構造物の形態創出, 日本建築学会構造系論文集, No. 520, pp. 85-92, 1999.
 21. 大森博司, 河村拓昌: 遺伝的アルゴリズムによる立体トラス構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, No. 538, pp. 115-121, 2000.
 22. 大森博司, 河村拓昌, 長田宗平: 遺伝的アルゴリズムによるフレーム構造物の位相設計, 構造工学論文集, Vol. 47B, pp. 1-6, 2001.
 23. 大森博司, 河村拓昌: 遺伝的アルゴリズムによる接合状態を考慮した離散的構造物の形態創生, 日本建築学会構造系論文集, No. 555, pp. 121-128,

- 2002.
24. 曾我部博之, 中垣友宏: 適応型遺伝的アルゴリズムによるトラス構造物の最適化, 構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 303-308, 2003.
 25. F. Y. Cheng and D. Li: Multiobjective optimization design with Pareto genetic algorithm, *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 123(9), pp. 1252-1261, 1997.
 26. D. Greiner, G. Winter and J. M. Emperor: Optimising frame structures by different strategies of genetic algorithms, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, pp. 381-402, 2001.
 27. K. Deb and S. Gulati: Design of truss-structures for minimum weight using genetic algorithms, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 37, pp. 447-465, 2001.
4. 5 発見的手法 (遺伝的アルゴリズム以外)
1. W. A. Bennage and A. K. Dhingra: Optimization of truss topology using tabu search, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 38(23), pp. 4035-4052, 1995.
 2. 本間俊雄, 加治広之, 登坂宣好: 免疫アルゴリズムによる構造システムの最適化と解の多様性, 日本建築学会構造系論文集, No. 588, pp. 103-110, 2005.
 3. A. S. Kwan: An evolutionary approach for layout optimization of truss structures, *Int. J. Space Struct.*, Vol. 13(3), pp. 145-155, 1998.
 4. J. J. McKeown: Growing optimal pin-jointed frames, *Struct. Opt.*, Vol. 15, pp. 92-100, 1998.
 5. Y. Nakanishi and S. Nakagiri: Optimization of truss topology using boundary cycle: derivation of design variables to avoid inexpedient structure, *JSME Int. J., Ser. A.*, Vol. 39(3), pp. 415-421, 1996.
 6. Y. Nakanishi and S. Nakagiri: Structural optimization under topological constraint represented by homology groups: topological constraint on one-dimensional complex by use of zero- and one-dimensional groups, *JSME Int. J., Ser. A.*, Vol. 40(3), No. 219-227, 1997.
 7. G. M. Reddy and J. Cagan: Optimally directed truss topology generation using shape annealing, *J. Mech. Eng.*, ASME, Vol. 117, pp. 206-209, 1995.
 8. G. M. Reddy and J. Cagan: An improved shape annealing algorithm for truss topology generation. *J. Mech. Eng.*, ASME, Vol. 117, pp. 315-321, 1997.
 9. W. K. Rule: Automatic truss design by optimized growth. *J. Struct. Eng.*, ASCE, Vol. 120(10), pp. 3063-3070, 1994.
 10. K. Shea, J. Cagan and S. J. Fenves: A Shape annealing approach to optimal truss design with dynamic grouping of members, *J. Mech. Eng.*, ASME, Vol. 118, pp. 388-394, 1997.
 11. B. V. H Topping, A. I. Khan and J. P. Leite: Topological design of truss structures using simulated annealing, *Struct. Eng. Rev.*, Vol. 8, pp. 301-314, 1996.
 12. 田川 浩, 大崎 純: 一様部材断面積を有する平面トラスのトポロジー・節点位置同時最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 521, pp. 73-80, 1999.
 13. K. S. Lee and Z. W. Geem: A new structural optimization method based on the harmony search algorithm, *Comp. & Struct*, Vol. 82, pp. 781-798, 2004.
 14. 本間俊雄, 加治広之, 登坂宣好: 免疫アルゴリズムによるトラス構造の多目的最適化と解の多様性, 構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 309-317, 2003.
 15. G. C. Luh and C. H. Chueh: Multi-objective optimal design of truss structure with immune algorithm, *Comp. & Struct*, Vol. 82, pp. 829-844, 2004.
- 5 連続体の形状・トポロジー
5. 1 発見的手法
1. 三井和男: 周期的に変動する条件下における構造形態創生のための発見的手法, 日本建築学会構造系論文集, No. 593, pp. 73-79, 2005.
 2. 伊能教夫 他: 力学構造を自己組織化するセル・オートマトン, 日本機械学会論文集 A, Vol. 61(586), pp. 1416-1422, 1995.
 3. 大森博司, 崔 昌禹: 等値線を利用した拡張 ESO 法による構造形態の創生, 日本建築学会構造系論文集, No. 539, pp. 87-94, 2001.
 4. Y. M. Xie and G. P. Steven: A simple evolutionary procedure for structural optimization, *Comp. & Struct.*, Vol. 49, pp. 885-896, 1993.
 5. 大森博司, 崔 昌禹, 鈴木謙仁: 等値線を導入した拡張 ESO 法による構造形態の創生, 構造工学

