

多様解導出のための創発に基づく設計方法

2004 年度

井上 全人

多様解導出のための創発に基づく設計方法

第 1 章 序論	(1)
1.1 研究背景	1
1.1.1 設計方法論の現状と動向	1
1.1.2 従来の工学設計方法	3
1.1.3 設計方法論の課題	4
1.1.4 設計過程の分類およびその特徴	6
1.2 研究目的	8
1.3 本論文の構成	9
第 2 章 創発に基づく設計方法の提案	(11)
2.1 緒言	11
2.2 創発の概念	11
2.3 設計過程と創発過程	13
2.4 創発設計方法	16
2.4.1 創発設計方法の基本構造	16
2.4.2 発現過程における解導出方法	17
2.4.3 最適化過程における解導出方法	18
2.5 創発設計方法に基づく多様解導出システムの基本構造	19
2.5.1 多様解導出システムの位置づけ	19
2.5.2 発現過程における多様解導出システムの基本構造	21
2.5.3 最適化過程における多様解導出システムの基本構造	22
2.5.4 多様解導出システムの基本構造	24
2.6 結言	27

第 3 章 多様解導出システムにおける形状生成方法の提案	(28)
3.1 緒言	28
3.2 形状モデルと形状生成空間	28
3.3 セルラ・オートマトンの応用	29
3.3.1 セルラ・オートマトン	29
3.3.2 セルラ・オートマトンを用いた形状生成に関する研究	30
3.3.3 セルラ・オートマトンの状態遷移関数	32
3.4 生物の発生特性を応用した形状生成方法	33
3.4.1 誘導の応用	33
3.4.2 頂部支配の応用	34
3.4.3 要素の発生過程	36
3.4.4 形状生成の過程	39
3.4.5 誘導および頂部支配を応用した形状生成方法	41
3.4.6 生物の発生過程を応用した形状生成方法の有効性検証	43
3.5 形状評価方法	51
3.5.1 椅子の形状設計への応用	51
3.5.2 形状評価項目	52
3.6 解探索アルゴリズムの導入	54
3.6.1 遺伝的アルゴリズムの導入	54
3.6.2 スキーマ破壊のアルゴリズムの導入	54
3.6.3 形状生成の過程	57
3.6.4 実行条件	58
3.7 結果および考察	59
3.7.1 生成形状	59
3.7.2 生成形状の多様性解析	59
3.7.3 解探索アルゴリズムのパラメータ設定	62
3.7.4 他の解探索アルゴリズムとの比較	65
3.8 結言	68

第 4 章 構造設計問題における多様解導出システムの提案	(69)
4.1 緒言	69
4.2 最適化過程における多様解導出システムの実行条件	69
4.2.1 設計条件および実行条件	69
4.2.2 材料および荷重条件の設定	69
4.3 形状変換方法	70
4.3.1 強度増加変換	70
4.3.2 重量減少変換	71
4.4 形状評価方法	71
4.5 形状最適化過程	72
4.6 結果および考察	73
4.6.1 生成形状	73
4.6.2 解の多様性解析	77
4.6.3 多様解導出システムの有効性解析	77
4.6.4 解の多様性に対する設計条件の影響解析	82
4.7 結言	88
第 5 章 多様解導出システムの意匠と構造の協調設計問題への応用	(90)
5.1 緒言	90
5.2 多様解導出システムの形状表現方法の拡張	90
5.3 発現過程における形状表現方法の拡張	90
5.3.1 要素発生方向の拡張	90
5.3.2 発現過程における多様解導出システムの実行	91
5.3.3 生成形状の多様性および形状生成の効率性解析	92
5.4 最適化過程における形状表現方法の拡張	94
5.4.1 要素補間方法の提案	94
5.4.2 最適化過程における多様解導出システムの実行	95
5.4.3 生成形状の多様性解析	96
5.5 意匠と構造の協調設計問題への応用	97
5.5.1 多様解導出システムの不使用時における意匠設計	97
5.5.2 多様解導出システムの使用時における意匠設計	98

5.6	結果および考察	100
5.6.1	導出された設計案	100
5.6.2	解の多様性解析	104
5.6.3	設計案の形状特徴におよぼす本システムの影響解析	107
5.7	結言	108
第6章 結論		(109)
	謝辞	112
	参考文献	115
	著者論文目録	123
	原著論文	123
	国際会議論文	124
	その他の国際会議発表	125
	国内学会発表	125

記号表

b_i	:	要素の有無 (1 あるいは 0)
$C^{[t]}$:	あるセルの時間ステップ t における状態
$cell [p][q]$:	形状 p の第 q 番目に位置するセルの状態
D	:	形状の多様性指標
d	:	頂部と注目要素との距離
d_{cell}	:	座面と地面 ($z=0$) との高度差
d_{elem}	:	座面と最下端要素との z 方向の高度差
d_{max}	:	頂部と頂部から最も遠いセルとの距離
\mathbf{e}_d	:	頂部から注目要素へ向かう方向の単位ベクトル
\mathbf{e}_i	:	近傍要素から注目要素へ向かう方向の単位ベクトル
f	:	状態遷移関数
f_{bl}	:	安定度
f_{gr}	:	接地面の形成度
f_{sf}	:	座面の形成度
$h_k(\mathbf{X})$:	最適化法における制約条件 (等号制約)
$g_j(\mathbf{X})$:	最適化法における制約条件 (不等号制約)
k	:	近傍情報ベクトルと位置情報ベクトルの合成比率
m_{ij}	:	形状 i と形状 j の和集合のセル数
$N^{[t]}$:	近傍セルの時間ステップ t における状態
n	:	集団の個体数
n_{cell}	:	座面部に存在するセル数
n_{elem}	:	座面部に存在する要素数
n_{state}	:	状態番号
n_θ	:	θ の角度領域番号
n_ϕ	:	ϕ の角度領域番号
S_{ij}	:	形状 i と形状 j の類似性指標
\mathbf{v}_{in}	:	入力ベクトル
\mathbf{v}_n	:	近傍情報ベクトル
\mathbf{v}_p	:	位置情報ベクトル
$W^{(n)}$:	最適化過程における状態 n における形状の総重量
w_i	:	近傍要素 i から注目要素へ向かう作用の大きさ
\mathbf{X}	:	設計変数 x_i からなる設計対象
x_i	:	最適化法における設計変数
z	:	最適化法における目的関数

α_{bl}	:	安定性判別角
$\Delta\theta$:	θ の増加量
$\Delta\phi$:	ϕ の増加量
δ_{ijk}	:	$cell[i][k]=cell[j][k]=1$ なら 1 を , $cell[i][k]\neq cell[j][k]$ なら 0 をかえず δ 関数
θ_{in}	:	入力ベクトルの極座標 θ 成分
θ_{out}	:	出力ベクトルの極座標 θ 成分
ζ	:	ペナルティ係数
$\bar{\sigma}_{max}^{(n)}$:	状態 n における要素の最大相当応力値
$\bar{\sigma}_{al}$:	許容応力
ϕ_{in}	:	入力ベクトルの極座標 ϕ 成分
ϕ_{out}	:	出力ベクトルの極座標 ϕ 成分
$\phi^{(n)}$:	最適化過程における修正目的関数

第1章

序論

1.1 研究背景

1.1.1 設計方法論の現状と動向

「設計」という人間の創造行為の真理を探求すべく、さまざまな設計研究 (design studies) が行われてきた。設計研究を設計理論 (design theory)、設計方法論 (design methodology)、および設計技術 (design technology) に分類し、設計行為 (design work) がこれらの総合として成り立つと考え、Fig. 1-1 のように、設計研究は、一般的 / 抽象的と個別的 / 具体的という軸により階層化できる。

設計理論は、設計対象に依存せずに、設計をモデル化し、体系化する研究であるため、「一般的かつ抽象的」である。この設計理論により得られる設計知識は、設計のモデルを与えるという意味では、科学的な知識であるといえる。設計理論の研究は、一般的に、帰納的方法と演繹的方法に分類される [佐藤 98]。帰納的方法とは、経験や観察により得られた知見をもとに一般的原理を発見しようとする方法であり、過去に多くの設計過程モデルが、この方法により提案されてきた [Glegg69, Moore70, 吉川 80, Pugh90, 野口 95a,b, 野口 98a,b]。一方、演繹的方法とは、一般的に否定できない事実を公理とおき、それをもとに演繹的に公理系を展開していく方法である。この演繹的方法による研究例は帰納的方法と比較すると数が少ないが、代表的な研究例としては、吉川らの“一般設計学” [吉川 79, 富山 85] や Suh の“The Principles of Design” [Suh90] があげられる。吉川, Tomiyama らは、設計をシンセシス行為にとらえ、設計知識を公理的集合論に基づいてモデル化することにより、設計を法則化、普遍化された科学として理解しようと試みた [吉川 79, Tomiyama03]。一方、Suh は、公理的設計理論を提唱し、設計を進める際の基本指針を公理としてまとめた。これらは、設計という行為自体を客観的に記述し、科学として

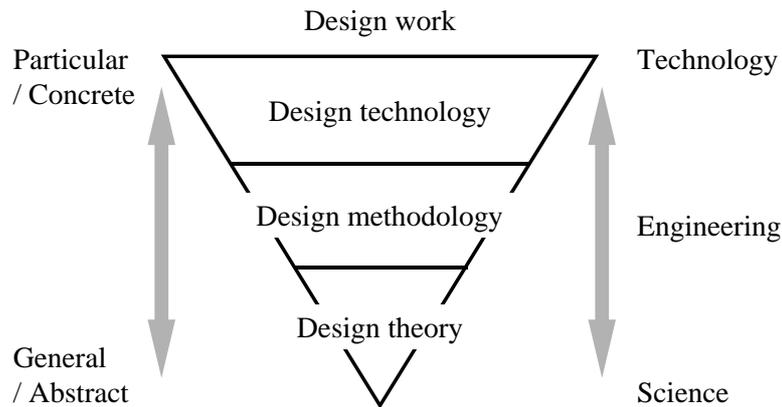


Fig. 1-1 Hierarchization of design studies

体系的に扱おうという試み[Dixon87, Cross93, Goel94, Levitt98]であり、設計研究のための理論的基礎を提供しており、設計研究の発展には欠かせない研究である[吉川 93]。また、設計に関する理解を深めることにより、例えば計算機による設計の自動化や、より合理的な設計の進め方が明らかになることが期待できる。設計理論の持つこれらの工学的な意味も重要視されている[富山 02]。しかしながら、前述のように、設計理論により得られる知識は、設計行為のための行動指針を与える工学的な知識ではなく、設計のモデルを与える科学的な知識であることから、その知識が直接的に設計に役立つとは限らない。

一方、設計技術は、自動車や航空機などの具体的な設計対象の設計に関する研究であるため、「個別的かつ具体的」である。この設計技術により得られる設計知識は、個別的な設計対象に対する設計行為のための具体的な行動指針を与えるという意味では、技術的な知識であるといえる。この設計技術の進歩と技術的な知識の蓄積により、今日のものづくりが発展した。設計の教科書として多く見られるのは、このような設計技術に関する知識である[尾田 02, 瀬口 03, 中島 03]。しかしながら、自動車や航空機という個別的かつ具体的な設計対象に関する設計技術のみでは、他の設計対象を設計することは難しい。例えば、血管中を動くマイクロマシンや深海や月面においても制御可能なロボットのような人間にとって非日常的な空間における人工物の設計は、従来の技術的な知識のみでは不可能な場合が多い。このように、設計技術により結果的に得られた設計知識は、対象となる個別の事象に特化した結果になることが多く、設計の一般的理論体系が形成される

には至らないのが現状である。

これらに対して、設計方法論は、具体的な設計対象の設計手順を体系化する研究であるため、設計理論と設計技術の間に位置する。この設計方法論により得られる設計知識は、個別の設計対象に関する設計知識とは異なり、具体的ではあるが一般的に使用可能な理論であり、設計行為のための一般化された行動指針を与えるという意味では、工学的な知識であるといえる。例えば、機械が故障しても重大な事故につながらないようにするために、つねに安全側で停止するようにするフェールセーフ設計や、故障しても機械が運転を継続できるための冗長設計のように、さまざまな設計方法論が提唱されている[富山 02]。しかしながら、このような設計方法論における知識は、人間の経験に基づいた知識が多いため、設計方法論としての一般的な知見を得ることは難しく、一般的理論体系が形成されるには至っていない[吉川 93]。設計研究のさらなる体系化のためには、設計理論と設計技術を連結するための設計方法論の研究が不可欠である。

以上のような設計方法論の現状のもと、近年においては、設計方法論における一般的な知見を得るために、計算機を用いた数理科学的、計算工学的なアプローチにより設計方法論を構築しようとする動向がある[赤木 90]。この数理科学、計算工学の発展は、近年の計算機の進歩に伴うものであるが、これらは、設計方法論に限らず、理論的な解明が難しい生物学や経済学などの学問分野においても有効性が示されている。このことから、計算機を用いた数理科学的、計算工学的なアプローチを設計方法論へ応用する可能性を示唆している。

1.1.2 従来の工学設計方法

従来の数理科学的、計算工学的なアプローチによる工学設計方法の代表例として、最適化法 (optimum design) があげられる[赤木 91a, 山川 93]。最適化法は、設計対象を数学的に記述し、設計対象と評価との関係を定量化することにより最も高い評価が得られる設計解を導出する方法である。この方法について以下に述べる。

最適化法においては、まず設計対象を複数の設計変数 (design variables) x_i からなるベクトル X として記述する。

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (1-1)$$

そして、設計対象に与えられる制約条件 (constrained conditions) を以下のような関数として表現する。

$$\begin{aligned} h_k(\mathbf{X}) &= 0 & (k = 1, 2, \dots, l) \\ g_j(\mathbf{X}) &\leq 0 & (j = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (1-2)$$

さらに、設計対象の評価が設計変数の関数となるように、定式化する。ここで、評価は設計対象に要求される機能を満足する程度を表し、式(1-3)のように関数 z として表現する。ここで、関数 z は目的関数 (objective function) と呼ばれる。

$$z = f(\mathbf{X}) \quad (1-3)$$

そして、目的関数 z を最大もしくは最小にする条件のもとで解くことにより、最適な設計解を導出する。これは、換言すれば、式(1-2)を満足し、さらに式(1-3)を最大もしくは最小にするベクトル \mathbf{X} を算出することである。最適化法の手順について、Fig. 1-2 に示す。

この最適化法は、実際の設計問題に適用する際には複雑な微分方程式を解くことが要求されるが、計算機の飛躍的な進歩とともに急速に実用化された。この方法により、設計者は、設計対象の設計変数、制約条件、および目的関数を定めることで、最適な設計解を導出することが可能となり、設計環境は大きく進歩した。

1.1.3 設計方法論の課題

前述したように、最適化法は、設計変数を用いたパラメトリックな手法により、設定した目的における最適な設計解を導出することが可能であり、優れた設計方法であるといえる。しかしながら、この方法はあらゆる設計過程に適用することが可能なわけではなく、つぎのような設計問題に対しては適用が難しい。

まず、設計対象における設計変数を定義することが不可能な設計問題が存在する。最適化法においては、設計変数の集合により設計解を記述しているため、その設計変数を定義することができなければ適用できない。対象とする設計問題によっては、設計対象を規定する制約条件が少ないために、設計対象における設計変数を定義することが不可能な場合があり、このような場合においては、最適化法を用いることは難しい。

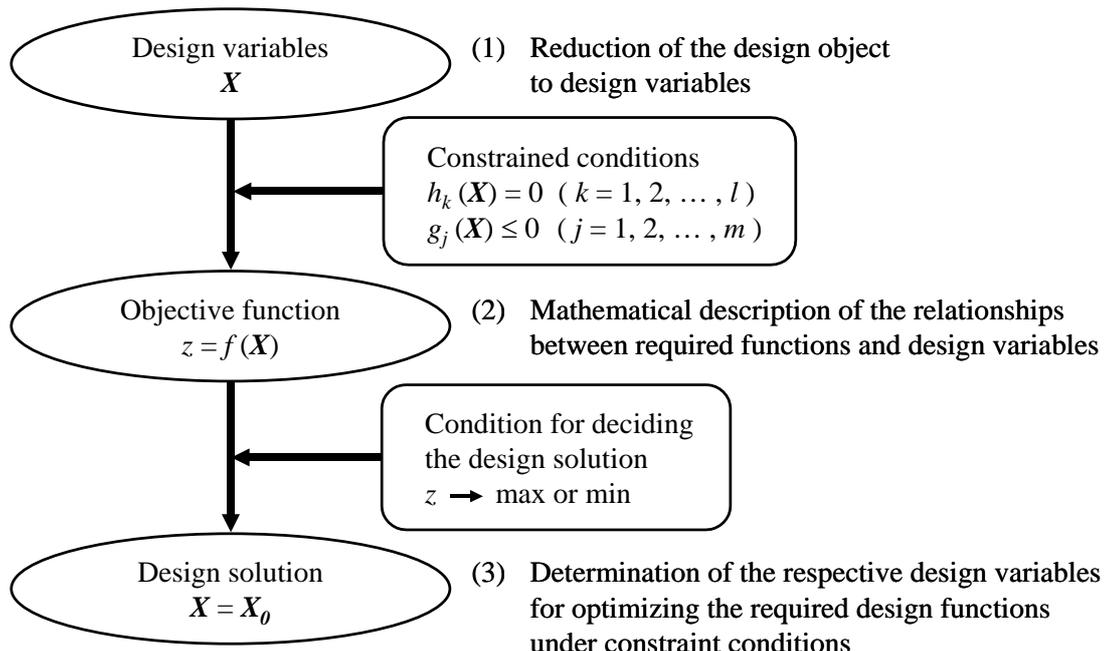


Fig. 1-2 Procedure for optimum design

また、目的関数が設計変数を用いた関数として完全に記述することが不可能な設計問題があげられる。最適化法においては、設計変数と目的関数との関係を定式化する必要があるが、評価と原因の因果関係が明確でない場合においては、この定式化が困難となることが多い。このような場合においては、最適化法を用いて最適な設計解を導くことが難しい。特に、モチーフや美観等に代表される設計者の感性[長町 89, 93][井口 94]や嗜好性を扱う設計問題に対しては、感性や嗜好性という現象をモデリングし、目的関数として記述することは難しい。最適化法を用いた設計研究においては、従来、このような問題を取り扱うことが少ない[Reich93]。

さらに、目的関数が複数存在する設計問題が存在する。この設計問題は、一般的に多目的問題(multiple objective problem)と呼ばれる。最適化法においては、設定した目的関数を最小化もしくは最大化することにより最適な設計解を導出するため、従来は、複数の目的関数の重み付けを行うか、制約条件を目的関数に含めることにより、単一の目的関数に統合するのが一般的である。しかしながら、重量や強度などのトレードオフの関係にある目的関数や、意匠設計や構造設計という質的に異なる関係にある目的関数同士を単一化することは難しい。

1.1.4 設計過程の分類およびその特徴

1.1.3 項において述べた最適化法の適用が難しい設計問題は、設計上流過程に多くみられる。この問題に対する一般的な設計過程の分類、およびそれぞれの過程の特徴を以下に説明し、考察を行う。

設計過程は、一般に Fig. 1-3 に示すように設計要求の把握 (understanding of task) から始まり、概念設計 (conceptual design)、基本設計 (preliminary design)、詳細設計 (detail design) を経て生産設計 (production design) に至る過程に分類される [赤木 91b]。

まず、概念設計は、設計要求に合致する設計案を作り出す過程である。この過程においては、基本となる自然法則を発見または理解し、そのような法則を組み合わせることにより期待する機能を実現する。つぎに、基本設計は、概念設計で得られた結果をもとに、製品として具象化 (embodiment) する過程であり、「具象化設計 (embodiment design [Pahl88])」とも呼ばれる。この過程においては、構造方式や形態、基本レイアウトなどを

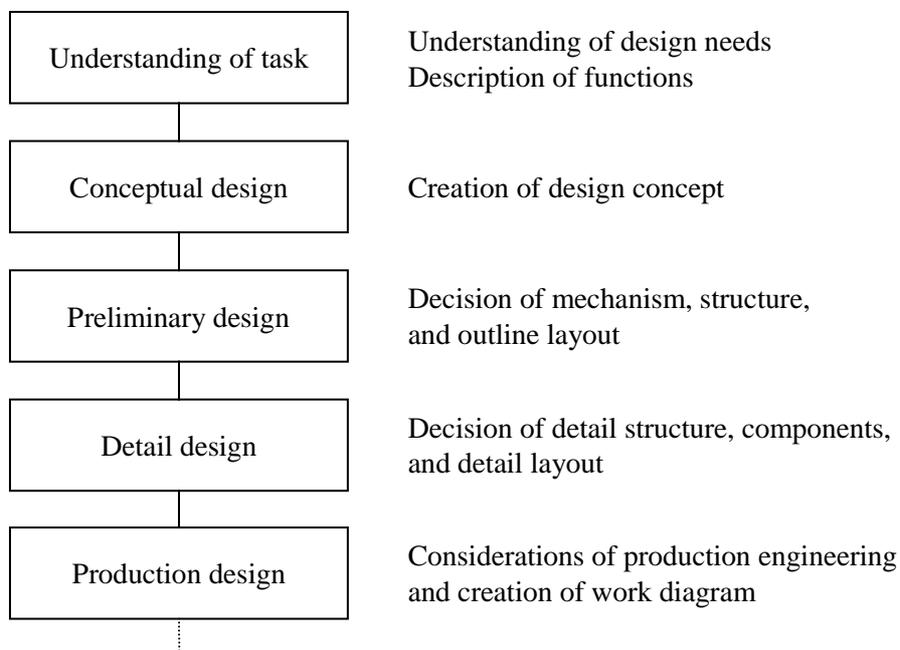


Fig. 1-3 Design process

決定する。そして、詳細設計は、基本設計の結果をもとにさらに詳細構造、詳細形状、詳細寸法、詳細レイアウトなどを決定する過程である。この過程においては、一般に設計図面として記述される。最後に、生産設計は、詳細設計の過程までに得られた設計結果をどのように生産すべきかを検討する過程である。この過程においては、生産技術のほか、工程計画なども検討される。

ここで、設計過程を概念設計や基本設計に相当する上流過程と、詳細設計や生産設計に相当する下流過程の2つに大別すると、2つの設計過程は以下の異なる特徴を有する。前者の上流過程においては、不明確な設計目標のもと、大域的な解探索を行うことにより多様解を導出する[Chakrabarti96]。一方、後者の下流過程においては、上流過程と比較して明確化された設計目標のもと、局所的な解探索を行うことにより唯一解を導出する。このように、この2つの設計過程は、質的に全く異なるため、その設計方法論も基本的に異なる。上流過程は、一般的にデザイナーや設計者の経験や直観に依存し、最適化法を適用することは難しい。一方、下流過程は、依然として設計者などの経験や直観に依存することが多いものの、最適化法やCAEに代表されるような数理的手法、計算力学的設計支援システムが、計算機の進歩とともに急速に実用化され、その有効性が示されている。

以上のように、従来の最適化法を用いた設計方法は、目標が不明確であり、大域的な解探索により多様解を導出する設計上流過程においては、その適用が難しい。今後の設計方法論においては、従来の方法を用いて解空間から局所的に最適な唯一解を導出するだけでなく、大域的に多様解を導出できる設計方法論の構築が強く望まれている。

1.2 研究目的

1.1 節に述べた背景から、本研究においては、計算機を用いた数理科学的、計算工学的アプローチにより、従来の最適化法では難しかった設計上流過程に適用可能な多様解を導出する新たな設計方法を提案する。さらに、提案する設計方法を人工物設計へ適用した具体的な多様解導出システムの構築を試みる。これにより、提案する設計方法の有効性を示すことを目的とする。

本研究においては、人工物の 3 次元形状の設計方法に注目した。人工物の形状は、材料力学、機械力学などをはじめとするあらゆる力学的な問題に加えて、感性情報を有する問題など、様々な問題を考慮して決定されなければならない。また、一般的に 3 次元形状を設計するためには、膨大な情報量を必要とする。そのため、設計者が、解空間から大域的に多様な 3 次元形状を導くことは非常に難しい。本研究においては、解空間から大域的に多様な人工物の 3 次元形状を生成することが可能な多様解導出システムを構造設計問題へ適用し、その構築を試みる。さらに、構築した多様解導出システムを意匠と構造の協調設計問題へ適用することにより、本システムの意匠設計および構造設計の両設計間の協調設計支援システムとしての可能性を示す。

1.3 本論文の構成

本論文の構成図を Fig. 1-4 に示す.

第 1 章では, 設計方法論の現状と動向を概説し, 従来の最適化法に基づく工学設計方法の課題を抽出することにより, 本研究の目的を示す.

第 2 章では, 多様解導出のための創発に基づく設計方法を提案する. 本方法は, 設計過程と創発過程の類似性に着目し, 創発のボトムアップ過程に相当する発現過程とトップダウン過程に相当する最適化過程の 2 つの過程を有する. 本方法と従来の最適化法を比較することにより本方法の多様解導出に対する可能性を示す. さらに, 本方法を人工物設計へ応用するために, 本方法に基づく 3 次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示す.

第 3 章では, 形状生成の具体的な方法を示す. 本方法は, ボクセル表現を用いて形状表現し, さらに, セルラ・オートマトンを用いることにより自己組織的に形状生成を行う. その際, 生物の形態多様性を生起させる発生特性の 1 つである細胞増殖の活性化を促す誘導と細胞増殖の抑制を促す頂部支配を応用する. 本方法を椅子の形状設計へ適用し, 形状の多様性と解探索の効率性について解析を行うことにより, 本方法の有効性を検証する.

第 4 章では, 構造設計問題における多様解導出システムを提案する. その際, 多数の設計変数を有する構造設計問題に対しても適用可能な最適性規準法を用いた最適化過程を導入する. 本システムの構造設計問題への適用可能性を検証すべく, 発現過程および最適化過程の 2 つの過程を有する本システムと従来の最適化法により導出された解の多様性および設計目標に対する力学解析結果を比較する.

第 5 章では, 第 4 章までで示した多様解導出システムを意匠と構造の協調設計問題へ適用し, その応用可能性を検証する. 本システムから導出された解を設計者に提示し, 得られた設計案を意匠面と構造面の両面から多様性解析を行う. これにより, 本システムの意匠と構造の満足解導出に対する可能性を示すとともに, 両設計間の協調設計支援システムとしての可能性も示す.

第 6 章に, 本研究の成果を述べ, 本研究を総括する.

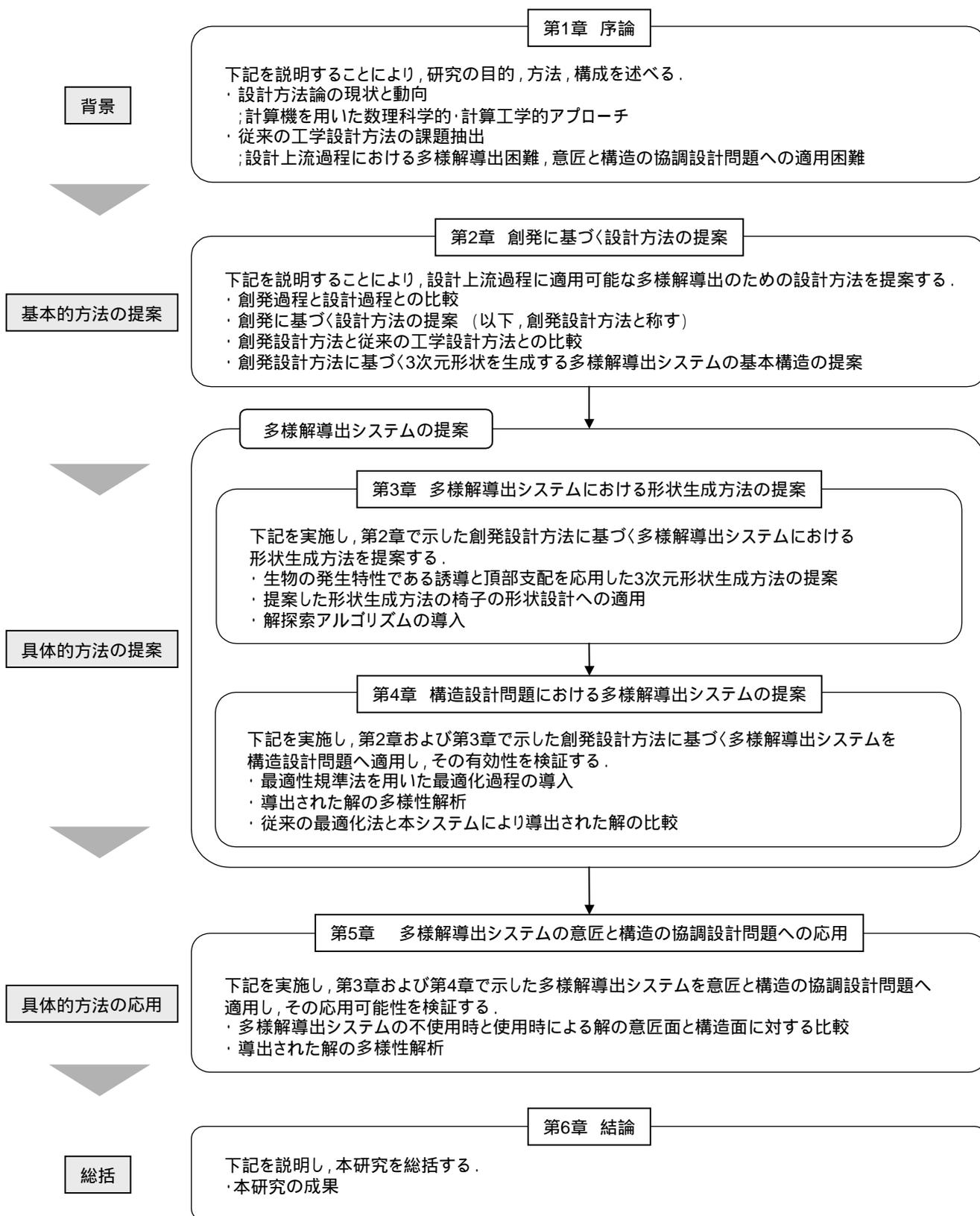


Fig. 1-4 The content of the present study

第2章

創発に基づく設計方法の提案

2.1 緒言

設計過程は概念設計や基本設計に相当する上流過程と詳細設計や生産設計に相当する下流過程の2つの過程に大別できる。前者の上流過程においては、不明確な設計目標のもと、大域的な解探索を行うことにより多様解を導出する。一方、後者の下流過程においては、上流過程と比較して明確化された設計目標のもと、局所的に解探索を行うことにより唯一解を導出する。従来の工学設計方法は、最適化法を用いることで唯一解の導出が可能であるため、下流過程においては有効性が示されている。しかしながら、多様解の導出は、現状では設計者の経験や直観に依存しているため、その一般化が望まれている。本章においては、上流過程に適用可能な多様解を導出する新たな設計方法を提案する。そして、本方法と従来の最適化法を比較することにより本方法の多様解導出の可能性を示す。さらに、本方法を具体的な人工物設計へ応用するために、本方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示す。

2.2 創発の概念

自然界においては、同一環境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(emergence)の過程により生み出されると考えられはじめた[Kauffman95]。そこで、本研究においては、この創発の概念に着目した多様解を導出するための設計方法を提案する。

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 (artificial life) の研究者達の間で創発という概念が着目されはじめた。

創発の概念は、進化論で用いられる概念で、先行条件から予言したり、説明したりすることが不可能な進化、発展をいい、Lewes がはじめてその概念を提唱した [Lewes1874]。その後、人工生命の研究者達は、創発の概念をボトムアップ (bottom-up) とトップダウン (top-down) の双方向の過程として説明した。北村によれば、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」 [北村 95] とされている。この定義は、Langton [Langton89] や上田 [上田 01] の定義とほぼ等しく、本研究では、システム論的にこれを創発の定義として捉える。創発の概念を Fig. 2-1 に示す。例えば、渡り鳥の群れのなかで、各々の鳥は自分のごく近くにいる鳥の動きだけを見て、自分が飛ぶ速さや方向を決める。あまり近づきすぎるとぶつかるし、あまり離れると群れからはぐれてしまうため、適当な距離を保ちながら飛ぶことになる。その意味で、構成要素である鳥

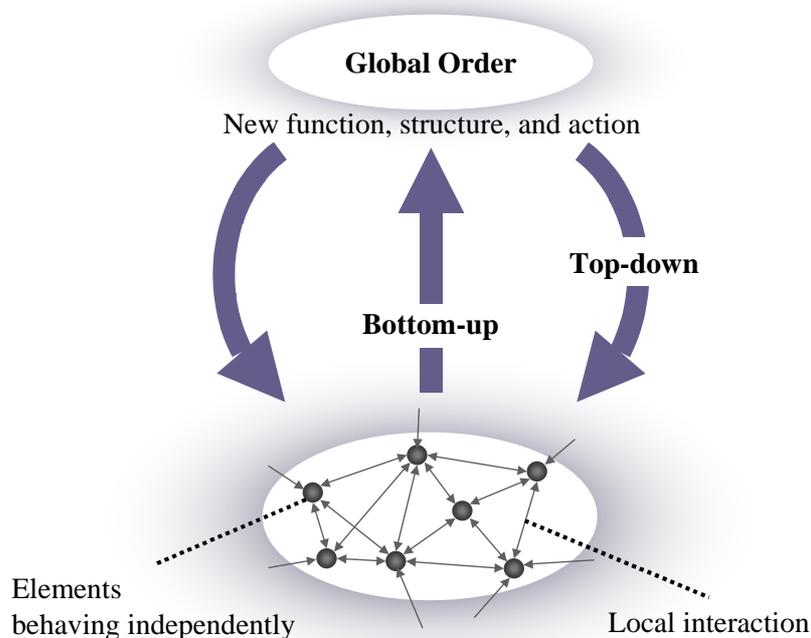


Fig. 2-1 Concept of emergence

たちの間の局所的な相互作用が、群れ全体の大域的な秩序を生み出し、それがまたそれぞれの鳥の相互作用の仕方に反映される[米沢 95]。

この創発の概念の最も代表的な特徴として、要素や相互作用には明示的に現れない挙動が全体に発現するという特徴をあげることができる。このような特徴は生物系のみならず、一般的に複雑な系に現れる特徴と一致するため、複雑なシステムの制御など、工学の分野にも応用されはじめている[小林 93, 池上 93, Perkins94, Soufi96, Poon97]。

2.3 設計過程と創発過程

吉川によれば、設計とは、「人間が概念として想定した要求機能を、それを充足する実体へと変換する行為」と言われている[吉川 79]。ここでは、設計過程を考察すべく、まず、設計者による設計解導出アルゴリズムについて説明を行う。

一般に、設計は Fig.2-2 のように評価から解を求める逆問題とされ、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。最適化法に代表される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。北村によれば、設計者はいくつもの設計解候補を直観で導き、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[北村 96]。

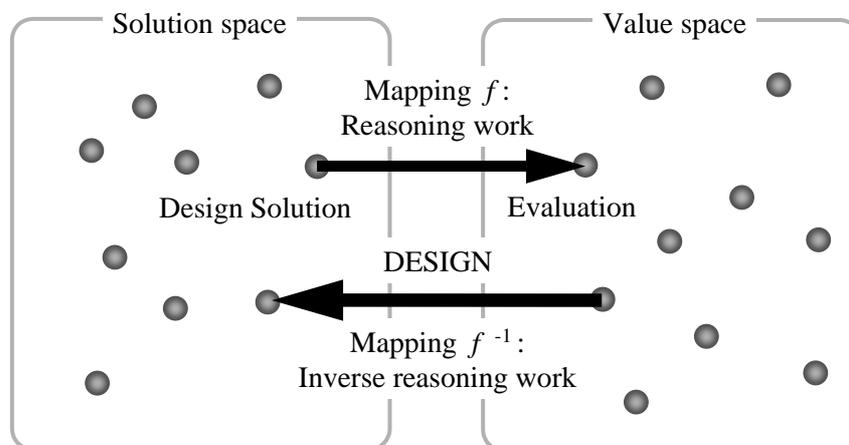


Fig. 2-2 Inverse problem

また, Simon によれば, 設計者による人工物の設計過程はつぎのように表現される [Simon69] .

