設計者の選好と力学的合理性を勘案した自由曲面シェル構造の 構造形態創生法の提案

その1 多目的遺伝的アルゴリズムによる発見的方法

COMPUTATIONAL MORPHOGENESIS OF FREE SURFACE SHELLS CONSIDERING BOTH DESIGNER'S PREFERENCE AND STRUCTURAL RATIONALITY

Part 1 Heuristic approach by multi-objective genetic algorithm

浜田 英明*¹, 大森 博司*²

Hideaki HAMADA and Hiroshi OHMORI

The scheme of computational morphogenesis for the shell structures with free curved surface is proposed, where the requirement on both the aesthetic aspect and the structural rationality can be simultaneously satisfied according to the judgment of the designer. In the proposed scheme, Non Uniform Rational B-Spline (NURBS) is utilized by which the number of unknowns can be controlled while the high degree of freedom for expression of the shape of the curved surface is maintained. For the scale index concerning with the aesthetic aspect, the degree of difference between the curved surfaces given by the designers and those given by computation has been adopted and, on the other hand, the strain energy of the structures has been adopted as the quantitative scale for the mechanical measurement. Consequently, the problem in question has been mathematically formulated as the multi-objective optimization problem, where the multi-objective genetic algorithms are utilized for obtaining the Pareto solutions.

Keywords: shape optimization, multi-objective optimization, multi-objective genetic algorithm, NURBS

形状最適化, 多目的最適化, 多目的遺伝的アルゴリズム, NURBS

1 序論

大空間を擁する大スパン建築では、建物の実体と構造が合致しているため建築と構造の区別はなく、意匠的な要求と構造的な合理性の両立が求められることが多い。最近では、情報技術の急激な成長を背景として、構造解析、シミュレーション技術、さらには施工技術なども高度に発達し、意匠的な要求として多様かつ複雑で、幾何学的な形態にとらわれない自由な形態が求められるようになってきている。しかし、近年に見る構造物は必ずしも力学的合理性を持つとは言えず、建築家の求める恣意的な形態をそのまま力学的に解決する例も多く見られる¹⁾。複雑、不定形で自由な形態を実現させようとする意欲的な要求に対して、設計の初期段階で、構造的な合理性を評価することを可能とする何らかの構造的指標があれば、それらの要求に対して力学的な根拠を添え、それにより更に優れた構造の提案に結びつけることもできるものと考えられる。

シェルの力学的に理想的な形態を数理的に求める形状決定問題を扱った研究は、20世紀前半から盛んに行われ、1950年代以降には数値計画法による最適設計問題の一分野として多くの例²⁾⁻¹⁴⁾があり、これらの研究に見るように、力学量のみを目的関数とする形状決定問題は相応の成果を挙げてきている。自由曲面シェル構造物の

形状決定を歪みエネルギーを単一の目的関数とする通常の感度解析手法も実設計に応用され¹⁵⁾、形態デザインの一手法として一定の成果を収めている。しかし、このような単一目的の最適化問題は多岐にわたる建築の要請に応えるのは困難であることが多い¹⁶⁾。力学的な合理性だけではなく、意匠性をも考慮に入れたものとして、文献17)は感性評価のアンケートを実施し、ニューラルネットワークによる方法を用いて学習後、遺伝的アルゴリズムを用いた形態評価システムを導入することにより、形状評価に力学量だけでなく感性の評価を組み込むことを試みている。

本論文では、設計者の提案曲面との相違の程度を表す幾何学的な距離と力学量である歪みエネルギーの双方を目的関数とする自由曲面シェル構造の構造形態創生法を提案し、数値解析例により本手法の有効性を示すとともに、得られる曲面形状の力学特性についても併せて論じる。この手法は、設計者の選好を定量的に表現する手段として、設計者のイメージする曲面形状(これを原曲面と呼ぶことにする)を基準とした評価対象曲面の持つ幾何学的な距離を採用し、構造的な合理性を表現する手段として、力学量である構造物のひずみエネルギーを考えることで、曲面形状決定問題を設計者の選好と力学量を目的関数とした多目的最適化問題に帰着させ、解法と

