創発設計システムにおけるパラメータと生成形状の多様性*

佐藤 浩一郎^{*1}, 武藤 和 夫^{*2}
氏 家 良 樹^{*3}, 松岡 由 幸^{*4}Diversity of Generation Forms and Parameters in
the Emergent Design SystemKoichiro SATO^{*5}, Kazuo MUTO,

Yoshiki UJIIE and Yoshiyuki MATSUOKA

^{*5} 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, diverse design ideas must be obtained from global solution search under the constraint of unclear design conditions. Because it is difficult to apply the conventional engineering design in the early design process, the emergent design method is proposed as a design method that can be applied in the early design process by a conventional research. Moreover, the emergent design system that can generate diverse three dimensional forms is proposed as an application of the emergent design method. To obtain diverse design solutions, this system should appropriately set the parameters with the application case. However, it cannot judge whether the value of the obtained parameters are the best because the parameters are decided by trial and error. In this research, the parameters that influences the diversity of form was extracted, and it aimed to show the knowledge of extracted parameter for the diversity of generated form and the setting method of these parameters. Therefore, the parameter of this system was assumed to be a factor, and an analysis of variance was conducted, and the parameters, which influence the diversity of generated form, were extracted. Moreover, it was analyzed to clarify the relationship to the diversity of form and extracted parameters, and the conditions about these parameters setting were shown.

Key Words : Emergence, Diverse Design Solutions, Design of Experiments, Orthogonal Array

1. 緒言

設計過程を設計上流過程と設計下流過程に大別した場合、後者においては、一般に、数理計画法⁽¹⁾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、パラメトリックに設計解を導出する工学的な設計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局所的な解探索を行い最適な唯一の設計解を導出する方法である。また、設計対象における設計目標や変数などの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、大域的な解探索が行われる⁽²⁻³⁾前者の設計上流過程においては、設計条件等が不明確である場合が多いため、前述した工学的な設計方法を用いることが難しい。また、設計上流過程においては設計者によって試行錯誤的に位相が異なる多様な設計解候補を導出するため、利用される設計者の経験や知識に依存し、局所解に陥る可能性もある。そのため、設計上流過程から

適用することが可能であり、不明確な設計条件下で大域的に解探索を行い多様な設計解を導出することができるとされている。この多様な設計解（候補）を導出する手法を用いることによって、上流過程における設計者の支援が可能になると考えられる。そのような手法として、筆者らは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⁽⁴⁻⁶⁾。

過去の研究において、筆者らは、大域的な解探索が可能な設計システムとして創発設計システムを提案し、椅子の形状生成⁽⁴⁾、人工股関節システム設計⁽⁵⁾および車体骨格設計⁽⁶⁾への適用を行ってきた。本システムは少ない設計条件下で、大域的な解探索を行い、多様な3次元構造物をコンピュータ上で生成可能である。本システムを実行する際、多様な形状を効率よく生成するために、適用対象に応じてシステム固有のパラメータの値を適切に設定する必要がある。しかし、値の設定は試行錯誤的に行われているため、得られた値が最適であるという保証がない可能性がある。また、各々のパラメータの多様性に対する影響度合いや形状生成の効率に関する知見も少ない。したがって、システムのパラメータと生成形状の多様性および形状生成効率に関する知見やそれらの設定方法が必要とされている。

* 原稿受付 2008 年 9 月 29 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} 慶應義塾大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員、慶應義塾大学理工学部。^{*4} 正員、フェロー、慶應義塾大学理工学部。

E-mail : Koichiro_Sato@a7.keio.jp

本研究では、生成形状の多様性に影響を及ぼす創発設計システムのパラメータを抽出し、抽出したパラメータの生成形状の多様性および形状生成効率に対する知見やそれらのパラメータの設定方法を示すことを目的とする。そのために、本システムのパラメータを因子とした分散分析を行い、生成される形状の多様性に影響を及ぼしているパラメータを抽出する。そして、抽出されたパラメータと生成形状の多様性および形状生成効率との関係を明確にするための解析を行い、パラメータ設定に関する条件を示す。

2. 創発設計システム

本章で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 創発の概念

生物学や生態学において、マクロな挙動を解明するためには、これまでの要素還元的な考え方では不十分であることが指摘されてきた。有機的な組織では、ある機能を実現するために全体を構成している要素も、局所的に見れば全体の一部としてではなく自律的な挙動を示している。このような現象を解明するために、1980年代後半、人工生命の研究者達の間で創発という概念が着目されはじめた。

