構造設計における多様解導出のための創発設計システム*

井上全人^{*1}, 荻野直樹^{*2}, 松岡由幸^{*1}Emergent Design System for Obtaining Diverse Design Solutions
in Structural DesignMasato INOUE^{*3}, Naoki OGINO and Yoshiyuki MATSUOKA^{*3} Department of Mechanical Engineering, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522 Japan

Conventional structural optimization methods are difficult to apply to the early process of design referred to as conceptual design, in which diverse design solutions are to be obtained. This paper describes a design method that obtains diverse design solutions. As a first step, a form-generation system that generates diverse forms is proposed. In this case, the diversity of organism is noted, and the form-generation method is referred to 'induction' and 'apical dominance' in the developmental process of organism. The proposed system, consisting of a generation process and an optimization process, is applied to the structural design of chairs, and the diversity of solutions is analyzed. As a result, it is shown that, as compared with conventional structural optimization methods, the proposed method obtains design solutions of adequate diversity. The results indicate the effectiveness of the proposed system for obtaining diverse design solutions.

Key Words: Design Engineering, Optimum Design, Finite Element Method, Emergence, Diverse Design Solutions, Structural Design, Cellular Automata, Voxel

1. 緒言

従来の工学設計においては、一般に、数値計画法に代表されるように、設計対象の形状寸法や位置などを設計変数とすることにより、パラメトリックに解を導出する方法が多く用いられる。この方法は、設計者が設定した条件のもとで最適唯一解を導出する方法であり、設計目標や設計変数など設計対象における設計条件やパラメータが明確な設計問題への適用に優れている。しかしながら、概念設計が行われる設計上流過程においては、設計目標が不明確な場合や設計条件が少ない場合がある。さらに、設計上流過程から詳細設計が行われる設計下流過程へ設計が進行するにつれて、設計目標が徐々に明確になり、設計条件が新たに追加される場合がある。これらの場合においては、従来の工学設計方法を用いて最適唯一解を導出するだけでなく、解空間から大域的に解探索を行い、少ない設計条件から多様解を導出することが強く望まれている。

設計対象の形状寸法や位置などをパラメータとせず、解空間から大域的に解探索を行う工学設計方法として、遺伝的アルゴリズムを用いた方法⁽¹⁾や均質化法を用いた方法⁽²⁾など、外形状を最適化するのではなく、位相構造を最適化する方法^{(3)~(5)}が提案されている。これらの方法は、構造の密度やヤング率などを変化させることにより、ノンパラメトリックに形状の最適な位相を決定する方法として有効性が示されている。しかしながら、得られた位相が、制約条件や目的関数などを詳細に設定した設計条件下における解であることから、少ない設計条件から設計解を導出することは難しい。そこで、筆者らは、少ない設計条件からの多様解導出が可能な新たな工学設計方法の基礎研究を進めてきた⁽⁶⁾。本設計方法は、近年、工学の分野において注目されている創発⁽⁷⁾にもとづく方法である。本報においては、創発にもとづく設計システム（以下、創発設計システムと称す）を提案し、本システムの多様解導出に対する可能性を示すことを目的とする。そのため、まず、椅子を設計対象とし、提案したシステムを椅子の構造設計へ適用する。そして、導出された解の多様性解析を行うことにより、提案したシステムの多様解導出に対する可能性について考察を行う。

* 原稿受付 2003年2月3日。

^{*1} 正員、慶應義塾大学理工学部(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)。^{*2} 慶應義塾大学大学院理工学研究科。