*¹ 佐々木睦朗構造計画研究所 修士(工学)

*² 名古屋大学大学院環境学研究所 教授・工博

Sasaki Structural Consultants, M. Eng.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

して多目的遺伝的アルゴリズムを用いることで Pareto 最適解集合を得ようとするものである。これにより、機能的・計画的・芸術的な条件を満足した設計者の曲面イメージを極力損なわずに、構造的にも相応の合理性を持つ曲面形態を求めることができることになる。

なお、曲面形状の表現手段として NURBS(非一様有理 B スプライン, Non-Uniform Rational B-Spline) を用い、曲面形状の表現を低自由度で実現するとともに、感度解析における非線形解析の収斂を早める工夫を施している。

2 スプライン関数

本論文では、B スプライン関数の応用として、近年 CAD で多用されている NURBS により曲面形状を表現している。これにより形状表現の高自由度性を維持しながら、形状の記述に要するデータ量を抑制することが可能となり、曲面を離散化して節点座標を全て未知量にする方法に比べて大幅な未知量の低減を図ることができる。また、スプライン関数であるため、曲線や曲面の一部の形状修正が曲面形状の滑らかさを失わせる心配もない。本論では NURBS の制御点の空間座標を未知量とすることで形状を表現する方法を採用している。ここでは最適化過程での未知量の取扱い方の説明を行うために、NURBS による形状表現の方法について記述する。

2.1 NURBS 曲面

曲面上の位置を定める 2 つのパラメータを s, t とする。曲面上の任意点の位置ベクトルを $\mathbf{S}(s, t) = [x(s, t) \ y(s, t) \ z(s, t)]^T$ で表す。曲面形状を定義する NURBS の制御点を 1 本の s 曲線および t 曲線上にそれぞれ I 個、 J 個配置し、全体として $N = I \times J$ 個網状に配置するものとする。各制御点の位置ベクトルを $\mathbf{P}_{ij} = [p_{xij} \ p_{yij} \ p_{zij}]^T$ ($i = 1, \dots, I$) ($j = 1, \dots, J$) と表す。このとき、曲面上の任意点の位置ベクトル $\mathbf{S}$ は次のように書ける¹⁸⁾。

$$\mathbf{S}(s, t) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{i,K}(s) B_{j,L}(t) w_{ij} \mathbf{P}_{ij}}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{i,K}(s) B_{j,L}(t) w_{ij}} \quad (1)$$

ここで、 $B_{i,K}(s)$ は K 階の B スプラインを、 K, L はそれぞれ s 曲線、 t 曲線上の B スプラインの階数 (滑らかさ) を表す。 w_{ij} は制御点の重み (寄与率) を表す。

2.2 NURBS の制御点と有限要素の節点の関係

本論文では、応力算定は有限要素法により行う。NURBS の制御点と有限要素の節点の関係について整理しておく。

今、パラメトリック平面 $s-t$ 上に n 個の節点を配置するとする。節点座標ベクトルを次のようにおく。

$$\mathbf{r}_x = [x(s_1, t_1) \ \dots \ x(s_n, t_n)]^T \quad (2)$$

$\mathbf{r}_y, \mathbf{r}_z$ も同様である。さらに、制御点座標ベクトルを次のようにおく。

$$\mathbf{q}_x = [p_{x11} \ \dots \ p_{x1J} \ \dots \ p_{xI1} \ \dots \ p_{xIJ}]^T \quad (3)$$

$\mathbf{q}_y, \mathbf{q}_z$ も同様である。

このとき、式 (1) より節点座標と制御点座標の関係式は次のようにかける。

$$\mathbf{r}_x = \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{q}_x, \quad \mathbf{r}_y = \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{q}_y, \quad \mathbf{r}_z = \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{q}_z \quad (4)$$