北村⁽⁷⁾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ボトムアップ的に発現し、他方、そのように生じた秩序が個体のふるまいをトップダウン的に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。

2.2 創発設計システムの概要

創発の概念の応用としてボトムアップ過程とトップダウン過程を有する創発設計システムが提案されている⁽⁴⁾。ボトムアップ過程では、セルラ・オートマトン⁽⁸⁻¹¹⁾（以下 CA と略記する）を用いて自己組織的に多様な形状を生成する。トップダウン過程では、ボトムアップ過程で得られた形状の多様性を保ちつつ各種最適化法を用いて力学条件等の設計条件を満たすように最適化することによって、多様な設計解を導出する（図

Fig.1 Emergent design system

1). 以下に各過程の詳細について述べる。

ボトムアップ過程では多様な形状を生成するために、ボクセル表現により複雑なパターンを自己形成する CA を利用した。オートマトンとは、有限個の状態を有し、入力によりその状態を変化させる有限オートマトンのことである。CA は格子状に配置されたオートマトンの集合であり、同じ大きさの均一なセルを想定する。各セル C は、有限個 (n 個) の状態 S を有し、離散的な時間ステップ t の進行とともに近傍に存在するセル（以下、近傍セルと呼ぶ）の状態 N を入力とする局所ルールに従い、自己の状態を変化させていく。あるセルの時間ステップ $t+1$ における状態 $C^{[t+1]}$ は、そのセルおよび近傍セルの時間ステップ t における状態 $C^{[t]}$, $N^{[t]}$ から決定され、状態遷移関数 f により次式のように表される。

$$C^{[t+1]} = f(C^{[t]}, N^{[t]})$$

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

本システムにおいて、セルの状態の表現は要素の有りまたは無しの 2 状態としている。この表現により、要素の集合として 3 次元構造物が表現されている。CA への入力情報としては、生物の多様性に起因する発生特性⁽¹²⁻¹³⁾である誘導と頂部支配をモデル化し、それらを結合して得られる入力ベクトルを用いた。誘導とは、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り、細胞増殖の活性化を促す特性である。誘導は図 2(a)のように近傍情報ベクトルとしてモデル化した。なお、 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 は作用

Fig.2 Input vector

の大きさ, 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を表している。一方, 頂部支配とは, 頂部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り, 細胞増殖の抑制を促す特性である。この支配的な作用は, 頂部からの距離が近いほど大きいといわれている。頂部支配は図 2(b)のように位置情報ベクトルとしてモデル化した。なお, d_{max} は頂部と頂部から最も遠いセルとの距離, d は頂部と要素との距離, e_d は頂部から要素へ向かう方向の単位ベクトルを表している。以上のように定義された近傍情報ベクトルと位置情報ベクトルを, 合成比率 k を用いて図 2(c)のように結合したものを入力ベクトルとしている。本システムにおける CA の出力ベクトルは新たに要素を発生させる方向である。この際, 用いる状態遷移関数は状態遷移表で表現されており, この状態遷移表に従い出力ベクトルが決定される。以上の局所ルールを用いて, 本システムのボトムアップ過程では初期要素と呼ばれる 1 個以上の要素から形状生成空間と呼ばれる要素発生が可能な空間内で多様な形状を生成する。初期要素は荷重点など構造物において必ず要素が存在する位置に設定する。なお, 時間ステップ t は形状の更新回数であり, 発生世代数と呼ばれている。

トップダウン過程ではボトムアップ過程で得られた設計候補補に対して荷重条件・拘束条件など具体的な設計条件の下, 適用対象に応じて最適性規準法や均質化法などの最適化手法を用いて形状の最適化を行う。

3. パラメータ解析

本章では, 創発設計システムにおけるパラメータを因子とした分散分析と, 生成される形状の多様性に影響を及ぼしているパラメータ抽出の結果について述べる。

3.1 解析パラメータの決定

創発設計システムにおけるパラメータを表 1 に示す。表 1 における分類 1 のパラメータは, 設定する際に, 適用対象から制約を受けないパラメータである。分類 2 のパラメータは, 適用対象における設計可能な空間から制約を受けるパラメータである。分類 3 のパラメータは, 適用対象に応じた設計条件 (設計目標や力学条件) から一意に決まるパラメータである。本研究の目的は適用対象に依存しない一般的なパラメータと多様性に関する知見を得ることを目的としている。そのため, 本研究では分類 1 のパラメータと分類 2 のパラメータを解析パラメータとした。合成比率 k は近傍情