E-mail: inoue@mech.keio.ac.jp

2. 創発設計システムの提案

本章においては、多様解を導出することが可能な創発設計システムを提案する。

2.1 創発過程と設計過程 自然界においては、同環境のもとに非常に多様な生物種が存在する。生物学や生態学の分野において、このような多様な生物種は、創発過程により生み出されると考えられはじめた。北村⁽⁶⁾によれば創発とは、「自律的にふるまう個体（要素）間および環境との間の局所的な相互作用が大域的な秩序を発現し、他方、そのように生じた秩序が個体のふるまいを拘束するという双方向の動的過程により、新しい機能、形質、行動が獲得されること」とされている。また、一般に、設計は逆問題とされ、論理的な解の決定が難しいとされている。設計解が与えられていれば、それに対する評価は一意に定まるが、目的とする評価が与えられていた場合に、設計解を導くことは難しい。数理計画法などの従来の工学設計方法においては、この逆問題に対して設計の境界条件を与えることで解を導いている。境界条件を設定することが難しい設計上流過程においては逆問題を解くことは難しいとされている。実際は、デザイナーや設計者はいくつもの設計案を直観で導き、順問題をくり返し解くことにより、与えられた評価を満足するような解を探索している。これより、設計過程をつぎのように表すことができる。まず、導いた設計案に対して評価を与える。その評価がある基準未満であれば設計案は棄却され、基準以上であれば設計案となる。そして、設計案が得られたならば、さらに設計解として最適化する。

このような設計過程と前述した創発過程を比較すると類似性を見出すことができる。設計者やデザイナーの直観により設計案を導き、ある基準以上の評価を有する設計案を発現する過程は、創発過程における、全体の特性に対して非明示的な構成要素同士が相互作用を及ぼしあい全体の特性を発現する過程に類似している。また、設計案の詳細部分が最適化される過程は、創発過程における全体の特性により構成要素が拘束されるという過程に類似している。このような類似性は、創発の概念を設計に応用する可能性を示唆している。

2.2 創発設計システムの基本構造 創発設計システムの基本構造は、創発のボトムアップ過程である発現過程、およびトップダウン過程である最適化過程の二つの過程から構成される。発現過程においては、少ない設計条件のもと多様な設計案を導出する。このとき、従来の工学設計方法のように特定の目的に対して最適化を行うのではなく、緩和された低い評価基準を設定

Fig.1 Structure of the system in the generation process

し、その基準を満足したときに設計案とする。一方、最適化過程においては、多くの設計条件のもと発現過程において導出された多様な設計案をそれぞれ最適化し、多様な設計解を導出する。

3. 創発設計システムの構造設計への適用

本章においては、2章において提案した創発設計システムを椅子の構造設計へ適用する。このとき、有限要素法を用いた構造解析を行う際のメッシュ作成が不要なボクセル表現を用いることとした。

3.1 発現過程のシステム

3.1.1 システムの構成 発現過程のシステムにおいては、形状は明確な目的関数を必要とせず、自己組織的に生成される。そして、非合目的にかつ自己組織的に生成された形状に対して評価を行い、評価を満足した形状を設計案として抽出する。発現過程のシステムは、自己組織的に多様な形状を生成する形状生成部と生成された形状を評価する形状評価部から構成される。発現過程におけるシステムの構成を図1に示す。

3.1.2 形状生成部

a. セルラ・オートマトンの応用 本研究においては、自己組織的な形状生成方法を構築するために、セルラ・オートマトン (Cellular Automata, 以後 CA と略記する) に着目した。CA においては、有限個 (n 個) の離散状態 S を有するセル C が、離散的な時間ステップ t の更新とともに自己と近傍セル N の状態を入力とする局所ルールに従い状態を変化していく。CA の状態変化は、状態遷移関数 f により次式のように表される。

$$C^{(t+1)} = f(C^{(t)}, N^{(t)}) \quad (1)$$

$$C = \{S_1, S_2, \dots, S_{n-1}, S_n\}$$

本研究においては、セルの状態を要素の有無という2状態($n=2$)とし、要素の集合として形状を表現する。形状は、セルの局所的な相互作用を記述した状態遷移関数により、自己組織的に生成される。