ただし、 $\tilde{\mathbf{B}}$ は第 k 行目の行ベクトル $\tilde{\mathbf{B}}_k$ が

$$\tilde{\mathbf{B}}_k = \frac{[B_{1,K}(s_k) B_{1,L}(t_k) w_{11} \ \dots \ B_{I,K}(s_k) B_{J,L}(t_k) w_{IJ}]}{\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J B_{i,K}(s_k) B_{j,L}(t_k) w_{ij}} \quad (5)$$

であるようなマトリクスである。

よって、節点位置ベクトル $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_x^T \ \mathbf{r}_y^T \ \mathbf{r}_z^T]^T$ と制御点位置ベクトル $\mathbf{q} = [\mathbf{q}_x^T \ \mathbf{q}_y^T \ \mathbf{q}_z^T]^T$ の関係式は次のようにかける。

$$\mathbf{r} = \mathbf{B} \mathbf{q}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{B}} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{B}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$\mathbf{B}$ の次元は $3n \times 3N$ であり、通常正方行列ではなく、節点数 n の方が制御点数 N よりも大きいので縦長マトリクスとなる。節点位置ベクトルと制御点位置ベクトルは 1 対 1 の関係にある。

また、 $\mathbf{B}$ はパラメトリック平面上の座標 (s, t) と重み w_{ij} 、B スプラインの節点および階数の関数であるが、簡単のためそれらを曲面形状修正時一定として扱う。そのため本論文では、 $\mathbf{B}$ は制御点座標と節点座標を関連づける定係数マトリクスとなる。

3 多目的最適化問題の定式化

本論文では、静的外力を受ける曲面構造物を設計対象とし、応力算定は有限要素法による線形静的解析により行う。曲面形状は N 個の NURBS の制御点により生成される n 個の節点で離散的に表現されるものとする。また、曲面形状修正時、座標拘束される節点 (これを不動点と呼ぶことにする) の座標拘束総数を m とする。原曲面の制御点位置ベクトル $\mathbf{q}_0 \in R^{3N}$ と節点位置ベクトル $\mathbf{r}_0 \in R^{3n}$ および、制御点位置ベクトルの修正量 $\Delta \mathbf{q} = \mathbf{q} - \mathbf{q}_0$ と節点位置ベクトルの修正量 $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r} - \mathbf{r}_0$ には式 (6) よりそれぞれ次の関係が成り立つ。

$$\mathbf{B} \mathbf{q}_0 = \mathbf{r}_0, \quad \mathbf{B} \Delta \mathbf{q} = \Delta \mathbf{r} \quad (7)$$

本論文では、曲面形状決定問題を、原曲面との差およびひずみエネルギー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。この問題の設計変数を NURBS の 3 次元制御点位置ベクトル $\mathbf{q}$ とすると、目的関数 f と制約条件は次のように定式化される。

$$\text{minimize} \quad f(\mathbf{q}) = \begin{cases} f_1(\mathbf{q}) = \|\mathbf{B}(\mathbf{q} - \mathbf{q}_0)\| \\ f_2(\mathbf{q}) = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T(\mathbf{q}) \mathbf{K}(\mathbf{q}) \mathbf{d}(\mathbf{q}) \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{subject to} \quad \tilde{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{q} = \Delta \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{0}$$

ここに、 $\mathbf{d} \in R^{6n}$ は節点変位ベクトル、 $\mathbf{K} \in R^{6n \times 6n}$ は全体剛性マトリクス、 $\tilde{\mathbf{B}} \in R^{m \times 3N}$ は不動点の座標拘束方向に関する行のみを $\mathbf{B}$ から抽出したマトリクスを表す。

多目的最適化を行うにあたり、計算過程を単純にするために式 (8) で定式化される制約付き多目的最適化問題を無制約多目的最適化問題に変換することを考える。

式 (8) の制約条件式

$$\tilde{\mathbf{B}} \Delta \mathbf{q} = \mathbf{0} \quad (9)$$

を満たすような $\Delta \mathbf{q}$ を求める。 $\tilde{\mathbf{B}}$ は一般に正方行列ではないため、一般逆行列を用いて連立方程式 (9) を解かなければならない。 $\tilde{\mathbf{B}}$ の一般逆行列を $\tilde{\mathbf{B}}^{-} \in R^{3N \times m}$ と表す。連立方程式 (9) の解は必