Table 1 Parameters of emergent design system

Classification		Parameters
Bottom up process	1	Composite ratio k
		Maximum number of element generation
	2	Size of element in relation to form generation space
Top down process	3	Aspect ratio of form generation space
		Connectivity number of form generation space
		Position of apex
		Number of apex
		Number of initial element
		Number of position of initial element
		Optimization method
		Load condition
		Constraint condition
		Object function

Fig.3 Analysis parameters

報ベクトルと位置情報ベクトルの配合割合であり, 発生世代数は形状の更新回数である。また, 形状生成空間に対する要素の大きさ (解像度) は, 図 3 に示すような一辺の要素の個数を表す。分類 2 のパラメータである形状生成空間の縦横比は図 3 のような z 軸の辺と x 軸もしくは y 軸の辺との比であり, 形状生成空間の連結数は形状生成空間に存在する穴の数を表す。

3.2 生成される形状の多様性の評価

解析パラメータを変化させて生成される形状の多様性の評価方法としては, 松岡ら⁽⁴⁾によって提案された多様性評価指標 D を用いることとした。多様性評価指標 D は, ボクセル要素の座標位置による差異を定量的に表現することが可能であり, 本システムで生成された形状の集団に対して, 次式のように表せられる。

$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \left(\sum_{j=i+1}^n S_{ij} \right)}{n C_2} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{m_{ij}} \delta_{ijk}}{m_{ij}} \quad \delta_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{for } cell[i][k] = cell[j][k] = 1 \\ 0, & \text{for } cell[i][k] \neq cell[j][k] = 0 \end{cases}$$

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 ($n=50$) 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, 両形状の和集合を構成する要素数 m_{ij} に対する割合を算出することにより類似性指標 S_{ij} を算出する。この類似性指標 S_{ij} をもとに形状のすべての

組合せの類似性指標平均を 1 から減じた値を多様性指標 D とした。

3.3 解析パラメータを用いた分散分析

3.3.1 直交表の選定 解析パラメータから多様性に影響を及ぼすパラメータを抽出するために、解析パラメータを因子とし、目標特性を多様性指標 D として分散分析を行った。分散分析においては、因子が互いの目標特性に影響を及ぼさない、直交した実験計画を立てる必要がある。因子の影響が直交する実験としては、多元配置実験⁽¹⁴⁻¹⁵⁾がある。しかし、本研究においては因子が 5 つあるため、3 水準の多元配置実験による解析を行うと、 3^5 回の実験が必要となる。そこで、実験回数を減らすために、直交表⁽¹⁶⁾を利用することとした。直交表は各因子が直交するように水準が配列されている表で、一部の水準の組み合わせで実験を行う。これにより、実験回数の大幅な削減が可能になる。

直交表は素数べき型直交表と混合系直交表がある⁽¹⁷⁾。本研究では、各パラメータ間に組み合わせによる効果（交互作用）が存在することが予想されたため、その効果も評価できる素数べき型直交表を用いることとした。素数べき型直交表で 5 因子を取り扱うことが可能で、かつ水準が多いという点から、3 水準の $L_{27}(3^{13})$ 直交表を用いることとした。

3.3.2 水準の値の設定と直交表の作成 次に直交表における各因子の水準の値を設定した。値を設定するため、表 2 に示すような過去の事例適用における解析パラメータ値を参考にし、表 3 のように解析パラメータの水準の値を設定した。なお、 $L_{27}(3^{13})$ 直交表で評価できる交互作用は、3 つもしくは 4 つである。本解析においては 10 通りの因子間の交互作用が存在する。

Table 2 Parameters

Parameters	Artificial hip	Body in white
Composite ratio k	0.1~0.9	0.6~0.9
Maximum number of element generation	150	Until convergence
Size of element in relation to form generation space (length of element side / characteristic length of generation space)	2mm/204mm	15mm/4500mm
Aspect ratio of form generation space	Simple	Complex
Connectivity number of form generation space	Not exist	Exist