- 1) 人工物(設計対象)が機能する環境の理解
- 2) 人工物(設計対象)の目的とする機能とそれを実現する技術手段の具体化
- 3) デザイン(設計結果)の評価

ただし, 3)により得られた設計解候補(代替案)の評価が不満足であれば2)に戻り他の代替案を探索する.

これらの設計解導出アルゴリズムに関する記述には共通する部分が見受けられ, これらの共通部分から, 設計解導出アルゴリズムが Fig.2-3 に示す構造であることが推測される. このアルゴリズムにおいては, まず, 設計者は設計解候補を作成し, その設計解候補に対して評価を行う. そして評価の結果が要求を満足するレベルに達していればそれを設計解として認め, 達していなければ, 他の設計解候補を作成する. この際, 評価を参考にしながら設計解候補を最適化することにより設計解を導出する場合や, まったく新しい設計解候補を作成する場合などがある. ここで, 設計者が設計解候補を導出する過程は, 一般に, アブダクション(abduction)と呼ばれる推論方法により行われ, 設計過程においては, アブダクションは最も重要な要素であると言われている[富山 01]. アブダクションは,

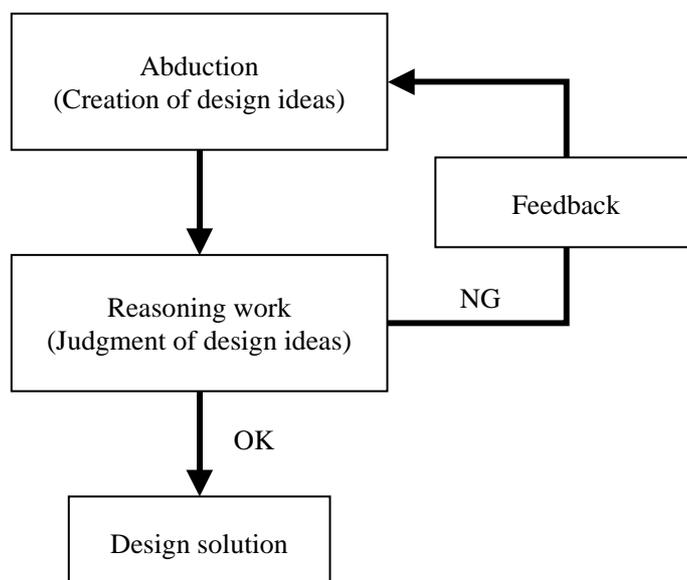


Fig. 2-3 Algorithm of obtaining design solution

C.S.Peirce により提唱された人間の推論方法の一つであり、演繹 (deduction)、帰納 (induction) に並ぶ第3番目の推論方法である [Hartshorne31-35, Burks58]。人間がある未経験の現象に遭遇したとき、ある仮説によりその現象を説明することができたならば、その仮説は正しいとみなされる。このような状況において、その仮説を生み出す能力をアブダクションという。

以上のような設計過程と前述した創発過程を比較すると両者に類似性を見出すことができる。ある基準以上の評価を有する設計解候補をアブダクションにより作成する過程においては、設計者は設計目標や制約条件を考慮してはいるものの、この過程は直観や偶然性に依存するところが大きいと言われている。つまり、設計者が直観により導く設計解候補は、完全な合目的性を有する論理に支配されて作成されるわけではなく、設計解候補の構成要素が組み合わせられることにより偶発的に形成されると考えられる。したがって、Fig. 2-4 に示されるように、設計者が結果としてある基準以上の評価を有する設計解候補をボトムアップ的に発現する過程は、創発過程における、自律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ボトムアップ的に発現する過程に類似している。また、設計解候補の詳細部分がトップダウン的に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トップダウン的に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。

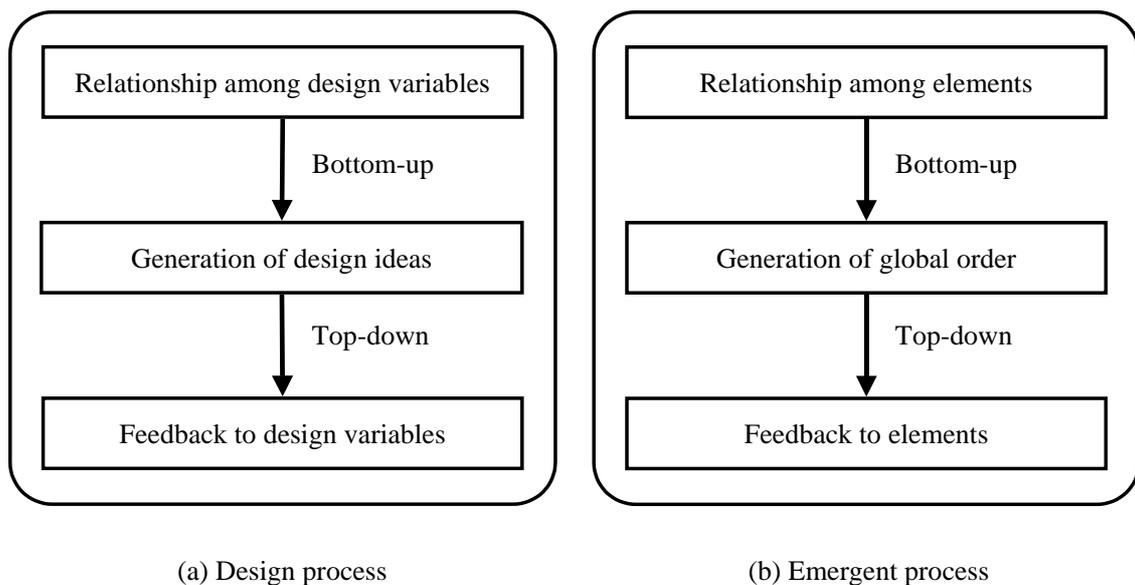


Fig. 2-4 Design process and emergent process

2.4 創発設計方法

2.4.1 創発設計方法の基本構造

ここで、創発に基づく設計方法を“創発設計方法 [Inoue01]”と呼ぶ。創発設計方法においては、ヒト、モノ、環境に含まれる各要素または特性が、創発の概念における構成要素に相当する。従来の製品評価では製品単体を対象とする場合が多い。しかしながら、製品の評価は、ヒト、環境との複雑な関係のうえに成り立っており、創発設計方法ではこの関係を考慮する。従来の設計方法と創発設計方法の比較を Table 2-1 に示す。従来の設計方法においては、多くの明確となる設計条件のもとで最適な唯一解を導出している。それに対し、創発設計方法の基本構造は、Fig. 2-5 に示すように、創発のボトムアップ過程に相当する発現過程およびトップダウン過程に相当する最適化過程の2つの過程を有する。発現過程においては、不明確な設計条件のもと多様な設計解候補を導出する。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、制約条件の設定が可能な場合には、制約条件に関する低い評価基準を設定し、その基準を満足したときに設計解候補とする。最適化過程においては、発現過程において設計解候補が導出されることにより、設計目標や制約条件などがより明確になるため、多くの明確となる設計条件のもとで発現過程において導出された多様な設計解候補をそれぞれ最適化し、多様な設計解を導出する。以下に、発現過程および最適化過程の2つの過程について述べる。

Table 2-1 Comparison of engineering design method and emergent design

	Engineering design method	Emergent design	
		Generation process	Optimization process
Design variables	known	unknown or known	known
Design conditions	many	a few	many
Objective function	design objective	low evaluation standard	design objective
Means to obtaining solution	maximization or minimization of the value of design objective	satisfaction of the low evaluation standard	maximization or minimization of the value of design objective
Design solution	a unique design solution	diverse design ideas	diverse design solutions

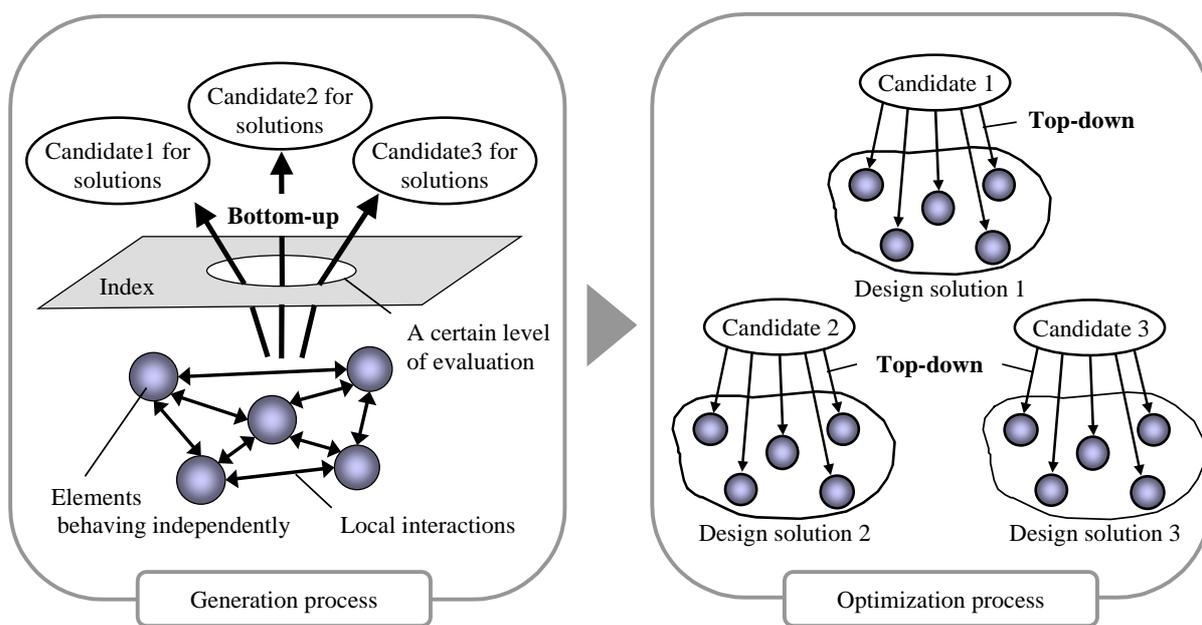


Fig. 2-5 Structure of emergent design

2.4.2 発現過程における解導出方法

発現過程は、創発過程における構成要素の相互作用により、設計解候補をボトムアップ的に発現する過程である。一般に、設計上流過程においては、目的が明確でない場合が多く、制約条件も少ないため、的確な設計条件を与えることは困難である。これより、発現過程においては、大域的な解探索を行う必要がある。

Fig. 2-6 に示すような多峰性を有する解空間において、構成要素の局所的な相互作用により、ある評価を有する設計解候補を発現する。このとき、制約条件が設定できる場合には、制約条件に関する低い評価基準を設定することにより、多様な設計解候補の導出が可能となる。

2.4.3 最適化過程における解導出方法

最適化過程は、発現過程において発現した設計解候補の構成要素が拘束され、トップダウン的に設計解が導出される過程である。この過程においては、発現過程により多様な設計解候補が導出されたことから、発現過程と比較すると徐々に設計目標が明確になり、制約条件も多くなる。最適化過程において設定した目的と制約条件により、発現過程において得られた多様な設計解候補は、さらに細部を修正することにより最適化される。各設計解候補は、発現過程により要素間の関係が決定されるため、この過程では、Fig. 2-6に示すように、要素間の関係を変化させない範囲で各要素を修正し、最適化する。これにより、発現過程において得られた解の多様性を保持しつつ、多様解を導出することが可能となる。

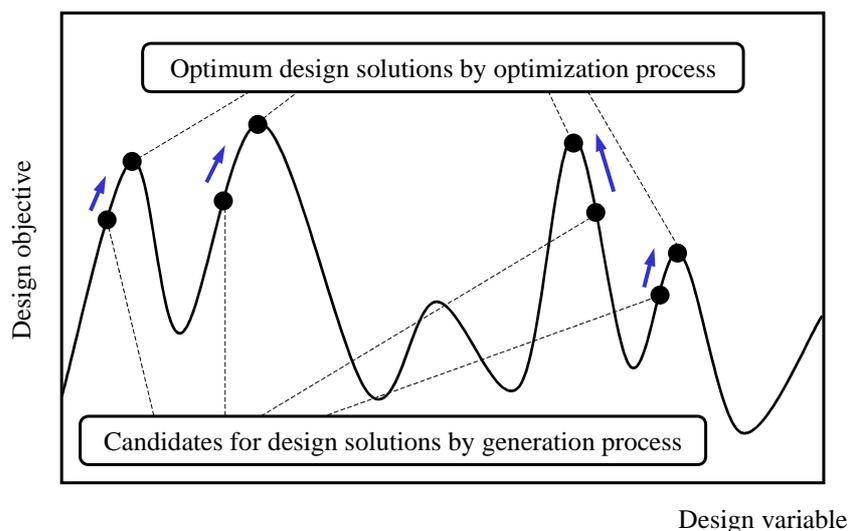


Fig. 2-6 Method for obtaining diverse design solutions by emergent design method

2.5 創発設計方法に基づく多様解導出システムの基本構造

本節においては、創発設計方法を人工設計へ適用すべく、本方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示す。

2.5.1 多様解導出システムの位置づけ

人工物の形状生成に関する従来 of 代表的な研究を紹介する。そして、従来研究の特徴から、多様解導出システムの位置づけを明確にする。

従来、人工物の形状を生成すべく、多くの最適化法の研究が行われてきた。形状を最適化する手法は、形状最適化 (shape optimization) と位相最適化 (topological optimization) の2つに大別できる [菊池 93, 鈴木 96]。

(1) 形状最適化の方法

形状最適化は、構造物の境界形状における構成要素を設計変数とし、形状の位相 (topology) を固定したまま境界形状を移動させることにより最適化する手法である。例えば、梅谷らは、生長変形法により外周上の節点とそれに対応する内部点を設計変数として、構造物の表面での応力に応じて表面を生長変形させている [梅谷 76]。この手法により、初期形状の位相において目標応力値を満たす形状を生成することを可能としている。この手法は、形状の位相が決定している設計下流過程において唯一解を導出することが可能であり、その有効性が示されている。

しかしながら、形状最適化の方法においては、初期形状と最適形状に大きな違いがある場合に、有限要素メッシュのゆがみにより解析精度が低下するため、形状を変形させるたびに有限要素モデルを作り直す必要がある。そのため、最適化の反復過程に自動メッシュ生成を組み込むか [Kikuchi86]、境界要素法などの領域内部に節点を設定する必要のない解析方法 [Mota84a, b, Bennet85, Burczynski85, King91] を用いることが不可欠となる。

(2) 位相最適化の方法

位相最適化は、構造物の境界形状を変更するのではなく、構造物の構成要素である密度や部材を変更することにより、その構造における最適な位相を求める手法である。位相最適化は、さらに、位相決定問題と最適分布問題の2つに大別できる [菊池 93]。

(a) 位相決定問題

位相決定問題の代表的な例題として、トラス問題において形状の位相を決定する問題があげられる[Hemp72, Reddy95, Shea97]。これは、トラス構造物のジョイントを結ぶすべての組み合わせを考え、剛性の最大化や、応力や変位に関する拘束条件を満たしながら全重量を最小化する問題である。部材に対して断面積を0とすればその部材は存在しないことになるため、部材の最適な配置を決定することができる。しかしながら、この手法においては、初期条件として部材数と節点を設定する必要があるため、導出される形状の位相が初期の設定条件に依存し、大域的な解探索には限界がある。

(b) 最適分布問題

一方、最適分布問題は、形状を材料の分布としてとらえる問題である。例えば、Odaらは、形状生成領域をいくつかの要素に分割し、各要素の板厚を設計変数として変化させることにより、最適な形状の位相を決定している[Oda94, 尾田97a, b, 尾田98]。しかしながら、このような板厚を設計変数とした場合においては、3次元形状への適用が難しい点があげられる。

これに対し、Inouらは、設計変数を各要素のヤング率にすることにより、3次元の構造問題における形状の位相変化を可能としている[伊能95a, b, 伊能97, Inou99]。具体的には、設定したヤング率と応力の関数により、各要素にかかる相当応力から各要素のヤング率を変換し、材料の分布として形状をとらえることにより、形状の位相を変化させている。しかしながら、この方法により生成される形状は初期の形状生成空間に依存する問題があげられる。

また、Bendsøeらは、形状を有限要素に分割し、Homogenization Methodと呼ばれる手法を用いて各要素の密度を変化させることにより設定した条件下の最適な位相を決定している[Bendsøe88, Suzuki91, Diaz93, Nishiwaki98]。Homogenization Methodは、空間に孔の空いたマイクロストラクチャを分布させる手法である。ここで、設計変数はマイクロストラクチャにおける孔の大きさとその角度である。この手法は、設計変数の変化を密度に変換する際に、材料の方向性を考慮することが可能であるため、初期の形状生成空間への依存も少ない。そして、形状生成空間、拘束条件、荷重条件などの制約条件を設定することにより、目的とする剛性最大化や軽量化が可能な手法である。しかしながら、導出される解は、設定した力学条件下における唯一解であり、同一条件下で多様解を導出するこ

とは難しい。

以上に示した位相最適化の方法は、設計初期における形状の位相を決定することが可能であり、その有効性が示されている。しかしながら、位相最適化の共通の問題点として、生成される形状の位相が特定の力学条件下における唯一解であり、そのため多様解を導出することは難しいという点があげられる。

(3) 多様解導出システムの特徴

以上より、従来の最適化法による形状生成方法は、目的関数や制約条件などの詳細な初期条件が明確に設定されている設計問題における最適な唯一解を導出する方法として有効性が示されているが、この方法を目的関数や制約条件などが不明確な設計問題へ適用することは難しく、さらに、大域的な解探索により多様解を導出することは難しい。

これより、本研究においては、従来の方法と比較して、

- ・ 目的関数や制約条件を明確に設定せずに、少ない設計条件下において解を導出することができる。
- ・ 大域的な解探索により、効率よく3次元形状の多様解を導出することができる。

という特徴を有するシステムの構築を目指す。

2.5.2 発現過程における多様解導出システムの基本構造

本項においては、発現過程における多様解導出システムの基本構造を示す。発現過程においては、目的関数や制約条件を明確に設定せずに解を導出するために、目的関数を設定せず、自己組織的に形状を生成させる。そして、従来の最適化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、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解候補として抽出する。

発現過程における多様解導出システムは、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 Fig. 2-7 に示す。

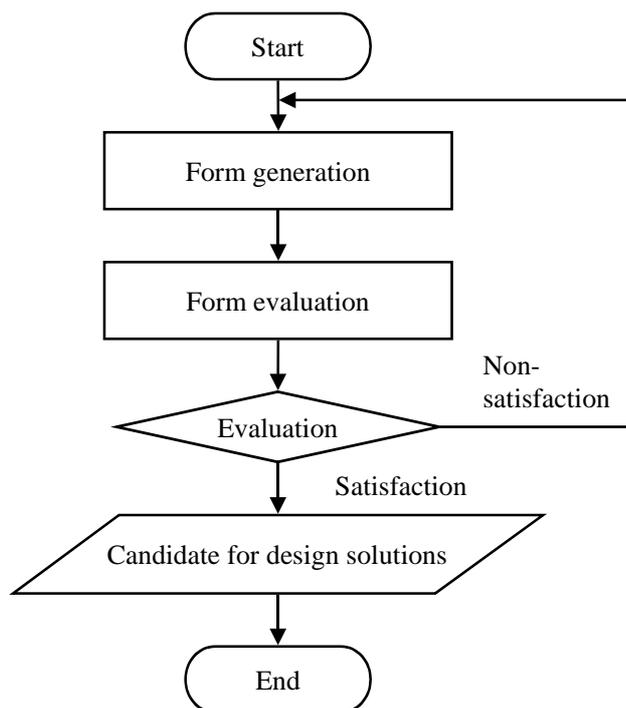


Fig. 2-7 System in generation process

2.5.3 最適化過程における多様解導出システムの基本構造

本項においては、最適化過程における多様解導出システムの基本構造を示す。最適化過程においては、発現過程により導出された多様な設計解候補を設定した目的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。このとき、発現過程により得られた形状の多様性を保持するシステムを提案する必要がある。

最適化を行う際に用いられる代表的な手法である数理計画法の諸方法は、目的関数を直接的に最小化する方法であり、しばしば直接法と呼ばれる。この直接法は、汎用に富む方法であるが、最適解への収束性、最適化の計算に要する時間、用いる計算機の容量などの問題があり、実用的にはこれらの点に注意を払わなければならない。これに対して間接法と呼ばれる方法が存在し、代表的な手法として最適性規準法 (optimality criteria method) があげられる。最適性規準法は、最適化問題の最適解が満たされるべき規準、すなわち最適性規準をあらかじめ定義し、その最適性規準による漸化式を用いて設計変数を修正するという手順をくり返すことにより最適解を導出する手法である。最適性規準は、問題によっては物理的あるいは工学的な直観に従って導き出される場合もあれば、ラグランジュ乗数の導入により得られたラグランジュ関数の停留値を与える条件から厳密に導き出される場合もある。最適性規準法は、数理計画法のように設計目標を目的関

数として直接定義するのではなく最適性規準を定義するため、数理計画法の諸方法ほど一般性はなく、また、最適解への収束性は必ずしも保証されない。しかしながら、最適性規準法は、定義した最適性規準に対して設計変数を更新すればよいため、設計変数が多い設計問題に対しても適用可能であり、数理計画法と比較して計算効率がよいため、大規模な設計変数を伴う構造設計問題に対する実用的な方法としても注目されている [川面 00]。

本研究においては、最適化過程におけるシステムを提案するにあたり、数理計画法と比較して計算効率のよい最適性規準法を用いることとした。その基本構造を Fig. 2-8 に示す。図に示すように最適化過程におけるシステムは、形状変換部と形状評価部により構成される。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。この操作をくり返し行うことにより、設定された目的に対して最適化された設計解の導出が行われる。

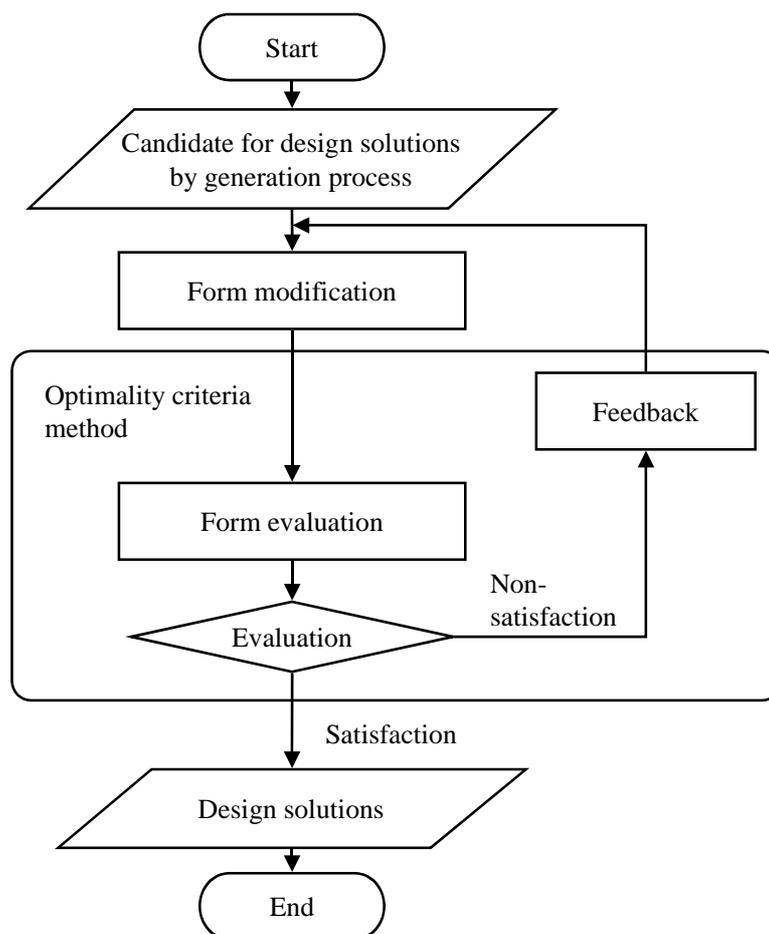


Fig. 2-8 System in optimization process

2.5.4 多様解導出システムの基本構造

前項までにおいて、発現過程と最適化過程における多様解導出システムのそれぞれの基本構造を示した。本項においては、発現過程と最適化過程の2つの過程を有する多様解導出システムの基本構造を示す。そして、本システムにより多様解が導出される過程と従来の最適化法により唯一解が導出される過程を比較することにより、本システムによる多様解導出の有効性を検討する。

まず、多様解導出システムの基本構造を Fig. 2-9 に示す。発現過程においては、特定の目的関数を設定せずに自己組織的に形状を生成する。そして、設定した低い評価基準を満足した場合に、設計解候補として抽出する。設定した解候補の数に達するまで、形状生成と評価をくり返す。なお、このとき、設定する評価項目は、重量や強度という力学特性だけでなく、定量化が可能な評価項目であれば複数設定することが可能である。一方、最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の力学特性を有限要素解析により算出し、算出された評価をもとに形状変換を行う。そして、設定した制約条件を満足した場合に、設計解として抽出する。これを発現過程において導出された設計解候補すべてにおいて行うことにより、多様解を導出する。

つぎに、本システムにより多様解が導出される過程と従来の最適化法により唯一解が導出される過程を比較することにより、本システムにより導出される多様解の有効性を検討する。従来の最適化法においては、Fig. 2-10(a)に示すように、設定した設計目標に関する解空間から最も評価の高い最適な唯一解を導出する。しかしながら、設計過程の進行にともない設計条件が徐々に明確になるため、設定した設計目標の追加や変更が必要になるという問題が考えられる。このような場合、Fig. 2-10(b)に示すように、新たに設計目標を設定することにより解空間が変化する。このとき、導出した唯一解は、新たな設計目標に関して、必ずしも最適解とは限らない。このような設計過程の進行にともない解空間が変化する問題に対し、従来は、設計過程を戻り新たな設計目標に対して最適化を行うことにより解決してきた。これに対し、大域的に多様解を導出可能な本システムにおいては、Fig. 2-11 に示すように、はじめの解導出時には評価していない評価項目に対しても高い評価を有する可能性があるため、設計過程を戻ることなく効率よく設計解を導出することができる。また、多様解を導出することにより、複数の力学特性に対し高い評価を有する可能性があることから、多目的問題への適用可能性も考えられる。

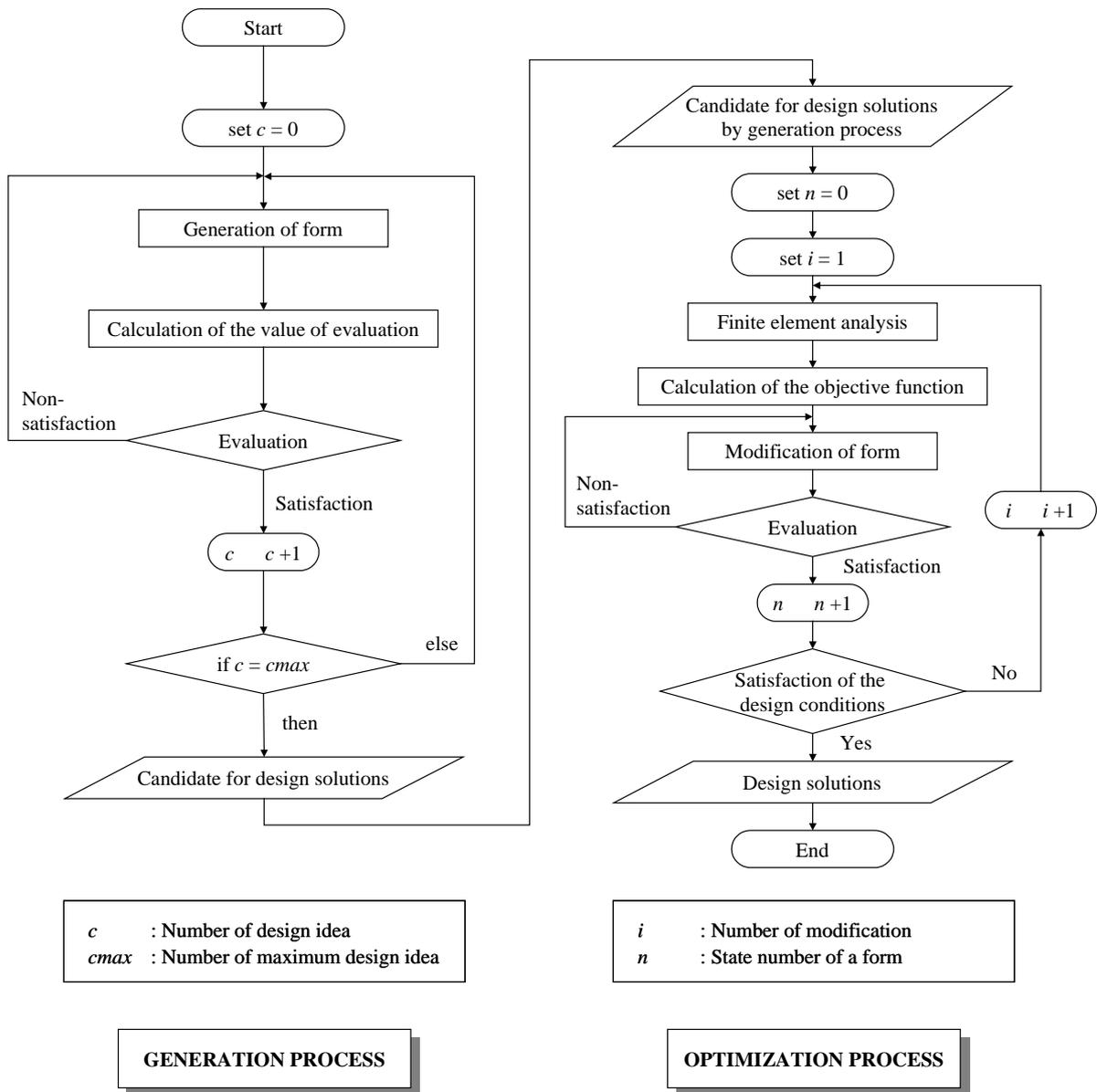


Fig. 2-9 System for obtaining diverse design solutions

本研究において提案した多様解導出システムは、発現過程と最適化過程の2つの過程から構成されているが、実際の設計問題においては、最適化過程を経た後も設計過程が進行する可能性があることから、2つの過程がさらにも繰り返されるシステムも考えられる。この問題に対しては、今後検討していく必要がある。

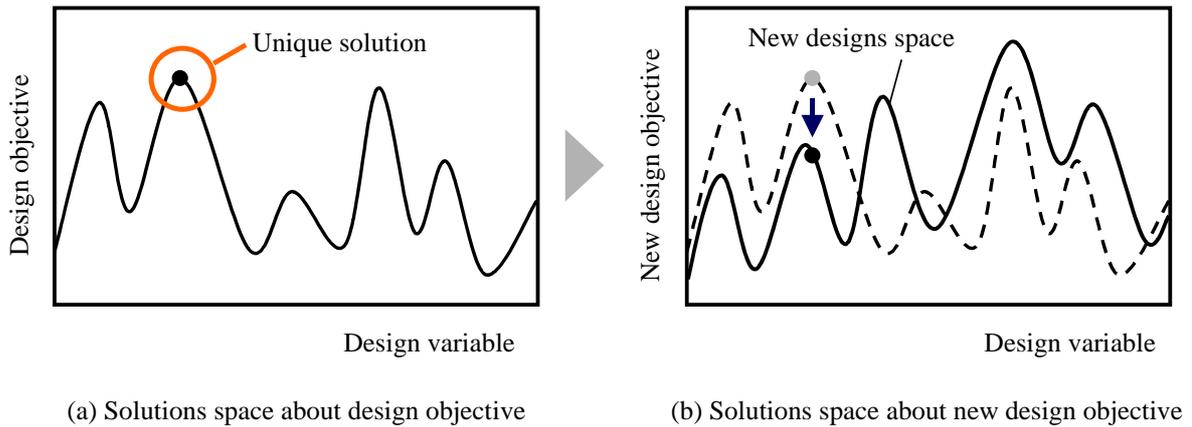


Fig. 2-10 Obtaining unique solution by optimum design

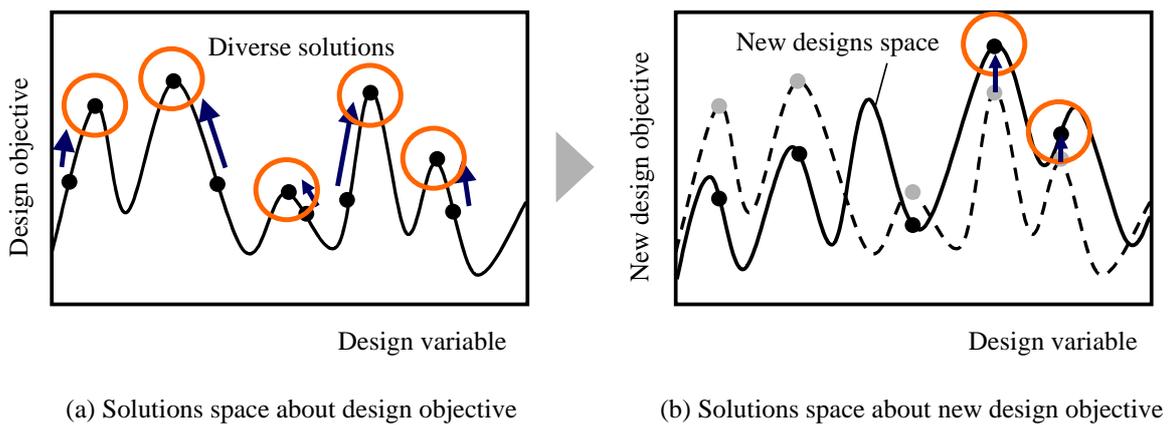


Fig. 2-11 Obtaining diverse solutions by proposed system

2.6 結言

本章においては、設計上流過程に適用可能な多様解導出を可能とする創発設計方法を提案した。本方法は、設計過程と創発過程の類似性に着目し、創発のボトムアップ過程に相当する発現過程およびトップダウン過程に相当する最適化過程の2つの過程を有する。

まず、従来の最適化法と創発設計方法を比較した結果、以下の知見が得られた。発現過程においては、少ない設計条件のもと多様な設計解候補を導出する。このとき、従来の最適化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、低い評価基準を設定し、その基準を満足したときに設計解候補とする。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解候補をそれぞれ最適化し、多様な設計解を導出する。

さらに、創発設計方法を人工物設計へ適用すべく、本方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示した。発現過程においては、特定の目的関数を設定せずに自己組織的に形状を生成する。そして、設定した低い評価基準を満足した場合に、設計解候補として抽出する。一方の最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の力学特性を有限要素解析により算出し、算出された評価をもとに形状変換を行う。そして、設定した制約条件を満足した場合に設計解として抽出する。以上の発現過程および最適化過程の2つの過程を経ることにより、少ない設計条件からの大域的な多様解導出を可能とした。

最後に、多様解導出システムと従来の最適化法の解導出過程を比較した結果、大域的な多様解導出が可能な本システムは、従来の最適化法では対応できなかった評価項目が新たに追加される設計問題に対しても有効である可能性を示した。

第3章

多様解導出システムにおける形状生成方法の提案

3.1 緒言

第2章では、設計上流過程に適用可能な多様解導出のための創発に基づく設計方法として、発現過程と最適化過程の2つの過程を有する創発設計方法を提案した。そして、創発設計方法を具体的な人工物設計へ応用するために、その方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示した。本章においては、第2章において示した多様解導出システムにおける形状生成方法を提案する。本形状生成方法は、特定の目的関数を設定せずに自己組織的に形状を生成するという特徴を有する。さらに、提案する形状生成方法を椅子の形状設計へ適用し、形状の多様性と解探索の効率性について解析を行うことにより、本形状生成方法の有効性について検証する。