ず1個は存在し、 $\phi \in R^{3N}$ を任意のベクトルとして次式で与えられる。

$$\Delta q = G\phi \quad (10)$$

ただし、 $G = I - \bar{B}^T \bar{B} \in R^{3N \times 3N}$

式(10)より式(8)で定式化される制約付き多目的最適化問題は、次式のような設計変数を制御点座標決定ベクトル ϕ とする無制約多目的最適化問題に帰着される。

$$\text{minimize } f(\phi) = \begin{cases} f_1(\phi) = \|H\phi\| \\ f_2(\phi) = \frac{1}{2} d^T(\phi) K(\phi) d(\phi) \end{cases} \quad (11)$$

ただし、 $H = BG \in R^{3n \times 3N}$ である。

4 多目的遺伝的アルゴリズムによる自由曲面の形態創生

本論文では、式(11)で定式化された多目的最適化問題を多目的遺伝的アルゴリズムにより解き、得られたPareto最適解集合の中から最終的に設計者が曲面形状を選好する構造形態創生法の提案を行う。

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によれば、1度の探索で多数の解が得られ、このことは、設計者がその解群から付加的な判断に基づいて、適宜、設計解を選好するのに役に立つ。すなわち、施工性、経済性、社会性、審美性など、科学的定量的な扱いには馴染まない要素をも同時に考慮する必要がある建築設計のプロセスに非常に都合がよい。

なお、本論文では多目的遺伝的アルゴリズムには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, 2001)¹⁹⁾を採用している。

本論文で提案する形態創生法の流れは以下になる。

構造形態創生法の流れ

- Step 1 所与の建築計画的条件に応じて原曲面形状、不動点位置、材料定数を定める。
- Step 2 原曲面の曲面形状をNURBSにより表現する。
- Step 3 探索母集団数、アーカイブ母集団数、世代数、交叉確率、突然変異確率を定める。
- Step 4 SPEA2により設計問題のPareto最適解群を求める。
- Step 5 得られたPareto最適解群の中から最終的に意思決定者である設計者が他の条件を勘案して曲面形状を選択する。

5 数値解析例

具体的な数値解析例を通して本手法の有効性を示す。

5.1 例題1：自重を受ける正方形平面を有する裁断球形シェル

5.1.1 解析概要

解析モデルは、一辺の長さが20mの正方形平面を有し、隅角部でピン支持された曲率半径20mの4面裁断球形シェルとし、制御点は $x-y$ 平面に 7×7 の格子状に配置する(図1)。曲面形状は鉛直方向のみ修正することにし、制御点の z 座標を決定する制御点座標決定ベクトル ϕ を設計変数とする。応力算定は有限要素法による線形静的解析により行い、有限要素は三角形平面シェル要

素を用いる。面内変形要素には定ひずみ三角形要素を、面外変形要素にはZienkiewicsらの非適合三角形要素を採用する。対称性を考慮して1/4の部分を解析対象とし、要素分割は128要素とする。シェルの隅角部は切り欠いており、隅角部に配置された2節点をピン支持する。外力は単位体積重量 24kN/m^3 として自重を作用させる。ヤング率を 21GPa 、ポアソン比を 0.17 とする。シェル厚は一律に 0.1m とし、ここでは定数として扱っている。形状修正時に座標拘束を受ける不動点は支持点とシェル頂点とする。したがって、本例題では、平面形状、頂点のライズは形状修正により変化しないことになる。計算に用いるSPEA2のパラメータを表1に示す。また設計変数の実行可能領域 X はスパンを L として、 $X = \{x | -L/2 \leq x_i \leq L/2\}$ としている。

なお、本例題において設計変数を各節点の z 座標とした場合、未知量は77となるが、NURBSの制御点 z 座標を設計変数とすると未知量は16となり、NURBSによる未知量低減の効果が理解できる。

