創発設計システムの構築に向けた大規模設計対象への事例適用*

佐藤 浩一郎^{*1}, 氏 家 良 樹^{*2}, 松 岡 由 幸^{*3}Application of the Emergent Design System to a Large-Scale
Design Object for Its ConstructionKoichiro SATO^{*4}, Yoshiki UJIE and Yoshiyuki MATSUOKA^{*4}Graduate School of Science and Technology, Keio University,
3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 223-8522 Japan

In the early design process, it is difficult to apply the conventional engineering design method from the necessity of the setting of the objective function. Therefore, in the past study, the emergent design system which is applicable for the early design process is proposed, and in an application to the design object without connectivity number in the form generation space and with number of elements of about 10^4 , effectiveness of deriving diverse design solutions using this system is indicated. In this study, we applied this system to a large-scale design object (a body in white) that has one or more connectivity number in the form generation space and number of elements of 10^5 or more, and it contributed to construction of this system.

Key Words: Emergent Design, Diverse Design Solutions, Body in White

1. 緒言

設計過程は、一般に上流過程と下流過程に大別される。前者の上流過程においては、概念設計や基本設計が行われる。概念設計ではどのような人工物を設計するかという設計対象のコンセプトを決定し、基本設計では概念設計で決定したコンセプトを実現するための大まかな形状や構造の決定を行う。この上流過程においては、設計目標や条件が不明確であるため、大域的な解探索により多様な設計解候補を導出する。後者の下流過程においては詳細設計が行われる。詳細設計では、基本設計で決定した形状・構造をもとに加工や組み立て等を考慮し、最終的な設計解を導出する。下流過程では、上流過程と比較して設計目標や条件が明確であるため、最適化法⁽¹⁻⁵⁾等を用いることによって合目的な唯一解を導出することが可能である。一方、上流過程においては、設計者の持つ経験や知識などを利用して試行錯誤的に多様な設計解候補を導出するため、設計者の経験や知識に依存してしまい、局所解に陥る可能性がある。そのため、より大域的な解探索が可能な手法が必要とされている。そこで、筆者らは設計上流過程においても大域的な解探索が可能な、創発の概

念に基づく設計方法および設計システムの研究を進めてきた⁽⁶⁻⁹⁾。

本報の研究の位置づけを図1に示す。過去の研究において、大域的な解探索が可能な設計システムである創発設計システムが提案されており、椅子の形状生成への試行の結果、強度を満足した多様な形状が導出されることが確認されている⁽⁸⁾。前報⁽⁹⁾においては、創発設計システムの構築に向けて、人工股関節システムを設計対象として本システムに適用を行った。この設計対象の特徴は、形状を生成する空間の位相幾何学における連結数(CN)が0であり、要素数が 10^4 オーダーであった。ここで、連結数とは閉曲面に存在する穴の個数を表し、本研究では形状生成空間に存在する穴の個数を表している。本システムを適用した結果、質量と最大相当応力について本システムと従来の最適化法により得られた従来解を比較することにより、従来解と同等の強度を有し、かつ軽量化された多様な設計解が導出された。この結果から本システムの多様な設計解導出に対する有効性が示され、システム構築の一助とした。しかし、実際の設計問題への適用を考慮した場合、CNが1以上となる複雑な形状生成空間における問題や、要素数のオーダーが 10^4 より大きい問題等に適用する必要があると考えられる。

本研究では、創発設計システムを大規模設計対象に適用を行う。本報における大規模設計対象とは、形状

* 原稿受付 2008年8月4日。

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

E-mail: Koichiro_Sato@a7.keio.jp

生成空間の CN が 1 以上であり、さらに要素数のオーダーが 10^5 である設計対象を指す。設計対象としては、車体骨格を選定し、本システムの適用を行う。そして、本システムによる解と従来の最適化法による解の比較を行う。そして、大規模設計対象に対する本システムの多様な設計解導出における有効性を示し、システム構築の一助とする。