- 論文集, Vol. 47B, pp. 7-14, 2001.
6. 大森博司, 崔 昌禹: 拡張 ESO 法による構造形態の創生—多目的適応型構造とシェル構造への適用, 日本建築学会構造系論文集, No. 552, pp. 109-116, 2002.
 7. 大森博司: 拡張 ESO 法による構造形態の創生, 計算工学講演会論文集, Vol. 7, pp. 867-870, 2002.
 8. 大森博司, 山本憲司: 応力分布を目的関数とする空間構造の形状最適化に関する研究 (その 1: シェル構造への適用), 日本建築学会構造系論文集, No. 496, pp. 67-73, 1997.
 9. 三井和男: セルオートマトンによる構造システムの自律的生成と最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 555, pp. 101-105, 2002.
 10. 三井和男: 構造形態を自律的に生成するセルオートマトン, 情報処理学会論文誌: 数値モデル化と応用, Vol. 44, No. SIG 7(TOM8), pp. 118-126, 2003.
 11. 曾我部博之, 三井和男: セルオートマトンによる構造物の最適化 (Structural Optimization by Cellular Automaton), 構造工学論文集, Vol. 50B, pp. 243-249, 2004.
 12. O. M. Querin, G. P. Steven and Y. M. Xie: Evolutionary structural optimisation using an additive algorithm, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 34, pp. 291-308, 2000.
 13. V. B. Young: *Bi-directional evolutionary structural optimisation (BESO) 2-D and 3-D*, Undergraduate Honours Thesis, Aeronautical Engineering, University of Sydney, 1997.
 14. C. Mattheck and S. Burkhardt: A new method of structural shape optimisation based on biological growth, *Int. J. of Fatigue*, Vol. 12(3), pp. 185-190, 1990.
 15. O. M. Querin, G. P. Steven and Y. M. Xie: Development of a performance indicator for structural topology optimization, *Struct. Multidisc. Optim.*, 1999.
 16. Y. M. Xie and G. P. Steven: Optimal design of multiple load case structures using an evolutionary procedure, *Eng. Comput.*, Vol. 11, pp. 295-302, 1994.
 17. T. Y. Chen, C. C. Shieh: Fuzzy multiobjective topology optimization, *Comp. & Struct.*, Vol. 78, pp. 459-466, 2000.
 18. S. Y. Wang and K. Tai: Graph representation for structural topology optimization using genetic algorithms, *Comp. & Struct.*, Vol. 82, pp. 1609-1622, 2004.
- ## 5. 2 発見的手法以外
1. 藤井大地: パソコンで解く構造デザイン, 丸善, 2002.
 2. 畔上秀幸: 形状最適化問題の解法, 計算工学, Vol.2(4), pp.27-35, 1997.
 3. H. A. Eschenauer and N. Olhoff: Topology optimization of continuum structures—A review, *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 54(4), pp. 331-389, 2001.
 4. A. R. Diaz and M. P. Bendsøe: Shape optimization of structures for multiple loading conditions using a homogenization method, *Struct. Opt.*, Vol. 4, pp. 17-22, 1992.
 5. 藤井大地, 江島 晋, 菊池 昇: 均質化設計法を用いた弾性変形機構の位相最適化, 日本建築学会構造系論文集, No. 528, pp. 99-105, 2000.
 6. T. E. Bruns and O. Sigmund, Toward the topology design of mechanisms that exhibit snap-through behavior, *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, Vol. 193, pp. 3973-4000, 2004.
 7. T. Sekimoto and H. Noguchi, Homologous topology optimization in large displacement and buckling problems, *JSME Int. J., Ser. A*, Vol. 44, pp. 610-615, 2001.
 8. H. Eschenauer, J. Koski and A. Osyczka: *Multicriteria Design Optimization*, Springer, 1990.
 9. B. Hassani and E. Hinton: A review of homogenization and topology optimization III—topology optimization using optimality criteria, *Comp. & Struct.*, Vol. 69, pp. 739-756, 1998.
 10. S. Min, S. Nishiwaki and N. Kikuchi: Unified topology design of static and vibrating structures using multiobjective optimization, *Comp. & Struct.*, Vol. 75, pp. 93-116, 2000.
 11. G. P. Steven, Q. Li and Y. M. Xie: Multicriteria optimization that minimizes maximum stress and maximizes stiffness, *Comp. & Struct.*, Vol. 80, pp.