5.1.2 解析結果と考察

本手法により得られたPareto最適解群の目的関数空間での存在位置を図2に示す。横軸に原曲面との差 $\|\Delta r\|$ を、縦軸にはひずみエネルギーをとっている。Pareto最適解群のそれぞれの解形状のシェル全領域における最大主応力・最大鉛直変位を図3に示す。ここで求めたシェルについては、最大応力はいずれのシェルにおいても支持境界近傍で発生し、最大変位はシェルの中央点付近で発生している。横軸にはPareto最適解となる個体の番号を、左縦軸には主応力の値を、右縦軸には鉛直変位の値をとっている。なおPareto最適解となる個体の番号は原曲面との差が小さいものから、

表1 SPEA2のパラメータ

探索母集団個体数	100
アーカイブ母集団個体数	25
世代数	1000
交叉確率	簡略型交叉 ²⁰⁾ のため設定せず
突然変異確率	0.01

図1 解析モデル

すなわちひずみエネルギーの大きいものから（図では左側の点から）順番に番号付けを行っている。

代表的な Pareto 最適解のシェル形状を図 4 b)~f) に示す。また、比較の対象として、原曲面のシェル形状を図 4 a) に示す。各図で左にシェル形状のアイソメトリック図を、右には立面図をそれぞれ示し、図中に f_1 , f_2 として示した値は、それぞれ式 (11) で表される原曲面との差、ひずみエネルギーを表し、 $\sigma_{\max}^t$, $\sigma_{\max}^c$ として示した値はそれぞれ各要素図心における引張膜応力のうちで

図 2 目的関数空間における Pareto 最適解群の存在位置

最大の値、圧縮膜応力のうちで最大の値を、 $\sigma_{\max}^b$ は各要素図心における曲げモーメントによる縁応力の絶対値のうちで最大の値を、 $w_{\max}$ と示した値は、各節点の鉛直変位のうちで最大の値を示す。

図 2 から、本手法により本設計問題の設計者に選択の幅の広さを与えるだけの多様な Pareto 最適解が得られていること、また、本例題では原曲面との差およびひずみエネルギーの 2 つの目的関数は互いにトレード・オフの関係にあることが確認できる。図 3 を見ると、ひずみエネルギーが最も小さい個体が最大主応力や最大鉛直

図 3 Pareto 最適解群の最大主応力・最大鉛直変位

a) Initial Shape

b) No.5

c) No.10

d) No.15

e) No.20

f) No.25

図 4 Pareto 最適解のシェル形状の例

変位を最小とするわけではないものの、ひずみエネルギーを小さくすることでそれら応答量をも一定の範囲で抑制できることが確認できる。また、個体番号が若い、すなわち原曲面に近い部分で、個体番号が増すにつれて曲げによる縁応力が急減しており、併せて引張膜応力も減少していることが示されている。このことは、原曲面形状を尊重した上で、シェルにとって不利となることの多い、曲げ応力やコンクリートの場合にはできれば避けることの望ましいと考えられる引張膜応力の発生を抑制した、圧縮による軸力抵抗型のシェルへと形状修正されていることが確認できる。ただし、ここでの最適化過程では、歪みエネルギーを小さくするような努力が払われており、その結果として、いわゆる軸索抵抗形式の構造が得られているのであり、引張軸力の出現を抑制する機構は持っていない。したがって、上述のような圧縮抵抗を主な抵抗形式として持つ構造は、結果として得られたものであることを付言しておく。なお、個体番号 8 以降において示されている曲げ応力の増加は、主として支点近傍の曲げ応答を反映したものであることが確認されている。

図 4 を見ると、個体番号が順次大きくなるにつれて、シェルはその自由辺縁の形状を円弧から次第に自由辺縁中央のむくりの大きいカテナリー曲線状に変化させることにより、なるべくシェル全面にわたる形状の修正量を抑制し、かつひずみエネルギーを小さくするように変化していることを確認することができる。すなわち、自由辺縁の形状を修正することにより、支点を結ぶシェル対角線上に谷、これと 45° ずれた方向に山を形成し、全体として折板状の剛な領域を形成することでシェル全体を形状変化により補剛し、自由辺縁に生じる大きな曲げ応力の発生を抑える形状へと変化していると考えることができる。なお、個体番号が大きいところで、隣接する自由辺縁の高さが僅かながら異なっている原因については明らかではないが、計算誤差によるものではないかと考えている。