3.2 形状モデルと形状生成空間

CAD上で3次元の立体を表現する方法には、サーフェスモデルとソリッドモデルがある。サーフェスモデルは、様々な自由曲面を表現でき、意匠設計への適用に優れているが、中空のため有限要素法を用いた力学計算には不向きな点が多い。一方、ソリッドモデルは中身が充填されているため、有限要素法を用いた力学計算が容易であり、構造設計の適用に優れている。本研究においては、将来的には意匠設計問題・構造設計問題の両方に適用することを想定している。ただし、ここでは構造設計問題への適用を主として想定し、ソリッドモデルを用いることにした。

また、ソリッドモデルの1つの表現としてボクセル表現がある。ボクセル表現とは、形状を微小な立方体要素の集合として近似する方法である。ボクセル表現を用いずに、構造物の形状そのものを設計する形状最適化の研究においては、形状の変化が大きくなると有

限要素メッシュのゆがみによる解析精度の低下によりメッシュの切り直しが必要となる。すなわち、最適化の反復過程に自動メッシュ生成を組み込むことが不可欠である[菊池 93]。ボクセル表現は、自由度の高い形状表現を可能とし、有限要素法を用いた力学解析を行う際にメッシュの作成を必要としないことから、構造設計問題の適用にも優れている。そのため、本研究においては、ボクセル表現を用いることにした。

さらに、ボクセル表現を用いるため、形状を生成させる空間としてセルで満たされた3次元の形状生成空間を設定する。ここで、セルとは、仮想的なしきり壁により区切られた立方体の空間であり、この空間におかれる形状を表現するための最小単位となる。このセルに材料が充填されたものを要素と呼び、Fig. 3-1 に示されるように、要素の集合により形状を表現することとする。

3.3 セルラ・オートマトンの応用

3.3.1 セルラ・オートマトン

本研究においては、多様な形状を生成する方法を提案するために、ボクセル表現により複雑なパターンを自己形成するセルラ・オートマトン[Wolfram96] (Cellular Automata, 以下 CA と略記する) に注目した。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り[都倉 95]、CA は、格子状に配置されたオートマトンの集合である[加藤 98, Delorme99]。

CA においては、まず、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)

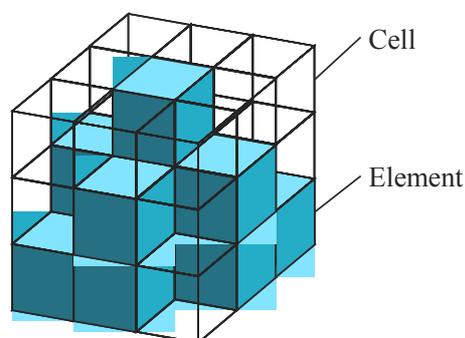


Fig. 3-1 Voxel model

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。

$$C^{[t+1]} = f(C^{[t]}, N^{[t]}) \quad (3-1)$$

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

つまり、CA は、つぎのような特徴を有している。

- ・ 各セル C の状態 S は、離散的な時間進行とともにすべてのセルと同時に更新される。
- ・ ある時間ステップ t における近傍セルの状態 $N^{[t]}$ により、つぎの時間ステップ $t+1$ におけるセルの状態 $C^{[t+1]}$ が決定される。
- ・ 各セル C の状態変化は、近傍セル N からの情報を入力とする状態遷移関数 f に従う。

特に、CA は、セル間の局所的相互作用を状態遷移関数として記述することにより複雑な現象を表現することが可能なため、人工生命の分野においては、自己組織的に形状を発現させる方法として、広く用いられている[都倉 95]。本研究においては、3次元 CA を用い、セルの状態を2状態として、状態が0のときを要素なし、1のときを要素ありとすることにより、要素の集合として形状を生成することとした。このようにして現れる形状は、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発現される。

3.3.2 セルラ・オートマトンを用いた形状生成に関する研究

CA を用いた形状生成に関する研究は、従来、多岐にわたり行われてきた。CA においては、前述のように、セル間の局所的相互作用を状態遷移関数として記述する必要がある。従来、目的に応じた様々な状態遷移関数が提案されてきた[Cao98, 石田 98, Santos98a, b, Hajiri99, Kita00, Halloy00]。本項においては、CA を用いた従来の研究を紹介するとともに、これらの研究で用いられている状態遷移関数について考察を行う。そして、本研究における状態遷移関数の設定方法について指針を得ることとする。

Inou らは、生体の支持組織が有する適応的な機能に注目し、構造物を自己組織化する CA モデルを構築している[Inou00]。このモデルにおいては、つぎのような状態遷移関数を設定している。はじめに、微小な立方体要素の集合で表現された初期形状を設定す

る。つぎに、これに力学条件を与え、各要素に発生する応力を計算する。さらに、応力値にしたがい各セルのヤング率を変化させる。そして、ヤング率の値に応じてセルを誕生、消滅させる。以上の手順をくり返すことにより、多様な位相構造を有する形状生成を可能としている。しかしながら、生成される形状は初期形状に依存する。他の研究においても、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[Kita00]。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、多様な形状生成が妨げられると考えられる。

これに対し、Oda らは、生成される形状が初期形状に依存する問題を回避するために、遺伝的アルゴリズムを用いた進化的 CA (Evolutionary Cellular Automata) を提案し、目的に対する最適な状態遷移関数を遺伝的アルゴリズムにより導いている[Oda94]。しかしながら、この方法により生成される形状は、特定の条件における唯一解であり、多様解を導出することは難しい。

また、CA においては、一般的に、設定する状態遷移関数の数が膨大になるという欠点を有している。いま、近傍セルの数を r 、各セルの状態数を n とすると、近傍セルの状態パターン P は、

$$P = n^r \quad (3-2)$$

となるため、考えられる状態遷移関数の数 L は、

$$L = n^P \quad (3-3)$$

となり、状態遷移関数の数 L は、非常に大きな値を有することが示される。

以上より、本研究においては、多様な形状を自己組織的に生成するために、既存の CA と比較して、

- ・ 初期形状に依存せずに多様な形状を生成することができる。
- ・ 比較的少ない情報量で状態遷移を行うことができる。

という特徴を有する状態遷移関数を設定する必要がある。

3.3.3 セルラ・オートマトンの状態遷移関数

本研究においては、初期形状に依存せずに多様な形状を生成するための状態遷移関数を設定する。しかしながら、初期形状がない場合には、状態遷移が起こらないか、あるいはすべてのセルが同じ状態に遷移するため、多様な形状が生成されないという問題が生じる。そこで、この問題を解決するために、限りなく無に近い状態として、単一要素を初期形状として設定することとした。そして、単一要素からの形状生成を可能とするために、CAの状態遷移関数を拡張することとした。

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のに対し、本方法においては、要素が存在するセルの近傍のみが状態遷移を行うこととした。さらに、CAにおいては、状態遷移関数の出力がそのセルのつぎの状態であるのに対し、本方法においては、状態遷移関数の出力を要素発生の有無および要素を発生させる方向とした。これらの方法により、単一要素からの形状生成が可能となると同時に、連続体の形状生成が可能となる。

つぎに、比較的少ない情報量で状態遷移を行うため、状態遷移関数における記述方法を決定する。考えられる状態遷移関数の数 L は、式(3-3)により表される。ここでは、要素の有無による3次元CAを考えているため、近傍セルの数 r を $26 (=3^3-1)$ 、各セルの状態数 n を2(要素あり, なし)とする。この場合、考えられる状態遷移関数の数 L は、

$$L = 2^{2^{26}} \approx 10^{2.5 \times 10^7} \quad (3-4)$$

となり、膨大な値を有するため、すべての状態遷移関数を記述することは困難であると考えられる。そこで、本方法においては、比較的少ない情報量で状態遷移を行うために、記述方法の拡張を行った。具体的には、状態遷移関数の入出力情報をベクトルで表現し、さらに、ベクトルを θ, ϕ という離散量で表し、量子化を行った。これにより、状態遷移関数の数 L は、著しく減少する。また、ベクトル表現を用いることにより、セルの位置変化による微妙に異なる情報を表現することが可能となる。なお、状態遷移に関する具体的な方法は、3.4.3項に記述する。

上記の特徴を満足するような状態遷移関数の入力情報を決定するために、1つの細胞から細胞増殖をくり返して形態を発現する生物の発生過程に着目した。

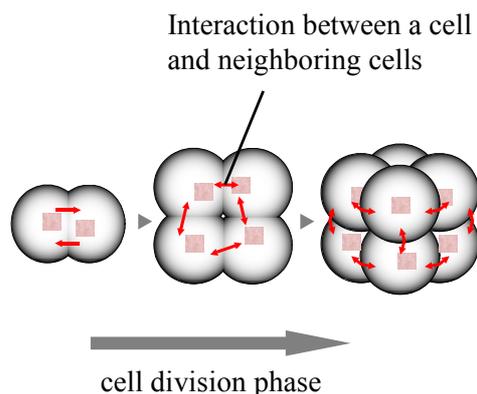


Fig. 3-2 Induction

3.4 生物の発生特性を応用した形状生成方法

発生生物学において、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 (morphogenesis) という [中沢 75, 塩川 91]. 発生とは, 「1 個の細胞である卵が, 受精により細胞分裂を開始し, 多細胞の胚になるとともに, 細胞に分化が起きて組織や器官が形成され, 複雑な体制を持った成体になるまでの過程」といわれている [中埜 86]. 松岡らは, 生物の形態多様性を生起させる発生特性を抽出するために, ISM (interpretive structural modeling) を用いて生物の発生特性を階層化し, 階層構造をもつ生物の発生特性を整理した [松岡 02]. その結果, 生物の個体内における特性として, 誘導 (induction) と頂部支配 (apical dominance) の特性が抽出された. そこで, 本方法においては, 誘導および頂部支配を応用した形状生成方法を提案する.

3.4.1 誘導の応用

誘導とは, Fig. 3-2 に示されるように, 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り, 細胞増殖の活性化を促す特性である. この特性は, 個々の細胞が局所的な相互作用によって, 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.

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, 作用の大きさを有する. ここで, 形状生成空間内の要素のなかで, 要

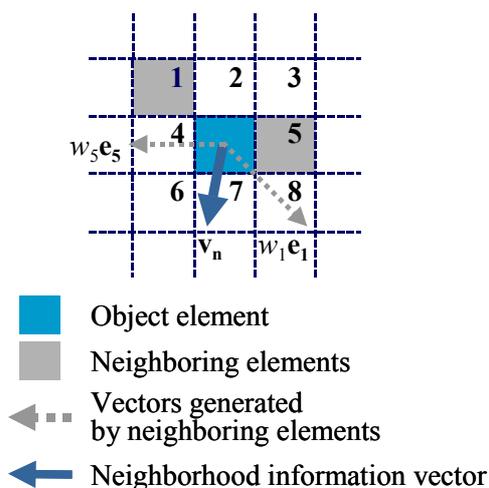


Fig. 3-3 Neighborhood information vector

素発生の判定を行う要素を注目要素と呼ぶこととする。複数の近傍要素をもつ注目要素が受けるベクトルは、Fig. 3-3 に示すように、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。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。

$$\mathbf{v}_n = \sum_{i=1}^{26} b_i w_i \mathbf{e}_i \quad (3-5)$$

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 は作用の大きさ、 \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を表す。

形状生成空間内の要素は、その近傍要素に刺激を与えて要素の発生を促す。そして、発生した要素は、その近傍要素に刺激を与える。以上の過程がくり返されることにより、要素に与えられる刺激が動的に変化し、複雑な形状生成が可能になると考えられる。

3.4.2 頂部支配の応用

頂部支配とは、Fig. 3-4 に示されるように、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。このた

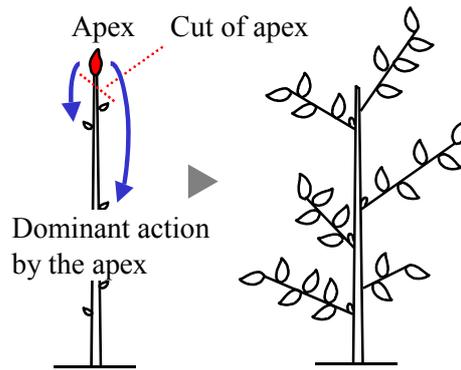


Fig. 3-4 Apical dominance

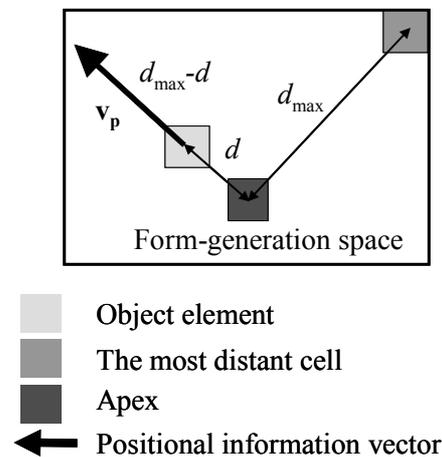


Fig. 3-5 Positional information vector

め、頂部支配は、各細胞が全体に対する自己の位置情報を認識することにより生じると考えられる。この位置情報を各細胞に伝えるためには、位置情報を発信する中心的な組織が必要となるが、発生生物学においては、頂部が位置情報を発信するといわれている。そこで、本研究においては、この位置情報をベクトルで表現し、モデル化を行った。以下に、モデル化の方法を述べる。

初期要素を頂部とし、頂部が形状生成空間に存在するすべての要素に対して位置情報を発信していると考えられる。この位置情報により、各要素は Fig. 3-5 に示すように、あるベクトルを受ける。各要素が受けるベクトルは、頂部から注目要素へ向かう方向と、頂部と注目要素との距離に応じた大きさを有する。このベクトルは、注目要素に与えられる位置情報

を反映しているため、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p と呼び、次式のように表される。

$$\mathbf{v}_p = (d_{max} - d)\mathbf{e}_d \quad (3-6)$$

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を表す。なお、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p においては、頂部の支配的な作用をベクトルの大きさにより表現している。つまり、このベクトルの大きさは、頂部と注目要素の距離が小さい場合には大きくなり、逆にこの距離が大きい場合には小さくなる。

形状生成空間内の頂部から要素に与えられる位置情報は、空間内の相対位置に固有である。したがって、頂部支配を応用することにより、要素の発生が空間内の位置による影響を受けることになる。これにより、状態遷移が位置により変化し、複雑な形状生成が可能になると考えられる。

3.4.3 要素の発生過程

前述したように、CA においては、入力を状態遷移関数により変換し、出力を求める。ここでは、要素が受けたベクトルが入力となり、状態遷移関数により要素発生の方向が決定される過程について説明を行う。

まず、本研究で用いた状態遷移関数の形式について述べる。CA の研究分野において、線形関数やステップ関数など、様々な状態遷移関数が用いられているが、本研究においては、入力がベクトルであるため、ベクトルを入力にすることが可能な関数が要求される。また、多様な形状生成のためには、入力するベクトルの微小な変化が出力に反映される状態遷移関数が望ましい。これは、入力ベクトルの多様性が要素発生過程の多様性につながり、それがさらに形状の多様性につながると考えられるためである。これらの条件を考慮し、本研究においては、状態遷移関数を状態遷移表 (state transition table) と呼ばれる表により表現し、要素発生の方向を状態遷移表に記述した。

状態遷移表は、左端の列にすべての状態を書き、上端の行にすべての入力記号を書き、状態 p に対応する行と入力 a に対応する列の交点の位置に遷移すべき状態 $\sigma(p, a)$ を記入する[都倉 95]。この状態遷移表の特徴として、つぎの点があげられる。

- ・ 入力や出力が定性的に表現される場合や、定量的であっても離散量で表現される場合においては状態遷移が可能である。
- ・ 入力に対して自由に出力を設定できるため、複雑な入力と出力の関係を表現することが可能である。ただし、表形式で対応関係が表現されるため、連続量を扱うことはできない。

本研究においては、ベクトルで表現される入力を方向により有限個のカテゴリに分類することで状態遷移表を用いることを可能とした。

つぎに、要素発生具体的な方法を以下に示す。

まず、入力されるベクトルを Fig. 3-6 に示すように 3 次元極座標系で表現し、xy 平面上の角度を θ_{in} ($0 \leq \theta_{in} < 2\pi$)、xz 平面上の角度を ϕ_{in} ($-\pi/2 \leq \phi_{in} \leq \pi/2$) とする。そして、Fig.3-7 のように、この θ_{in} 、 ϕ_{in} をその大きさによりそれぞれ 8 個および 4 個の角度領域番号のいずれかに分類することにより離散量で表現する。すべての角度領域には角度領域番号が設定されており、これらの番号から次式により状態番号 n_{state} を算出し、入力されるベクトルを 1 から 32 までの連続した番号に割り振る。

$$n_{state} = n_{\theta} + 8(n_{\phi} - 1) \tag{3-7}$$

ここで、 n_{θ} を θ_{in} の角度領域番号、 n_{ϕ} を ϕ_{in} の角度領域番号とする。式(3-7)は、様々な入力されるベクトルをその方向により 1 から 32 の状態番号に分類することを意味する。なお、角度領域の境界においては、角度領域番号の低い番号の値をとることとした。また、入力されるベクトルが $\mathbf{0}$ の場合、状態番号は 33 とする。

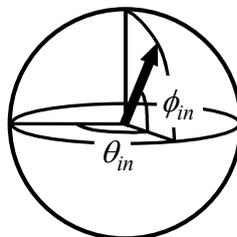


Fig. 3-6 Input vector to the CA state transition function

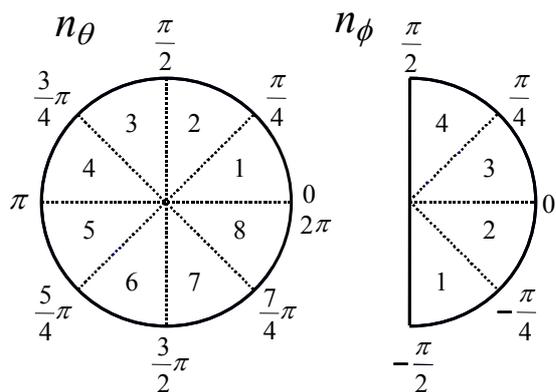


Fig. 3-7 Angle region number

Table 3-1 Example of CA state transition table

n_{state}	$\Delta\theta (\pi/4)$	$\Delta\phi (\pi/8)$
1	4	2
⋮	⋮	⋮
32	6	5
33	1	7

つぎに、この状態番号と状態遷移表を用いて出力されるベクトルを求める。状態遷移表には、入力されるベクトルのそれぞれの状態番号に対応した出力値が記述されている。本方法で用いる状態遷移表の出力値は、Table 3-1に示すように、 θ_{in} の増加量 $\Delta\theta$ と ϕ_{in} の増加量 $\Delta\phi$ の角度領域番号である。式(3-7)により算出された状態番号は、状態遷移表により $\Delta\theta$ および $\Delta\phi$ に変換され、さらに、次式により出力されるベクトルが算出される。

$$\begin{aligned} \theta_{out} &= \theta_{in} + \Delta\theta \\ \phi_{out} &= \phi_{in} + \Delta\phi \end{aligned} \tag{3-8}$$

出力されるベクトルは、要素の発生する方向を示すベクトルであるが、実際に要素の発生する方向は、注目要素が面をもつ6方向のうち、出力されるベクトルに最も近い方向となる。

ただし、出力されるベクトルの方向にすでに要素が存在する場合は発生しない。

なお、状態遷移表に記述される各状態番号に対応する $\Delta\theta$, $\Delta\phi$ の出力値を Fig. 3-8 に示す 1 次元配列に記述する。要素はこの 1 次元配列に従い発生することとなる。

3.4.4 形状生成の過程

これまで、単一要素を初期形状として要素発生を行う過程について述べた。つぎに、単一要素から要素発生をくり返し、形状が生成される過程について述べる。

要素発生は、発生世代数と呼ぶ離散的な時間変数に従って行われる。まず、ある発生世代数において存在するすべての要素に対して、それぞれ要素発生判定が行われる。ここで、要素発生判定とは、ある要素が、その位置に応じた入力されるベクトルを算出し、状態遷移表を用いて発生する要素の方向を決定する過程を意味する。なお、それぞれの要素発生判定の時点では要素の発生は起こらず、発生する要素の座標が記録されるだけである。そして、すべての要素判定が終了した時点で、記録されているすべての要素が発生し、発生世代数を更新する。この過程をくり返し、発生世代数が設定した最大発生世代数に達した時点で成長が終了する。

以上の過程で要素発生をくり返し、単一要素から形状生成を行う方法を提案した。このような形状生成方法を用いることで、自己組織的な形状生成が可能となり、多様な形状生成につながると考えられる。なお、本方法のフローチャートを Fig. 3-9 に示す。

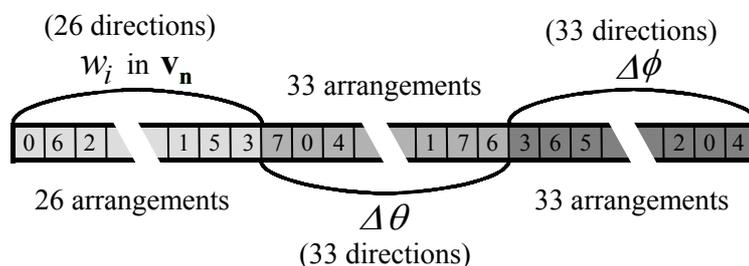


Fig. 3-8 One-dimensional arrangement

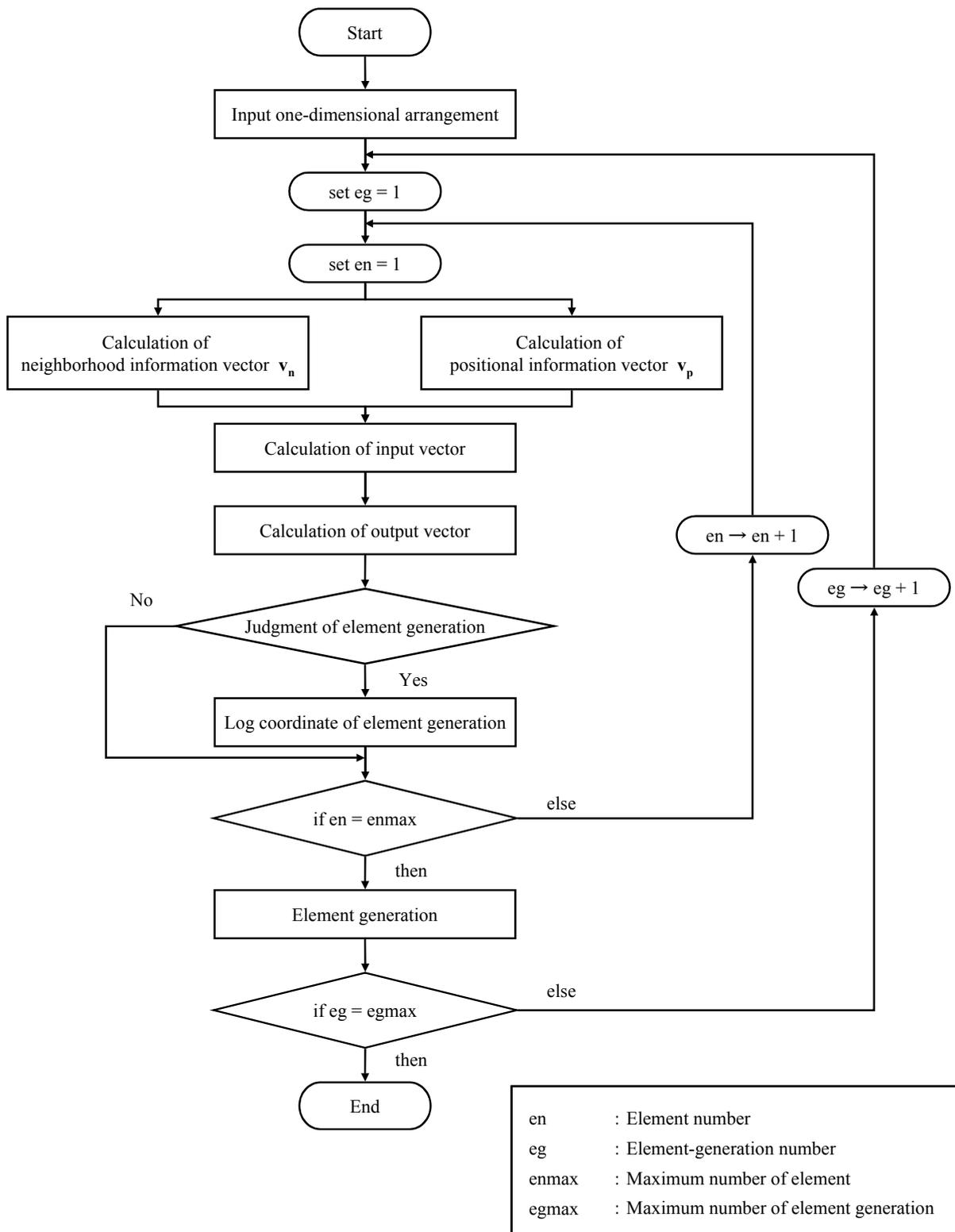


Fig. 3-9 Flowchart of form generation

3.4.5 誘導および頂部支配を応用した形状生成方法

(1) 形状生成の条件

まず、形状を生成させる空間として、セルで満たされた3次元の形状生成空間を設定する。多様な形状を生成するためには、形状生成空間にある一定の大きさが要求される。形状生成空間が要素の大きさに対して小さい場合には、要素が空間を囲む壁面に到達しやすくなる。この壁面に達した要素はその面に沿って成長を続けるため、生成される形状が空間の形状に束縛されることになる。これらの形状は、空間形状の制約を受けるため、自由度を失い、多様性が低下すると考えられる。したがって、形状生成空間は、要素の大きさに対して十分な大きさをもつ必要がある。一方、形状生成空間が大きすぎると、形状生成方法の実行に必要なとされる計算の負担が大きくなる。以上の条件を考慮して、各辺が21個のセルにより構成される立方体を形状生成空間に設定した。

つぎに、要素発生開始の始点である単一要素の位置を設定する。本方法においては、特定の初期形状を設定する必要はないが、発生開始位置を設定する必要がある。この位置は、生成する形状の自由度を低下させないように、様々な形状に共通して存在する位置が望ましい。本方法においては、この位置として、形状生成空間の中央部とした。

さらに、要素発生における最大発生世代数を設定する。最大発生世代数が小さい場合には、要素がほとんど発生せずに、形状が生成されない可能性がある。一方、最大発生世代数が大きすぎると、形状生成空間内に要素が発生しすぎ、形状の多様性が低下すると考えられる。以上より、発生世代数を試行錯誤的に変化させて形状生成を行った結果、要素発生における最大発生数を20とした。また、生成される形状の特徴と、その傾向を解析するため、100個以上の要素からなる形状が10個得られるまで試行をくり返した。

(2) 近傍情報ベクトルおよび位置情報ベクトルの特徴

CAの状態遷移関数への入力情報として、式(3-5)の近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n のみを用いて形状生成を行った結果、Fig. 3-10に示すような過程で形状が生成され、塊状、平板状、骨組状およびそれらの組み合わせの形状が生成される傾向が確認された。また、生成された形状をパターン別に分類した結果、塊状の形状が最も多く生成される傾向が確認された。これは、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n が近傍セルの状態により局所的に定まるベクトルであるため、単一要素を中心としてそのまわりに要素が発生したためであると考えられる。

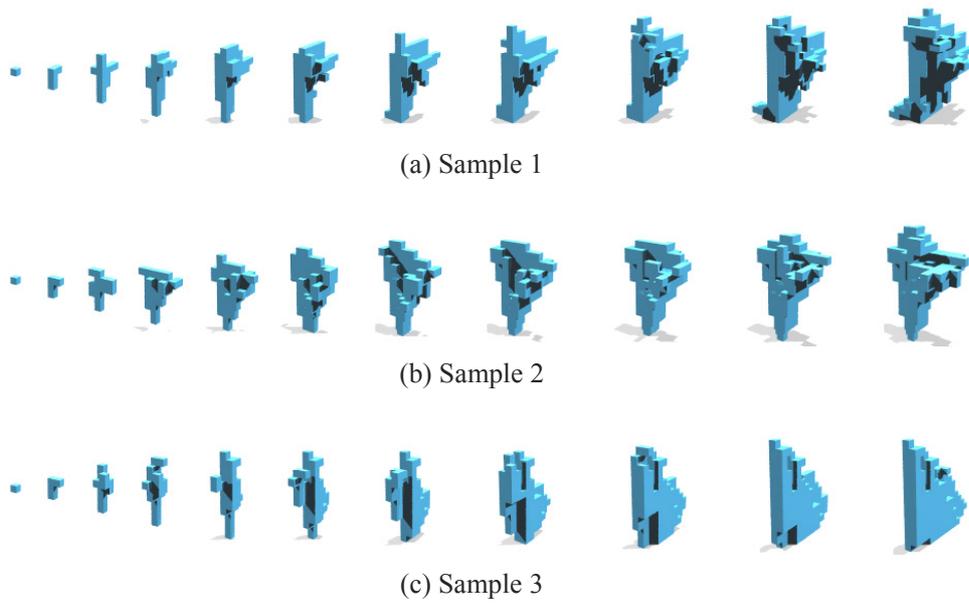


Fig. 3-10 Form-generation process by neighborhood information vector \mathbf{v}_n

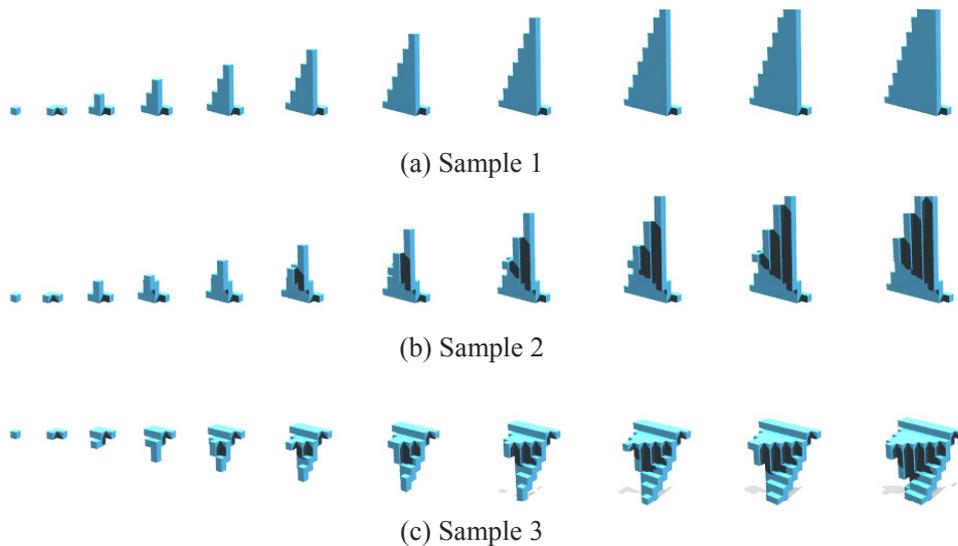


Fig. 3-11 Form-generation process by positional information vector \mathbf{v}_p

一方、CAの状態遷移関数への入力情報として、式(3-6)の位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を用いて形状生成を行った結果、Fig. 3-11 に示すような過程で方向性を持つ形状が生成され、平板状の形状が生成される傾向が確認された。これは、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p が、空間に固定された頂部との位置関係により一意的に定まるベクトルであるため、発生に方向性が生じたためであると考えられる。

(3) 近傍情報ベクトルおよび位置情報ベクトルの合成による形状生成

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 を設定して、入力ベクトル \mathbf{v}_{in} を次式により定義した。

$$\mathbf{v}_{in} = k \mathbf{v}_n + (1-k) \mathbf{v}_p \quad (3-9)$$

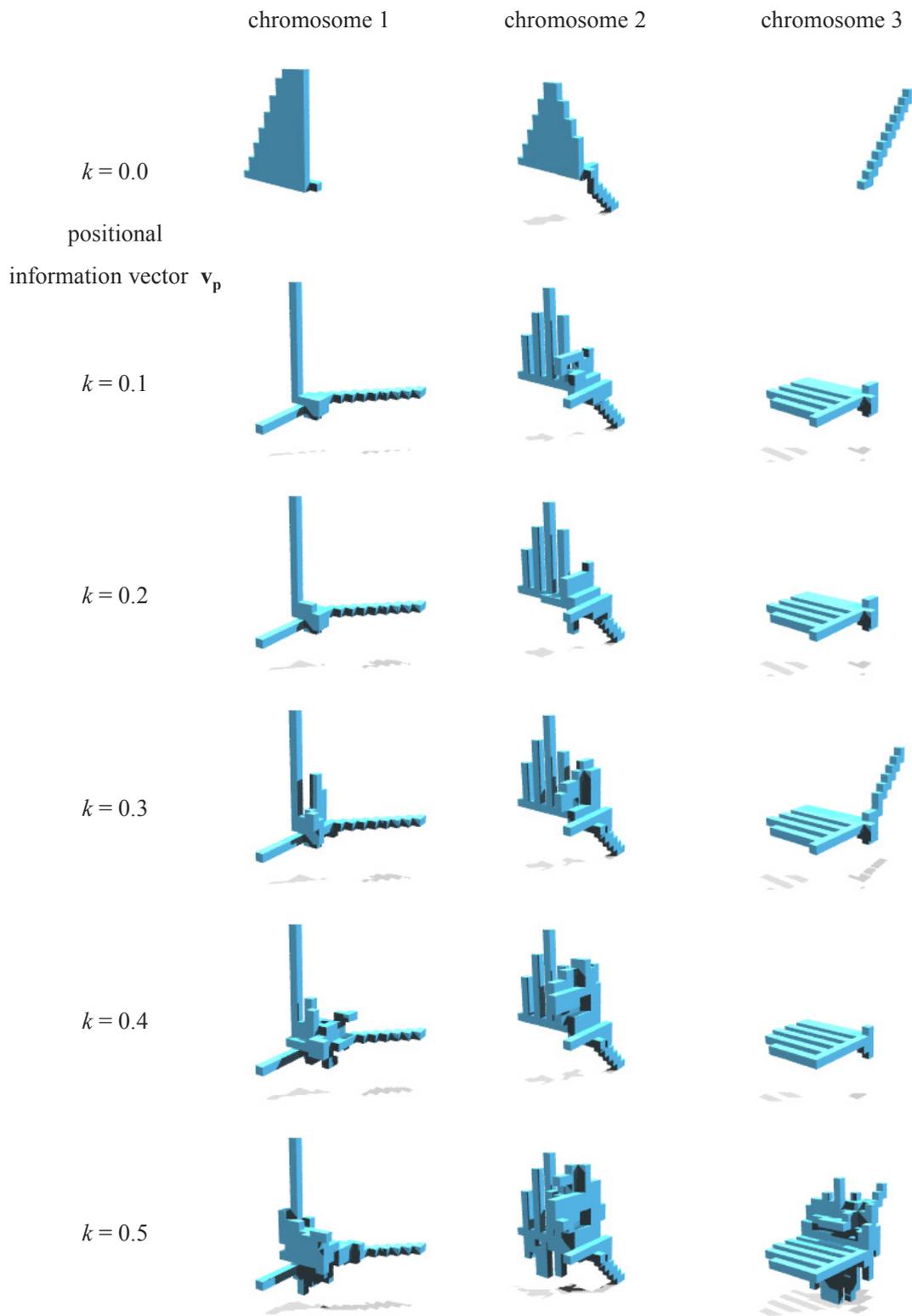
状態遷移表の情報が記述された同一の 1 次元配列を用いて、 k 値の変化にともなう近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n および位置情報ベクトル \mathbf{v}_p の形状生成への影響について解析した。その結果、Fig. 3-12 (a), (b) に示すように、 k 値の変化により、段階的な差異を有する形状が生成された。位置情報ベクトル \mathbf{v}_p は、単独では平板状の形状を生成する傾向があるが、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n を合成することにより、骨組状の形状が多く生成される傾向が確認された。また、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n を用いることにより多くみられる塊状の傾向は、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を合成することにより抑制されることが示された。

以上より、塊状の形状生成を行う場合には合成比率 k を 1.0 に近づけ、一方、平板状の形状生成を行う場合には合成比率 k を 0.0 に近づける。そして、骨組状の形状生成を行う場合には合成比率 k を $0.0 < k < 1.0$ の範囲で操作することにより、形状生成の操作が可能となる。これらの結果をうけ、次項にて、形状生成の多様性と効率性の観点から詳細に解析を行う。

3.4.6 生物の発生過程を応用した形状生成方法の有効性の検証

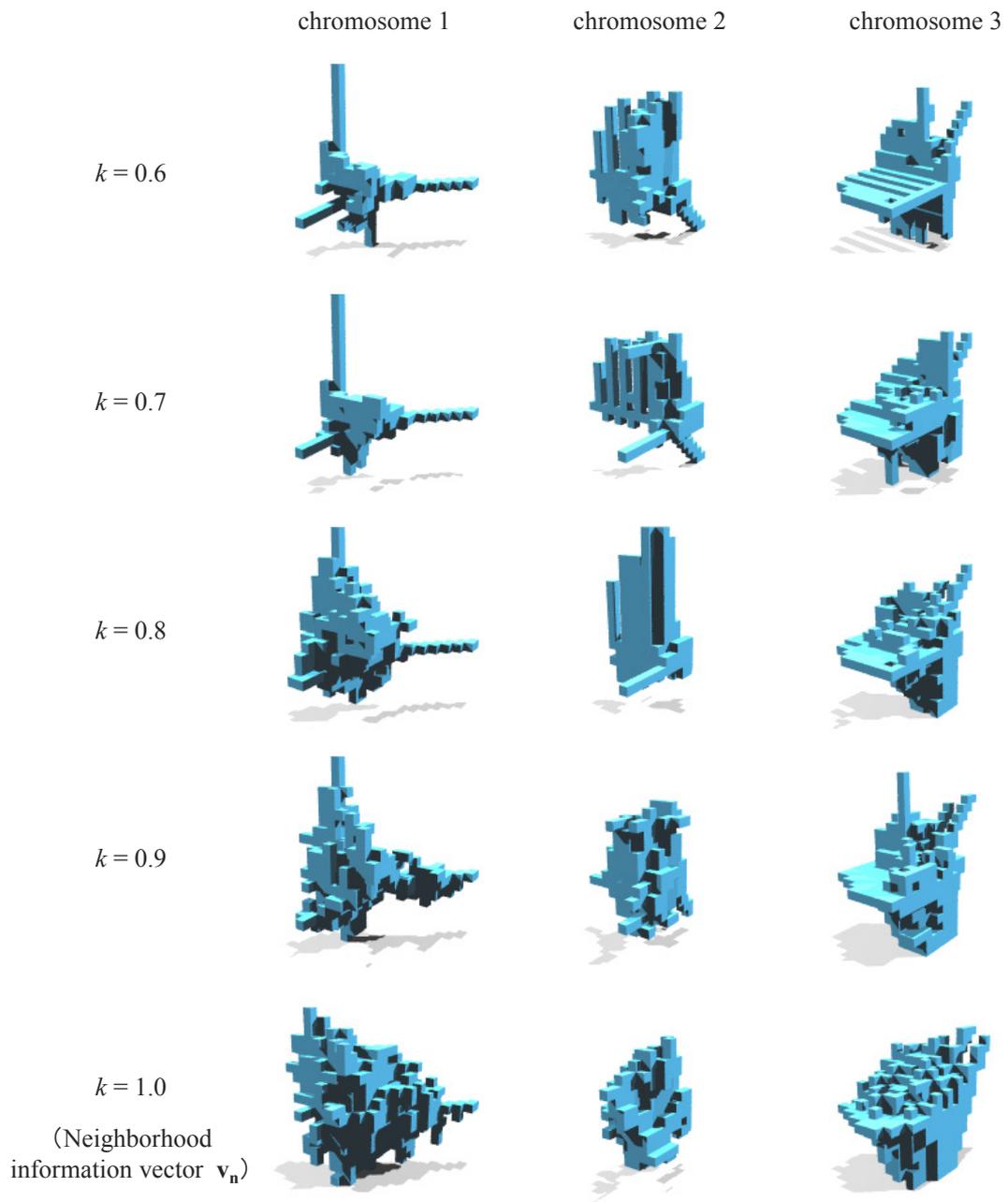
(1) 多様性の定義

生成された形状の多様性を定量的に解析する。本研究では、主として構造設計問題への適用を想定して多様性を考える。構造設計においては、生成形状に対する拘束点や荷重点などの座標位置を明示する必要がある。そのため、本研究においては、ボクセルの座標位置による差異を表現することが可能な多様性指標を定義する。



(a) $0.0 \leq k \leq 0.5$

Fig. 3-12 Change of forms followed by composite ratio k



(b) $0.6 \leq k \leq 1.0$

Fig. 3-12 Change of forms followed by composite ratio k

まず, Fig. 3-13 (a)に示すように, 本方法から生成された2つの形状 form i と form j が存在した場合に, これらの類似性指標 S_{ij} を次式により定義する.

$$S_{ij} = \frac{(\text{form } i) \cap (\text{form } j)}{(\text{form } i) \cup (\text{form } j)} = \frac{\sum_{k=1}^{m_{ij}} \delta_{ijk}}{m_{ij}} \quad (3-10)$$

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

ここで, $\text{cell}[p][q]$ を形状 p の第 q 番目のセルの状態 (要素なしの場合:0, 要素ありの場合:1), m_{ij} を form i と form j の和集合のセル数とした.