Table 3 Factors and levels of factor

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Composite ratio k	0.25	0.5	0.75
Maximum number of element generation	50	250	500
Resolution (Number of element on a side)	20	40	80
Aspect ratio (of side area)	$1/2 \cdot \sqrt{2}$	1:1	$2:1 \cdot \sqrt{2}$
Connectivity number (Topology)	0	1	4

したがって、全因子間の交互作用を評価するために、直交表を 4 つ作成した。

3.3.3 結果および多様性に影響を及ぼす因子の抽出

作成した 4 つの直交表に従い実験を行った。その結果の要因効果図を図 4 に、分散分析表を表 4 に示す。なお、誤差に対する分散比が 2.0 以下の因子は、効果が誤差程度であるとみなし、誤差に含んだ。図 4 の要因効果図および表 4 の分散分析表は、用いる直交表によって各因子の交互作用や誤差の寄与率が異なることが確認できる。

まず、解析パラメータについて考察を行う。合成比率 k に関しては、全ての分散分析表において生成形状の多様性に対して最も高い寄与率を示している。この結果は、過去の適用事例から得られている合成比率 k を変化させると生成形状の多様性が変化するという知見と一致しており⁽⁴⁾、妥当な結果といえる。以上より、合成比率 k は生成される形状の多様性に影響を及ぼしていることが確認できた。同様に、全ての分散分析表において、形状生成空間の縦横比に関しても合成比率 k に次いで生成形状の多様性に対して高い寄与率を示し、全ての要因効果図においても同じ効果を示している。以上より、形状生成空間の縦横比も生成形状の多様性に影響を及ぼしていることが確認できた。他の解析パラメータに関しては、分散分析表において寄与率が低く、すべての分散分析表において一貫して誤差に対して有意ではない。また、すべての要因効果図において、一貫して同じ効果を示しているものはない。したがって、これらの解析パラメータは生成形状の多様性への影響が小さいと考えられる。

次に解析パラメータ間の交互作用について考察を行う。合成比率 k と形状生成空間の縦横比の交互作用については、寄与率が低いため 3 つの直交表において誤差に含まれていることから、生成形状の多様性への影響は小さいと考えられる。合成比率 k と連結数、形状生成空間の縦横比と連結数の交互作用については、表 4(b)より誤差に対して有意でかつ誤差よりも大きな効果を持っているが、寄与率が小さいことや本解析において使用した直交表によって寄与率の値が異なることを考慮すると、これらの交互作用の生成形状の多様性への影響は小さいと考えられる。また、表 4(a)の発生世代数と解像度のような他の交互作用についても多様性に対して影響が小さいことが確認できる。よって、これらの交互作用も多様性への影響は小さいと考えられる。また、用いる直交表によって、分散分析の結果が変化する理由としては、今回取り上げていない多様性に影響を及ぼす要因が存在するか、今回の解析では

(a) Response graph obtained from orthogonal array 1

(c) Response graph obtained from orthogonal array 3

(b) Response graph obtained from orthogonal array 2

(d) Response graph obtained from orthogonal array 4

Factor 1: Composite ratio k
 Factor 2: Maximum number of element generation
 Factor 3: Resolution
 Factor 4: Aspect ratio
 Factor 5: Connectivity number

Fig.4 Response graph

Table 4 Analysis of variance table (ANOVA table)

(a) ANOVA table obtained from orthogonal array 1

Factor	f	S	V	F_0	S'	$\rho(\%)$
Factor 1	2	0.2711	0.1355	15.80 **	0.2539	38.27
Factor 2	2	0.0663	0.0331	3.86 *	0.0491	7.40
Factor 3	2	0.0120	0.0060	0.70 ○	-	-
Factor 4	2	0.1545	0.0773	9.01 **	0.1374	20.70
Factor 5	2	0.0183	0.0091	1.07 ○	-	-
Interaction(2*3)	4	0.0306	0.0077	0.89 ○	-	-
Interaction(2*5)	4	0.0295	0.0074	0.86 ○	-	-
Interaction(3*5)	4	0.0391	0.0098	1.14 ○	-	-
Noise	4	0.0421	0.0105	-	-	-
Total	26	0.6634	-	-	-	100
Noise'	20	0.1716	-	-	-	33.62