5.2 例題 2：自重を受ける円形平面を有する球形シェル

5.2.1 解析概要

解析モデルは、半径 14.142m の円形平面を有し、点支持された曲率半径 20m の球形シェルとする (図 7)。その他の設定条件は例題 1 と全く同様である。例題 1 のシェルが正方形平面を持つものであるのに対し、このシェルは、平面形状が連続的な円形である一方、支持条件が四点の離散的な支持となっており、それらの相互的な影響による形状変化を求めることが、この例題の主眼である。

図 5 目的関数空間における Pareto 最適解群の存在位置

5.2.2 解析結果と考察

例題 1 と同様にして、本手法により得られた Pareto 最適解群の目的関数空間での存在位置を図 5 に、Pareto 最適解群のそれぞれの解形状のシェル全領域での最大主応力・最大鉛直変位を図 6 に、さらに代表的な Pareto 最適解群 (解曲面群) のシェル形状を図 8 b)~f) に、原曲面のシェル形状を図 8 a) に示す。図 8 f) を見るとスパン中央部分でシェルの曲率が中心部分と比べて反転しており、「反り」の形状が現れていることが確認できる。このことは図 4 f) にも見ることができるが、図 8 f) ではシェル中心部で「むくり」があり、シェルの中心部と端部とで曲率の変化が大きくなっている。これはシェル自由端に生じる面内せん断力をシェル形状の変化により処理する非常に合理的な形状であり、こうした形状が自然に得られていることを確認できる。なお、ここで求めたシェルについて、最大応力はいずれのシェルにおいても支持境界近傍で発生し、最大変位はシェルの中央点付近で発生している。

例題 1 と支点が同一で平面形状のみが違う本例題においても、本手法により本設計問題の多様な Pareto 最適解が得られること、2 つの目的関数は互いにトレード・オフの関係にあること、自由辺縁

図 7 解析モデル

図 6 Pareto 最適解群の最大主応力・最大鉛直変位

図 8 Pareto 最適解のシェル形状の例

中央のライズを上昇させることで形状修正量を抑制しつつひずみエネルギーが小さくなること、ひずみエネルギーの小さな個体は曲げ応力の小さい軸力抵抗型のシェル形状であること、ひずみエネルギーを小さくすることで応答力学量も抑制できることが確認できる。

6 結語

本論文では、設計者の選好と力学的合理性を両立させる自由曲面シェル構造の形態創生法の提案を目的として、曲面形状決定問題を原曲面との差およびひずみエネルギーを目的関数とすることで多目的最適化問題として扱い、多目的遺伝的アルゴリズムにより Pareto 最適解を求める方法について述べた。

本論文の内容は以下のように要約される。

- 1) NURBS を用いることにより、形状表現の高自由度性と曲面形状の滑らかさを維持しながら、形状の記述に要するデータ量を抑制でき、有限要素の節点を全て未知量とする場合に比べて、形状表現に拘束する未知量の大幅な低減を図ることができる。
- 2) 設計者の選好を表現する基準として提案された原曲面との差、力学量としてひずみエネルギーを考えることで、曲面形状決定問題を設計者の選好と力学量を目的関数とした多目的最適化問題に帰着できる。これにより、建築計画的条件を満足した設計者の曲面イメージを損なわずに力学的にも一定の合理性をもつ

たシェル構造の形態を求めることができる。

- 3) NURBS の制御点座標を設計変数、形状修正時の節点座標拘束を制約条件とする多目的最適化問題は、一般逆行列を用いることにより無制約多目的最適化問題として定式化できる。
- 4) 原曲面との差およびひずみエネルギーを目的関数とする多目的最適化問題において、多目的遺伝的アルゴリズムを用いることにより多様な Pareto 最適解群を得ることができる。これにより設計者に他の条件を勘案する選択の幅を与えることができる。