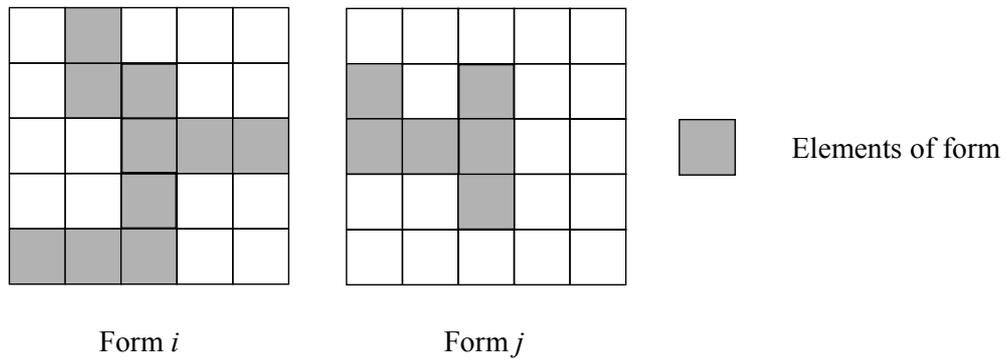
本研究においては, 前述したように, 類似している2つの形状は, 同じ位置に存在している要素数が多いと考える. したがって, 同じ位置に存在する form i と form j の積集合のセル数を Fig. 3-13 (b)に示すように測定し, Fig. 3-13 (c)に示すような両形状の和集合を構成するセル数 m_{ij} に対する割合を求めることにより形状の類似性を算出する. この式により算出される形状の類似性は, 2つの形状がまったく同じであれば1となり, すべてのセルの状態が異なる場合に0となる.

つぎに, 本方法から生成された形状の集団に対して, 多様性指標 D を次式により定義する.

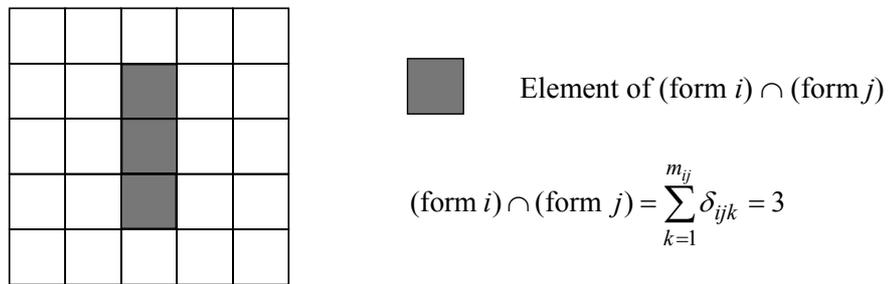
$$D = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=i+1}^n S_{ij} \right)}{n C_2} \quad (3-11)$$

ここで, n を集団の個数, i を形状番号 ($1 \leq i \leq n$), C を2項係数, S_{ij} を形状 i と形状 j の組み合わせにおける類似性指標とした.

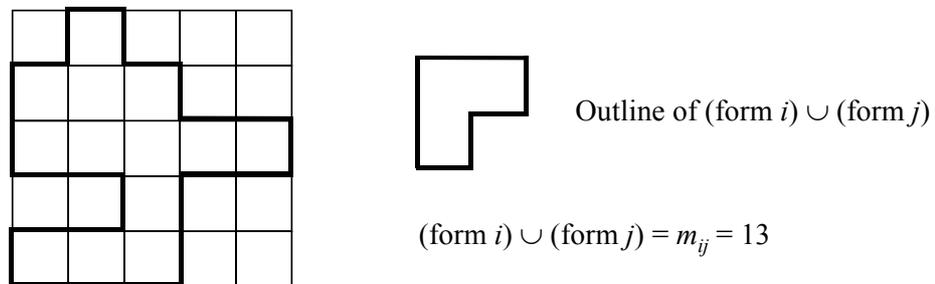
この定義は, グループ内に類似した2形状が少なければそのグループの形状多様性は高いとする考え方に基づいており, グループ内すべての組み合わせの類似性指標の平均をとり, 1から減じた値となっている. この多様性指標 D は, グループ内のすべての形状が同一である場合に最小値0となり, グループ内のどの2形状の組み合わせについても同一の位置にセルがなかった場合に最大値1となる.



(a) Examples of form i and form j



(b) Elements of $(\text{form } i) \cap (\text{form } j)$



(c) Elements of $(\text{form } i) \cup (\text{form } j)$

Fig. 3-13 Similarity index

なお、この指標は、ボクセルの位置関係による幾何学的な評価であるが、形状の対称性や回転は考慮されていない。それは、前述のように、本研究が構造設計問題への適用を主として想定したものであり、構造設計問題においては、荷重点や拘束点などの位置で解析結果が大きく異なるためである。この指標は、形状の多様性を評価する1つの指標となりうるが、形状の多様性を評価する際には、その適用事例により評価方法を使い分けることが必要となる。例えば、構造設計において、構造面から形状の多様性を評価する場合には、重量、強度、剛性という力学特性を用いることが考えられる。一方、意匠設計において、意匠面から形状の多様性を評価する場合には、認知実験を行うことにより感性という認知特性を用いることが考えられる。本研究においては、力学特性による多様性解析を第4章にて行い、認知特性による多様性解析を第5章にて行う。

(2) 形状生成の効率性の定義

本方法による形状生成の効率性を解析するために、形状生成の効率性を評価する指標として、試行形状数を定義した。試行形状数とは、100個以上の要素からなる形状が10個生成されるまでに必要とする試行数である。つまり、これは、試行に必要とした1次元配列の総数であり、試行形状数が少ないほど形状生成の効率性は高いといえる。

(3) ランダムベクトルを用いた形状生成との多様性比較

CAにおける状態遷移関数への入力情報として、ランダムなベクトルを用いた場合と、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n および位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を用いた場合との比較を行うことにより、本方法における入力ベクトルの有効性について検証を行う。

(a) ランダムベクトルを用いた形状生成方法の実行

要素へ入力されるベクトルをランダムベクトルとして形状生成を実行する。具体的には、Fig. 3-14に示すように、 x , y , z 方向それぞれに-1から1までの乱数を与えて、これを要素に入力されるベクトルの各成分の大きさとした。これにより、各要素に与える入力情報をランダムにすることが可能となる。

本方法を実行した結果、Fig. 3-15のように、塊状の形状が生成される傾向が示された。これは、ランダムな入力ベクトルが無秩序に要素を増加させたためであると考えられる。

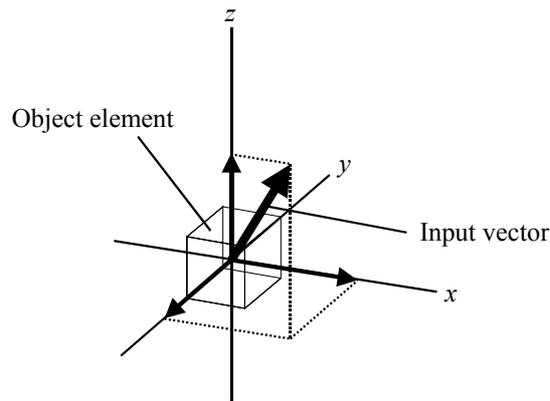


Fig. 3-14 Set of random vector

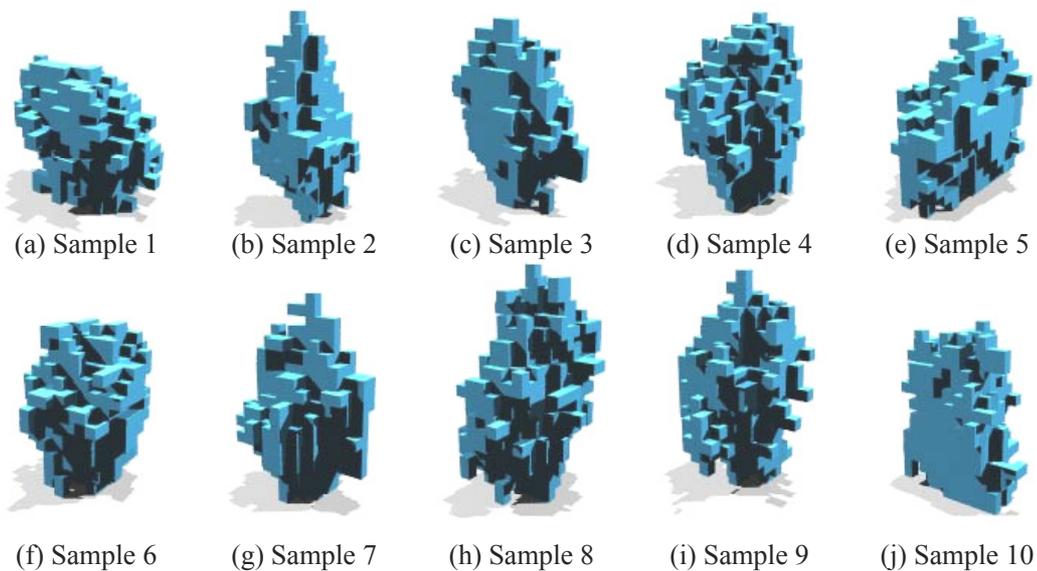


Fig. 3-15 Examples of form generation by random vector

(b) 形状の多様性および形状生成の効率性解析

CA における状態遷移関数への入力情報として、ランダムベクトルを用いた場合、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n および位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を用いた場合のそれぞれに関して、試行形状数と多様性指標 D との関係について解析を行った。ここで、合成比率 k の変化による試行形状数と多様性指標 D との関係の変化について解析を行うため、 k 値を 0.0 から 1.0 まで 0.1 ごとに变化させた。その結果を Fig. 3-16 に示す。

まず、多様性指標 D を用いてランダムベクトルにより生成された形状の多様性を解析した結果、0.61 という比較的低い平均値を示し、0.47 から 0.72 と大きいばらつきを示した。形状の多様性が比較的低い値を示した結果は、塊状の形状を生成する傾向が示された結果を表現している。一方、試行形状数を用いた形状生成の効率性を解析した結果、10 という最小値を示したことから、効率よく形状が生成されることが確認された。これは、無秩序な要素発生が形状生成を促進したことが考えられる。以上より、ランダムベクトルを要素に入力させることにより、形状生成の効率性は高い値を示したが、高い多様性は示されなかった。

つぎに、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n および位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を用いることにより生成される形状の多様性および形状生成の効率性を解析した。その結果、ランダムベクトルを用いた場合には得られない高い多様性が得られることが確認された。また、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n と位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を組み合わせることにより、これらのベクトルを単独で用いた場合には得られない高い多様性が得られることが示された。

さらに、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p に近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n を付加することによる形状生成への

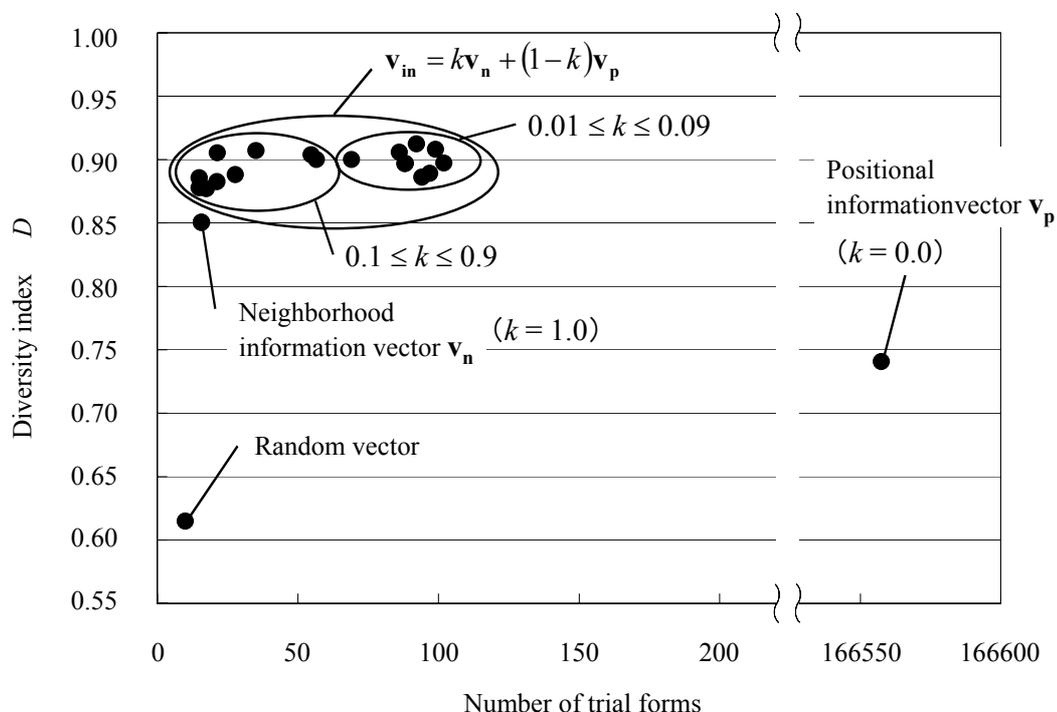


Fig. 3-16 Relationship between efficiency and diversity followed by input vector

影響について解析を行うために、 k 値を 0.0 から 0.1 の間は 0.01 ごとに变化させて、試行形状数と多様性指標 D との関係について解析を行った。その結果、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p を単独で用いた場合には、頂部による要素発生を抑制する働きが生じるため形状生成の効率性が著しく低下するのに対し、位置情報ベクトル \mathbf{v}_p に近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n を付加することにより、近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n を単独で用いた場合とほぼ変わらない効率で高い多様性が得られることが確認された。

3.5 形状評価方法

3.5.1 椅子の形状設計への応用

提案した形状生成方法を人工物設計に適用するにあたり、本研究においては、適用対象として椅子を選定した。椅子は、多様な形状が存在し、材料力学、機械力学などをはじめとするあらゆる構造面の特性に加えて、感性情報を有する問題など、様々な問題を考慮して決定されなければならない。そのため、多様な 3 次元形状の導出を目的とする本研究における適用対象として適当であると考えられる。

提案した形状生成方法においては、特定の初期形状の設定を必要としないが、Fig. 3-17 に示すように、着座姿勢の人間が占有する空間には、形状生成の制限を与えた。また、要素発生開始の始点である単一要素の位置を設定する必要がある。単一要素の位置として、生成する形状の自由度を低下させないように、あらゆる設計解に共通して存在する位置が望ましい。そのため、共通の部位として、Fig. 3-17 に示すように、座面中央部に相当する位置を要素発生開始位置とした。

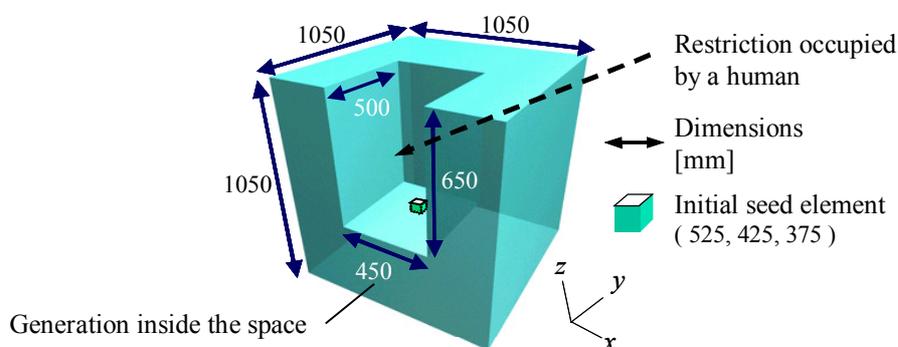


Fig. 3-17 Form-generation space

3.5.2 形状評価項目

本研究においては、形状が椅子として認められるための最低限の評価項目として、座面の形成度、接地面の形成度、安定度の3項目を設定した。以下に、各評価項目についての評価の算出方法を述べる。

人が座るといふ椅子の機能を考慮すると、人が座る座面があることが必要条件となる。したがって、生成される形状において、座面がどの程度形成されているかが評価項目になると考えられる。座面の形成度については、以下の式により算出する。形状生成空間中において座面が形成されるべき部分に位置するセルを座面部のセルとし、この座面部に含まれる要素の割合を座面の形成度とした。

$$f_{sf} = \frac{n_{elem}}{n_{cell}} \quad (3-12)$$

n_{elem} : 座面部に発生した要素の数

n_{cell} : 座面部の制約条件としたセルの数

形状生成空間に座面が形成されていたとしても、それが地面に接していなければ人を座らせることはできない。この適用事例における要素発生開始の始点である単一要素は、座面の中央部に存在するため、生成される形状によっては地面に接しない場合が起こりうる。そこで、椅子としての評価項目として、接地面の形成度を設定した。これは、生成された形状において、最下端にある要素が地面にどれだけ接近しているかを表す評価項目であり、以下の式により算出する。

$$f_{gr} = \frac{d_{elem}}{d_{cell}} \quad (3-13)$$

d_{elem} : 座面と最下端要素の z 方向の高度差

d_{cell} : 座面と地面 ($z = 0$) の高度差

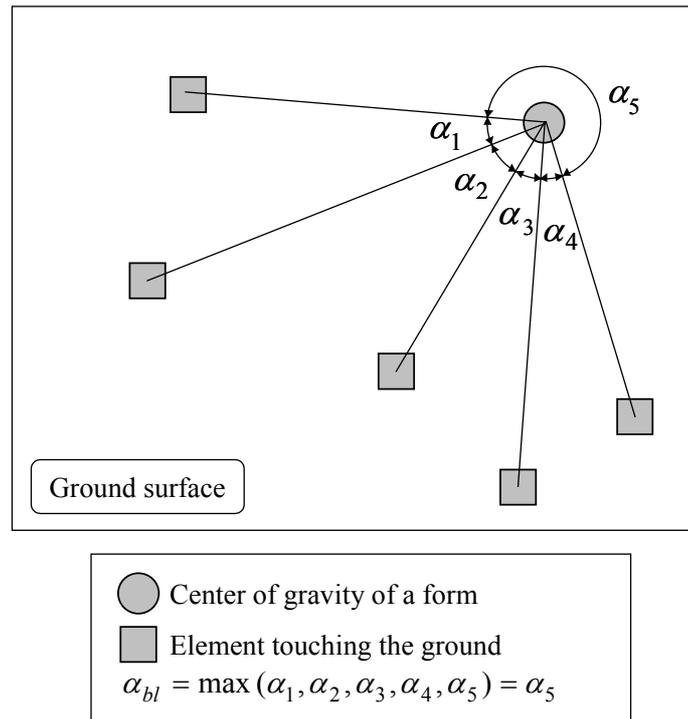


Fig. 3-18 Angle for judging stability

座面が存在し、接地面も存在していたとしても、安定して立っていることができないならば、椅子としての機能を果たすことができないと考えられる。安定度については、椅子の重心を求めることにより、以下の式により算出する。

$$\text{if } \alpha_{bl} < \pi \text{ then } f_{bl} = 1.0 \quad (3-14)$$

$$f_{bl} = 1 - \frac{\alpha_{bl} - \pi}{\pi}$$

ここで、形状の安定性を判別するために、Fig. 3-18 に示すような安定性判別角 α_{bl} を定義する。安定性判別角 α_{bl} とは、形状の重心と接地している要素のなす角度のなかで最も大きい角度であり、安定性判別角 α_{bl} が π よりも小さい場合には形状が安定していると判断する。この評価項目は、生成された形状の外側に重心があった場合 1.0 未満となり、この値は重心が形状から離れば離れるほど 0 に近づく。また、形状の内側に重心があった場合、1.0 となる。

以上の3項目はそれぞれ、0 から 1 の値をとる。そして、3つの評価項目を用いて、生成された形状の評価値を以下の式により算出する。

(3-15)

$$f = f_{sf} + f_{gr} + f_{bl}$$

f_{sf} : 座面の形成度

f_{gr} : 接地面の形成度

f_{bl} : 安定度

算出された評価値が3項目すべての評価を満足し、 $f = 3.0$ になる形状を設計解候補として抽出する。設計解候補となった形状が10個抽出されるまで、形状の生成をくり返した。

3.6 解探索アルゴリズムの導入

3.6.1 遺伝的アルゴリズムの導入

効率よく大域的な解探索を行うために、解探索アルゴリズムを導入する。解探索アルゴリズムとしては、本研究の目的から、導出される設計解候補の多様性を十分に確保しながら、効率よく解探索を行えるアルゴリズムを導入する必要がある。そこで、本研究においては、解探索のアルゴリズムとして、大域的な解探索を行うことが可能な遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm, 以下 GA と略記する) を用いることとした。

解探索アルゴリズムを導入したシステムの基本構造を Fig. 3-19 に示す。形状生成を行う過程を形状生成部、形状の評価を行う過程を形状評価部とし、評価結果をフィードバックする過程に GA を用いた。また、GA における染色体には CA の状態遷移表の情報が記述された Fig. 3-8 に示される1次元配列を用いた。

3.6.2 スキーマ破壊のアルゴリズムの導入

本研究においては、多様解導出を目的として、解探索を行う個体集団における個体の多様性を十分に確保するために GA の拡張を行った。ここでは、一般的な GA と、本システムで拡張を行った GA における解抽出方法の違いについて述べる。

一般的に、GA による解探索問題では、適応度の収束を終了条件とする。そのため、複数の染色体が含まれる集団の世代交代の結果、評価を最大とする唯一の最適解、または最適な解の集団が導出される。しかし、本研究においては、最適な唯一解ではなく、多様

解導出を目的としており、解空間に存在する様々な多様解を探索し、同時に多様解を導出する方法が必要である。

そこで、ある形状について、評価がある一定の基準を超えたときに設計解候補として抽出することとし、1つの解を抽出して終了するのではなく、集団から複数の染色体を抽出するまで解探索をくり返すこととした。

また、設計解候補に与えられる評価は遺伝子型の組み合わせに依存しており、GAを用いたシステムにおいては、組み合わせ問題を解いていることになる。このとき、遺伝子型におけるスキーマ (schemata) と呼ばれる一定の文字列のパターンが、表現型の優位な特性を発現することが知られている。スキーマを有する染色体が集団中に存在することにより、その染色体は、適応度の高い染色体として遺伝的操作 (genetic operations) の際に高い確率で選択されるため、世代交代をくり返しながら集団に伝播していく。その結果、類似したスキーマを有する設計解候補が導出されるため、多様解導出を行うことが困難になると考えられる。

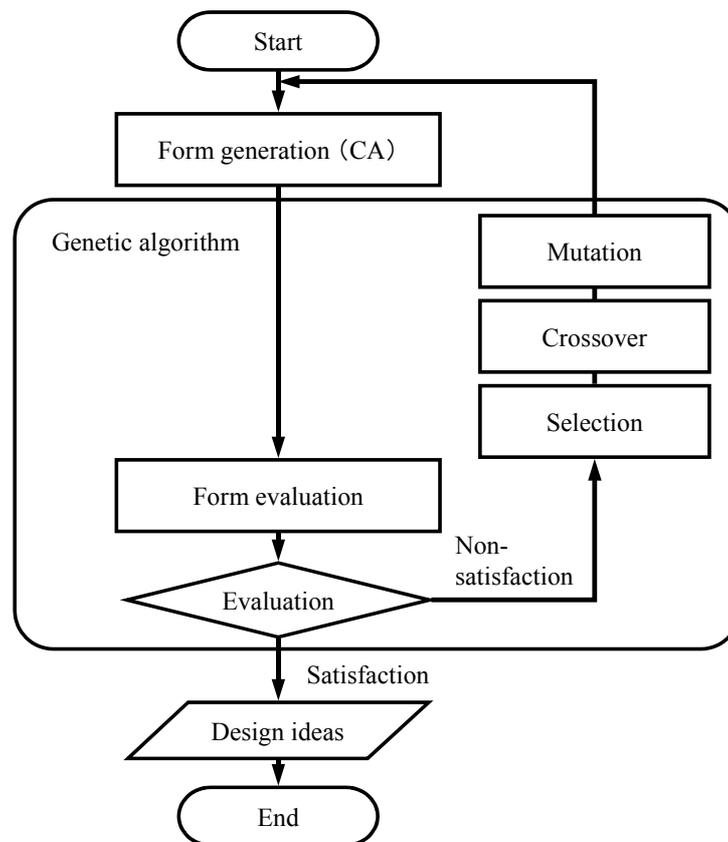
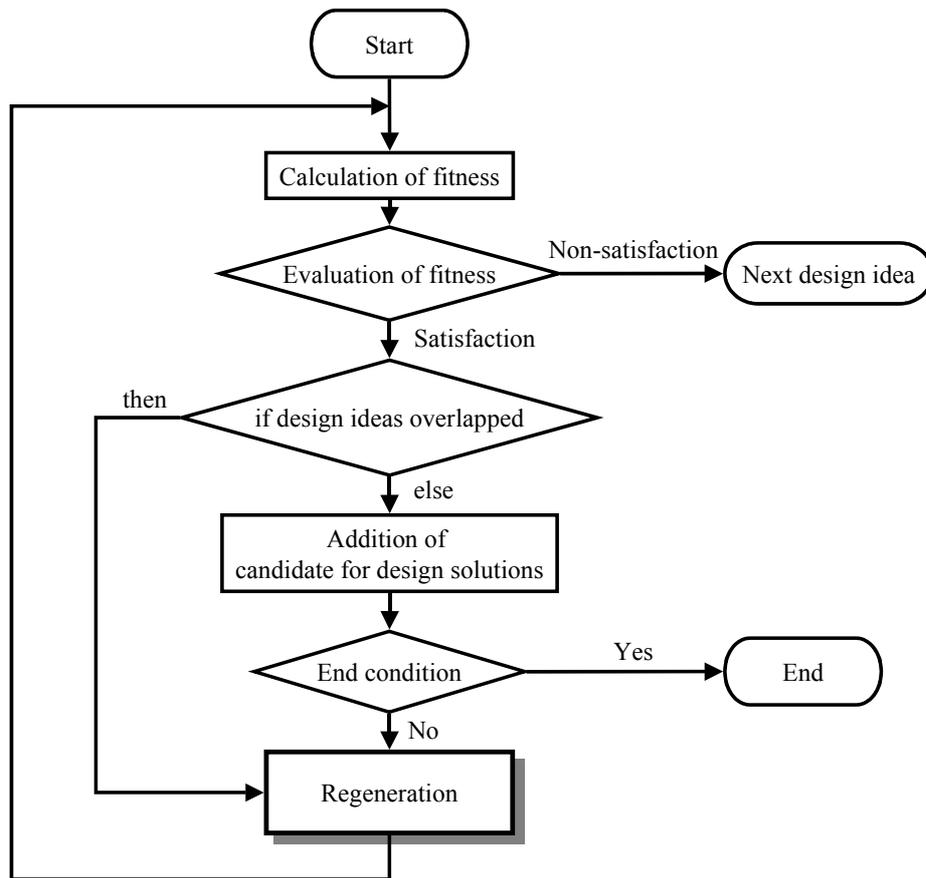


Fig. 3-19 Structure of the system in the generation process

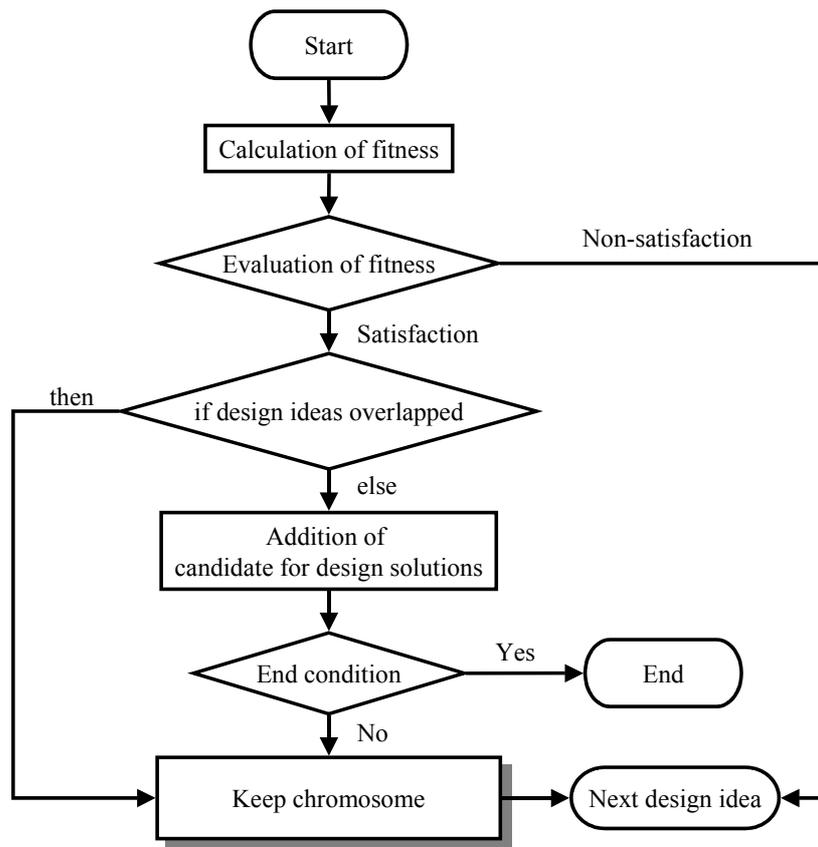
そこで、本システムにおいては、まず、一定以上の評価を満たす染色体を設計解候補として抽出する。さらに、後世の集団へスキーマを有する染色体が伝播することを避けるため、Fig. 3-20(a)に示すような方法でスキーマの破壊を行うこととした。そして、新たに乱数を発生させた染色体と置き換え、集団中の個体の多様性を保持することとした。本研究においては、このアルゴリズムをスキーマ破壊のアルゴリズムとし、Fig. 3-20(b)に示すような一般的なGAにおけるアルゴリズムをスキーマ保存のアルゴリズムとして両者を区別することとする。

スキーマ破壊のアルゴリズムは、一定の確率で世代交代の度に操作が行われる突然変異と異なり、設計解候補が抽出される度に操作が行われる。



(a) Schemata destruction algorithm

Fig. 3-20 Search algorithm



(b) Schemata preservation algorithm

Fig. 3-20 Search algorithm

3.6.3 形状生成の過程

本システムが設計解候補を導出する過程について述べる。まず、乱数により設定した個体数の染色体が生成され、集団が生成される。つぎに、染色体をもとに形状が生成され、形状に対して、設計対象に応じた評価が行われる。さらに、評価結果をもとに適応度が算出される。この段階において、一定の適応度の基準を満たされた形状を集団中から抽出し、設計解候補とする。最後に、算出された適応度をもとに、集団中の染色体に対して、遺伝子操作が行われる。