2. 創発設計システム

本章においては、多様な設計解を導出することが可能な創発設計システムの概要について述べる。

2.1 創発と創発設計 自然界においては、同一環境下においても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⁽¹⁰⁾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（ボトムアップ）、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（トップダウン）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。一方、設計過程と創発過程の類似性を見出すことができる。設計過程におけ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

を発現するボトムアップに類似している。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トップダウンに類似している。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。特に設計上流過程においては、このボトムアップとトップダウンの両者が行われる傾向にある。このボトムアップとトップダウンの双方向性を有する「創発設計」が行われることにより、新しくかつ多様な設計解候補が導出されると考えられる。

2.2 創発設計システム 前節で述べた創発設計に基づく設計システムとして創発設計システムが提案されている⁽⁶⁾。本システムは、多様な 3 次元形状を生成する過程であるボトムアップ過程と、ボトムアップ過程で得られた形状を最適化するトップダウン過程の 2 つの過程により構成される。

システム図を図 2 に示す。ボトムアップ過程においては、セルラ・オートマトン（以下 CA と略記する）を用いて自己組織的に多様な形状の生成を行う。本システムでは、ボクセルを用いて CA における要素を表現している。また、CA における状態遷移ルールとして、生物の多様性に起因する発生特性である誘導と頂部支配を導入した。誘導とは、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。これを、注目要素の周辺から受ける近傍情報ベクトル v_n としてモデル化した（図 3(a)）。また、頂部支配とは、頂部と呼ばれる個体発生を統制する支配的な要素が、形態形成に影響を与えるという特性である。これを、頂部から注目要素へ影響する位置情報ベクトル v_p としてモデル化した（図 3(b)）。これにより、頂部に近い要素ほど頂部の影響を強く受けるとい

Fig.2 Emergent design system

Fig.3 Input vector

う性質を持つ。2つのベクトルを結合し、その合成比率を k と定義し、CAの入力ベクトルを次式のように設定した。

$$v_{in} = k v_n + (1-k) v_p \quad (0 \leq k \leq 1) \quad (1)$$

k の値は、誘導と頂部支配の作用の合成の割合を調整可能なパラメータである。式(1)において k の値が1に近ければ誘導による影響が強く、注目要素の周囲に存在する要素から様々な方向の作用を受けることになり塊状の形状が生成される傾向がある。一方、式(1)において k の値が0に近ければ頂部支配による影響が強く、常に頂部から同一方向の作用を受けることになり棒状や板状の形状が生成される傾向がある。ボトムアップ過程における入力パラメータは合成比率 k の他に頂部位置、形状生成空間、要素サイズ、初期要素、発生世代数、および評価項目がある。頂部位置とは、頂部支配の作用の中心となる位置である。形状生成空間とは、要素の生成範囲を示す空間である。要素サイズとは、形状を構成するボクセルの大きさである。初期要素とは、CAにおいて形状生成を開始する要素であり、設計対象において要素が必ず存在する部位を初期要素とすることが望ましい。発生世代数とは、形状を更新する回数である。また、評価項目とは、ボトムアップ過程において満たすべき項目である。

トップダウン過程においては、ボトムアップ過程により導出された多様な形状について、それぞれを設計者が定める条件の下で最適化する。最適化法として、本システムでは最適性規準法と均質化法もしくは密度法による位相最適化が実行可能である。本研究では、均質化法と比較して設計変数が少なく計算効率に優れている密度法による位相最適化を実行することとした。密度法による位相最適化は、材料の弾性剛性が密度のべき乗に比例すると仮定し、各要素の密度を設計変数として最適な材料分布を求める方法である⁽¹¹⁾。トップダウン過程における入力パラメータには、荷重条件や拘束条件のような力学条件、目的関数および制約関数がある。トップダウン過程においては、以上のパラメ