(b) ANOVA table obtained from orthogonal array 2

Factor	f	S	V	F_0	S'	$\rho(\%)$
Factor 1	2	0.4306	0.2153	149.11 **	0.4277	57.57
Factor 2	2	0.0005	0.0002	0.16 ○	-	-
Factor 3	2	0.0610	0.0305	21.13 **	0.0581	7.82
Factor 4	2	0.0866	0.0433	29.98 **	0.0837	11.26
Factor 5	2	0.0122	0.0061	4.21 *	0.0093	1.25
Interaction(1*4)	4	0.0406	0.0102	7.04 *	0.0349	4.69
Interaction(1*5)	4	0.0449	0.0112	7.77 *	0.0391	5.26
Interaction(4*5)	4	0.0585	0.0146	10.12 *	0.0585	7.87
Noise	4	0.0082	0.0020	-	-	-
Total	26	0.7429	-	-	-	100
Noise'	6	0.0087	-	-	-	4.28

(c) ANOVA table obtained from orthogonal array 3

Factor	f	S	V	F_0	S'	$\rho(\%)$
Factor 1	2	0.3776	0.1888	28.52 **	0.3643	54.66
Factor 2	2	0.0101	0.0051	0.76 ○	-	-
Factor 3	2	0.0200	0.0100	1.51 ○	-	-
Factor 4	2	0.1150	0.0575	8.69 **	0.1018	15.27
Factor 5	2	0.0416	0.0208	3.14 *	0.0284	4.26
Interaction(1*3)	4	0.0255	0.0064	0.96 ○	-	-
Interaction(1*4)	4	0.0171	0.0043	0.65 ○	-	-
Interaction(3*4)	4	0.0338	0.0085	1.28 ○	-	-
Noise	4	0.0259	0.0065	-	-	-
Total	26	0.6666	-	-	-	100
Noise'	20	0.1324	-	-	-	25.82

(d) ANOVA table obtained from orthogonal array 4

Factor	f	S	V	F_0	S'	$\rho(\%)$
Factor 1	2	0.2804	0.1402	16.37 **	0.2632	35.66
Factor 2	2	0.0057	0.0028	0.33 ○	-	-
Factor 3	2	0.0944	0.0472	5.51 *	0.0772	10.46
Factor 4	2	0.1389	0.0695	8.11 **	0.1218	16.50
Factor 5	2	0.0703	0.0352	4.11 *	0.0532	7.21
Interaction(1*2)	4	0.0430	0.0108	1.26 ○	-	-
Interaction(1*4)	4	0.0176	0.0044	0.51 ○	-	-
Interaction(2*4)	4	0.0209	0.0052	0.61 ○	-	-
Noise	4	0.0669	0.0167	-	-	-
Total	26	0.7381	-	-	-	100
Noise'	18	0.1541	-	-	-	30.16

Factor 1: Composite ratio k
 Factor 2: Maximum number of element generation
 Factor 3: Resolution
 Factor 4: Aspect ratio
 Factor 5: Connectivity number
 Interaction(A*B): Interaction between A and B

f : Degree of freedom
 S : Sum of squares
 V : Variance
 F_0 : Variance ratio
 S' : Net sum of squares
 ρ : Net sum of squares

*: Significance level 5%
 **: Significance level 1%
 ○: Factor of less than 2%
 in variance ratio

Table 5 Factors and levels of factors

	Levels				
Composite ratio k	0.1~0.9 count by 0.1				
Aspect ratio
	1/4:2	1/2: $\sqrt{2}$	1:1	2:1/ $\sqrt{2}$	4:1/2

評価していない3因子間以上の交互作用が存在するためと考えられる。

以上の考察から、生成される形状の多様性に影響を及ぼす解析パラメータとして合成比率 k と形状生成空間の縦横比を抽出した。

3.4 抽出されたパラメータの生成形状の多様性に対する影響解析

3.4.1 各パラメータの水準の設定と解析の実行

分散分析によって抽出された合成比率 k 、縦横比に対する生成形状の多様性と形状生成効率に対するより詳細な影響を評価するため、各因子に水準を設定し、各因子の各水準の全組み合わせで解析を行った。各因子の水準は表5のように合成比率 k は9水準、形状生成空間の縦横比は5水準に設定した。