ただし、一般にCAにより生成される形状は初期形状に依存することが報告されている⁽⁴⁾。これより、特定の初期形状を設定することは、生成される形状の範囲を限定し、多様な形状の生成が妨げられると考えられる。そこで本研究においては、特定の初期形状を設定せず、単一要素(初期要素)から形状を生成することとした。CAを用いた形状生成の研究においては、すべてのセルが状態遷移を行うことが一般的であることに対し⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁹⁾、本方法においては、要素の存在するセルの近傍セルのみが状態遷移を行うこととした。また、一般的にCAにおいては、出力がセルのつぎの状態であることに対し、本方法においては、要素の発生方向とした。この方法の構築にあたり、上記の特徴を満足する状態遷移関数の入出力情報を決定する必要がある。この決定のために、単一の細胞から細胞増殖をくり返して個体を形成する生物の発生過程に着目した。

b. 生物の発生過程の応用 発生生物学⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾において、細胞増殖をくり返して生物の形態が発現する現象を形態形成という。本方法においては、生物における多様な形態形成に関与する発生特性⁽¹²⁾である誘導

(induction)および頂部支配(apical dominance)を応用した。そして、これら二つの特性をベクトル表現でモデル化することとした。これにより、要素の位置と重みを同時に表現することが可能となる。

①誘導の応用 誘導とは、生物の形態形成において、ある細胞が他の隣接細胞へ作用して、その隣接細胞を特定の形質へ変化させる特性である。この特性は、個々の細胞が局所的な相互作用を生じ、隣接細胞の発生に影響を与える特性であると捉えられる。ここで、形状生成空間に存在するすべての要素において、任意の要素を囲む26個のセル(近傍セル)に作用を及ぼしていると考えられる。この作用により、近傍セルに存在する要素(近傍要素)は、あるベクトルを受ける。このベクトルは、作用を及ぼす要素から作用を受ける要素へ向かう方向と、その方向に応じた大きさを有する。ここで、形状生成空間内の要素のなかで、要素発生の判定を行う要素を注目要素と呼ぶこととする。複数の近傍要素を持つ注目要素が受けるベクトルは、近傍要素のそれぞれが注目要素に与えるベクトルを合成したベクトルとなる(図2)。このベクトルは注目要素近傍における情報を反映するため、近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ と呼び、次式のように表される。

Fig.2 Neighborhood information vector

Fig.3 Positional information vector

$$\mathbf{v}_n = \sum_{i=1}^{26} \frac{b_i w_i}{w_{\max}} \mathbf{e}_i \quad (2)$$

ここで、 i は近傍要素番号、 b_i は1または0の値をとる要素の有無、 w_i はベクトルの係数、 $w_{\max}$ はベクトルの係数の最大値、 $\mathbf{e}_i$ は近傍要素から注目要素へ向かう方向の単位ベクトルである。

②頂部支配の応用 頂部支配とは、頂部(apex)と呼ばれる個体発生を統制する役割を担う組織により、支配的に形態形成を行う特性である。この支配的な作用は、頂部からの距離に近いほど大きいと言われている。この特性は、頂部が他の組織への支配的な作用を生じ、個体の形態形成に影響を与える特性であると捉えられる。ここで、初期要素を頂部とし、初期要素から位置情報を伝えるための支配的な作用が生じていると考える。形状生成空間の各要素は、この作用により、次式のような位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ を生じる(図3)。

$$\mathbf{v}_p = \frac{d_{\max} - d}{d_{\max}} \mathbf{e}_d \quad (3)$$

ここで、 $d_{\max}$ は頂部と頂部から最も遠いセルとの距離、 d は頂部と注目要素との距離、 $\mathbf{e}_d$ は頂部から注目要素へ向かう方向の単位ベクトルである。

③誘導と頂部支配の合成 二つのベクトルの合成比率 k を設定し、入力ベクトル $\mathbf{v}_{in}$ を定義した。

$$\mathbf{v}_{in} = k \mathbf{v}_n + (1-k) \mathbf{v}_p \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (4)$$

c. 形状生成の過程 CAでは、入力を状態遷移関数により変換し、出力を求める。本方法においては、要素が受けたベクトルを入力とし、状態遷移関数により要素発生の方向が決定され、要素発生のくり返しにより形状が生成される。本研究においては、要素発生の方向を一次元配列に記述し、設定した最大発生世代数に達するまで要素の発生をくり返した(図4)。