Fig.4 Form generation space of BIW and initial elements

ータを用いて、実際に設計対象に求められる条件を入力する。

3. 創発設計システムの大規模設計対象への適用

本章では、2章において示した創発設計システムを車体骨格設計へ適用する。また、多様な設計解導出に対する有効性を検証する。

3.1 大規模設計対象 過去の研究において形状生成空間の CN が0であり、要素数が 10^4 オーダーである設計条件として人工股関節システム形状に適用を行った。しかし、実際の設計に本システムを用いる場合には、 CN が1以上であり、さらに多くの要素数を有する設計対象に適用し、多様な設計解導出に対する有効性を示す必要がある。そこで、本研究においては、大規模設計対象（形状生成空間の CN が1以上であり、形状を構成する要素数のオーダーが 10^5 である設計対象）に本システムを適用し、そのような設計対象として車体骨格を選定した。

3.2 ボトムアップ過程

3.2.1 パラメータ設定 本研究における形状生成空間としては、通常的車体骨格を拡張した形状とし、図4のように設定した。また、ボクセルの大きさは一辺15mmとし、総要素数は約23万個となった。初期要素は、生成される形状すべてに存在するため、設計上必要な部位に配置することが適当である。本研究においては、構造上要素が必要である各ピラーとルーフとの接合部とトップダウン過程において入力する荷重点の部位に初期要素を図4のように配置した。発生世代数が増加すると形状の体積も増加することになる。本研究では要素数20万個以上であるため、過去の研究⁽⁶⁻⁹⁾のように数値を設定せずに発生が収束した場合に発生世代数を停止することとした。評価項目は、トップダウン過程における力学解析の実行を考慮して、複数箇所から生長する要素同士が一続きになっていることとした。頂部は、図5に示すような前後搭乗者の着座位置、頭部位置および脚部位置に設定した。合成比率は0.1から0.9まで0.1ずつ変化させて形状生成を行うこととした。

Fig.5 Position of apexes

Fig.6 Form generation process ($k = 0.6$)

3.2.2 ボトムアップ過程の実行結果 設定したパラメータでの形状生成の様子と導出された形状の一例を図6と図7に示す。複数の初期要素から生長した要素同士の繋がり方が各形状で異なり、ルーフの前面が大きく開いている形状やフロント部が結合していない形状など、それぞれ特徴が異なる形状が導出された。合成比率 k の値が低いと頂部支配による位置情報ベクトルの作用が大きくなるため、形状生成が抑制され、各初期要素から発生した要素同士が繋がりにくくなり、評価項目を満たさなくなるため、合成比率 k が 0.6 未満では形状が導出されなかった。この結果については、5章において考察を行う。

3.3 トップダウン過程

3.3.1 荷重条件と材料特性値の設定 本研究においては、最適化に用いた力学条件を図8のように設定した。車体骨格の捩り剛性、曲げ剛性、エンジンルーム剛性、ピラー横剛性の4つの剛性に関わる荷重条件をそれぞれ設定した。最適化の際に用いた材料は炭素鋼とし、弾性係数とポアソン比はそれぞれ 210GPa, 0.3 と設定した。また、一般的なホワイトボディ設計に従い、ドアやエンジン等を取り付けていない状態で解析を行った。

3.3.2 目的関数および制約条件 本研究では、目的関数を剛性である平均コンプライアンス C 、制約条件をボトムアップ過程で導出された形状の質量の 10% 以下になるように設定した。密度法を用いた位相最適化問題は次式のように定式化される⁽¹⁾。

$$\min_{\rho \in L} [C(\rho)] \quad C(\rho) = \mathbf{d}^T \mathbf{K}(\rho) \mathbf{d} \quad (2)$$

$$L = \left\{ \rho \mid 0 \leq \rho_i \leq 1 \ (i=1, \dots, N), \sum_{i=1}^N \rho_i \leq m_s \right\}$$

ここで、 ρ は設計変数 $\{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}$ で ρ_i は i 番目要素の密度比を表し、 N は有限要素数である。また、 $\mathbf{d}$ は節点変位ベクトル、 $\mathbf{K}$ は全体剛性マトリックス、 L は与えられた条件を満たす許容設計変数の集合、 m_s は密度比の制約値であり⁽¹⁾、本研究では全要素の密度比を 1 とした場合の 10% とした。