- 2433-2448, 2002.
12. H. Guan, Y. J. Chen, Y. C. Loo, Y. M. Xie and G. P. Steven: Bridge topology optimisation with stress, displacement and frequency constraints, *Comp. & Struct.*, Vol. 81, pp. 131-145, 2003.
 13. W. H. Zhang and P. Duysinx: Dual approach using a variant perimeter constraint and efficient sub-iteration scheme for topology optimization, *Comp. & Struct.*, Vol. 81, pp. 2173-2181, 2003.
 14. M. Bruyneel and P. Duysinx: Note on topology optimization of continuum structures including self-weight, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 29, pp. 245-256, 2004.
 15. M. J. de Ruiter and F. van Keulen: Topology optimization using a topology description function, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 26, pp. 406-416, 2004.
 16. K. Svanberg and M. Werme: A hierarchical neighbourhood search method for topology optimization, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 29, pp. 325-340, 2005.
 17. M. Stolpe and K. Svanberg: Modelling topology optimization problems as linear mixed 0-1 programs, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 57, pp. 723-739, 2003.
- 6 メカニズム, コンプライアントメカニズム
28. T. E. Bruns and D. A. Tortorelli: Topology optimization of non-linear structures and compliant mechanisms. *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 190, pp. 3443-3459, 2001.
 29. T. E. Bruns O. Sigmund and D. A. Tortorelli: Numerical methods for the topology optimization of structures that exhibit snap-through. *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 55, pp. 1215-1237, 2002.
 30. L. L. Howell: *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, 2001.
 31. N. D. Masters and L. L. Howell: A self-retracting fully compliant bistable micromechanism, *J. MEMS*, Vol. 12, pp. 273-280, 2003.
 32. H. Matoba, T. Ishikawa, C. Kim and R. S. Muller: A bistable snapping mechanisms, *IEEE Micro Electro Mech. Sys.*, pp. 45-50, 1994.
 33. S. Nishiwaki, S. Min, J. Yoo and N. Kikuchi: Optimal structural design considering flexibility, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 190, pp. 4457-4504, 2001.
 34. C. B. W. Pedersen, T. Buhl and O. Sigmund: Topology optimization of large-displacement compliant mechanisms, *Int. J. Num. Meth. Eng.*, Vol. 44, pp. 1215-1237, 2002.
 35. O. Sigmund: On the design of compliant mechanisms using topology optimization, *Mech. Struct. & Mach.*, Vol. 25(4), pp. 493-524, 1997.
 36. 大崎 純, 西脇眞二: スナップスルーを利用したバイステープルコンプライアントメカニズムの形状設計法, 日本機械学会論文集 A, Vol. 70(700), pp. 23-28, 2004.
 37. M. Ohsaki and S. Nishiwaki: Shape design of pin-jointed multistable compliant mechanism using snapthrough behavior, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 30, pp. 327-334, 2005.
 38. S. Pellegrino (ed.): *Deployable Structures*, CICM Course and Lectures, No. 412, Springer, 2001.
 39. C. J. Gantes: *Deployable Structures: Analysis and Design*, WIT Press, 2001.
 40. 藤井大地, 原田卓哉, 平田裕一: 骨組の位相最適化手法を用いたリンク機構の創生, 日本建築学会構造系論文集, No. 597, pp. 63-68, 2005.
 41. A. Kawamoto: Path-generation of articulated mechanisms by shape and topology variations in non-linear truss presentation, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, Vol. 64, pp. 1557-1574, 2005.
 42. A. Kawamoto, M. P. Bendsøe and O. Sigmund: Planar articulated mechanism design by graph theoretical enumeration, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 27, pp. 295-299, 2004.
 43. Y. Y. Kim, G. W. Jang, J. H. Park, J. S. Hyun. and S. J. Nam: Configuration design of rigid link mechanisms by an optimization method: A first step, in: *Proc. IUTAM Symp. on Topological Design Optimization of Structures, Machines and Materials*, Springer, pp. 251-260, 2005.