3.1.3 形状評価部 発現過程においては、緩和された低い評価基準を設定する。本研究においては、形状が

Fig.4 Process of form generation

椅子として認められるための最低限の評価項目を設定し、接地面の形成度 f_{gr} 、座面の形成度 f_{sf} 、安定度 f_{bl} の3項目を以下のように設定した。

$$f_{gr} = \frac{d_{elem}}{d_{cell}} \quad (5)$$

ここで、 d_{elem} は座面と最下端要素との高度差、 d_{cell} は座面と地面の高度差である。

$$f_{sf} = \frac{n_{elem}}{n_{cell}} \quad (6)$$

ここで、 n_{elem} は座面部に発生した要素の数、 n_{cell} は座面部に存在するべきセルの数である。

$$f_{bl} = \begin{cases} 1.0, & \text{for } \alpha_{bl} < \pi \\ 1 - \frac{\alpha_{bl} - \pi}{\pi}, & \text{for } \alpha_{bl} \geq \pi \end{cases} \quad (7)$$

ここで、地面に接する各要素と重心のなす角度のなかで最も大きい角度を α_{bl} とする。

これらの3項目はそれぞれ、0.0から1.0の値をとり、三つの評価項目が次式を満足する形状を設計案として抽出する。

$$f_{gr} = f_{sf} = f_{bl} = 1.0 \quad (8)$$

そして、設計案が30個抽出されるまで、形状の生成をくり返す。また、形状生成空間を設定し、着座姿勢の人間が占有する空間に要素の発生制限を加える。

3.1.4 実行結果 発現過程におけるシステムのパラメータである近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ と位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ の合成比率 k と要素の最大発生世代数の変化にともなう生成形状の傾向について解析を行った(図5, 6)。ただし、位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ のみ ($k=0.0$) のときには設計案となる形状は生成されなかった。

図5より、合成比率 k の増加にともない、骨組状の形状から塊状の形状が生成される傾向が確認できた。この傾向は、最大発生世代数を変化させたときにおいても同様であった。これより、近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ は、塊状の形状生成を促すことが明らかとなり、要素

Fig.5 Change of forms followed by composite ratio k (maximum number of generations 20)

Fig.6 Change of forms followed by maximum number of generations ($k=0.1$)

発生を促進する働きを有することが示唆された。一方、位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ は、単独の形状生成の結果からも、要素発生を抑制する働きを有することが示唆された。

また、図6より、最大発生世代数の増加にともない、塊状の形状が生成され、要素発生を促進する傾向が確認できた。この傾向は、合成比率 k を変化させたときにおいても同様であった。これより、最大発生世代数は、要素発生を制御するための重要なパラメータであることが示された。

3.2 最適化過程のシステム

3.2.1 システムの構成 最適化過程のシステムにおいては、発現過程により導出された多様な設計案を設定した設計目標に対してそれぞれ最適化することにより多様な設計解を導出する。本研究の形状表現は、ボクセル表現であるため、ボクセルの有無を設計変数とすることが容易である。本研究においては、ボクセルの有無を設計変数とし、設計変数が多い問題に対しても適用可能な最適規準法を用いた。最適化過程のシステムは、発現過程により生成された形状を変換する形状変換部と変換された形状を評価する形状評価部から構成される。形状変換部において変換された形状が形状評価部において評価され、評価結果が形状変換部にフィードバックされ、つぎの変換が行われる。この操

Fig.7 Structure of the system in the optimization process

作をくり返し行うことにより，設定された設計目標に対して最適化された設計解の導出を行う．最適化過程におけるシステムの構成を図7に示す．

・3.2.2 形状変換部 人が着座する椅子として要求される機能を果たすためには，力学条件を考慮する必要がある．そこで，本研究においては，設計目標を軽量化とし，制約条件を発現過程の設計条件(8)式に加え強度とし，以下のように設定した．

$$\begin{aligned} & \text{Minimize : } W \\ & \text{subject to : } f_{gr} = f_{sf} = f_{bl} = 1.0, \\ & \quad \bar{\sigma}_{\max} \leq \bar{\sigma}_{al} \end{aligned} \quad (9)$$