本解析においても多様性に対する評価値としては、多様性指標 D を用いた。また、実用上の計算効率を考慮して、多様性に影響を及ぼすパラメータに対する形状生成の効率を評価するために試行形状数を用いた。試行形状数とは、ボトムアップ過程における一定の評価値を満たす形状、ここでは最大要素数の5%以上の要素からなる形状が50個生成されるまでに必要とする試行数である。試行形状数が少ないほど形状生成の効率は高いといえる。ここで、各評価値は、システム上全く同じ条件下でも実験を行うたびにばらついてしまう。そこで、このばらつきを考慮するために前述の解析を10回実行した。

3.4.2 結果および考察 図5に多様性指標に対する実験結果を示す。図5より、多様性に対してはいずれの形状生成空間の縦横比においても、合成比率 k が小さくなるほど、生成形状の多様性が増加することが確認できる。このことから、直交表による実験と同様に合成比率 k を低い値に設定することで多様な形状が生成される傾向を確認できた。同様に、縦横比については棒状の形状生成空間より、平板状の形状生成空間の方が生成形状の多様性が増加することが確認できた。このことから、棒状の形状生成空間では、特に合成比率 k を小さな値に設定する必要があると考えられる。

(a) Aspect ratio = 1/4:2

(b) Aspect ratio = 1/2: $\sqrt{2}$

(c) Aspect ratio = 1:1

(d) Aspect ratio = 2:1/ $\sqrt{2}$

(e) Aspect ratio = 4:1/2

Fig.5 Relationship between composite ratio k and D

Fig.6 Relationship between composite ratio k and number of trial

Fig.7 Basic concept of parameter determination

次に形状生成効率に対する実験結果を図6に示す。図6より、形状生成効率は合成比率 k が小さくなると著しく減少することが確認できる。これは、合成比率 k を低くして形状生成を行った場合、頂部支配の影響が大きくなるため、形状を出力するための条件である最大要素数の5%を満たしにくくなり、形状生成に時間を要してしまうためと考えられる。また、棒状の形状生成空間よりも平板状の形状生成空間のほうが効率は低いことが確認できる。このことは、形状生成空間に平板状の箇所が存在する車体骨格設計の事例適用において、形状が生成されにくく、合成比率 k が0.6未満では生成されなかったという知見⁽⁶⁾と一致する。以上の結果から、合成比率 k を低い値に設定することによって、多様な形状が生成される傾向、棒状の形状生成空間と比較して平板状の形状生成空間の方が生成形状の多様性は増加するが形状生成の効率は減少することが確認できた。

4. 多様な形状を生成するためのパラメータの設定方法

本章においては、前章までの解析結果から得られた知見を整理し、多様な形状を生成するためのパラメータの設定方法について述べる。解析結果より、以下の3つの知見が得られた。1つ目は、合成比率 k の値を減少させることにより生成される形状の多様性指標の値を増加させることができることである。2つ目は、棒状の形状生成空間と比較して平板状の形状生成空間のほうが形状の多様性指標の値は増加することである。3つ目は、合成比率 k の値を減少させることにより多様性は増加するが形状生成効率は減少することである。

以上のような知見からパラメータの設定方法を図7に示す。図7のように、パラメータの設定方法は形状生成空間の縦横比の制約および合成比率 k と形状生成空間によって変化する形状生成効率の制約の下、最も

小さな値に合成比率 k の値を設定することである。具体的な方法としては、以下のような方法が考えられる。合成比率の値を 0.3 と 0.7 のように低い値と高い値の 2 種類と一定の形状試行数を設定し形状生成を行う。この最初に設定する 2 種類の値は形状生成空間の形状に応じて設定を行う。例えば、空間が棒状だった場合には合成比率の変化による形状生成効率の変化は小さいため 0.2 と 0.6 のように低く設定し、平板状だった場合には形状生成効率が低くなるため、0.3 と 0.8 のように合成比率を高めに設定する。各値での形状生成の結果、設定した形状試行数内において合成比率の値が 0.3 で形状が生成された場合には、0.3 を基準に合成比率の値を下げていき最小の合成比率の値を設定する。一方、0.3 で設定した形状試行数内に形状が生成されず、0.7 で形状が生成された場合には 0.7 を基準に合成比率を下げて形状生成を行い、最小の合成比率の値を設定する。以上のような方法を用いることで多様な形状を効率よく生成することが可能になると考えられる。