7 空間構造

7. 1 張力構造

1. G. Tibert and S. Pellegrino: Review of form-finding methods for tensegrity structures, *Int. J. Space Struct.*, Vol. 18(4), pp. 209-223, 2003.
2. D. Williamson, R. E. Skelton and J. Han, Equilibrium condition of a tensegrity structure, *Int. J. Solids Struct.*, Vol. 40, pp. 6347-6367, 2003.
16. J. Y. Zhang and M. Ohsaki: Form-finding of self-stressed structures by an extended force density method, *J. Int. Assoc. for Shell and Spatial Struct.*, Vol. 46(3), pp. 159-166, 2005.
17. J. Y. Zhang, M. Ohsaki and Y. Kanno: A direct approach to design of geometry and forces of tensegrity structures, *Int. J. Solids and Struct.*, Vol. 43(7), pp. 2260-2278, 2006.
3. 大森博司, 石原競, 八木孝憲, 荻原伸幸: 極小曲面解析による膜構造の形状解析—複合変分汎関数を用いて—, 日本建築学会構造系論文集, No. 469, pp. 61-70, 1995.
4. 大森博司, 石原競, 八木孝憲: 極小曲面法による膜構造の形状決定に関する研究 (非線形解法の検討と収束性に関する考察), 日本建築学会構造系論文集, No. 502, pp. 99-104, 1997.
5. 大崎 純, 中村恒善: すべり節点ケーブルネットの初期応力指定形状設計法, 構造工学論文集, Vol. 41B, pp. 199-206, 1995.
6. 大崎 純, 中村恒善: 境界ケーブルを有するケーブルネットの境界形状・初期張力指定形状設計法, 構造工学論文集, Vol. 42B, pp. 287-294, 1996.
7. 大崎 純, 上谷 宏二, 高谷 真次: 逆問題型手法による膜構造物の目標形状・応力トレードオフ設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 488, pp. 107-115, 1996.
8. 大崎 純, 山川 誠: 膜構造物の静的載荷時の剛性を考慮した初期応力・裁断膜形状最適化, 膜構造研究論文集, No. 11, pp. 31-38, 1997.
9. 大崎 純, 藤原 淳: 膜材料の非線形性と異方性を考慮した膜構造物の応力・形状最適化, 膜構造研究論文集, No. 12, pp. 1-9, 1998.
10. 大崎 純, 藤原 淳, 北折智規: 1次固有振動数を剛性の指標とした膜構造物の初期応力・形状設計法,

膜構造研究論文集, No. 13, pp. 15-22, 1999.

11. M. Ohsaki and K. Uetani: Shape-stress trade-off design of membrane structures for specified sequence of boundary shapes, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 182, pp. 73-88, 2000.
12. 藤原 淳, 大崎 純, 上谷宏二: 材料の粘弾性特性を考慮した膜構造物の裁断図設計法, 日本建築学会構造系論文集, No. 545, pp. 103-109, 2001.
13. M. Ohsaki and J. Fujiwara: Developability conditions for prestress optimization of a curved surface, *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, Vol. 192, pp. 77-94, 2003.
14. 藤原 淳, 大崎 純, 上谷宏二: 膜構造物の張力再導入機構と形状の最適化, 構造工学論文集, Vol. 49B, pp. 335-342, 2003.