ここで， W を形状の重量， $\bar{\sigma}_{\max}$ を最大相当応力値， $\bar{\sigma}_{al}$ を許容応力値とする．形状変換においては，有限要素法により算出された相当応力分布を用いる．形状変換部は，形状の強度を増加させるための強度増加変換と形状の重量を減少させるための重量減少変換から構成される．強度増加変換においては，許容応力値を超える最大相当応力値を有する節点の周りに要素を付加する(図8)．一方，重量減少変換においては，最小相当応力値を有する要素を削除する(図9)．

3.2.3 形状評価部 形状評価部においては，形状変換部により変換された形状を評価する．この際，以下に示すラグランジュ乗数 ζ を導入した目的関数 $\phi^{(n)}$ を設定し，その最大化を行う．

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } \phi^{(n)} \\ & \phi^{(n)} = \frac{W^{(n-1)} - W^{(n)}}{W^{(n-1)}} + \zeta \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{\max}^{(n)}}{\bar{\sigma}_{al}} \right) \\ & \zeta = \begin{cases} 1, & \text{for } \bar{\sigma}_{\max}^{(n)} > \bar{\sigma}_{al} \\ 0, & \text{for } \bar{\sigma}_{\max}^{(n)} \leq \bar{\sigma}_{al} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

Fig.8 Modification for increasing strength

Fig.9 Modification for reducing weight

ここで， $W^{(n)}$ を状態 n における総重量， $\bar{\sigma}_{\max}^{(n)}$ を状態 n における最大相当応力値とする．最大相当応力値が許容応力値を超えている場合には，強度増加変換と重量減少変換の二つの変換を行い，許容応力値以下の場合には重量減少変換のみを行う．変換された形状が(8)式を満足し，かつ目的関数 $\phi^{(n)}$ の値が増加する場合に，その形状をつぎの状態 $n+1$ とし，改めて基準を設定する．また，条件のうち一つでも満足しない場合には，前の状態 n に戻り，他の要素変換を行う(図7)．

3.2.4 実行結果 システムを実行するにあたり，材料特性および荷重条件を設定した．材料は，ポリスチレンを想定し，ヤング率3.3GPa，ポアソン比0.33，質量密度 $1.05 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，許容応力1.7MPaと設定した．そして，荷重条件は，着座時に動的に荷重が負荷されることを想定し，衝撃応力を考慮して座面方向に10MPa，背もたれ方向に6MPaの分布荷重を設定した．その結果，発現過程と最適化過程の二つの過程を経ることに

Fig.10 Generation process and optimization process

より、図10のような過程で形状が最適化された。これより、発現過程において導出された設計案の特徴を保持しながら最適化されることが示された。

4. 創発設計システムの有効性解析

本章においては、本システムを椅子の構造設計へ適用した際に導出された解の多様性解析および力学解析を行うことにより、本システムの多様解導出に対する可能性について考察を行う。

4.1 多様性解析

4.1.1 多様性指標の定義 ここでは、本システムの有効性を検証するために、生成形状の多様性を定量的に解析する。構造設計においては、有限要素法を用いた構造解析を行う際のメッシュ作成を必要とせず、利便性が高いボクセル表現を用いることが主流となっている。その際に、形状をボクセルの有無により表現する。このため、ボクセルの有無による幾何学的な観点からの多様性指標 D を定義した。

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n D_{ij} \right)}{{}_nC_2} \quad (11)$$

$$D_{ij} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{m_{ij}} \delta_{ijk}}{m_{ij}}$$

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{for } cell[i][k] = cell[j][k] = 1 \\ 0, & \text{for } cell[i][k] \neq cell[j][k] \end{cases}$$

ここで、 $cell[p][q]$ は形状 p の第 q 番目のセルの状態（要素あり：1，要素なし：0）、 m_{ij} は任意の2形状 i, j の和集合のセル数、 n は形状の個数（ $n=30$ ）である。この指標においては、まず、任意の2形状 i, j を重ねた場合に重複する要素の個数を測定する。そして、重複した要素数の、2形状の和集合を構成する要素数 m_{ij}