3.3.3 トップダウン過程の実行結果 ボトムアップ過程において導出された形状に対して密度法による位相最適化を実行した結果の一例を図9に示す。本システムにより得られた解の特徴として、以下のようなこ

Fig.7 Examples of design candidates by bottom-up process

Fig.8 Loading conditions

とが挙げられる。

キャビン周辺の要素は最適化法によって削除されにくい、ボトムアップ過程で導出された各形状はキャビン周辺に異なる形状を有しているため、その特徴を残しつつ形状の最適化が行われていることが確認できる。キャビン周辺の要素が削除されにくいのは、複数の荷重条件が作用することで各荷重条件に対する剛性を保つためと考える。車体前後部において要素が多く削除されるのは衝突に相当する荷重が伝達している要素は必要となるが、それ以外の車体前後部の要素については必要でないため削除される。このような特徴からキャビン周りでの位相の発生や荷重伝達の異なる多様な設計解が導出されたことが確認できた。このようにボトムアップ過程において、初期形状が異なる多様な形状を生成し、トップダウン過程において多様な初

期形状に対して最適化を行うことによって多様な設計解を導出することが可能である。

4. 従来の最適化法との比較

本システムにより導出された設計解の有効性を検証するために従来の手法で導出された設計解と比較を行った。従来解とは、形状生成空間を要素で充填した形状を初期形状として密度法による位相最適化を行った形状であり、ボトムアップ過程を経ずトップダウン過程による最適化のみを行った設計解である。図 10 に従来解および本システムにより導出された解の形状、質量および各力学条件に対する最大相当応力の値を示す。最適化法のみを実行した図 10(a) の従来解は、初期形状と比較して、特に車体正面および背面部分において大きく要素が削除され、フロアの前後部にも要素の削除が確認できる。さらに、この従来解と比較して、図 10(b) の設計解では①-1 のフロント部分、図 10(c) の設計解では②-1 のフロア部分の形状が異なっていることが確認できる。図 10(b) の本システムによる解は、ピラー横剛性に関しては従来解とほぼ同等である。また、エンジンルーム剛性に対する最大相当応力は従来解よりもやや高い値を示しているものの、曲げ剛性に対する最大相当応力においては従来解より最大相当応力が低い値を示している。この要因としては、図 10 の①-2 や①-3 に示すように (b) の設計解はダッシュパネル付近やキャビン後方部の補強が考えられる。この他にも、図 10(a) の①-4 の部分では、従来解ではキャビン後方部分の荷重を受ける部材に梁を渡して補強しているのに対して図 10(b) の①-4 の設計解は部材を太くして補強しており、異なる形状特徴を有している。また、図 10(c)

の本システムによる解においても従来解と比較すると曲げ剛性の最大相当応力の値はやや高い値を示しているが、ピラー横剛性については低い値を示している。この要因としては、図 10(c) の②-2 に示すようにピラー横剛性の荷重を分散するようなループ部分の形状を有しているからと考えられる。以上のように本システムを用いることにより、従来解よりも最大で 16% 軽量化され、同等もしくはそれ以上の強度を持つ設計解を導出できる可能性が示された。以上の結果から、大規模設計対象に対する本システムの多様な設計解導出に対する有効性が示された。今後、導出された設計解の構造上の特徴を踏襲しながら最終の設計解に到達するべく、形状最適化などのより詳細な検討を行っていく必要がある。

Fig.9 Design solutions by Emergent design system

Fig.10 Comparison between mass and maximum equivalent stress

Fig.11 Narrow part in form generation space

5. CNの有無による形状生成傾向の変化に関する考察

図11より、AピラーやBピラーのように形状生成空間の幅が狭い部分の存在が確認できる。これらの形状生成空間の特徴は、前報⁽⁹⁾の適用事例では存在しなかった。この特徴の違いから以下のことが考えられる。