7. 2 シェル

1. F. Otto and B. Rasch: *Finiding Form*, Axel Menges, 1995.
2. 日本建築学会シェル・空間構造運営委員会空間骨組構造小委員会 編: 空間骨組構造: 形態・性能・生産, 1995.
3. M. Ohsaki and M. Hayashi: Fairness metrics for shape optimization of ribbed shells, *J. Int. Assoc. Shells and Spatial Struct.*, Vol. 41(1), pp. 31-39, 2000.
4. M. Ohsaki, T. Ogawa and R. Tateishi: Shape optimization of curves and surfaces considering fairness metrics and elastic stiffness, *Struct. Multidisc. Optim.*, Vol. 24, pp. 449-456, 2003, Erratum: Vol. 27, pp. 250-258, 2004.
5. T. Ogawa, M. Ohsaki, T. Miyamura and T. Kumagai: Shape optimization of shell roofs subjected to strong wind by using a variable complexity model, *J. Int. Assoc. for Shell and Spatial Struct.*, Vol. 46(2), pp. 110-115, 2005.
6. H. Isler: Generating shell shapes by physical experiments, *Bulletin of the Int. Assoc. for Shell and Spatial Struct.*, Vol. 34, pp. 53-63, 1993.
7. E. Ramm: Shape finding methods of shells, *Bulletin of the Int. Assoc. for Shell and Spatial Struct.*, Vol. 33, pp. 89-99, 1992.
8. E. Ramm and G. Mehlhorn: On shape finding methods and ultimate load analyses of reinforced concrete shells, *Eng. Struct.*, Vol. 13, pp. 178-198, 1991.

9. E. Hinton and N. V. R. Rao: Structural shape optimization of shells and folded plates using two-noded finite strips, *Comp. & Struct.*, Vol. 46(6), pp. 1055-2072, 1993.
 10. R. Reitingger and E. Ramm: Buckling and imperfection sensitivity in the optimization of shell structure, *Thin-Wall Struct.*, Vol. 23, pp.159-177, 1995.
 11. K.-U. Bletzinger and E. Ramm: Structural optimization and formfinding of light weight structures, *Comp. & Struct.*, Vol. 79, pp. 2053-2062, 2001.
 12. S. J. Lee and E. Hinton: Dangers inherited in shells optimized with linear assumptions, *Compt. & Struct.*, Vol. 78, pp. 473-486, 2000.
8. 発見的手法
8. 1 全般
1. 日本建築学会 編: 知的システムによる建築・都市の創造, 技報堂, 1998.
 2. 坂和正敏, 石井博昭, 西崎一郎: ソフト最適化, 朝倉書店, 1995.
 3. 柳浦睦憲, 茨木俊秀: 組合せ最適化—メタ戦略を中心として, 朝倉書店, 2001.
 4. 日本建築学会 編: やさしくわかる建築・都市・環境のためのソフトコンピューティング, 丸善, 2005.
 5. 三井和男, 大崎 純, 大森博司, 田川 浩, 本間俊雄: 発見的最適化手法による構造のフォルムとシステム, コロナ社, 2004.
 6. 日本機械学会 編: 適応化・知能化・最適化法, 技法堂, 1996.
 7. C. A. Coello Coello, *List of References on Evolutionary Multiobjective Optimization*, <http://www.lania.mx/~ccoello/EMOO/EMOObib.html>
 8. C. A. C. Coello. A comprehensive survey of evolutionary-based multiobjective optimization Techniques, *Knowledge and Information Sys.*, Vol. 1(3), pp. 269-308, 1999.
8. 2 遺伝的アルゴリズム
1. 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎, オーム社, 1994.
 2. L. Davis: 遺伝アルゴリズムハンドブック, 森北出版, 1990.
 3. 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, 産業図書, 1993.
 4. E. Zitzler and L. Thiele: Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE Trans. on Evolutionary Computation*, Vol. 3(4), pp. 257-271, 1999.
 5. K. Deb, S. Agrawal, A. Pratab and T. Meyarivan: A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II, KanGAL report 200001, Indian Inst. of Tech., 2000.
 6. E. Zitzler, M. Laumanns and L. Thiele: SPEA2: improving the performance of the strength Pareto evolutionary algorithm, Tech. Report 103, Comp. Eng. and Commun. Networks Lab. (TIK), 2001.
 7. C. A. Coello and A. D. Christiansen: Multiobjective optimization of trusses using genetic algorithms, *Comp. & Struct.*, Vol. 75(6), pp. 647-660, 2000.
 8. K. Deb: *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Chichester, 2001.
 9. D. E. Goldberg: *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addition-Wesley, 1991.
 10. P. Hajela and C. Y. Lin: Genetic search strategies in multicriterion optimal design, *Struct. Opt.*, Vol. 4, pp. 99-107, 1992.
 11. N. Srinivas and K. Deb: Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms, *Evolutionary Computation*, Vol. 2(3), pp. 221-248, 1994.
8. 3 遺伝的アルゴリズム以外
1. 特集「創発システム」, 計測と制御, Vol. 35(7), 1996.
 2. 加藤恭義, 光成友孝, 築山 洋: セルオートマトン法, 森北出版, 1998.
 3. M. Aarts and J. K. Lenstra (Eds.): *Local Search in Combinatorial Optimization.*, John Wiley & Sons., 1997.
 4. D. F. Jones et al.: Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the art, *European J. Operations Res.*, Vol. 137, pp. 1-9, 2002.
 5. C. Bovill: *Fractal Geometry in Architecture and Design*, Birkhauser, 1996.
 6. 星野 力: 人工生命の夢と悩み, 裳華房, 1994.