以上の過程をくり返し、一定の適応度をもった形状の数が要求する値に達するときを解探索の終了とする。本システムのフローチャートを Fig. 3-21 に示す。

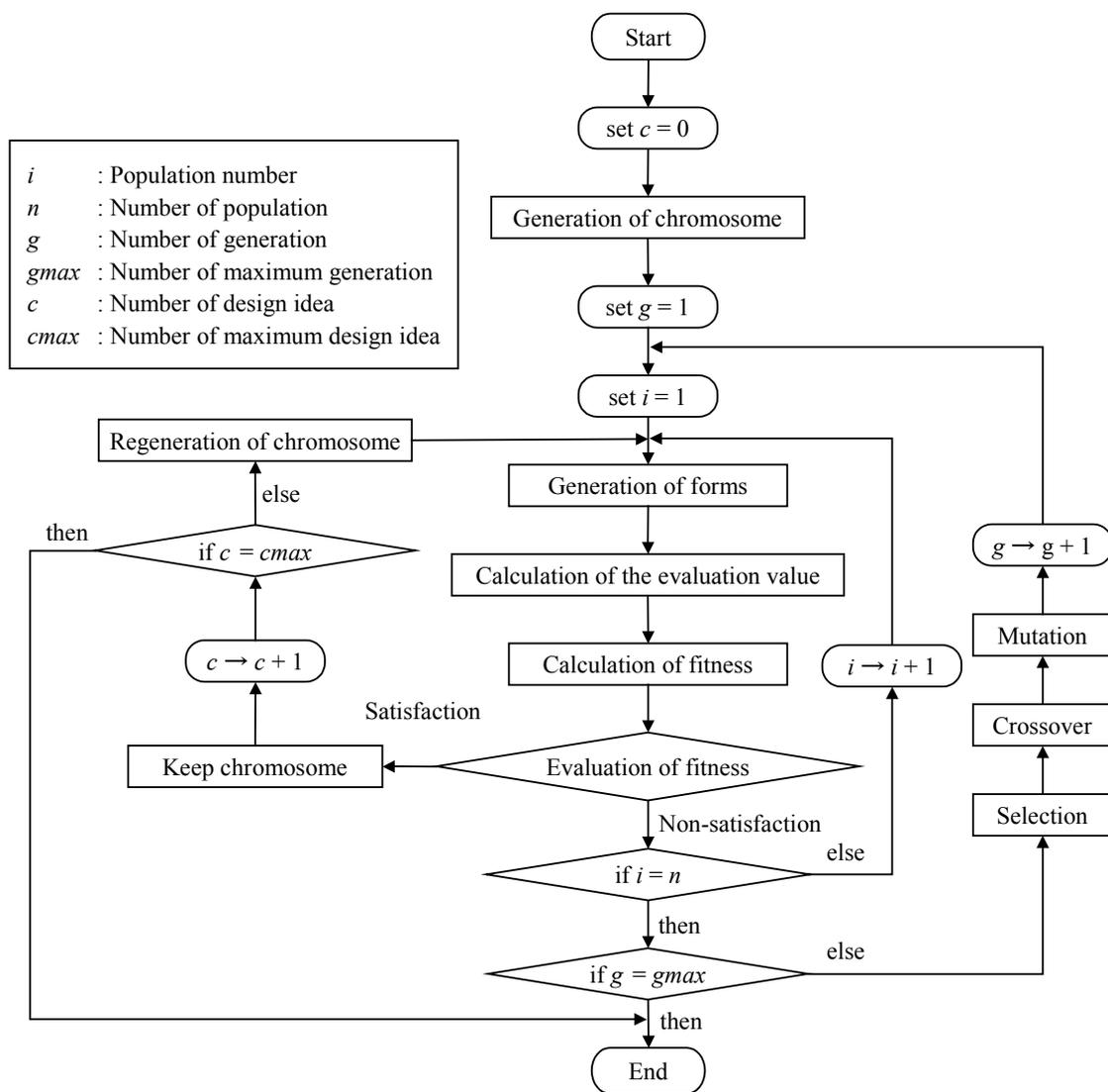


Fig. 3-21 Structure of the system in the process

3.6.4 実行条件

GAにおける交叉方法および選択方法には、最も基本的な手法である1点交叉，ルーレット選択をそれぞれ用いる。なお，GAを用いたシステムにおける適応度計算には，式(3-15)により算出された評価値を用い，評価値が3.0を満足した染色体を設計解候補として抽出する。

3.7 結果および考察

3.7.1 生成形状

提案した発現過程における多様解導出システムを実行した。本方法により導出された椅子の形状生成例をFig. 3-22に示す。図に示されるように、脚部を有する形状、背もたれを有する形状、広い座面部を有する形状、骨組状の形状など多様な形状が生成されることが確認された。生成された形状は、椅子としての3つの評価項目を満足した多様な形状であり、これらが設計解候補となる。発現過程により導出された多様な設計解候補が、後半の過程である最適化過程において、それぞれ最適化され多様な設計解となる。

3.7.2 生成形状の多様性解析

3.4.6項において定義した多様性指標 D を用いて導出された形状の多様性について定量的な解析を行った。

このとき、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 の値を0から1まで、0.1ごとに設定し、多様性指標 D の値を測定した。なお、形状の多様性測定においては、それぞれの設定について10回の形状生成を行い、その平均を計算した。

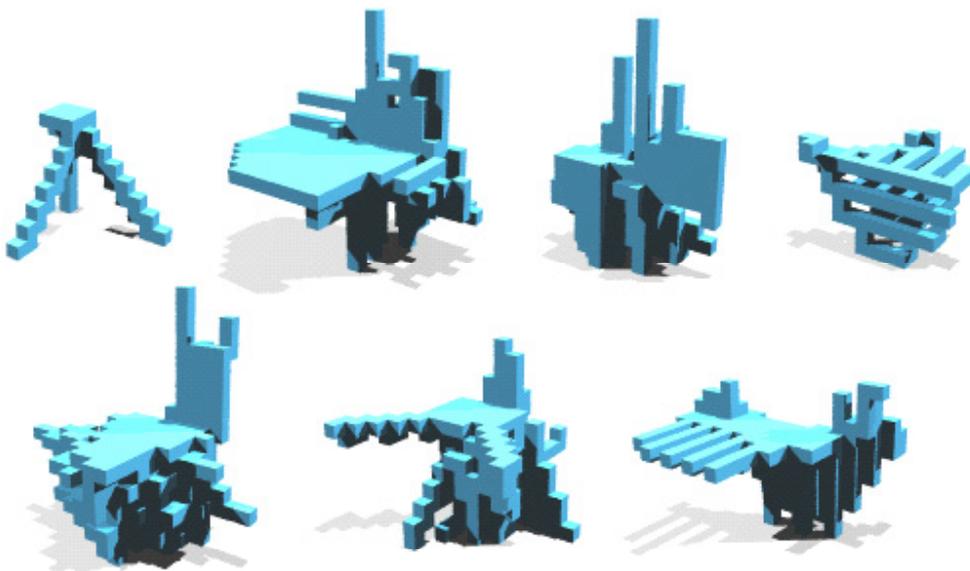


Fig. 3-22 Examples of design ideas

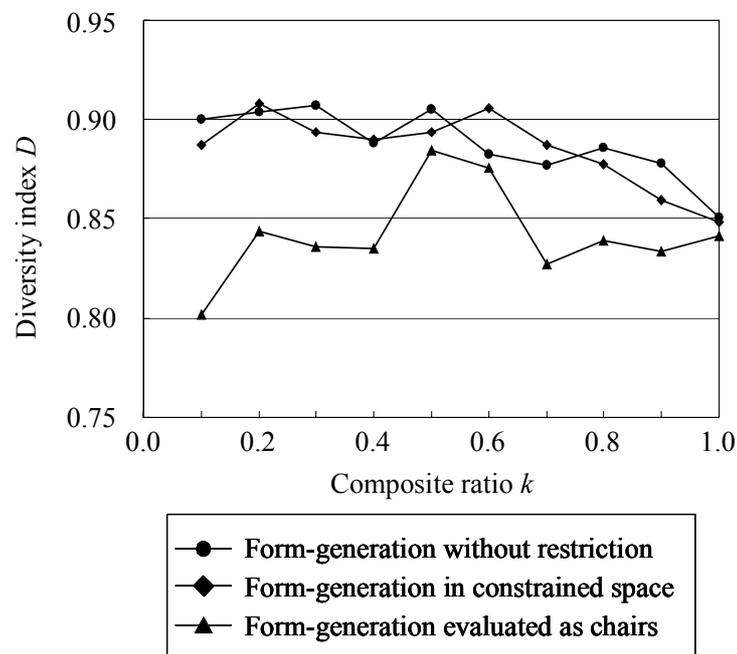


Fig. 3-23 Relationship between composite ratio k and diversity

その結果, Fig. 3-23 に示される結果が得られた. ここで, 形状生成方法を単独に実行した場合, 形状生成に空間制限を与えた場合, そして形状生成に評価過程を導入した場合との多様性指標 D の比較を行った. なお, $k = 0.0$ の場合においては, 評価を満たした形状が生成されなかった. その結果, 形状生成に評価過程を導入することにより, 多様性の低下が示された. また, $0.1 \leq k \leq 0.5$ および $0.5 < k \leq 1.0$ においては, 多様性が著しく低下することが示された.

これは, 評価過程の導入により, 形状抽出の条件が厳しくなったためであると考えられる. また, $0.1 \leq k \leq 0.5$ においては, 形状は骨組状の形状を生成する傾向が示されており, 評価過程を導入することにより, 導出される形状が限定されたためであると考えられる. 一方, $0.5 < k \leq 1.0$ においては, 塊状の形状を生成する傾向が示されているため, 多様性が低下したと考えられる.

つぎに, 入力ベクトルの合成比率 k と設計解候補を探索する効率の関係を解析した. ここで, 設計解候補を探索する効率を表す尺度として, 3.4.6 項と同様に試行形状数を用い

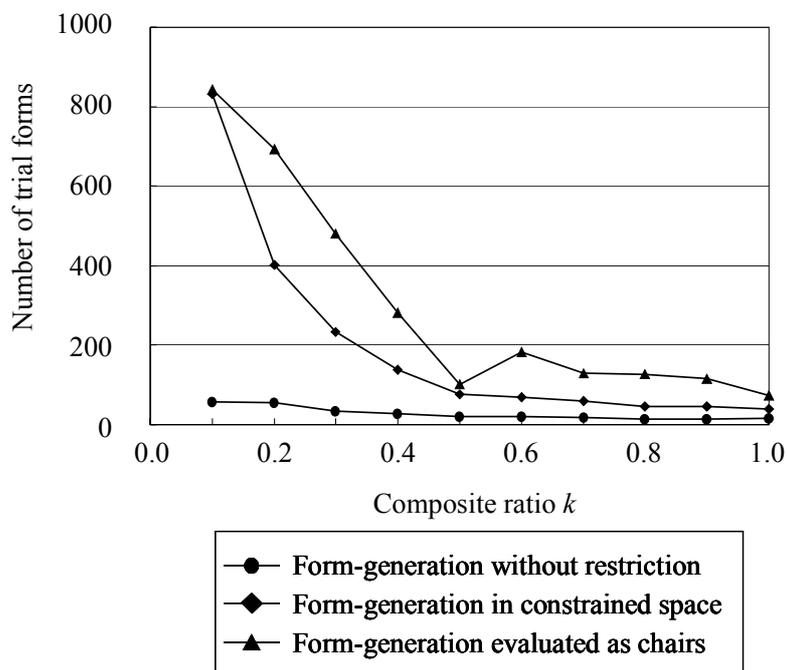


Fig. 3-24 Relationship between composite ratio k and efficiency

た. 本適用における試行形状数とは, 評価基準を満足した形状が 10 個抽出されるまでに必要とする形状の試行数である. つまり, 試行形状数が大きいほど, 設計解候補の解探索の効率性が低いことを表す.

入力ベクトルの合成比率 k と試行形状数の関係を Fig. 3-24 に示す. この図から, $0.1 \leq k \leq 0.5$ において, 試行形状数が著しく減少することが示された. また, 評価過程の導入により, 形状抽出の条件が厳しくなり, 評価過程を導入しない場合と比較して, より多くの試行数の必要性が確認された. 生成される形状は, 骨組状の形状が生成される傾向が強くなるに従い, 本適用において設定した評価を満たしにくくなると考えられる.

さらに, 以上の結果を用いて試行形状数と多様性の関係を解析した. その結果を Fig. 3-25 に示す. これより, 高い多様性を保ち, さらに少ない試行形状数で設計解候補を抽出できる k 値 ($k = 0.5$) が存在することが確認された.

以上の結果より, 設計対象や目的に応じて, 設計解候補の解探索の効率性と生成される形状の傾向を考慮した適切な合成比率 k 値の設定が必要であると考えられる.

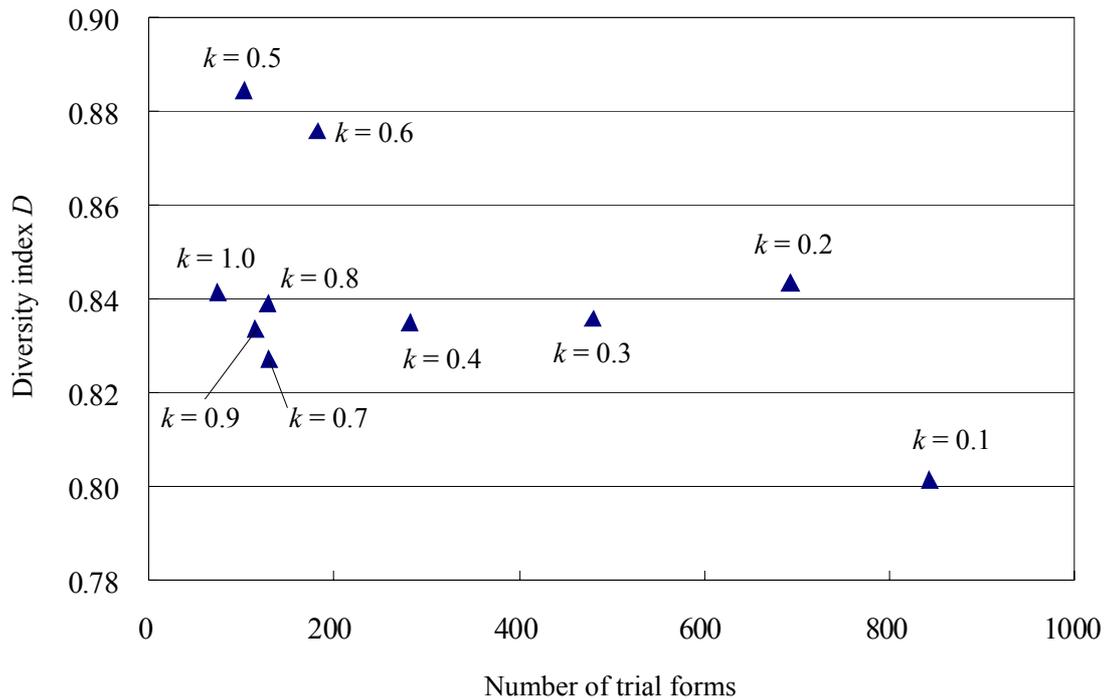


Fig. 3-25 Relationship between efficiency and diversity

3.7.3 解探索アルゴリズムのパラメータ設定

本研究で提案したシステムにおけるパラメータである突然変異率および個体数を変化させ、生成される形状の多様性および解探索の効率性についての解析を行った。個体数は50から250まで50ごと、突然変異率は0%から30%まで5%ごとに設定を行った。このときの実行結果を Fig. 3-26 および Fig. 3-27 に示す。

Fig. 3-26 より、突然変異率 0%において個体数の違いによる多様性の比較を行うと、個体数の増加にともない導出される形状の多様性が増加することが示された。これは、個体数の少ない場合においては、世代交代のくり返しにより集団における染色体が類似する傾向を示すためであると考えられる。また、個体数が少ない場合には、集団中に十分な多様性を保持できないため、局所解へ陥りやすく、多様な形状の導出は困難になると考えられる。そして、個体数が多いほど1世代において探索する形状が多く、大域的な解探索により設計解候補を抽出することができ、高い多様性が得られると考えられる。個体数 50 の場合と個体数 100 の場合における多様性について、t 検定を行った結果、0.0196 という有

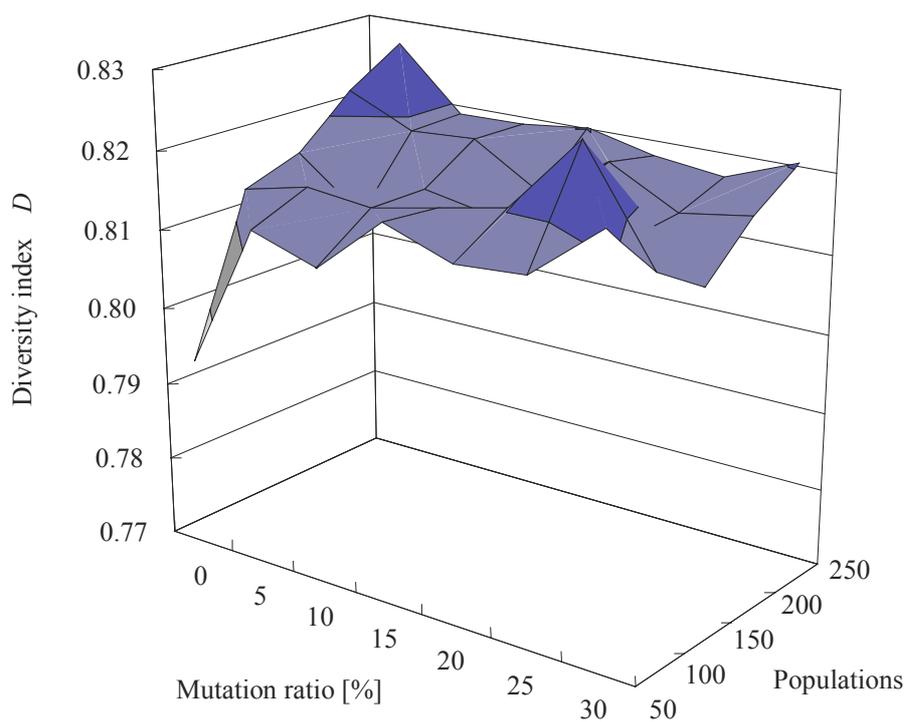


Fig. 3-26 Analytical results of diversity

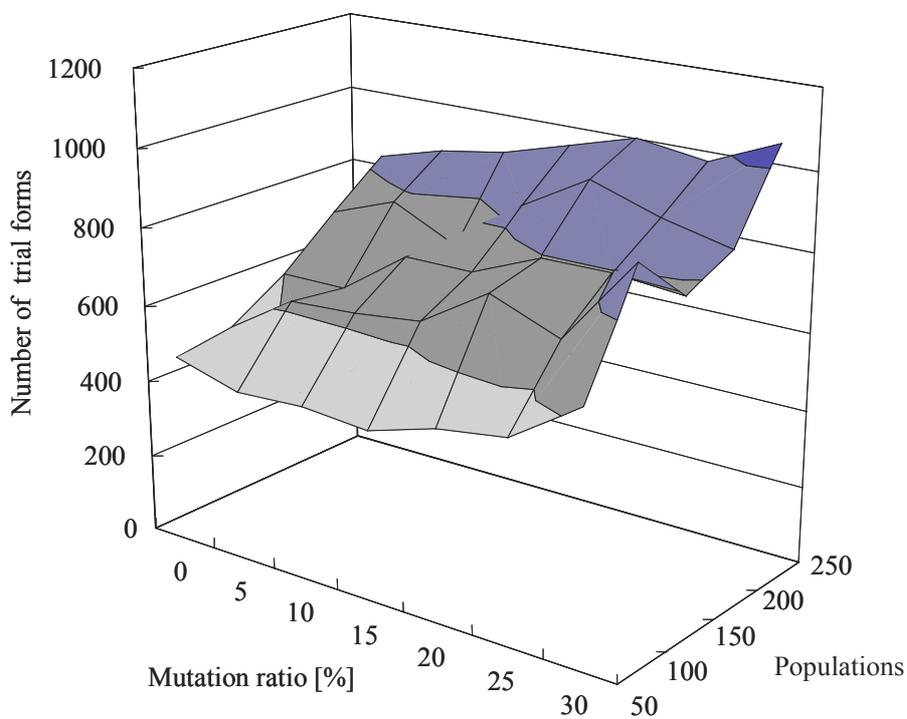


Fig. 3-27 Analytical results of efficiency

意水準が得られ、生成される形状の多様性の差が確認された。以上より、生成される形状の多様性を確保するためには、可能な限り大きな個体数を設定することが望ましいと考えられる。

しかし、Fig. 3-27 に示されるように、個体数の増加にともない、形状の解探索の効率性を表す試行形状数が増加し、解探索の効率性の低下が確認された。したがって、得られる設計解候補の多様性と設計解候補を探索する効率性を考慮して、適切な個体数を設定する必要性が示された。

また、突然変異率と試行形状数の関係については、突然変異率の増加にともない、試行形状数が増加し、形状の解探索の効率性が低下することが確認された。これは、突然変異率の増加により、世代交代の際に集団中の染色体が有する形質を破壊する傾向が強くなり、親世代の特徴が受け継がれる可能性が低くなり、世代交代による局所解への収束が生じにくくなるためであると考えられる。

しかし、個体数 50 および 100 という個体数の比較的少ない条件においては、突然変異が有効に作用し、多様な設計解候補の導出を促進しているといえる。また、個体数 150 以上で、導出される設計解候補の多様性への突然変異率による影響は明確に示されなかった。この原因として、本実行条件においては、個体数 150 以上においては、初期集団において個体の多様性が十分に確保されているためであると考えられる。

個体数と突然変異率による影響をあわせて考慮すると、多様性および効率には、少ない試行形状数で効率よく多様な設計解候補の探索が行える設定が存在することが確認された。本研究においては、他の条件と比較して、個体数 100、突然変異率 25% に設定した際に、最も効率よくかつ多様な設計解候補の導出が可能であることが示された。

以上の結果より、提案したシステムを有効に活用するために以下のことがいえる。

- ・ 導出される形状の多様性を確保するためには、個体数は 100 以上の十分大きな値を設定する。
- ・ 個体数の増加にともない、形状の解探索の効率性は低下することから、形状の多様性と効率性の両者を比較して適切な個体数を設定する。
- ・ 個体数が小さい場合においては、突然変異は形状の多様性の確保に有効に作用するが、個体数が十分大きい場合においては、突然変異による設計解候補の多様性への突然変異率の影響は少ない。個体数の設定に合わせて突然変異率を設定する。

3.7.4 他の解探索アルゴリズムとの比較

3.7.2 項において示された、最も高い多様性を保ち、さらに少ない試行形状数で設計解候補を抽出可能な合成比率 $k = 0.5$ において、解探索アルゴリズムを全く用いないシステム、スキーマ保存の一般的な GA を用いたシステム、本提案によるスキーマ破壊の GA を用いたシステムの多様性および解探索の効率性をそれぞれ比較することで、本システムにおける解探索アルゴリズムの有効性を検証した。

解探索アルゴリズムを用いないシステムにおいては、ランダムに染色体を作成して形状を生成し、評価を行う。そして、必要な個数の設計解候補が導出されるまでランダムに染色体の生成をくり返す。このシステムにおいては、染色体をランダムに生成するために、探索空間を大域的に探索することができ、多様な設計解候補を導出することが可能になると考えられる。しかし、反面、GA オペレーションのような解探索のための操作がないため、設計解候補を導出するまでに多くの試行数を要すると考えられ、探索の効率性に欠けるといえる。

これに対し、スキーマ保存の GA を用いたシステムは、設計解候補として認められた染色体を削除せずに、個体集団中に保存するとともに突然変異率を 0% に設定する。このような設定により、優れた遺伝情報が個体集団に伝播しやすくなり効率的な探索が可能となる。このアルゴリズムは、探索の効率性を最優先にした GA であり、解を導出するまでの時間は短い反面、導出される解が類似したものになり、解の多様性は低くなると考えられる。

したがって、これら 2 つのシステムと本研究で提案したシステムを比較することで、本システムにおける解探索アルゴリズムが、解の多様性と探索の効率性に関して、どの程度有効であるかを検証することができると考えられる。なお、スキーマ破壊の GA のみの効果を解析するために、本システムにおいて突然変異率を 0% に設定した結果も同時に比較した。

また、測定値の信頼性を高めるために、それぞれプログラムを 10 回実行して 10 個の多様性指標 D および試行形状数を算出し、それぞれ平均値を求めた。なお、比較条件は、本システムにおいて最も高い多様性を得た個体数 100 のときとした。

まず、それぞれのアルゴリズムが導出する解の多様性について比較する。Fig. 3-28 は、それぞれのアルゴリズムが導出する設計解候補の多様性指標 D の値を示している。この図において、本システム(スキーマ破壊 GA, 突然変異率 25%)は、解探索アルゴリズムを用いないシステムと同等の高い多様性を有していることが示された。また、突然変異率を

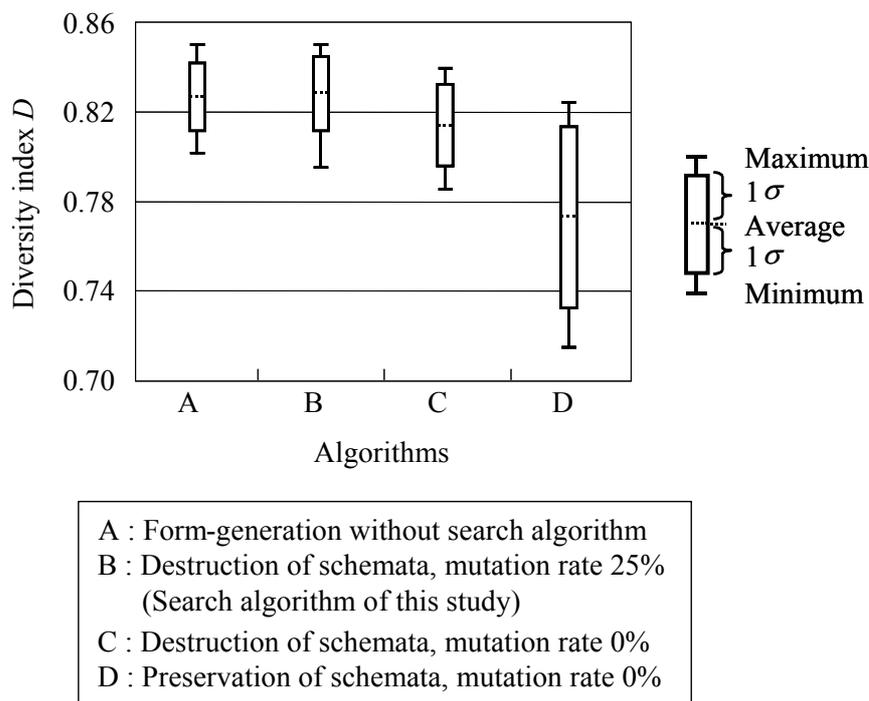


Fig. 3-28 Relationship between algorithm and diversity

0%に設定したスキーマ破壊のGAとスキーマ保存のGAを比較した場合にもスキーマ破壊のGAの多様性が大きく、このアルゴリズムが多様な設計解候補の導出に有効であることが示唆された。

つぎに、解探索の効率について比較する。Fig. 3-29は、それぞれのシステムが終了するまでに必要とした試行形状数を示している。この図において、スキーマ保存のGAを用いた本システムが最も解探索の効率が高く、解探索アルゴリズムを用いないシステムの解探索の効率性は著しく低いことが示された。ここで注目すべき点は、解探索アルゴリズムを用いないシステムと本システムとの試行形状数の差異が、本システムとスキーマ保存のGAとの差異と比較して大きいことである。この結果から、本システムがGAにより効率的に解探索していることが示された。

これらの解の多様性と解探索の効率の平均値をまとめた結果をFig. 3-30に示す。これより、提案したGAを用いたシステムにおいては、他の手法と比較して十分に高い多様性を確保しながら効率よく形状の探索を行えることが明らかになった。

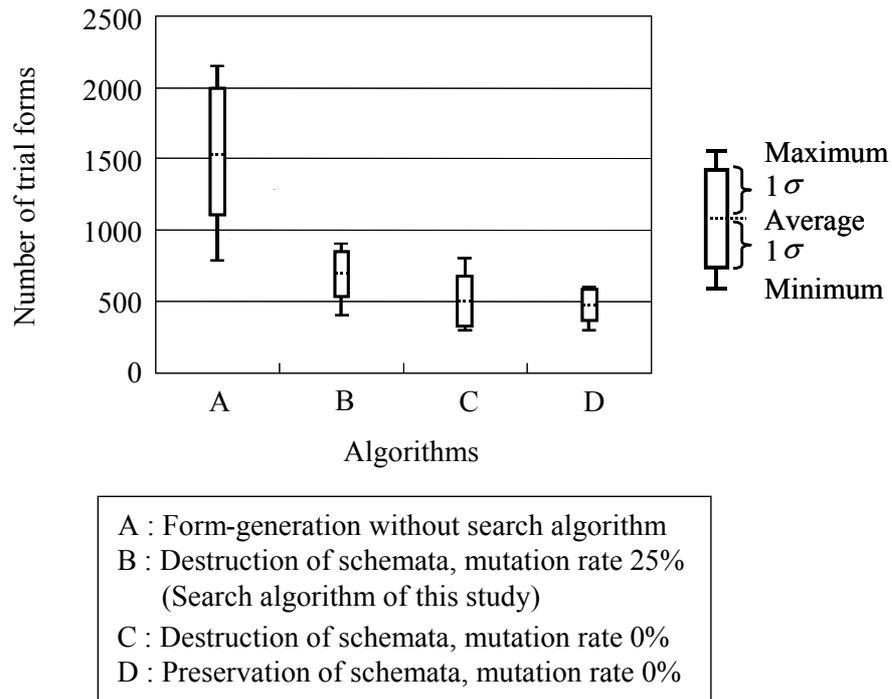


Fig. 3-29 Relationship between algorithm and efficiency

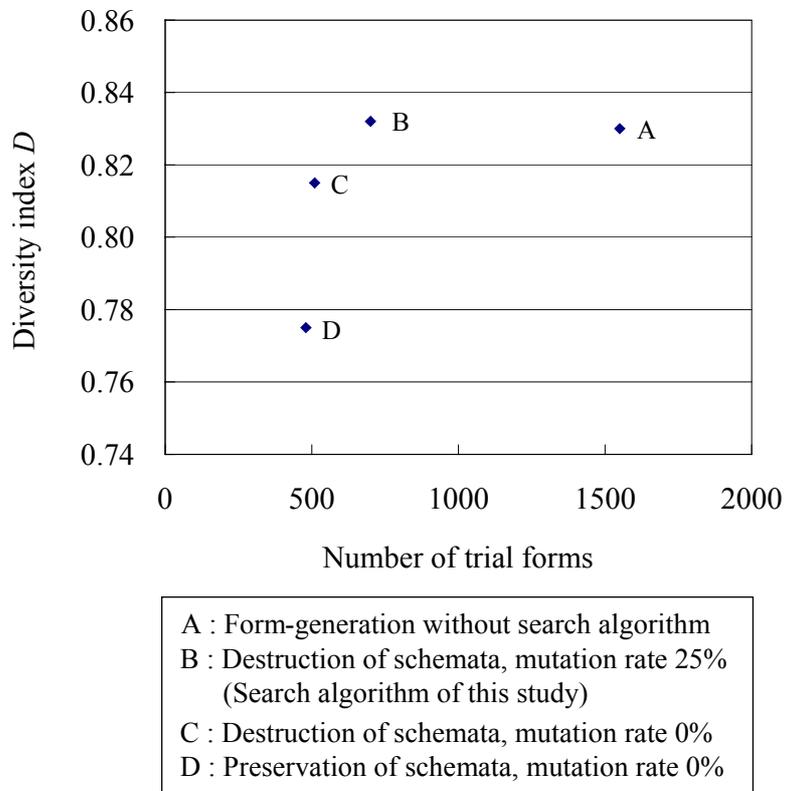


Fig. 3-30 Relationship between efficiency and diversity followed by algorithm

3.8 結言

本章においては、第2章で示した多様解導出システムにおける形状生成方法を提案した。本方法は、ボクセル表現およびセルラ・オートマトンを用いることにより自己組織的な形状生成を可能とした。その際、生物の形態多様性を生起させる発生特性の1つである細胞増殖の活性化を促す誘導と細胞増殖の抑制を促す頂部支配を応用した。その結果、誘導の応用は塊状の形状生成を、一方、頂部支配の応用は平板状の形状生成を促すことが明らかとなった。この知見をもとに、本方法においては、その両者を合成することにより、骨組状の多様な形状を生成することを可能とした。

つぎに、提案した形状生成方法を椅子の形状設計へ適用し、形状の多様性と解探索の効率性について解析を行った。そして、形状評価を行わない場合との比較を行った結果、椅子としての評価を行った場合においても多様な形状を生成することが可能であることが確認された。同時に、椅子としての評価を行うことにより、解の解探索の効率性が低下することが確認された。

最後に、効率よく大域的な解探索をするために、解探索アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズムを用いた。さらに、十分な解の多様性を確保するために、スキーマ破壊のアルゴリズムを付加した。その結果、解探索アルゴリズムを用いない場合と同等の多様性を保持しながら高い解探索の効率性の解導出が可能であることが確認された。

第4章

構造設計問題における多様解導出システムの提案

4.1 緒言

第3章では、創発設計方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムにおける形状生成方法を提案した。本章においては、第3章で提案した形状生成方法を用いて、構造設計問題における多様解導出システムを提案する。さらに、本システムと従来の最適化法により導出される解の多様性および設計目標に対する力学解析結果を比較することにより、多様解導出システムの有効性を検証する。

4.2 最適化過程における多様解導出システムの実行条件

4.2.1 設計条件および実行条件

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、力学的な条件を考慮する必要がある。そこで、最適化過程においては、発現過程の多様解導出システムにおいて評価した接地面の形成度、座面の形成度、安定度の3項目に加えて、強度に関する制約条件を追加することとする。具体的には、最大応力が生じている要素の相当応力を許容応力以下と設定した。さらに、目的を軽量化とした形状の最適化を行った。相当応力値は、発現過程により導出された設計解候補に荷重を加え、有限要素法を用いた数値解析により算出する。

4.2.2 材料および荷重条件の設定

ここで、相当応力値を算出する際に用いる材料特性および荷重条件について以下に述べる。有限要素法を用いるためには、材料特性を設定する必要がある。生成される椅子の形状は、有機的な形状となることが予想されるため、複雑かつ曲線的な形状を成形

することが可能な材料を用いることが要求される。また、体積の大きい形状が生成される可能性が高いため、実用性を考えると、密度の低い材料を用いることが要求される。これらの条件を考慮して、椅子の材料としてプラスチック材料であるポリスチレンを選定し、ヤング率 3.3GPa, ポアソン比 0.33, 質量密度 $1.05 \times 10^3 \text{g/cm}^3$, 許容応力 1.7MPa と設定した。

つぎに、荷重条件について述べる。荷重方向は、座面の方向と背もたれ方向の 2 方向とした。荷重の大きさは、人が座るときに静的でないことを想定して、衝撃応力を考慮した値とし、座面方向に 10MPa, 背もたれ方向に 6MPa とした。なお、荷重は分布荷重とし、総荷重を座面に存在する総要素数で除した値が、座面に存在する各要素にかかることとした。

4.3 形状変換方法

形状変換部においては、有限要素法により算出された相当応力分布を用いて形状の変換を行う。本研究においては、制約条件を強度、目的を軽量化と設定したため、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の 2 つの形状変換方法を設定した。2 つの変換をくり返し行うことにより、強度に関する制約条件を満足した軽量化された形状が生成される。以下に、それぞれの変換における具体的な操作方法について示す。

4.3.1 強度増加変換

発現過程において導出された設計解候補が、最適化過程において新たに設定した強度に関する制約条件を必ずしも満足しているとは限らない。そこで、本変換においては、強度の増加を目的とした変換を行う。具体的には、まず、相当応力分布により最大相当応力値を有する節点を算出する。そして、Fig. 4-1 に示されるように、その節点における応力値が許容応力を超えている場合に、その節点の周りすべてに要素を付加する。この形状変換により、最適化過程における目的となる軽量化に関する評価値は減少するが、制約条件である強度に関する評価値は増加する。