CNが1以上であることで形状生成空間が狭くなるような部分においては、誘導の作用が小さい場合には形状生成を抑制する頂部の作用が大きくなるため、形状が生長しにくいことが挙げられる。また、形状が生長しにくいために、複数ある初期要素から生長した要素同士が繋がりにくくなり形状が導出されにくいことも考えられる。これは3章で示したように合成比率 k が0.6未満の場合に形状が導出されないということからも確認できる。以上のことから、CNが1以上のときに形状生成空間が狭くなる場合には誘導の作用が有効であることが考えられる。これは、誘導の作用によって、ピラー等の形状生成空間が狭い部分においても形状生成空間に沿うように要素が生長していくことが可能であるためである。しかし、誘導の作用はこれらのような空間の幅が狭い設計対象に対して有効であるが、頂部支配の作用が小さくなるため、ボトムアップ過程において異なる位相を有するような多様な形状は導出されにくい。そのため、誘導の作用が大きい場合でも多様な形状を導出するための方法が望まれる。

6. 結言

本報では、形状生成空間のCNが1以上であり、要素数のオーダーが 10^5 である大規模設計対象に創発設計システムを適用し、本システムと従来の最適化法による解の比較を行った。その結果、大規模設計対象に対する本システムの多様な設計解導出の有効性を示し、システム構築の一助とした。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 形状生成空間のCNが1以上で要素数が多い設計対象においても本システムを用いることにより異なる位相を有する多様な設計解が導出された。
- (2) 本システムにより導出された設計解と最適化法のみを用いた従来解を最大相当応力で比較すると本システムで導出された設計解は、従来解に対して最大16%軽量化され、4つの剛性において同等かそれ以上の剛性を有した。
- (3) (1), (2)より、大規模設計対象に対する本システムの多様な設計解導出に対する有効性が示唆された。
- (4) 形状生成空間の幅が狭い場合誘導の作用が形状導出に対して有効であることが確認された。
- (5) 誘導の作用が大きい場合、ボトムアップ過程において位相が異なる多様な形状は導出されにくくなるため、誘導の作用が大きい場合でも多様な形状を導出するための方法の必要性を確認した。

なお、本論文においては多様な形状特徴を有する設計解が導出されている。今後、これを踏襲した最終的な設計解を導出するためのシステム開発が必要である。

文 献

- (1) Bensøe, M., Kikuchi, N., Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, **71** (1988), 197-224.
- (2) Diaz A. R., Belding B., On Optimum Truss Layout by a Homogenization Method, *Trans. ASME, J. of Mech. Des.*, **115**(1993), 367-373.
- (3) Kumar, AV., Gossard, DC., Synthesis of Optimal Shape and Topology of Structures, *Trans. ASME, J. of Mech. Des.*, **118** (1996), 68-74.
- (4) Ishii, K., et al., A Topology Optimization by using the Frame Based Unit-Cell, *JSME*, **67**-654, C (2001), 499-506.
- (5) Huiji D., et al., Topology Optimization of Compliant Mechanisms Using the Homogenization Design Method, *Struct.Constr.Eng., AIJ*, **528** (2000), 99-105.
- (6) Inoue, M., Matsuoka, Y., Evolutionary Form-Generation System Based on Emergence, *The Science of Design*, **48**-2 (2001), 1-8.
- (7) Matsuoka, Y., Fujii, T., Form-Generation Method Applying Properties in the Developmental Process of Organism Generating the Morphological Diversity, *The Science of Design*, **49**-3 (2002), 93-102.
- (8) Matsuoka, Y., Inoue, M., System for Obtaining Diverse Design Solutions Based on Emergence, *Japan Society for Design Engineering*, **38**-8 (2003), 411-420.
- (9) Sato, K., et al., Construction of an Emergent Design System by Application to Development of the Artificial Hip Stem, *Japan Society for Design Engineering*, **43**-2 (2008), 93-100.
- (10) Kitamura S., Systems-Toward a New Paradigm for Artificial Systems. *Toward System Theory of Function Emergence*, **35**-7 (1996), 492-495.
- (11) Huiji D., et al., Topology optimization of structures using the voxel finite element method. *Japan Society for Computational Engineering and Science*, **2**(2000), 87-94.