5. 結言

本研究では、創発設計システムのパラメータの生成形状の多様性および形状生成効率に対する知見や生成形状の多様性に影響のあるパラメータの設定方法を示すことを目的とした。そのために、本システムのパラメータを因子とした分散分析を行い、生成される形状の多様性に影響を及ぼしているパラメータを抽出した。そして、抽出されたパラメータと生成形状の多様性および形状生成効率との関係を明確にするための解析を行い、パラメータ設定に関する条件を示した。本研究の成果を以下に示す。

- (1) 本システムのパラメータである、合成比率 k 、発生世代数、形状生成空間に対する要素の大きさ（解像度）、形状生成空間の縦横比および連結数の 5 因子を解析パラメータとして直交表を用いて分散分析を行った結果、生成形状の多様性に対して有意なパラメータとして合成比率 k 、形状生成空間の縦横比を抽出した。
- (2) 抽出したパラメータを用いて多様性と形状生成効率に対する影響解析を行った結果、以下の 3 つの知見を得た。
 - ・生成形状の多様性は合成比率 k を小さな値に設定することで増加する
 - ・棒状よりも平板状の形状生成空間のほうが多様な形状が生成される
 - ・形状生成効率については棒状の形状生成空間より

平板状の形状生成空間の方が生成形状の多様性は増加するが形状生成の効率は減少する

- (3) (2)の知見からパラメータの設定方法は形状生成空間の縦横比の制約および合成比率 k と形状生成空間によって変化する形状生成効率の制約の下、最も小さな値に合成比率 k の値を設定することである。
- (4) (3)に示した設定方法の一例として、形状生成空間の形状に応じて 2 種類の値を設定し形状生成を行い、設定した形状試行数内で形状が生成された値のうち低い値を基準として合成比率の値を下げて形状生成を行う方法を示した。

今後の課題としては、本研究で得られたパラメータの指針を実際に 3 次元構造物に適用して、その有効性を検証することや今回の研究で検証しなかった 3 つ以上のパラメータ間の相互作用による設計解の多様性への影響を検証することが挙げられる。

文 献

- (1) Yamakawa, H., Optimization design (in Japanese), (1993), Baifukan Co., LTD.
- (2) Akagi, S., Design engineering (Vol. 1) (in Japanese), (1991), Corona Publishing Co., LTD.
- (3) Akagi, S., Design engineering (Vol. 2) (in Japanese), (1991), Corona Publishing Co., LTD.
- (4) Masato, Inoue. and Yoshiyuki Matsuoka., Form-Generation System Imitating the Developmental Process of Organism for Obtaining Diverse Design Solutions, *Computer-Based Design*, (2002), pp.327-336.
- (5) 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), pp.93-100.
- (6) Muto, K, et al., Basic Research of Emergent Design System for Development of New Body Frame, *Proceedings of Design symposium 2006*, No.06-5, (2006), pp.85-88.
- (7) Kitamura S., Systems-Toward a New Paradigm for Artificial Systems. Toward System Theory of Function Emergence, *J.SICE*, **35-7** (1996), pp.492-495.
- (8) Wolfram, S., Theory and Application of Cellular Automata, (1996), World Scientific.
- (9) Tokura, N., Automata and formal language (in Japanese), (1995), Shokodo Co., LTD.
- (10) Delorme, M., An Introduction to Cellular Automata, (1999), Kulwer Academic Press.
- (11) Kato, H., et al., Cellular automaton (in Japanese), (1998), Morikita, Publishing Co., Ltd.
- (12) Shiokawa, K., Development biology (Vol. 1, 2, 3) (in Japanese), (1991), Toppan.
- (13) Nakagawa, S., Principle of Morphogenesis (in Japanese), 1975, Shokabo Publishing Co., LTD.
- (14) Taguchi, G., Design of Experiments (Vol. 1, 2) (in Japanese), Maruzen, 1962.
- (15) Yamada, S., Design of Experiments — methods — (in Japanese), (2004), JUSE Press.
- (16) Abe, S., Orthogonal representation and Design of Experiments (in Japanese), (1993), JUSE Press.
- (17) Matsuoka, Y., Statistical Analysis for Product Development, (2006), Kyoritsu Shuppan Co., LTD.