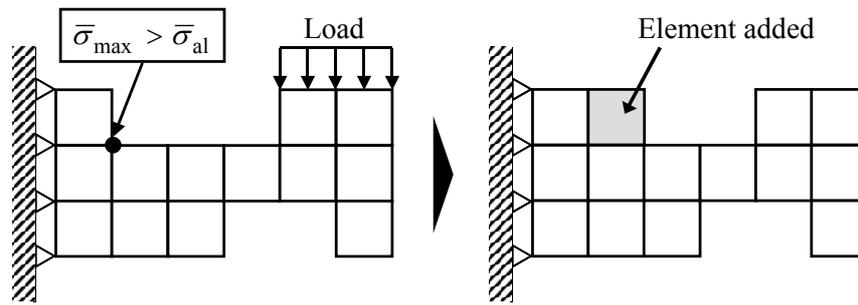


Fig. 4-1 Modification for increasing strength

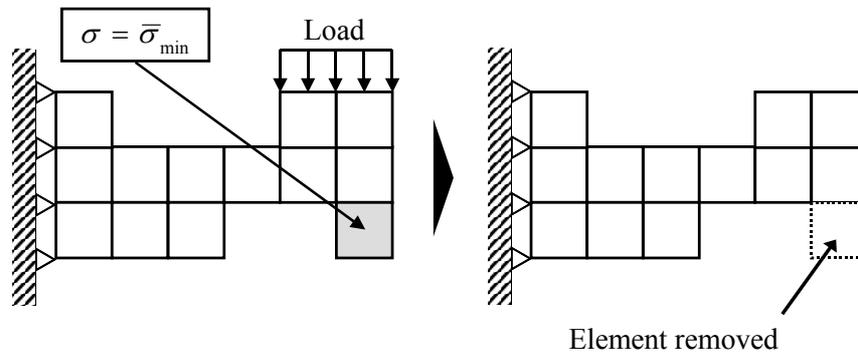


Fig. 4-2 Modification for reducing weight

4.3.2 重量減少変換

本変換においては、形状の軽量化を目的とした変換を行う。具体的には、Fig. 4-2 に示されるように、相当応力分布により、最小相当応力値を有する要素を算出し、その要素を削除する。この操作を制約条件内で繰り返し行うことにより軽量化が行われる。

4.4 形状評価方法

形状評価部においては、形状変換部において変換された形状を評価する。この際、以下に示すペナルティ係数 ζ を導入した修正目的関数 $\phi^{(n)}$ を次式のように設定した。

Maximize $\phi^{(n)}$

$$\phi^{(n)} = \frac{W^{(n-1)} - W^{(n)}}{W^{(n-1)}} + \zeta \left(1 - \frac{\bar{\sigma}_{\max}^{(n)}}{\bar{\sigma}_{\text{al}}} \right)$$

$$\zeta = \begin{cases} 1, & \text{for } \bar{\sigma}_{\max}^{(n)} > \bar{\sigma}_{\text{al}} \\ 0, & \text{for } \bar{\sigma}_{\max}^{(n)} \leq \bar{\sigma}_{\text{al}} \end{cases} \quad (4-1)$$

ここで、 $W^{(n)}$ を状態 n における総重量、 $\bar{\sigma}_{\max}^{(n)}$ を状態 n における要素の最大相当応力値、 $\bar{\sigma}_{\text{al}}$ を許容応力値とする。なお、許容応力値は、降伏応力値に安全率を除し、1.7MPaとした。また、ペナルティ係数 ζ は、最大相当応力値が許容応力値を超えている場合は 1、許容応力値以下の場合には 0 の値を有する。最大相当応力値が許容応力値を超えている場合においては、強度増加変換と重量減少変換の 2 つの変換を行い、また、許容応力値以下の場合においては、重量減少変換のみを行う。

また、式(4-1)により算出された値を状態 n における評価値とする。そして、設定した目的関数の最大化を行う。変換された形状が制約条件である接地面の形成度、座面の形成度、安定度の 3 項目を満たし、かつ目的関数の評価値が増加しているかどうかを確認する。この条件を満足する場合に、その形状をつぎの状態 ($n+1$) とし、あらためて規準を設定する。また、条件のうちで、1 つでも満足しない場合においては、前の状態 n に戻り、他の要素の変換を行う。

4.5 形状最適化過程

設計解候補が最適化され、設計解が導出される過程を Fig. 4-3 に示す。まず、発現過程において得られた設計解候補である形状に荷重を付加し、有限要素解析により相当応力分布を得る。ここで、強度に関する制約条件を満足していない場合においては、強度増加変換を行い、制約条件を満足するまで強度増加変換と重量減少変換をくり返し行う。また、強度に関する制約条件を満足している場合においては、重量減少変換のみをくり返し行う。最後に、重量減少変換が終了した場合に、変換世代 i が更新され、設計解が導出される。

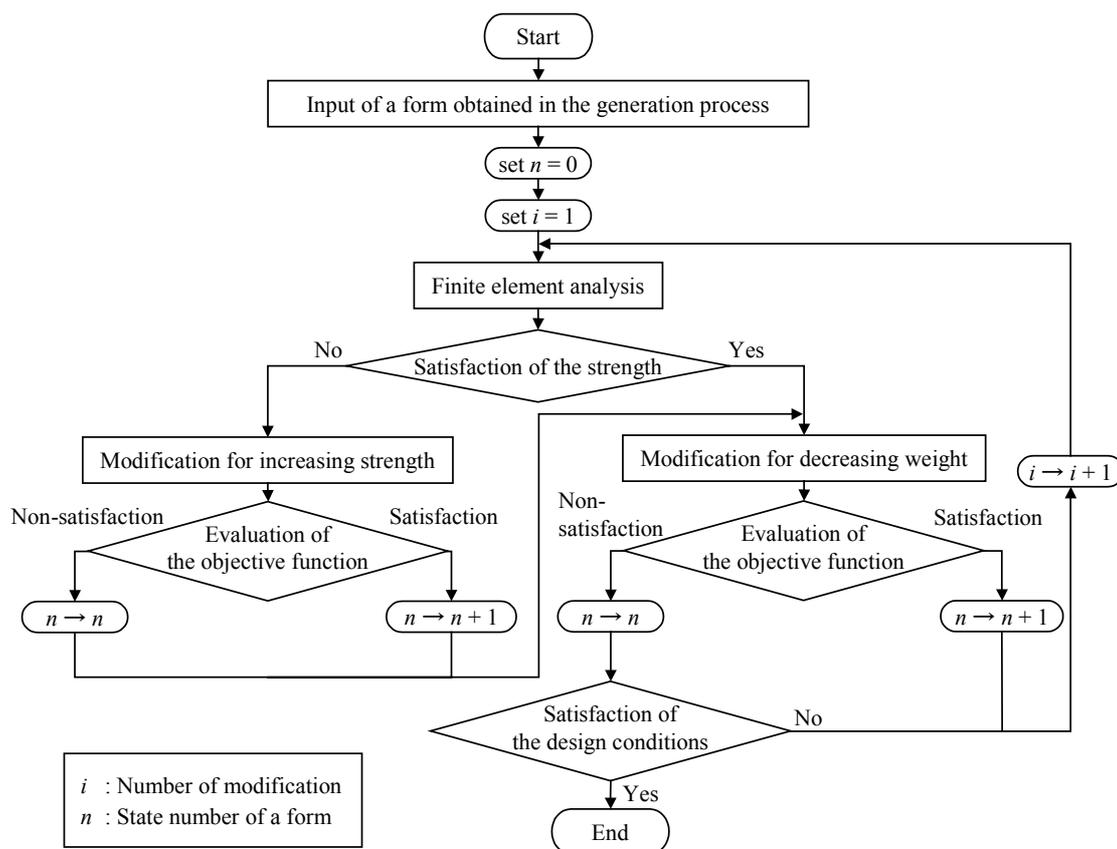


Fig. 4-3 Flowchart of the system in the optimization process

4.6 結果および考察

4.6.1 生成形状

提案した最適化過程における多様解導出システムを実行した。形状が最適化される過程を Fig. 4-4 に示す。このように、発現過程において生成された形状は、要素の増減をくり返し行うことにより、強度の制約条件のもとに軽量化が行われた。また、強度が必要な部位には要素の付加が行われ、十分な強度を有する部位には要素の減少が行われることが確認された。

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 Fig. 4-5 に示す。図に示されるように、強度の制約条件を満足していない初期の状態において、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、強度を満たし、許容応力値以下の状態を有した場合においては、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。

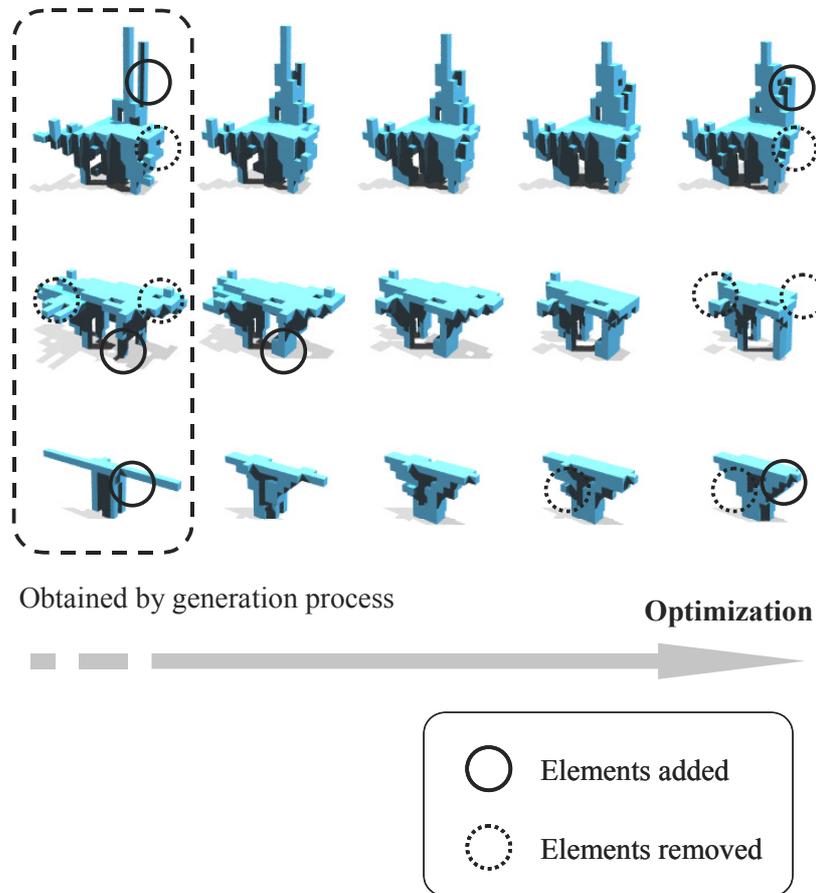
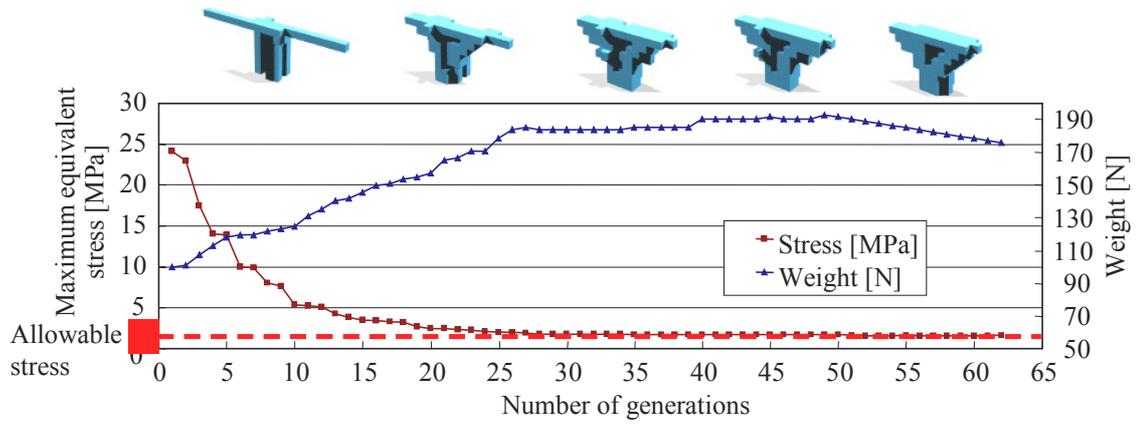


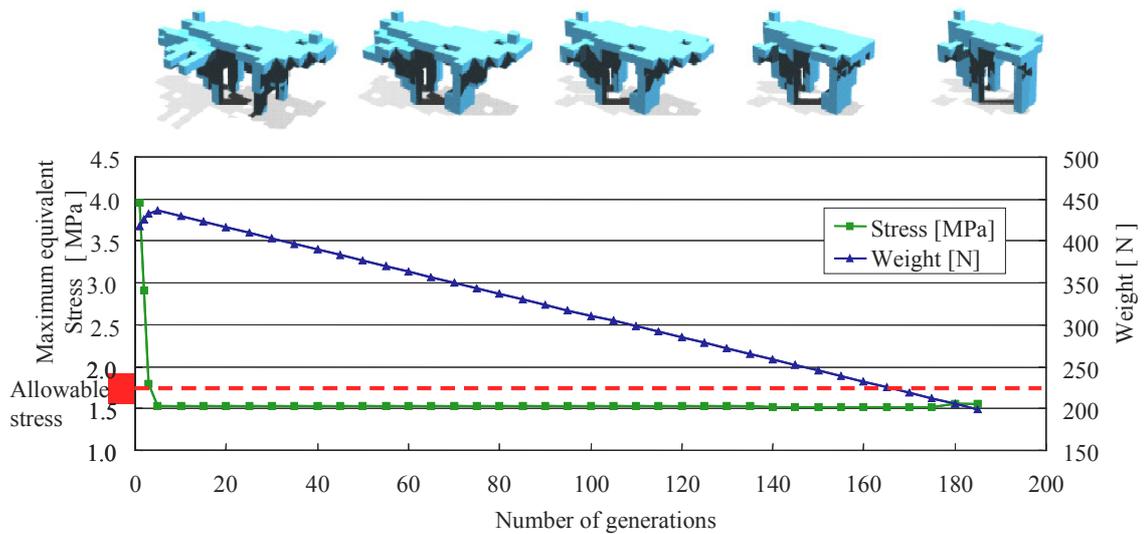
Fig. 4-4 Form-optimization process

さらに、発現過程および最適化過程において導出される形状の比較を行った。Fig. 4-6に示されるように、発現過程においては、単一要素から自己組織的に多様な設計解候補が導出された。一方、最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の特徴を保持しながら最適化されることが確認された。

発現過程と最適化過程のそれぞれの過程により生成された形状の重量と最大相当応力の変化をFig. 4-7, Fig. 4-8に示す。この図より、発現過程において、重量および最大相当応力値は、ばらつきが大きく多様な形状が生成されることが確認された。それに対して、発現過程と最適化過程を経た場合においては、重量のばらつきを保持したまま強度の評価を満足した形状が生成されることが確認された。



(a) Example 1 of optimization process



(b) Example 2 of optimization process

Fig. 4-5 Effect of number of generations on maximum equivalent stress and weight

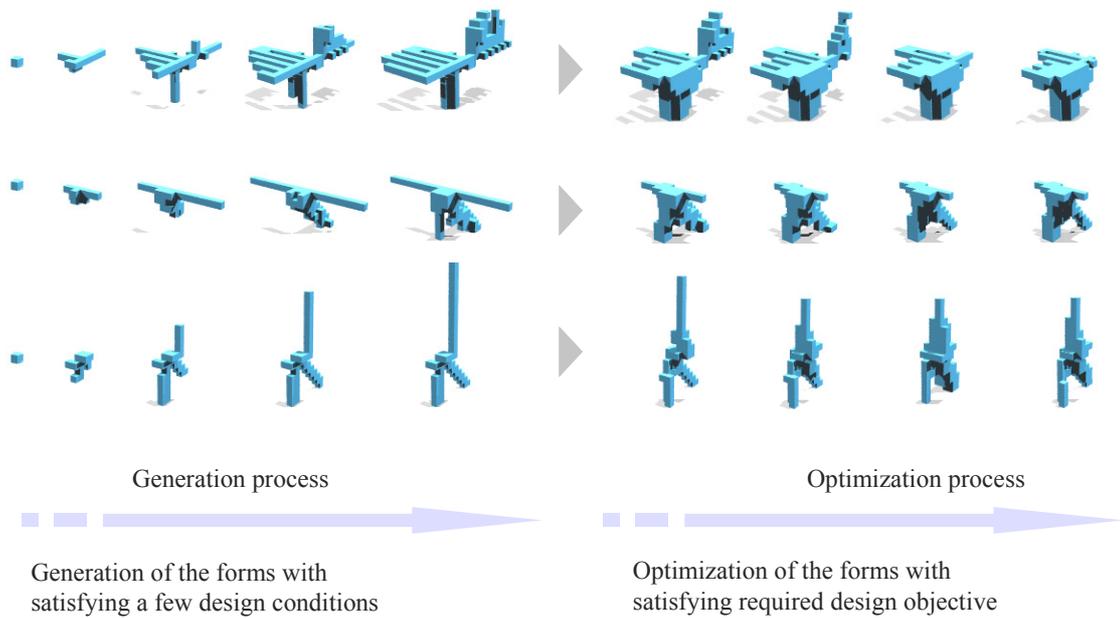


Fig. 4-6 Forms obtained by generation process and optimization process

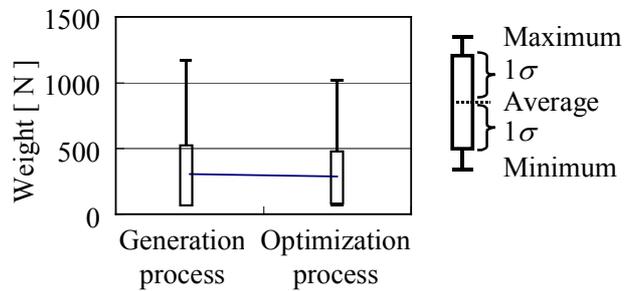


Fig. 4-7 Change in weight

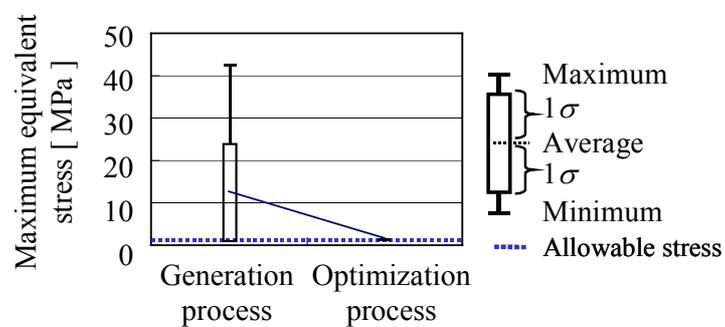


Fig. 4-8 Change in stress

4.6.2 解の多様性解析

3.4.6 項において定義した多様性指標 D を用いて、発現過程および最適化過程の2つの過程を経た生成形状の多様性解析を行った。このとき、3.7.2 項において得られた結果から、少ない試行形状数で高い多様性を示した近傍情報ベクトル \mathbf{v}_n と位置情報ベクトル \mathbf{v}_p の合成比率 k の値が 0.5 の場合における多様性解析を行った。その結果、Fig. 4-9 に示される結果が得られた。ここで、発現過程における形状の多様性と最適化過程を経た形状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。

4.6.3 多様解導出システムの有効性解析

(1) 従来の工学設計方法による解の導出

多様解導出システムの有効性を解析するために、発現過程および最適化過程の2つの過程を有する本システムと従来の工学設計方法との比較を行った。本研究においては、従来の工学設計方法として、初期形状、設計条件および設計目標を設定し、その条件における最適な唯一解を導出する最適化法を用いた。そして、多様解導出システムにおいて設定した形状生成空間のすべてに要素が充填された状態を初期形状として、多様解導出システムの最適化過程と同様の条件で最適化を行った。その結果、Fig. 4-10 に示されるように、設定した条件における最適な唯一解が導出された。

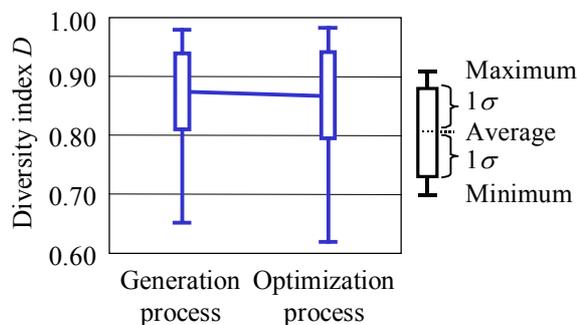


Fig. 4-9 Analysis of diversity by the diversity index

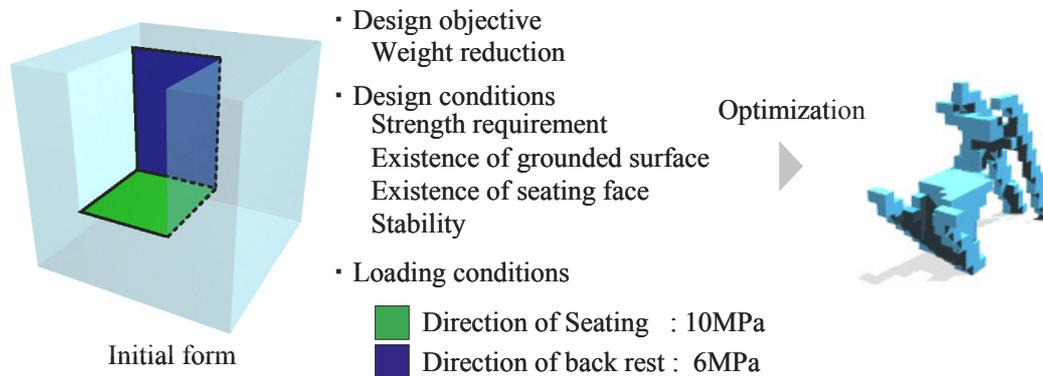


Fig. 4-10 A unique design solution obtained by the conventional optimality method

(2) 従来の工学設計方法と多様解導出システムによる解の比較

設計目標である重量と制約条件である強度を表す最大相当応力について、本システムにより導出された Fig. 4-11 に示される 20 個の多様解と従来の最適化法により導出された唯一解との比較を行った。その結果、Fig. 4-12, 4-13 に示されるように、本システムにより導出された多様解は、許容応力値以下であると同時に、従来の最適化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 2 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。

従来の最適化法の多くは、設定した設計条件のもと最適な唯一解を導出するため、初期形状に依存した最適解となる。これに対し、多様解導出システムにおいては、初期形状を単一要素としているため、従来の最適化法と比較して、初期形状に依存しない大域的な解探索が可能となる。このため、本システムにより、従来の最適化法と比較して、設計目標に対して高い評価を有する解を導出する可能性があると考えられる。

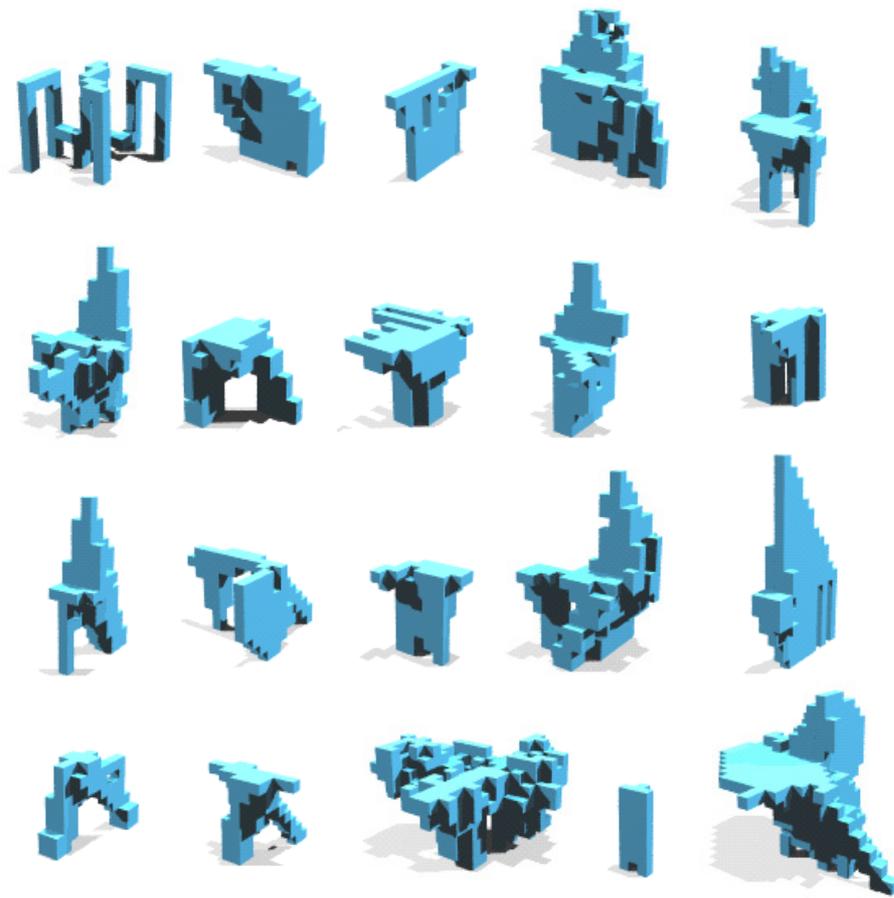


Fig. 4-11 Diversity design solutions by proposed system

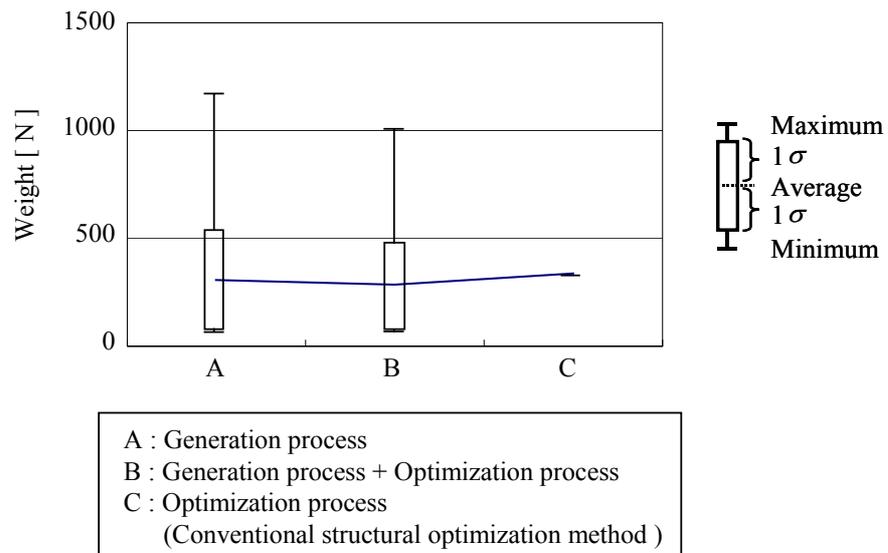


Fig. 4-12 Change of weight

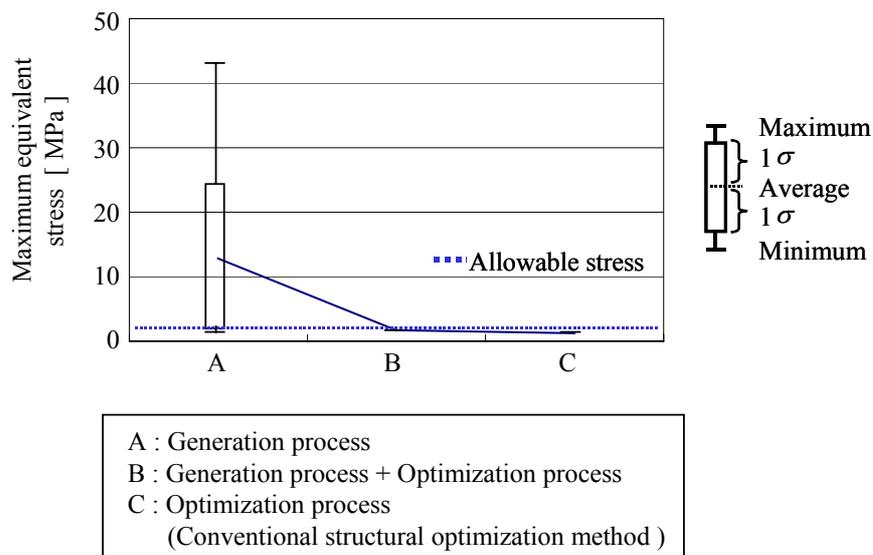


Fig. 4-13 Change of stress

(3) 追加された評価項目に関する解の評価

本項においては、さらに、設計条件として考慮していない、ひずみエネルギーの総和について解析を行った。そして、多様解導出システムにより導出された多様解および従来の最適化法により導出された唯一解を重量とひずみエネルギーの総和との関係について解析した。その結果、Fig. 4-14 に示されるように、設計目標である軽量化に対し高い評価を有した多様解のなかに、ひずみエネルギーの総和に対しても、従来の最適化法により導出された唯一解と比較して高い評価を有する設計解が含まれることが確認された。以上より、多様解を導出することが可能な本システムの適用可能性として、以下のことが考えられる。

1) 設計条件や設計目標が新たに加わるような設計問題への適用

設計過程の進行にともない、設計条件が明確になるため、設計目標の追加や変更が必要になるという問題が考えられる。このような問題に対し、従来は、設計過程を戻り、新たな設計目標に対して最適化を行うことにより解決してきた。これに対し、多様解を導出することが可能な本システムにおいては、設計解の導出時には考慮していない評価項目においても高い評価を有する可能性があるため、設計過程を戻ることなく、効率よく設計解を導出することができる。また、複数の力学特性に対し、高い評価を有する解の導出が可能なことから、多目的問題への適用可能性が考えられる。

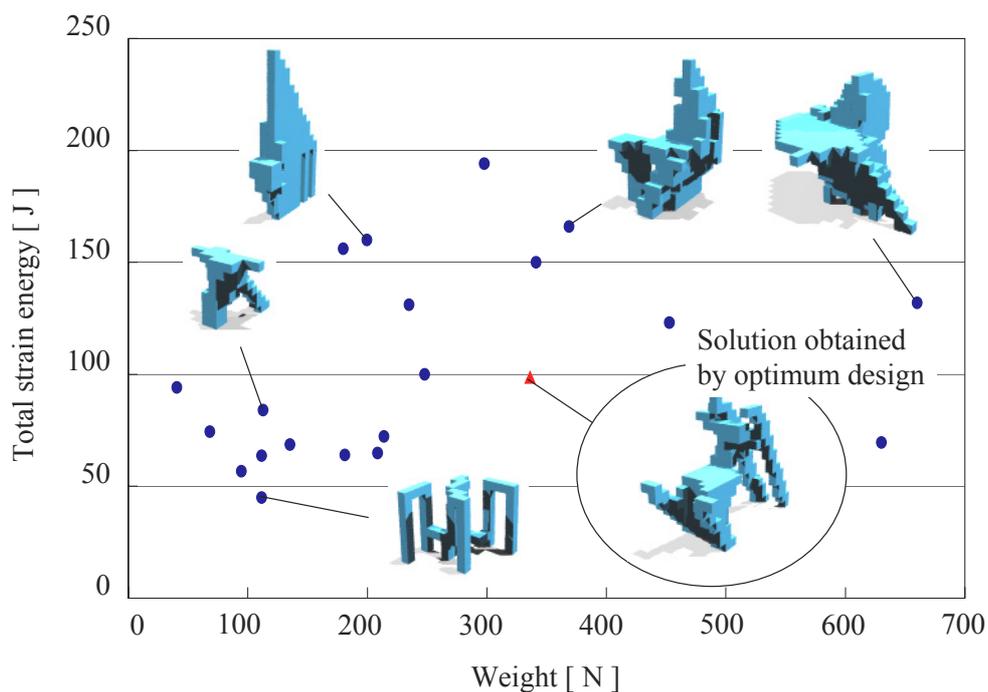


Fig. 4-14 Comparison of the proposed system and the optimum design in terms of weight and total strain energy

2) 設計目標を定量的に表すことが難しい設計問題への適用

従来の最適化法は、設計目標などが定量的に評価できる問題への適用が可能であるが、美しさや新奇性などの評価は、定性的な評価であるため、設計目標とすることが難しかった。これに対し、本システムは、設計目標だけでなく、その他の考慮していない特性についてもばらつきを有する設計解の導出が可能であるため、定性的な評価に対しても高い評価を有する設計解が導出される可能性がある。

4.6.4 解の多様性に対する設計条件の影響解析

(1) 実行条件

多様解導出システムの前半の過程にあたる発現過程においては、緩和された評価基準のもと多様な設計解候補が導出される。本節においては、発現過程の評価基準が、後半の過程にあたる最適化過程を経た設計解の多様性におよぼす影響について解析を行う。具体的には、Table 4-1 に示すように、発現過程の評価基準を低く設定する場合と高く設定する場合の2通りを設定し、それぞれの場合において導出される設計解の比較を行う。低い評価基準を設定する場合においては、第3章と同様に、設計条件として、座面の形成度、接地面の形成度、安定度の3つの評価項目を設定する。一方、高い評価基準を設定する場合においては、前述の3項目に加え、最大相当応力が許容応力以下という最適化過程で新たに加えた設計条件と同一の条件を設定する。なお、最適化過程のシステムにおいては、発現過程における評価基準の影響について解析を行うために、それぞれ同一の設計条件および設計目標を設定する。

Table 4-1 Evaluation in generation process

Evaluation in generation process Processes	Low evaluation (3 items)	High evaluation (4 items)
Generation process	<ul style="list-style-type: none"> • Design conditions <ul style="list-style-type: none"> ▪ Existence of grounded surface ▪ Existence of seating face • Stability 	<ul style="list-style-type: none"> • Design conditions <ul style="list-style-type: none"> ▪ Existence of grounded surface ▪ Existence of seating face • Stability • Strength requirement
Generation process + Optimization process	<ul style="list-style-type: none"> • Design conditions <ul style="list-style-type: none"> ▪ Existence of grounded surface ▪ Existence of seating face • Stability • Strength requirement • Design objective <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weight reduction 	<ul style="list-style-type: none"> • Design conditions <ul style="list-style-type: none"> ▪ Existence of grounded surface ▪ Existence of seating face • Stability • Strength requirement • Design objective <ul style="list-style-type: none"> ▪ Weight reduction

(2) 発現過程におけるシステムの実行

前項で述べた条件のもと、発現過程のシステムをそれぞれ実行した。その結果、Fig. 4-15 に示されるように、接地面の形成度、座面の形成度、および安定度の3項目を評価した場合には、自由度の高い多様な形状が生成される傾向が示された。それに対し、前述の3項目に強度を付加した4項目を評価した場合には、Fig. 4-16 に示されるように、塊状の形状が多く生成され、生成された形状どうしが類似する傾向が示された。これは、4項目を評価した場合には、力学的に高い強度を有する塊状の形状が多く生成されたためと考えられる。

また、生成された形状の多様性および形状生成の効率性について、多様性指標 D および試行形状数を用いて解析を行い、3項目を評価した場合と4項目を評価した場合との比較を行った。まず、生成された形状の多様性について解析を行った結果、Fig. 4-17 に示されるように、3項目を満足した形状と比較して、4項目を満足した形状の多様性が低下する傾向が示された。これは、3項目を満足した形状は高い自由度を有することに対し、4項目を満足した塊状の形状は、それぞれが類似した傾向を示すため、形状の多様性が低