Fig.11 Analytical results of diversity

に対する割合を算出することにより、2形状の類似性を算出し、その類似性を1から減じた値を2形状の多様性指標 D_{ij} とする。そして、この2形状の多様性指標 D_{ij} をもとに解となる形状のすべての組合せの平均値を多様性指標 D とする。

4.1.2 合成比率および最大発生世代数の変化にともなう解の多様性の影響解析 本項においては、発現過程におけるシステムのパラメータである近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ と位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ の合成比率 k と要素の最大発生世代数の変化にともなう解の多様性への影響を解析した（図11）。

まず、合成比率 k に注目すると、多様性は合成比率 k の増加とともに低下する傾向が示された。これは、近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ の影響が大きくなることにより、塊状の形状生成が促進されるためであると考えられる。また、位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ のみで実行した場合（ $k=0.0$ ）には、3.1.4 項の結果と同様、設計案となる形状は生成されなかった。このことから、形状生成を促進する働きを有する近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ と形状生成を抑制する働きを有する位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ の両者を合成することが、多様な形状の生成につながると考えられる。

つぎに、要素の最大発生世代数に注目すると、最大

Fig. 12 Relationship between composite ratio k and diversity
(maximum number of generations 20)

Fig. 13 Analysis of diversity by the diversity index
($k = 0.1$, maximum number of generations 35)

Fig. 14 Effect of number of generations on maximum equivalent stress and weight

発生数の増加にともない、多様性が減少する傾向が示された。これは、最大発生世代数の増加にともない、塊状の形状生成が促進されるためであると考えられる。また、各合成比率 k において、多様性のピークが存在することからも、適度な合成比率 k と最大発生世代数の組合せを設定する必要性が示唆された。

以上より、発現過程において、合成比率 k および最大発生世代数は、形状の多様性を制御する重要なパラメータであることが示された。

4.1.3 発現および最適化過程を経た解の多様性解析

定義した多様性指標を用いて、発現過程および最適化過程における合成比率 k の変化にともなう解の多様性の変化を解析した (図 12)。その結果、最適化過程を経た解の多様性の変化は、発現過程における解の多様性の変化と定性的に類似していることが示された。これより、最適化過程を経た解は、発現過程により得られた解に依存することが示唆された。

また、発現過程および最適化過程を経た解の多様性解析を行った (図 13)。そして、発現過程における解の多様性と最適化過程を経た解の多様性について有意水準 0.01 の仮説検定を行った結果、有意確率 $p < 0.01$ であり、両者の有意差は確認されなかった。これより、最適化過程を経た解の多様性は、発現過程における解の多様性に対し、大きく低下することなく多様性が保持されることが示された。

4.2 力学解析

4.2.1 変換世代数と相当応力、重量の関係 最適化過程における変換世代数と相当応力、重量の関係を図 14 に示す。このように、初期状態の最大相当応力値が許容応力値を超えた場合 ($\bar{\sigma}_{\max} > \bar{\sigma}_{\text{al}} = 1.7\text{MPa}$) においては、要素の付加により重量が増加し、同時に最大相当応力値は減少する。そして、許容応力値以下の状態を有した場合 ($\bar{\sigma}_{\max} \leq \bar{\sigma}_{\text{al}}$) においては、許容応力値内で軽量化を行い、重量が減少することが確認された。

4.2.2 従来の最適化手法により導出された解との比較

本システムにより導出された解と従来の最適化手法により導出された解を重量と最大相当応力値について比較した (図 15, 16)。このとき、従来の最適化手法として、3.2 節に示した最適化過程における最適規準法を用い、3.2.4 項と同様の設定条件下で最適化過程のみを実行した。なお、初期形状は形状生成空間とした。