7. S. Levy: *Artificial Life*, Penguin Books, 1993.
 8. 服部 桂: 人工生命の世界, オーム社, 1994.
 9. E. Thro: 人工生命, カットシステム, 1994.
 10. P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer: *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer, 1990.
9. 幾何学, 群論
1. 今野 豊彦, 物質の対称性と群論, 共立出版, 2005.
 2. 難波 誠, 群と幾何学, 現代数学社, 1996.
 3. 吉川圭二, 群と表現, 岩波書店, 1996.
 4. 杉原厚吉, 不可能物体の数理, 森北出版, 1993.
 5. 宮崎興二, 建築のかたち百科, 彰国社, 2000.
10. 形状モデリング
1. G Farin, J. Hoscek and M.-S. Kim (eds.): *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, North-Holland, 2002.
 2. G Garin: CAGD のための曲線・曲面理論, 共立出版, 1991.
 3. 川合 慧: コンピュータグラフィックス, 日刊工業新聞社, 1993.
 4. D. F. Rogers: *An Introduction to NURBS*, Morgan Kaufmann, 2001.
 5. D. von Seggern: *Curve Design and Generation*, CRC Press, 1993.
 6. 田澤義彦: 曲線論・曲面論, ピアソン, 1999.
 7. 桜井 明 監修, 菅野敬祐, 吉村和美, 高山文雄 著: C によるスプライン関数データ解析/CG/微分方程式. 東京電機大学出版局, 1993.
 8. 三浦 曜 監修, 中島孝行, 大野敏則 著: CAD・CG 技術者のための NURBS 早わかり, 工業調査会, 1994.
 9. 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.
 10. 谷口健男: FEM のための要素自動分割デローニー三角分割法の利用, 森北出版, 1992.
 11. 林 武文, 加藤清敬: OpenGL による3次元 CG プログラミング, コロナ社, 2003.
11. その他
1. 松下 貢 編: 生物にみられるパターンとその起源, 東大出版会, 2005.
 2. 古山正雄: 造形数理, 造形ライブラリー1, 共立出版, 2002.
 3. 三井秀樹: 形の美とは何か, NHK ブックス, 2000.
 4. 武田 暁: 形の科学, 裳華房, 1997
 5. 高木隆司: 形の数理, 朝倉書店, 1992.
6. 蔵本由紀: 川崎恭治, 山田道夫, 甲斐昌一, 篠本滋, パターン形成, 朝倉書店, 1991..
 7. 大崎 純: 情報テクノロジーの開発 (システム工学・制御), 重要論文のレビューとリスト, 日本建築学会総合論文誌, No. 4, pp. 142-145, 2006.
 8. A. Bejan: *Shape and Structure, from Engineering to Nature*, Cambridge University Press, 2000.
 9. 佐々木睦朗: FLUX STRUCTURE フラックスストラクチャー, TOTO 出版, 2005.
 10. 瀬尾文彰, 松本信二: ハイパーサーフェイスのデザインと技術 ーやわらかな時代の建築に向けて, 彰国社, 2005.
 11. 大森博司, 風袋宏幸, 飯嶋俊比古, 武藤 厚, 長谷川泰稔: 構造形態創生法によるオフィスビルの設計, 日本建築学会技術報告集, No. 20, pp. 77-82, 2004.
 12. 大森博司: 構造形態創生法と構造形態, 特集: 変わりゆく構造形態, 建築技術, No. 671, pp. 112-115, 2005.
 13. 長谷川泰稔, 金子慶一, 風袋宏幸, 大森博司: 構造形態創生法によるオフィスビル壁面のデザイン/芥川プロジェクト, 建築技術, No. 671, pp. 136-137, 2005.