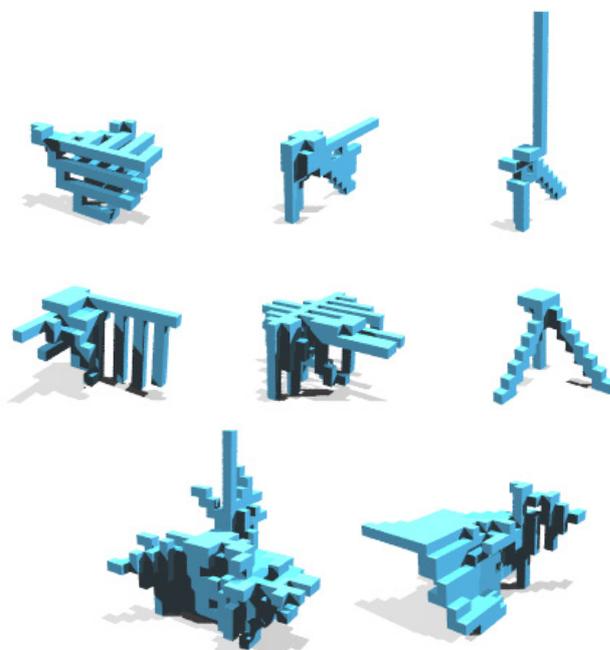


Fig. 4-15 Examples of forms satisfied with low evaluation (generation process)

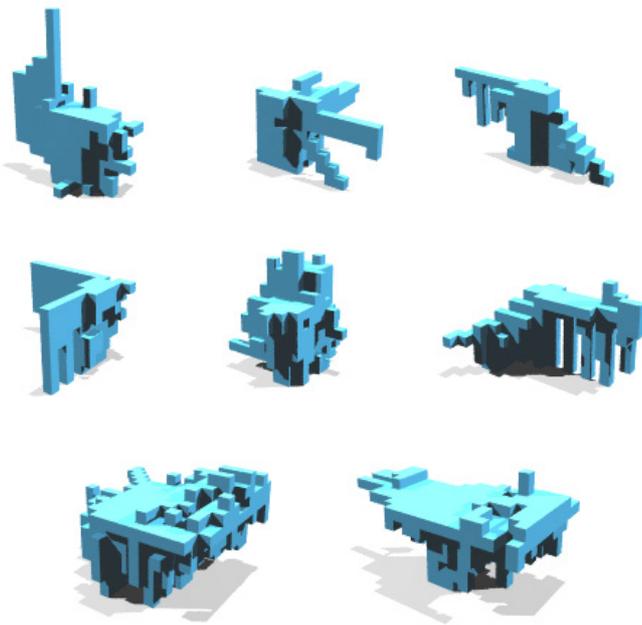


Fig. 4-16 Examples of forms satisfied with high evaluation (generation process)

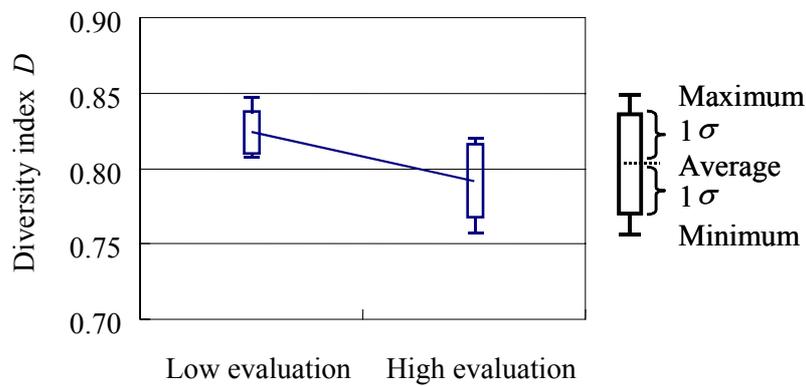


Fig. 4-17 Analysis of diversity

下したと考えられる。つぎに、形状生成の効率性について解析を行った結果、Fig. 4-18 に示されるように、4 項目を評価することにより、形状生成の効率性が低下する傾向が示された。これは、3 項目を評価した場合には生成される形状が、強度という設計条件を加えることにより、生成されない可能性があるため、形状生成の効率性が低下したと考えられる。

以上より、発現過程において評価基準を低く設定することは、高い自由度を有する多様な形状を効率よく生成することに対して有効であることが示された。

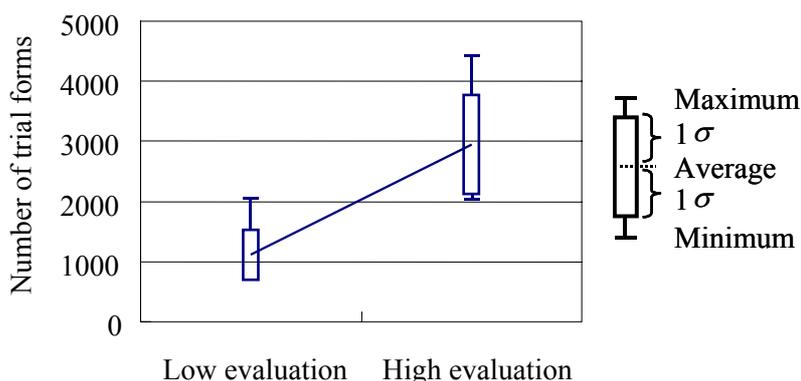
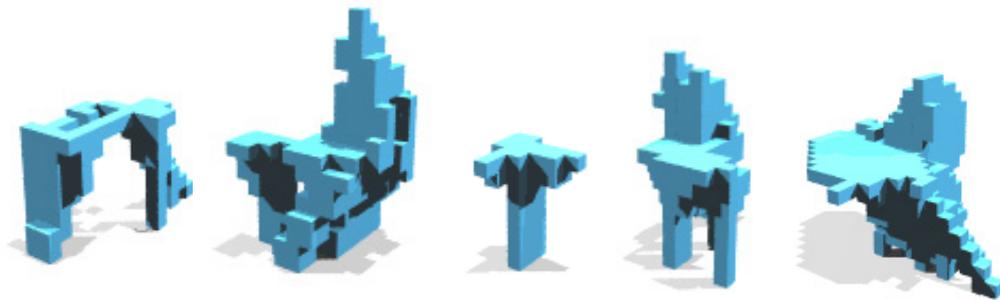


Fig. 4-18 Analysis of efficiency

(3) 最適化過程におけるシステムの実行

発現過程において、接地面の形成度、座面の形成度、安定度の3項目を評価した場合、およびこれら3項目に強度を付加した4項目を評価した場合において導出された設計案を、多様解導出システムの後半の過程である最適化過程においてそれぞれ最適化を行った。最適化過程におけるシステムの実行条件は、発現過程における評価基準が設計解の多様性におよぼす影響について解析を行うため、双方とも同一の条件とした。この条件のもと、最適化過程のシステムを実行した。その結果、Fig. 4-19 に示されるように、3項目を評価した場合、および4項目を評価した場合において導出された設計案がそれぞれ最適化された。3項目を評価した場合においては、脚部や背もたれを有した形状、広い座面部を有した形状などさまざまな特徴を有する形状が生成され、重量のばらつきを有する多様な設計解が導出された。4項目を評価した場合には、設計目標の軽量化に対して高い評価を有する形状が生成されたが、棒状の傾向を有する形状が多く、生成された形状どうしが類似する傾向を示した。強度の条件を加えた4項目を評価した場合は、発現過程において導出される設計案は、強度の設計条件を満足しているため、最適化過程においては、重量減少変換のみが行われる。そのため、Fig. 4-16 に示されるように、発現過程において生成された形状どうしが類似する傾向を示した4項目を評価した場合には、最適化過程を経た後も同様の傾向を示す形状が生成されたと考えられる。

さらに、多様性指標 D を用いて、生成された形状の多様性について解析を行った。その結果、Fig. 4-20 に示されるように、システムの最終的な設計条件および設計目標が同一であるにも関わらず、発現過程における評価基準により形状の多様性に差異が生じるこ



(a) Examples of forms satisfied with low evaluation



(b) Examples of forms satisfied with high evaluation

Fig. 4-19 Comparison of forms between low evaluation and high evaluation
(generation process + optimization process)

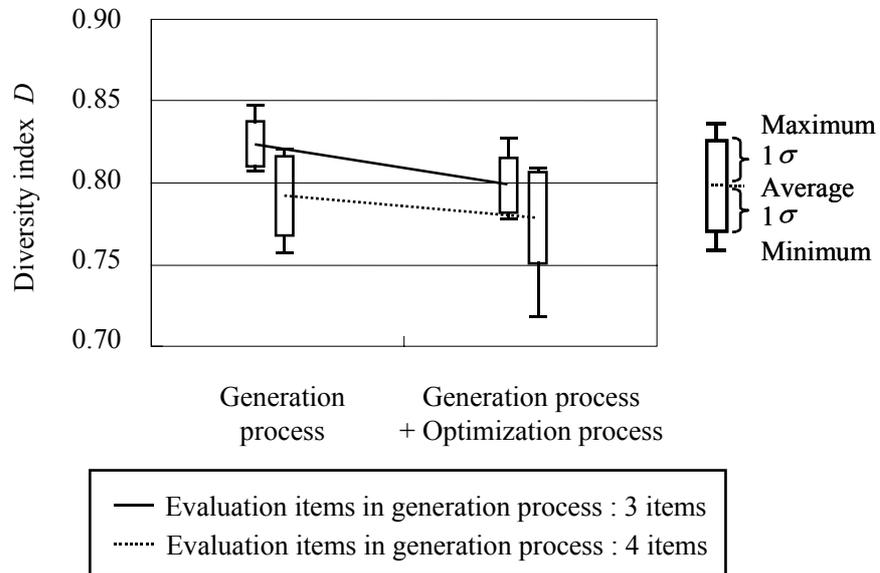


Fig. 4-20 Comparison of diversity between 3 items and 4 items in generation process

とが示された。また、発現過程において、4項目を満足した形状と比較して、高い多様性を有した3項目を満足した形状は、最適化過程を経た後においても、4項目を満足した形状と比較して高い多様性を有することが示された。このことより、発現過程において高い多様

性を有する形状を導出することが、最適化過程を経た設計解の多様性に影響をおよぼす可能性が示唆された。

(4) 解空間のモデルを用いた考察

ここでは、発現過程における評価基準が設計条件の多様性におよぼす影響について、解空間のモデルを用いて考察を行う。多峰性を有する解空間において、多様解導出システムは、発現過程および最適化過程の2つの過程を経ることにより多様解の導出を可能とする。まず、Fig. 4-21 に示されるように、発現過程において、低い評価基準を設定した場合は、発現可能な領域を広く取ることから解空間を大域的に探索することが可能となる。そのため、発現過程において、緩和された評価基準のもと、多様な設計案の導出が可能となる。そして、導出された多様な設計案をそれぞれ最適化することにより、多様な設計解の導出を行う。一方、発現過程において高い評価基準を設定した場合は、Fig. 4-22 に示されるように、発現可能な領域が狭くなるため、発現過程において導出される設計案の多様性が低下する。そのため、発現過程により導出された設計案を局所的に最適化する最適化過程を経た設計解の多様性も低下したと考えられる。このように、発現過程における評価基準を高く設定した場合と低く設定した場合では、最終的な条件は同一であっても、発現過程の評価基準により導出される解のばらつきが異なるため、設計解の多様性に差異が生じると考えられる。

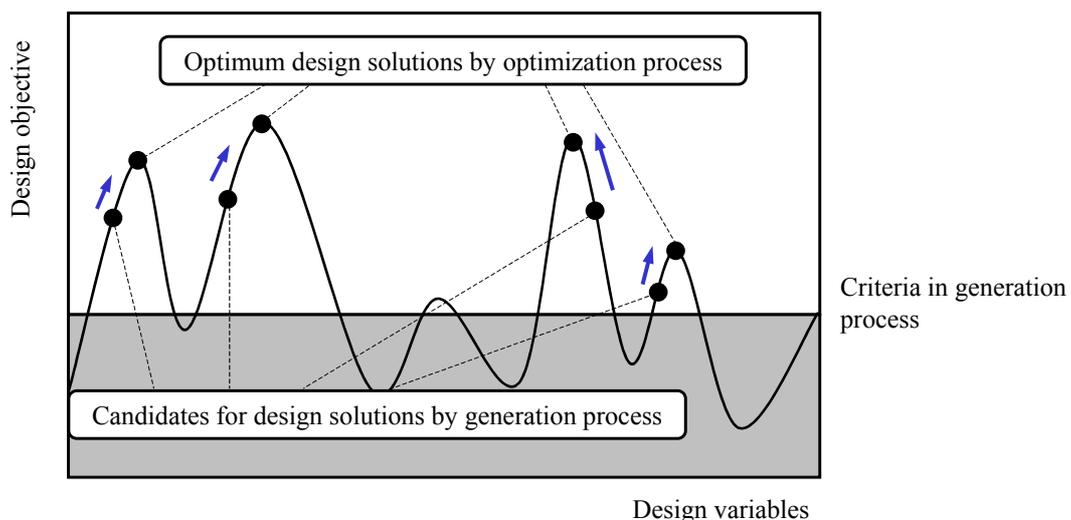


Fig. 4-21 Solutions space in case of setting low evaluation in generation process

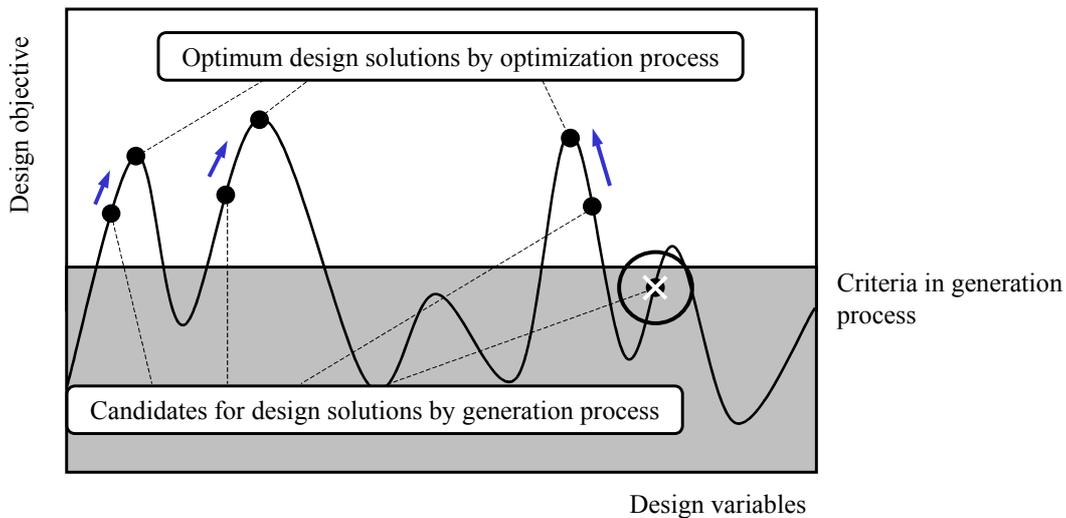


Fig. 4-22 Solutions space in case of setting high evaluation in generation process

以上より、多様解を導出するためには、発現過程における評価基準を低く設定し、大域的な解探索により設計解候補を導出することが有効であることが確認された。

4.7 結言

本章においては、構造設計問題における多様解導出システムを提案した。その際、大域的な解探索が可能な最適性規準法を用いた最適化過程を導入した。このとき、形状変換方法として、強度増加変換と重量減少変換の2つの形状変換方法を設定した。その結果、発現過程においては、単一要素から自己組織的に多様な設計解候補が導出された。一方、最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の特徴を保持しながら最適化されることが確認された。

さらに、発現過程および最適化過程の2つの過程を経た解の多様性解析を行った結果、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確認された。これより、発現過程において、解空間から大域的に位相が決定され、最適化過程において、その位相内での最適解が導出されたことが示唆された。

発現過程および最適化過程の2つの過程を有する本システムと従来の最適化法により

導出される解の比較を行った。その結果、本システムにより導出された解は、従来の最適化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。以上の結果から、両過程を経ることにより、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が示された。

最後に、多様解導出の有効性を示すべく、設計条件として考慮していない、ひずみエネルギーの総和について解析を行った。ここで、本システムにより導出された多様解および従来の最適化法により導出された唯一解を重量とひずみエネルギーの総和との関係について解析した。その結果、設計目標である軽量化に対し高い評価を有した多様解のなかに、ひずみエネルギーの総和に対しても、従来の最適化法により導出された唯一解と比較して高い評価を有する設計解が含まれることが確認された。以上より、大域的に多様解を導出することが可能な本システムの適用可能性として、設計条件や設計目標が新たに加わるような設計問題への適用や設計目標を定量的に表すことが難しい設計問題への適用可能性を示唆した。

第 5 章

多様解導出システムの意匠と構造の協調設計問題への 応用

5.1 緒言

設計過程においては、設計対象の形態を重視した意匠設計と、設計対象の強度を重視した構造設計という、設計情報が質的に異なる設計を考慮する必要がある。したがって、意匠面に優れた設計解と構造面に優れた設計解の各解のうち、両者を満足する解（以下、意匠設計と構造設計の満足解と称す）を導出することが必要とされる。そこで、本研究においては、引き続き、椅子を設計対象とし、本システムを意匠と構造の協調設計問題へ適用する。そして、得られる解の多様性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有効性について検証するとともに、意匠設計と構造設計の満足解導出の可能性について考察を行う。

5.2 多様解導出システムの形状表現方法の拡張

意匠設計においては、形状表現の高い自由度が要求されるため、多様解導出システムにおける形状生成方法の要素発生方向を拡張した。従来の形状表現方法は、要素どうしが面と面で接触することを制約とした方法である。本章においては、形状表現方法を拡張し、要素どうしが面だけでなく、線および点で接触することを可能とする方法を提案する。

5.3 発現過程における形状表現方法の拡張

5.3.1 要素発生方向の拡張

発現過程においては、形状生成方法における要素発生方向の拡張を行った。従来の形状生成方法における要素発生方向は、注目要素から注目要素と面で接触する近傍セルへ向かう 6 方向であったが、より多様な形状の生成を可能とするために、注目要素近傍

のセルのすべてに対し発生の可能性を与え、Fig. 5-1 に示されるように、26 方向とした。具体的には、注目要素と面、線および点で接触する要素へ向かう 26 方向のうち、出力ベクトルの方向にもっとも近い方向とした。この方法により、生成される形状の自由度が増し、多様な形状生成につながると考えた。

5.3.2 発現過程における多様解導出システムの実行

要素発生方向を 6 方向とした場合に生成される形状と 26 方向とした場合に生成される形状との比較を行った。その結果、Fig. 5-2 に示されるように、要素発生方向を 26 方向に拡張することにより、6 方向とした場合と比較して、生成される形状の自由度が増し、従来のシステムでは表現することができなかつた多様な形状が生成されることが確認された。

さらに、要素発生方向を 6 方向とした場合と 26 方向とした場合について、同一の 1 次元配列を用いて、形状生成を実行した。その結果、Fig. 5-3 に示されるように、6 方向とした場合には要素発生が停止した形状についても、26 方向とすることにより要素発生が持続され、多様な形状が生成されることが確認された。

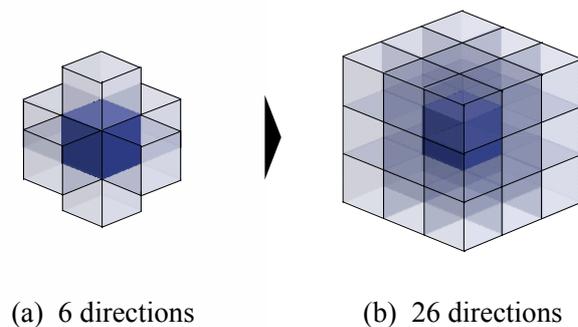


Fig. 5-1 Expansion of directions of element generation

5.3.3 生成形状の多様性および形状生成の効率性解析

第3章で定義した多様性指標 D を用いて、生成された形状の多様性について要素発生方向を6方向とした場合と26方向とした場合との比較を行った。その結果、Fig. 5-4に示されるように、要素発生方向を26方向とすることにより、6方向の場合と比較して、多様な形状が生成されることが確認された。これは、要素発生方向を26方向とすることで、複雑な形状表現が可能となり脚部を有する形状や斜め方向に成長した形状などのバリエーションの多い形状生成が可能となったためであると考えられる。

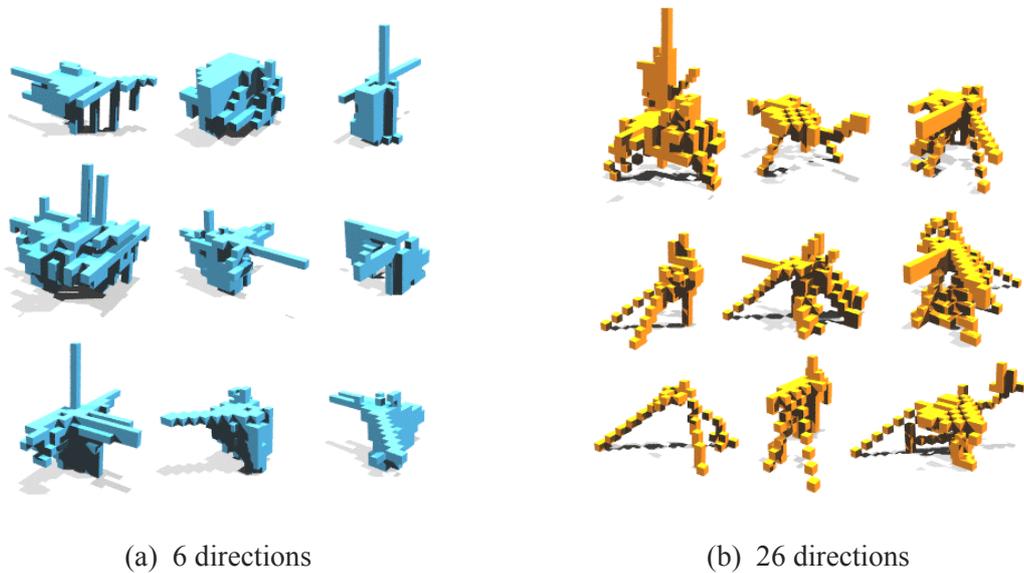


Fig. 5-2 Comparison of generated chair forms

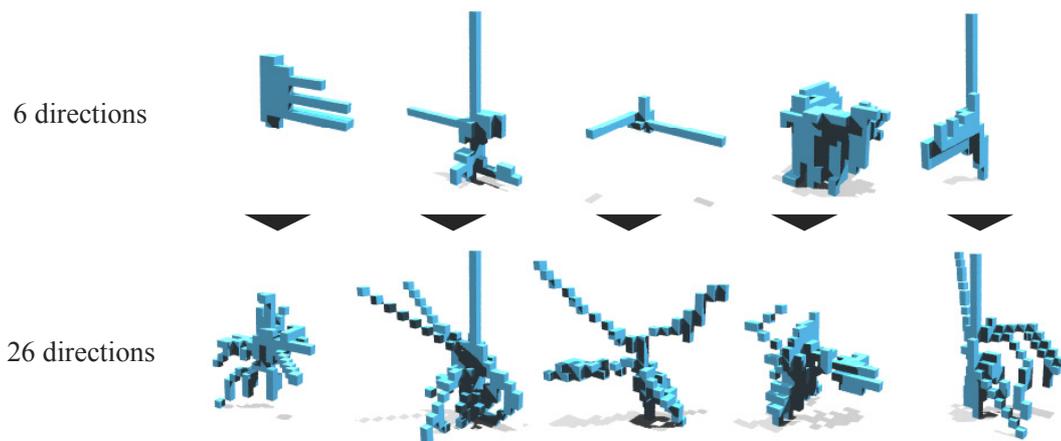


Fig. 5-3 Comparison of generated forms with the same one-dimensional arrangement

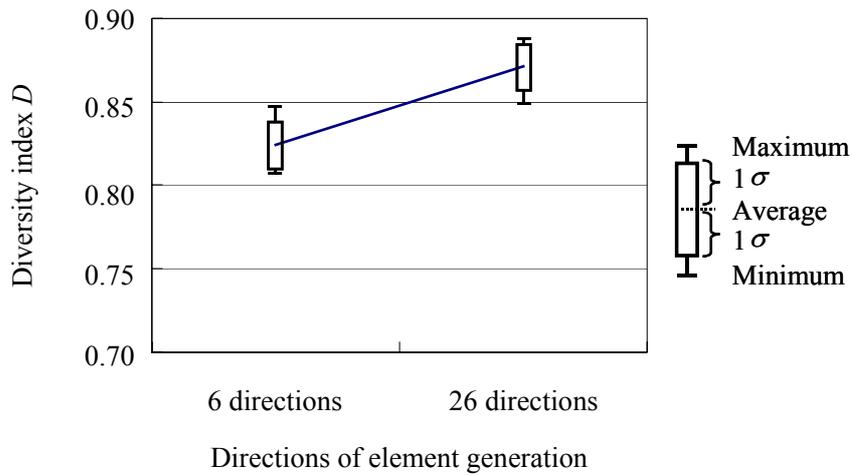


Fig. 5-4 Comparison of diversity

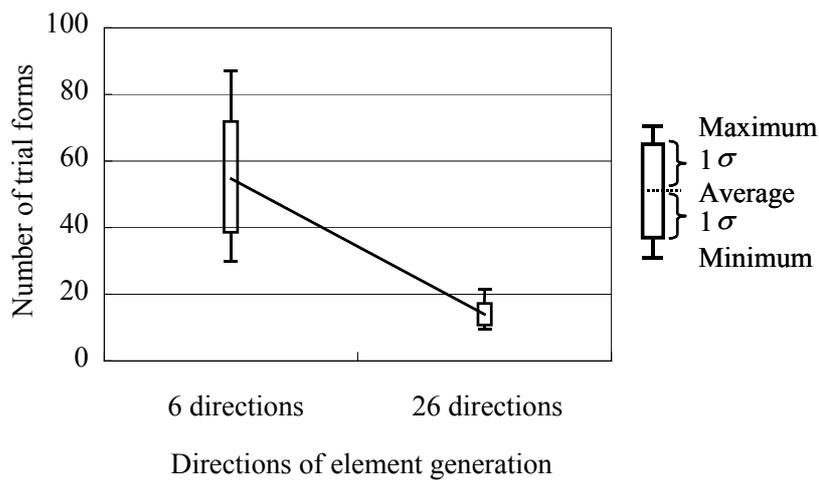


Fig. 5-5 Comparison of efficiency

つぎに、試行形状数を用いて、形状生成の効率性について要素発生方向を6方向とした場合と26方向とした場合との比較を行った。その結果、Fig. 5-5に示されるように、要素発生方向を26方向とすることにより、6方向の場合と比較して、効率よく形状が生成されることが確認された。これは、要素発生方向を26方向とした場合には、1つの要素から発生することのできるセル数が増加し、要素の発生する確率が上昇したことにより、評価基準を満足した設計案の出現確率も上昇したためと考えられる。

以上より、要素発生方向を26方向に拡張することにより、多様な形状が効率よく生成されることが示された。

5.4 最適化過程における形状表現方法の拡張

5.4.1 要素補間方法の提案

発現過程においては、要素発生方向を拡張することにより、生成される形状の自由度が増し、多様な形状を効率よく生成することが可能となった。しかしながら、Fig. 5-6 に示されるように、要素どうしが点や線で接触する部分を含む形状も多数生成された。このような点接触や線接触を含む形状は、最適化過程において、力学条件により最適化を行う際に、有限要素解析ができない。このような問題に対し、本研究においては、ヤング率を非常に低く設定した要素（以下、弱要素と称する）を点接触や線接触している部分に補間することとした。

吉村らは、力を伝達する媒体として弱要素を用いている[吉村 94]。また、大河内らは、要素の集合により近似した形状についての有限要素解析の際に生じる可能性のある不安定な状態を防ぐために弱要素を用いている[大河内 95]。これらのことから、弱要素の補間により、要素の点および線接触の部分において強度の増加を抑えつつ、力を伝達することが可能となり、解析の際の不安定な状態を防ぐことが可能になると考えられる。

以上より、本研究においては、Fig. 5-7 に示されるように、点接触や線接触している部分に最小限の弱要素を付加することにより、発現過程において生成された形状の力学的特徴を大きく変えることなく形状の最適化が行えると考えた。ここで、これまでの要素を新たに導入した弱要素と区別するために実要素と呼ぶこととする。

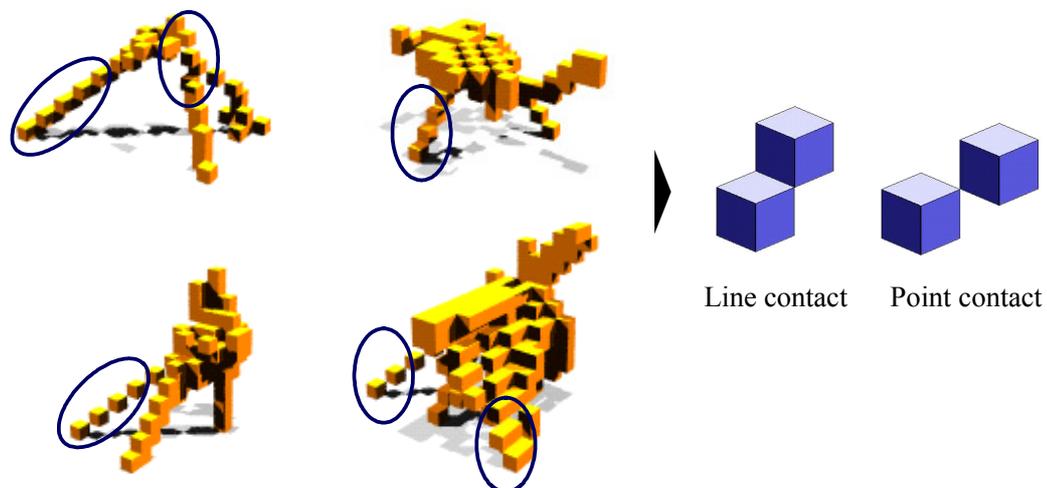


Fig. 5-6 Generated chair forms with point contact and line contact

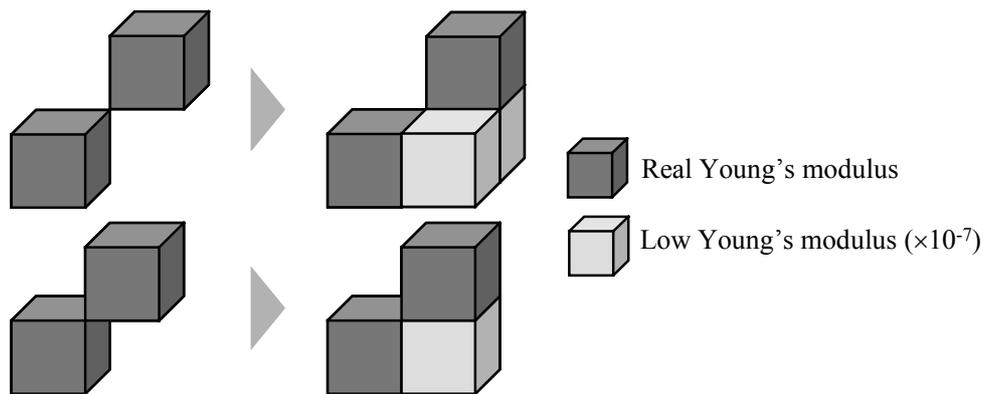


Fig. 5-7 Addition of the low Young's modulus elements

従来のシステムでは、強度増加変換において最大の相当応力を生じている節点の周りに要素を付加し、重量減少変換において最小の相当応力を生じている要素の除去を行う。それに対し、形状表現方法を拡張したシステムにおいては、弱要素による変換形状への影響を少なくするために、強度増加変換および重量減少変換において変換する要素は実要素のみとする。また、弱要素による補間および弱要素の除去は、変換のたびにを行う。以上より、形状表現方法を拡張したシステムにおいて、形状の力学的特徴を大きく変えることなく最適化を行うことが可能となる。

5.4.2 最適化過程における多様解導出システムの実行

提案した要素補間方法を用いて、最適化過程のシステムを実行した。その結果、Fig. 5-8 に示されるように、要素発生方向を 26 方向に拡張した発現過程のシステムにより生成された形状が、その特徴を保持したまま最適化された。

また、形状表現方法を拡張した多様解導出システムの有効性について解析を行うために、拡張したシステムにより生成された形状と従来の面接触のみの形状表現方法により生成された形状との比較を行った。その結果、Fig. 5-9 に示されるように、従来の形状表現方法では生成することが難しかった脚部を有する形状など、表現の自由度が増した形状が多く生成され、形状表現方法を拡張した多様解導出システムの有効性が示唆された。

5.4.3 生成形状の多様性解析

形状表現方法を拡張したシステムの有効性を定量的に解析するために、多様性指標 D を用いて、多様性解析を行った。その結果、Fig. 5-10 に示されるように、形状表現方法を拡張したシステムにより生成された形状の多様性は、発現過程において生成された形状と比較して、低下する傾向が確認された。これは、点接触や線接触している部分には応力集中が生じるため、最適化過程の強度増加変換により多くの実要素が付加され、塊状の形状が生成される傾向のためであると考えられる。しかしながら、形状表現方法を拡張したシステムにおいて生成された形状の多様性指標 D の値は、発現過程および最適化過程の双方において、従来のシステムと比較して高い値を示すことが確認された。

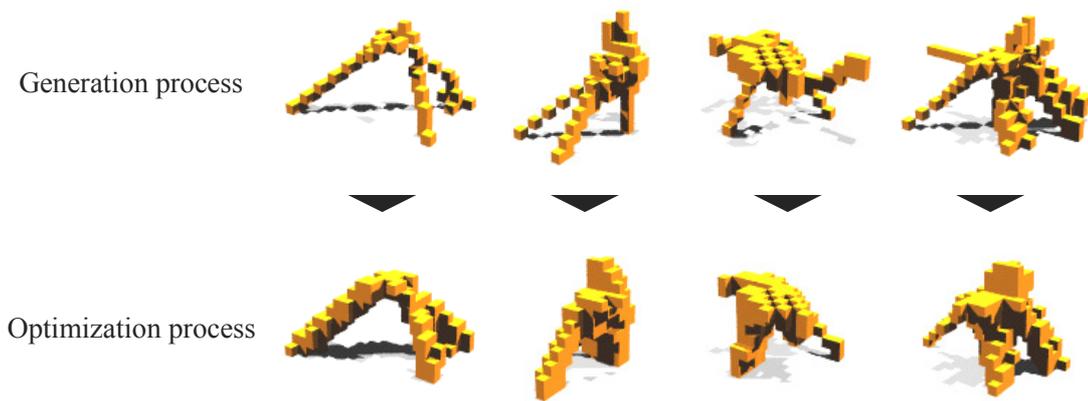


Fig. 5-8 Examples of chair forms generated by expanded optimization system

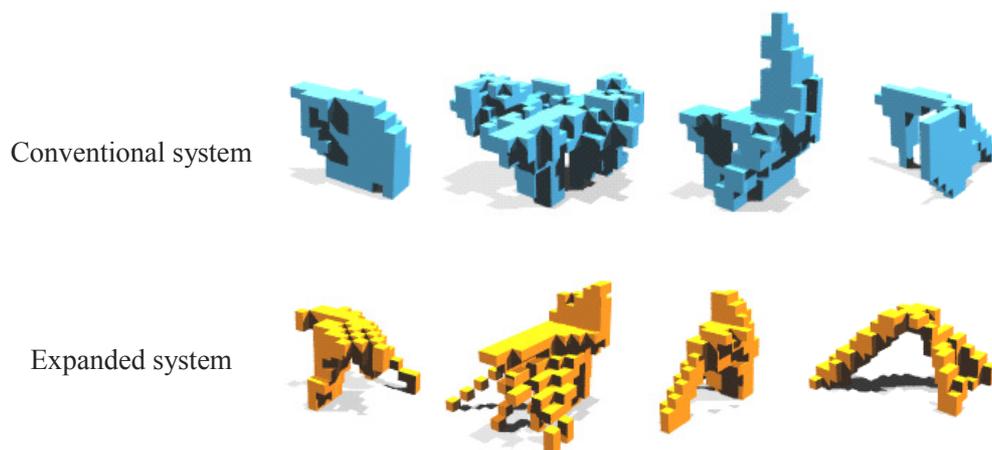


Fig. 5-9 Comparison of conventional system with expanded system

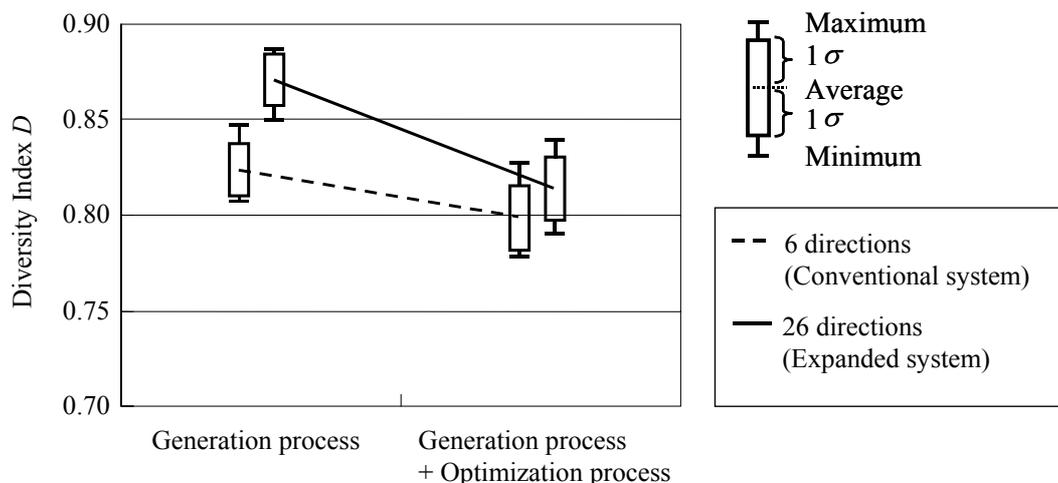


Fig. 5-10 Diversity analysis

5.5 意匠と構造の協調設計問題への応用

第 4 章までで示した多様解導出システムを椅子の意匠と構造の協調設計問題へ適用した。本システムの両設計の協調設計問題への適用可能性を検証するために、本システムを使用したとき(以下、本システムの使用時と称す)と従来の発想のみ(以下、本システムの不使用時と称す)で得られる解の多様性を解析した。