図 15 および図 16 より、最適化過程を経た解は、許容応力値以下であると同時に、従来の最適化手法により導出された解よりも軽量化された解が含まれることが認められた。また、発現過程の重量のばらつきを保持したまま許容応力値以下の解が導出されることも認められた。これより、発現過程における解の多様性が保持されながら、最適化されることが示され、発現過程および最適化過程の二つの過程を有する本システムの多様解導出に対する可能性が示唆された。

Fig.15 Change of weight

Fig.16 Change of stress

5. 結言

本報においては、従来の工学設計方法を適用することが難しかった少ない設計条件からの多様解導出が可能な創発設計システムを提案した。さらに、本システムを椅子の構造設計へ適用し、得られた解の多様性解析を行った。その結果、以下のことが示された。

- (1) 形状生成方法においては、生物の多様な形態形成に関与する誘導と頂部支配を応用した。その結果、誘導の応用は形状生成を促進する働きを、一方、頂部支配の応用は形状生成を抑制する働きを有することが明らかとなった。本方法においては、この両者を合成することにより、多様な形状を生成することを可能とした。
- (2) 発現過程においては、上記の形状生成方法をもとに、少ない設計条件下で、初期形状を必要とせず、単一要素から自己組織的に多様な設計案が導出されることを可能とした。
- (3) 最適化過程においては、多くの設計条件下で、発現過程により得られた多様な設計案の特徴をそれぞれ保持した設計解が導出されることを可能とした。
- (4) システムのパラメータである近傍情報ベクトル $\mathbf{v}_n$ と位置情報ベクトル $\mathbf{v}_p$ の合成比率 k と要素の最大発生世代数は、形状の多様性を制御する重要なパラメータであることを確認し、これらを制御することにより多様な形状生成を可能とした。
- (5) 導出された解に対する多様性解析の結果、最適化過程を経た後の解は、従来の最適化手法により得られた解よりも軽量化された解が含まれるとともに、発現過程で得られた高い多様性を保持することが確認された。両過程を経ることにより、解空間から大域的な解探索が行われ、機能を満足する多様な解の集合を得ることを実現した。

本報においては、本システムを椅子の構造設計に適用することにより、多様解を工学的に導出する可能性

を示唆した。多様解導出を可能とする本システムは、設計過程において新たに設計条件が追加される設計問題という、従来の工学設計方法では解決が難しかった問題に対しても有効であると考えられる。本システムを様々な適用事例について実行し、多目的問題に対する新たな解決方法としての可能性についても追究していきたいと考えている。

文 献

- (1) Chapman, CD., Jakiela, MJ., Genetic Algorithm Based Structural Topology Simplification Consideration, Trans. ASME, J. of Mech. Des., **118** (1996), 89-98.
- (2) Bense, M., Kikuchi, N., Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, **71** (1988), 197-224.
- (3) Kumar, AV., Gossard, DC., Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures, Trans. ASME, J. of Mech. Des., **118** (1996), 68-74.
- (4) 伊能教夫, 上杉武文, 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン (さまざまな位相構造の生成とその形態比較), 機論, **61**-585, A (1995), 1109-1114.
- (5) 尾田十八, 主税雅裕, 局所ルールによる大規模構造物の最適化について, 機論, **63**-606, A (1997), 425-430.
- (6) Inoue, M., Matsuoka, Y., Evolutionary Form-Generation System Based on Emergence, The Science of Design, **48**-2 (2001), 1-8.
- (7) Langton, C.G., Artificial Life, Addison-Wesley Pub Co. (1989), 1-48.
- (8) 北村新三, 創発的機能形成システム理論に向けて, 計測と制御, **35**-7 (1996), 492-495.
- (9) 北栄輔, 豊田哲也, 野村社史, セルラ・オートマタを用いた構造物の設計 (ローカル・ルールの導出に関する一考察), 機論, **64**-622, A (1998), 1717-1724.
- (10) 中沢信午, 形態形成の原理, 裳華房 (1975).
- (11) 塩川光一郎, 発生物学 (上・中・下), トッパン (1991).
- (12) 松岡由幸, 藤井健史, 形態多様性を生起させる生物の発生特性を応用した形状生成方法, デザイン学研究, **49**-3 (2002), 93-102.