構造形態創生関係ソフトウェアリスト

■委員会メンバー等により開発された解析ソフト

1. 「形カー1」プログラム

開発者： 渡辺誠, 大崎純, 千葉貴史

概要： 形態発生プログラムと構造最適化プログラムから成る。構造最適化プログラムでは, greedy method(貪欲法)により, 応力制約下で部材総体積を最小化。

関連 URL: http://www.makoto-architect.com/KEIRIKI-1/keiriki_j.htm

2. 拡張 ESO 法プログラム

開発者： 大森博司

概要： 拡張 ESO 法による連続体のトポロジー最適化。与えられた外力条件の下で, von Mises 応力が構造物内の各部分で可能な限り均一になる形状が求められる。

関連 URL: <http://www.dali.nuac.nagoya-u.ac.jp/ohmori/>

3. Otto / Isler

開発者： 藤井大地

概要： 重量制約下でコンプライアンスを最小化するような構造形態が求められる。Otto は骨組の最適化, Isler は2次元連続体の最適化を行うプログラム。

ダウンロード URL: <http://www.archi.hiro.kindai.ac.jp/LABO/SAL/soft.zip>

4. TopologyOptimizer

開発者： 三井和男

概要： セルオートマトンによる2次元連続体のトポロジー最適化。von Mises 応力が構造物内の各部分で可能な限り均一になるような形状を探索。

ダウンロード URL: <http://news-sv.ajj.or.jp/kouzou/s17/TopologyOptimizer.zip>

なお, 2~3(3については Isler のみ)のソフトは, 日本建築学会構造形態の創生と最適化小委員会編, 「構造形態の創生と最適化セミナー」資料 CD にも掲載されている。

■市販の構造形態解析ソフト

以下に挙げる解析ソフトは, コロキウム実施組織メンバーが調べた範囲のものです。実施組織が推奨しているわけではありません。各解析ソフトの詳細については, 問い合わせ先に連絡のこと。

1. 構造最適設計プログラム OPTISHAPE-TS

教育用のソフト OPTISHAPE-E も販売されている。

問い合わせ先: 株式会社 くいと URL: <http://www.quint.co.jp/>

2. 有限要素解析および構造最適設計ソフトウェア HyperWorks OptiStruct

問い合わせ先: アルテアエンジニアリング株式会社 URL: <http://www.altairjp.co.jp/>

3. 最適設計解析プログラム GENESIS

問い合わせ先: VDOC 株式会社 URL: <http://www.vdoc.co.jp/>

4. 汎用型最適設計支援ツール OPTIMUS

問い合わせ先: サイバネットシステム株式会社 URL: <http://www.cybernet.co.jp/>

5. COSMOS DesignSTAR / COSMOS Works

問い合わせ先: 株式会社 構造計画研究所 URL: <http://www.kke.co.jp/>