多目的遺伝的アルゴリズムは、感度解析を必要としない遺伝的アルゴリズムの利点を完全に継承した非常に汎用性の高い手法である。本論文では設計者の選好として原曲面との幾何学的な差違、構造合理性を表現する指標である力学量としてひずみエネルギーを採用したが、これは一例に過ぎず、他にも種々の選択があり得る。設計者の選好としては、例えば、構造物の特定の箇所は不動として固定し、それ以外の部分の変化を許すという考え方などは現実的な意匠性に関する指標として充分実用的であろう。また、力学的な指標としては、固有振動数、線形座屈荷重、特定部位の変形量など、種々の指標を考えることができ、これらは本論で示した方法により、まったく同様に扱うことが可能である。また、本論では2とした目的関数を3以上にとることも困難な点はまったく存在せず、今後の応用が期待できる汎用性の大変高い手法であると言うことができる。

参考文献

- 1) 佐々木睦朗. 建築と構造合理性. 建築技術, No. 671, pp. 84-89, 2005.
- 2) P.Pedersen. On the Minimum Mass Layout of Trusses. *AGARD Conference Proceeding*, No. 36, 1970.
- 3) Ph.Trompette, J.L.Mercelin. On the Choice of the Objectives in Shape Optimization. *Engineering Optimization*, 11, (1 / 2), pp. 92-109, 1987.
- 4) L.Younsheng. Sensitivity Analysis in Shape Optimization Design for a Pressure Vessel. *Int. J. Pres. Ves. Piping*, 49, pp. 387-397, 1992.
- 5) J.I.Barbosa, C.M.Soaes, C.A.M.Soaes. Sensitivity Analysis and Shape Optimal Design of Axisymmetric Shell Structures. *Computing Systems in Engineering*, Vol. 2, No. 5-6, pp. 525-533, 1991.
- 6) E.Ramm. Shape Finding Methods of Shells. *Bulletin of the International Association for Shell and Spatial Structures(IASS)*, Vol. 33, pp. 89-99, 1992.
- 7) E.Ramm, G.Mehlhorn. On Shape Finding Methods and Ultimate Load Analyses of Reinforced Concrete Shells. *Eng. Struct.*, Vol. 13, pp. 178-198, 1991.
- 8) E.Hinton, N.V.R.Rao. Structural Shape Optimization of Shells and Folded Plates using Two-noded Finite Strips. *Computers Structures*, Vol. 46, No. 6, pp. 1055-2072, 1993.
- 9) 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. 6.
- 10) 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. 1.
- 11) 陣沛山, 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. 11.
- 12) 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. 2.
- 13) 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.
- 14) 小河利行, 大崎純, 立石理恵. 線形座屈荷重最大化と部材長一様化を目的とした単層ラチスシェルの形状最適化. 日本建築学会構造系論文集, No. 570, pp. 129-136, 2003. 8.
- 15) 佐々木睦朗. FLUX STRUCTURE フラックスストラクチャー. TOTO 出版, 2005.
- 16) 大森博司. 構造形態創生法と構造形態. 建築技術, No. 671, pp. 112-115, 2005.
- 17) 堤和敏, 佐々木啓介, 太田優子. 感性を考慮した建築屋根構造の形態創生に関する研究. 構造工学論文集 B, Vol. 51B, pp. 1-6, 2005.
- 18) G.Farin 著, 木村文彦監修, 山口泰監訳. CAGD のための曲線・曲面理論 実践的利用法. 共立出版, 第2版, 1991.
- 19) E.Zitzler, M.Laumanns, and L.Thiele. SPEA2: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm. *Technical Report 103, Computer Engineering and Communication Networks Lab (TIK)*, 2001.
- 20) 坂和正敏, 田中雅博. 遺伝的アルゴリズム. 朝倉出版, 1995.

(2006年4月4日原稿受理, 2006年8月9日採用決定)