5.5.1 多様解導出システムの不使用時における意匠設計

(1) 設計案の作成方法

工業デザインを専攻する学生 19 名に対し、本システムを使用せずに椅子形状の設計案を 10 個作成させた。

(2) 設計案の作成条件

椅子の設計案を作成させるにあたり、設計目標、設計空間、および材料特性を設定した。設計目標は、第 4 章において実行した最適化過程における目標と同様に設定し、「接地していること」、「座面があること」、「安定していること」、および「強度を満たしていること」という設計条件とともに「極力軽くすること」という設計目標を与えた。また、設計空間は、第 3 章における Fig. 3-17 と同様に設定した。なお、材料は、軽量、高比強度、高比剛性という特徴を有することから、近年人工物設計における優れた材料として注目されているマグネシウムを想定して設計案を作成させた。

5.5.2 多様解導出システムの使用時における意匠設計

(1) 設計案の作成方法

5.5.1 項とは別の工業デザインを専攻する学生 19 名に対し、本システムにより生成された形状を 30 個提示し、提示した生成形状をもとに椅子形状の設計案を 10 個作成させた。

(2) 設計案の作成条件

まず、本システムを実行することにより、提示する形状を生成する。その際に、形状生成空間、材料特性、および荷重条件を設定した。形状生成空間と荷重条件は、第 4 章と同様の設定とした。また、材料は、マグネシウムを想定し、ヤング率 44.7GPa、ポアソン比 0.35、質量密度 $1.74 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、許容応力 41MPa と設定した。本システムにより生成された形状を Fig. 5-11 に示す。

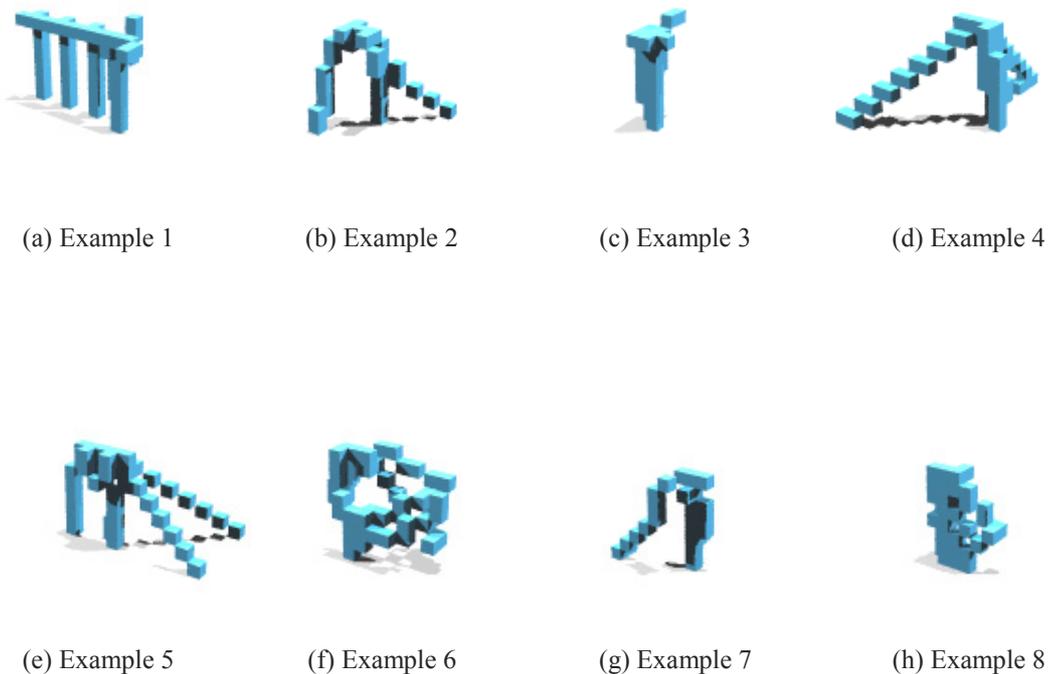


Fig. 5-11 Examples of generated chair forms (from example1 to example8)

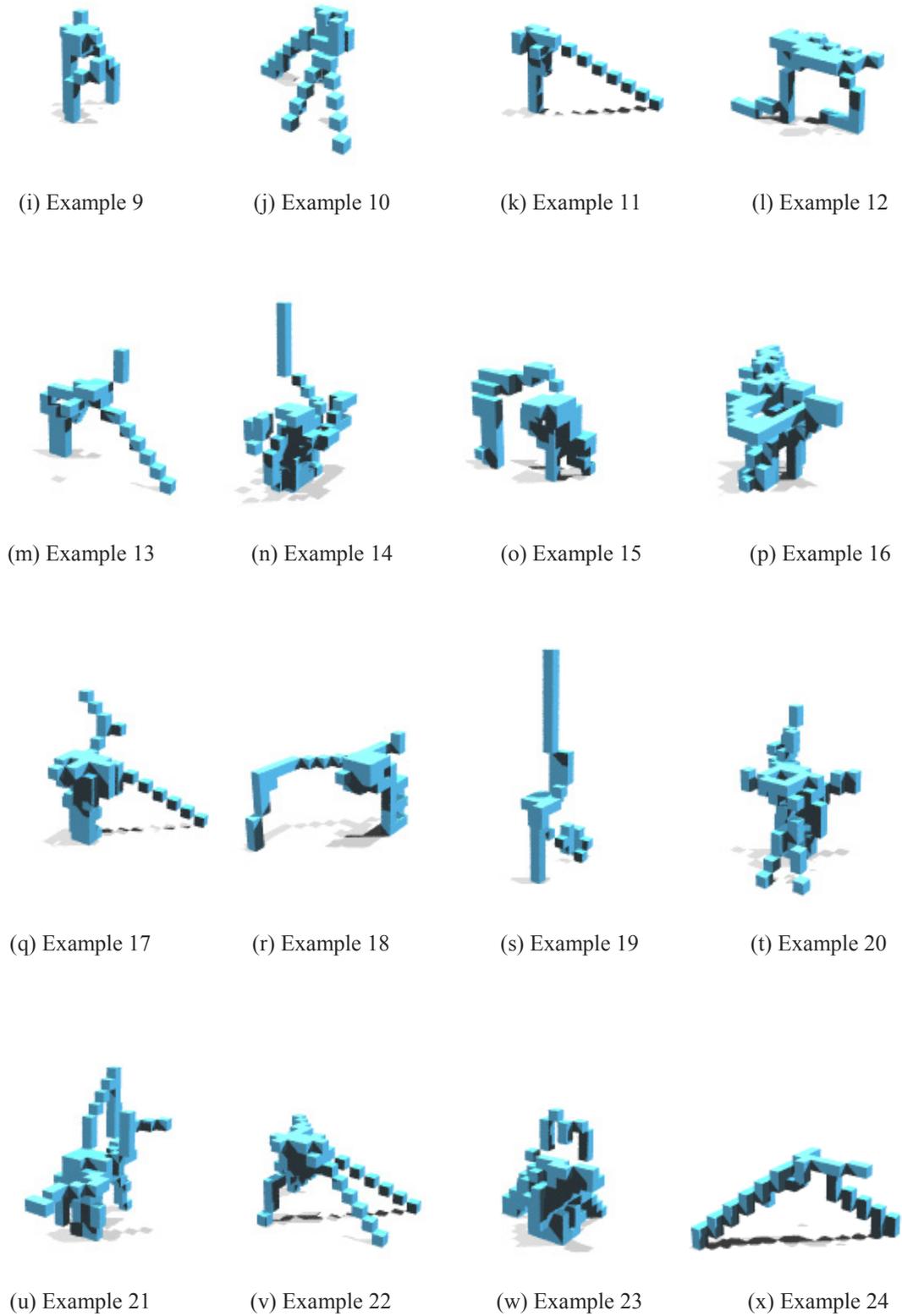


Fig. 5-11 Examples of generated chair forms (from example9 to example24)

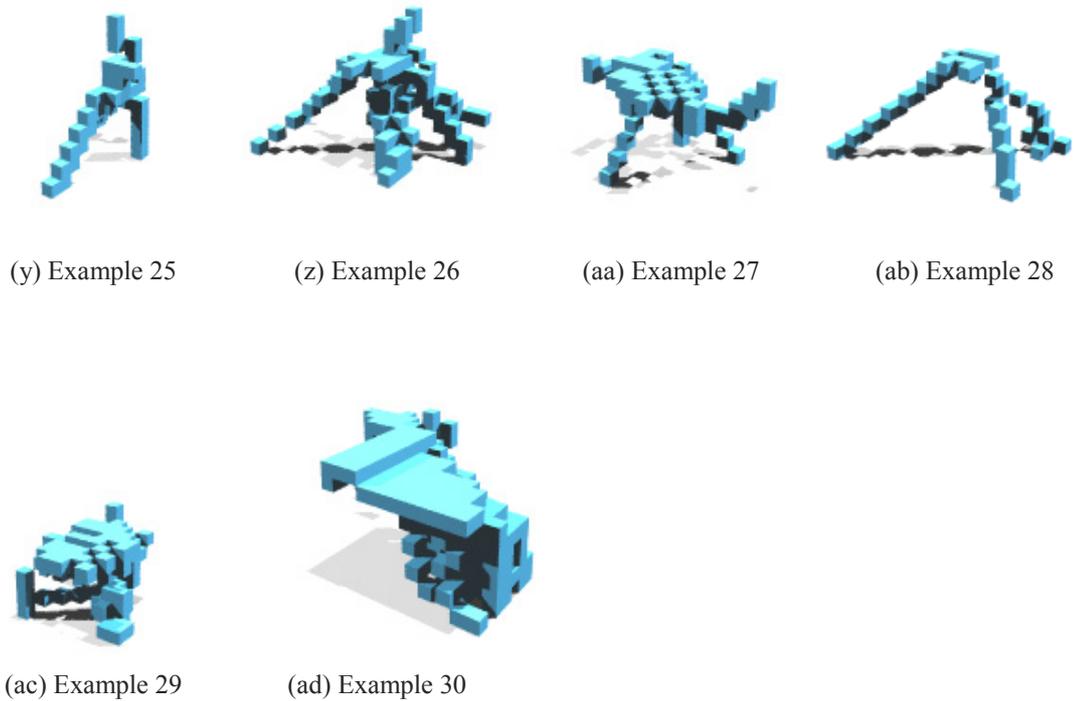


Fig. 5-11 Examples of generated chair forms (from example25 to example30)

5.6 結果および考察

5.6.1 導出された設計案

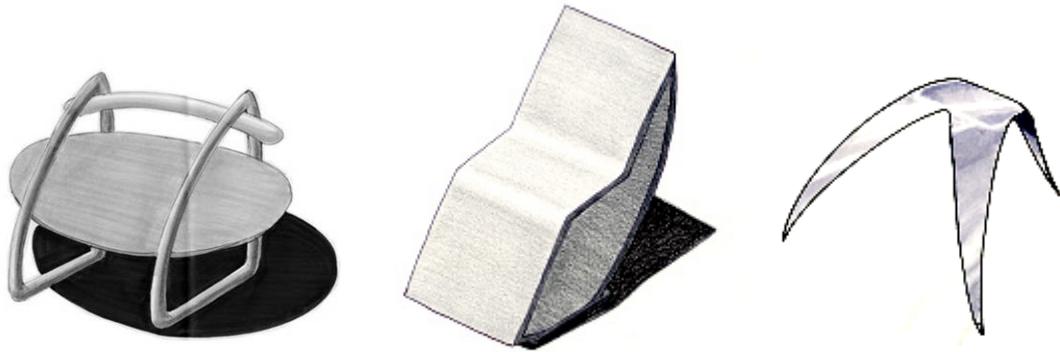
本システムの不使用时において得られた椅子形状の設計案の例を Fig. 5-12 に示し、本システムの使用時において得られた椅子形状の設計案の例を Fig. 5-13 に示す。本システムの不使用时における設計案には、対称な形状や面で構成された形状が多い傾向が確認されることに対し、本システムの使用時における設計案には、やや体積が小さく非対称や塊状の形状も含まれていることが確認された。これらのことは、本システムの使用が、従来の椅子の対称性やマグネシウムの板材という既成概念を打破する方法として効果的であるとともに、意匠設計と構造設計の満足解導出にもつながっていることを示唆している。詳細は 5.6.2 項にて、設計案の多様性の観点から解析を行う。



(a) Example 1

(b) Example 2

(c) Example 3



(d) Example 4

(e) Example 5

(f) Example 6



(g) Example 7

(h) Example 8

(i) Example 9

Fig. 5-12 Examples of the design ideas without referencing anything

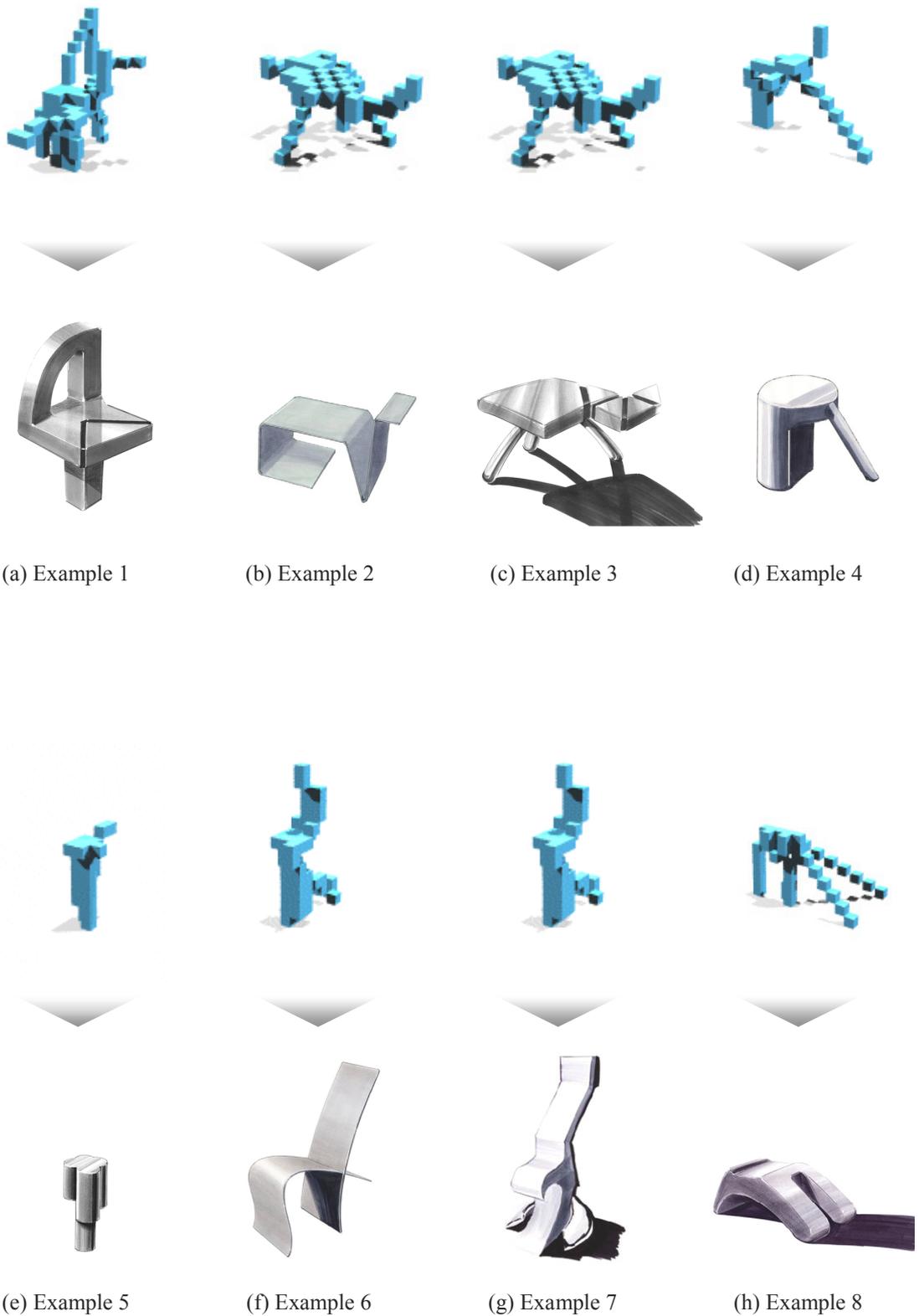


Fig. 5-13 Examples of the design ideas with referencing forms obtained by the system
(from example1 to example8)

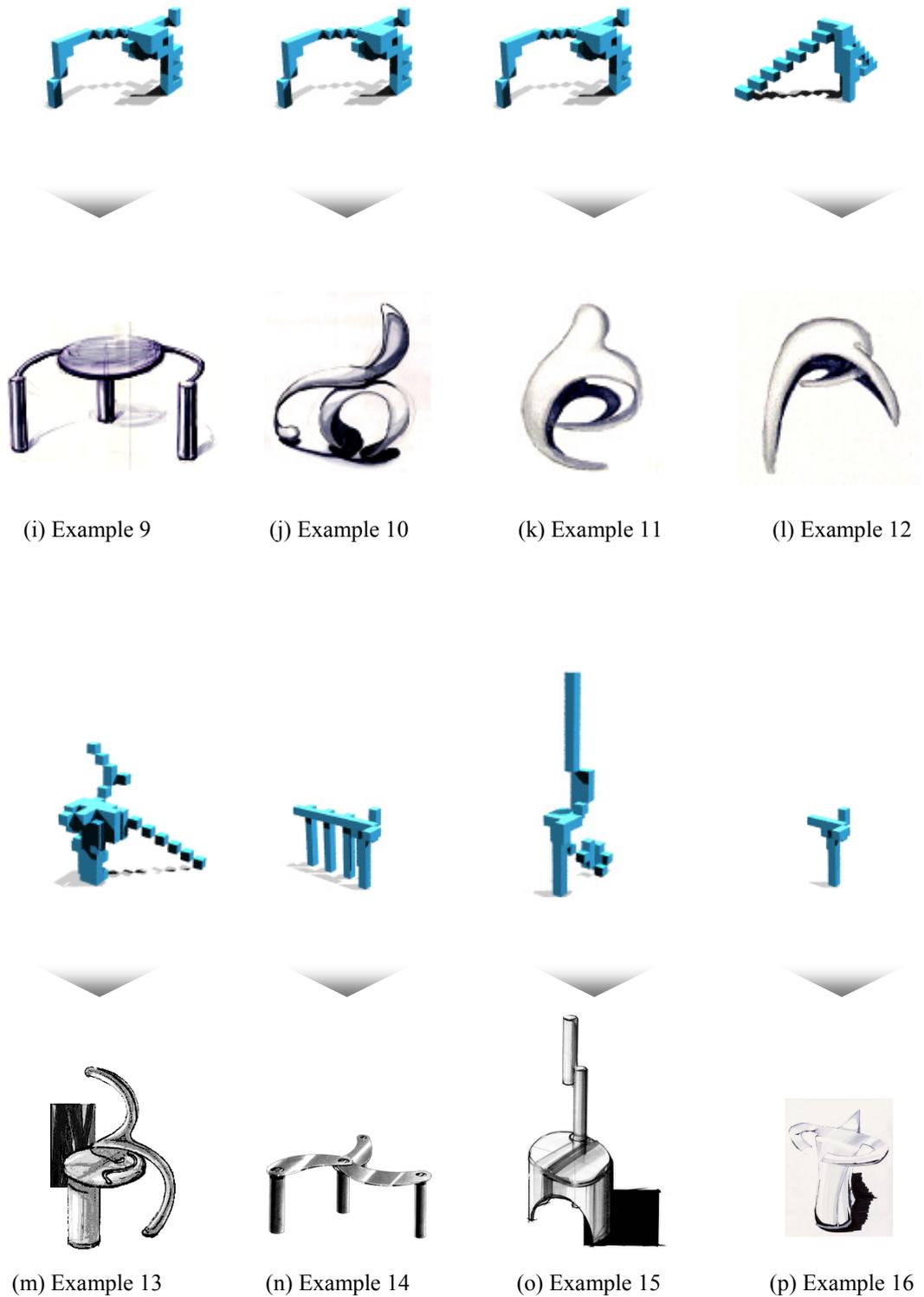


Fig. 5-13 Examples of the design ideas with referencing forms obtained by the system
(from example9 to example16)

5.6.2 解の多様性解析

ここでは、第4章までで示した多様解導出システムの意匠設計への適用可能性について検証する。そのために、作成された設計案の多様性について認知実験を用いて解析を行う。本実験においては、本システムの使用時と不使用時に得られた各設計案20個の合計40個をディスプレイ上にランダムな順番で表示させた。これを被験者に観察させ、Table 5-1に示す23項目について3段階SD法(semantic differential method)[Osgood57, 岩下83]により官能評価を行わせた。そして、得られた結果に対する多様性解析を行うにあたって、まず、類似性の解析を行った。本研究においては、対象間の類似性を把握しやすいという特徴を有する多次元尺度構成法[林76]を用いることにより、設計案に対する評価を2次元座標平面上に布置し、設計案間の類似性を解析することとした。

Table 5-1 Evaluation items

Beautiful (美しい)	/	Not beautiful (美しくない)	Hard (硬そうな)	/	Soft (柔らかそうな)
Refined (上品な)	/	Crude (下品な)	Heavy (重そうな)	/	Light (軽そうな)
Individual (個性的な)	/	Not individual (個性的でない)	Slender (細長い)	/	Fat (太く短い)
New (目新しい)	/	Common (見慣れた)	Stable (安定な)	/	Unstable (不安定な)
Functional (機能的な)	/	Not functional (機能的でない)	Tense (緊張した)	/	Lax (弛緩した)
Symmetric (対称な)	/	Asymmetric (非対称な)	Gaudy (派手な)	/	Restrained (地味な)
Dynamic (動的な)	/	Static (静的な)	Warm (暖かい)	/	Cold (冷たい)
Well proportioned (プロポーションのよい)	/	Poorly proportioned (プロポーションの悪い)	Strong (強い)	/	Weak (弱い)
Orderly (秩序のある)	/	Disorderly (秩序のない)	3-dimensional (立体的な)	/	2-dimensional (平面的な)
Voluminous (ボリュームのある)	/	Not voluminous (ボリュームのない)	Continuous (連続な)	/	Discontinuous (不連続な)
Curvilinear (曲線的な)	/	Rectilinear (直線的な)	Fine (細かい)	/	Coarse (粗い)
Complex (複雑な)	/	Simple (単純な)			

はじめに、各設計案に対する評価間の距離を平方ユークリッド距離により導出した。この距離が各設計案間の類似性を表すことになる。2つの設計案間の距離が小さいほどそれらは類似していることになり、距離が大きいほどそれらは相違していることになる。つぎに、得られた平方ユークリッド距離を用いて、多次元尺度構成法により各設計案に対する評価を2次元座標平面上に布置した。この平面上において、各点は設計案に対する評価を表す。

多次元尺度構成法を用いて、各設計案の評価を2次元座標平面上に布置した。その結果を Fig. 5-14 に示す。図中に示した楕円は、本システムの不使用時、使用時における信頼限界 90%の確率楕円を表す。Fig. 5-14 より、本システムにより生成された多様な形

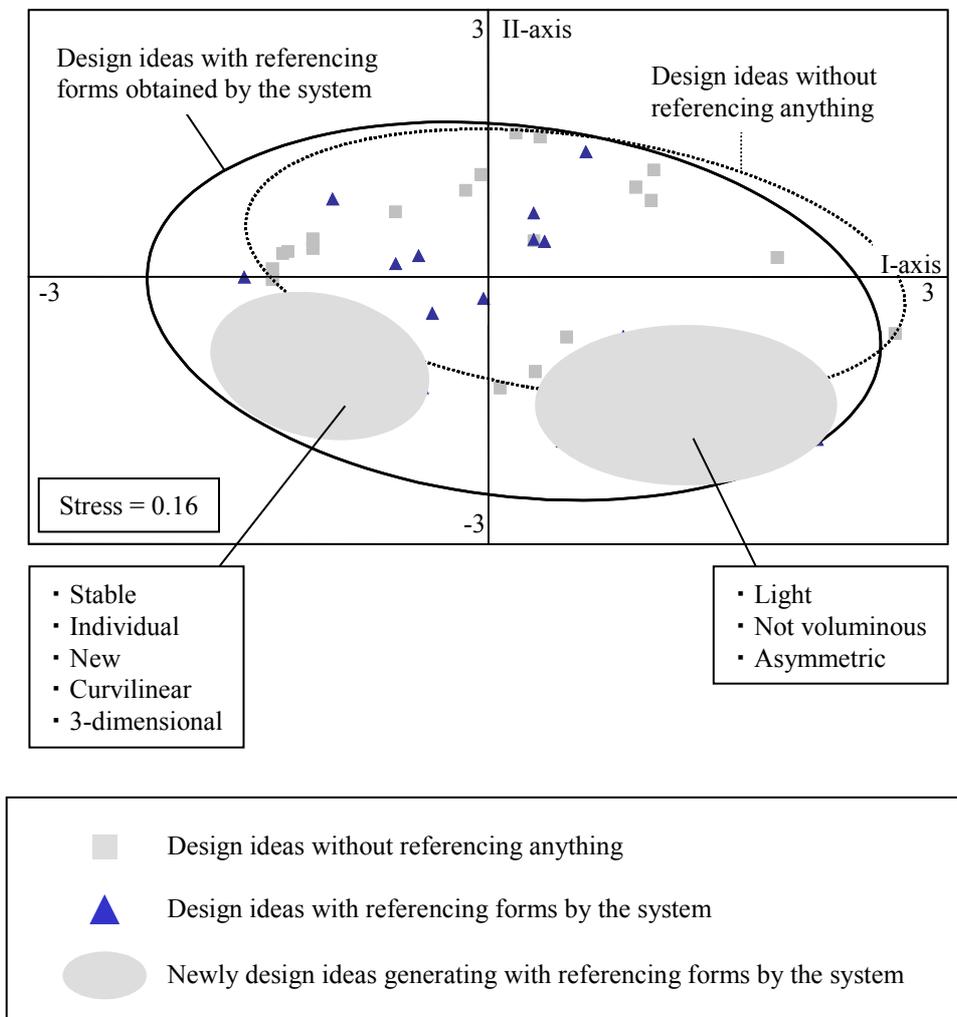


Fig. 5-14 Diversity analysis using multi-dimensional scaling

状を提示することにより、本システムの不使用时における設計案に近い評価を有する設計案に加え、異なる評価を有する設計案も新たに多数得られることが確認された。ここで、本システムを使用することにより新たに得られた設計案に関する評価と、すべての設計案に関する評価との差について、有意水準 0.05 の仮説検定を行った。その結果、「個性的な」、「目新しい」、「曲線的な」、「立体的な」、「非対称な」という意匠面に関わる項目とともに、「安定な」、「軽そうな」、「ボリュームのない」という構造面に関わる項目に対して有意確率 $p < 0.05$ であり、有意差が確認された。これより、新たに得られた設計案には、意匠面と構造面に関わる項目に対して高い評価を有することが確認された。

つぎに、各設計案に対する評価間の平方ユークリッド距離の平均値、および標準偏差を用いて作成された設計案の多様性について解析を行った。その結果を Fig. 5-15 に示す。ここで、本システムの不使用时と使用時における各設計案間の距離の分散について有意水準 0.05 の仮説検定を行った。その結果、有意確率 $p < 0.05$ であり、有意差が確認された。また、本システムの不使用时と比較して、使用時における距離の平均値が高い値を示したことから、本システムを使用して多様な形状を提示することにより、大域的に解探索が行われる可能性が示された。

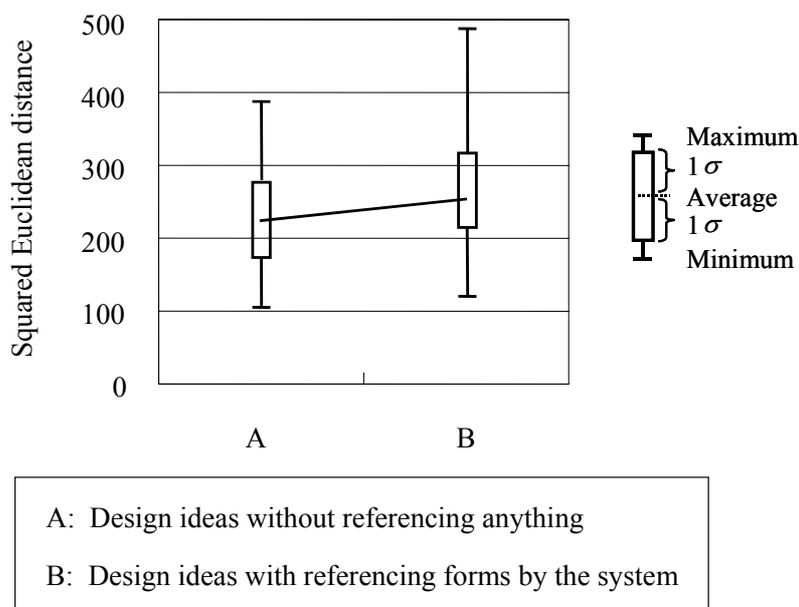


Fig. 5-15 Diversity analysis using squared Euclidean distance

これらのことから、本システムで生成された、設計目標や設計条件などを満足する形状を提示することにより、本システムの不使用時では得られなかった意匠面と構造面に優れた多様解が新たに得られることが示された。

5.6.3 設計案の形状特徴におよぼす本システムの影響解析

本項においては、本システムが設計案の形状特徴におよぼす影響について、意匠設計と構造設計の満足解導出の観点から解析を行う。

ここで、作成された設計案の形状特徴について、認知実験で得られた形状特徴に関する評価のうち、意匠の新奇性に関わる評価項目である「目新しい(New)－見慣れた(Common)」に関する評価と、構造の軽量化に関わる評価項目である「軽そうな(Light)－重そうな(Heavy)」に関する評価をそれぞれ縦軸、横軸に布置した。その結果、Fig. 5-16

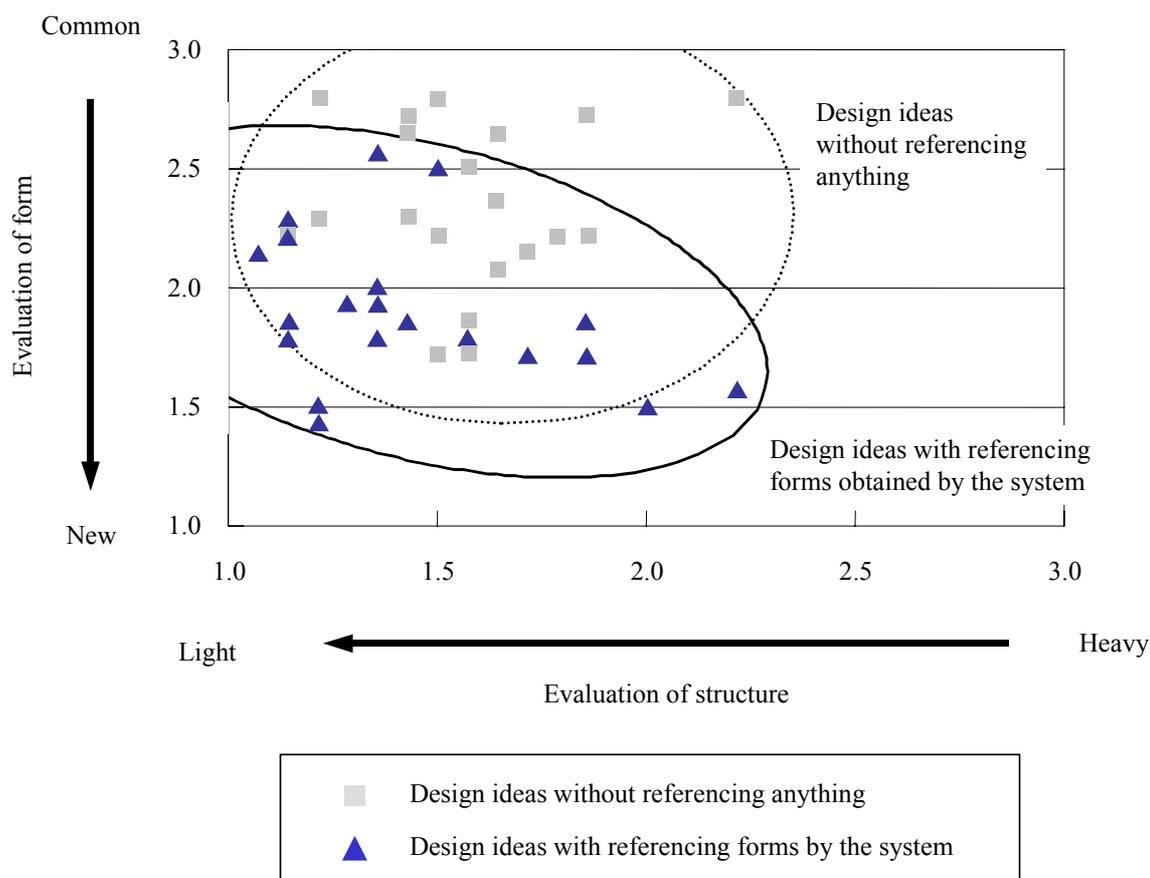


Fig. 5-16 Evaluation of form and structure (new and light)

に示すように、本システムの使用時においては、不使用時と比較して、「目新しい」と「軽そうな」の双方の項目に対して高い評価を有する設計案が得られることが確認された。以上より、本システムの意匠設計と構造設計の満足解導出に対する可能性が示唆された。

5.7 結言

本章においては、第3章および第4章で示した多様解導出システムを意匠と構造の協調設計問題へ適用した。ここで、本システムから導出された解を設計者に提示させた場合と提示させなかった場合に得られる設計案に関して、多次元尺度構成法を用いて多様性解析を行った。本システムの使用時と不使用時における各設計案間の分散について有意水準 0.05 の仮説検定を行った結果、有意差が確認された。また、本システムの使用時の方が不使用時よりも高い値を示したことから、本システムの使用により、大域的に解探索が行われ、本システムの不使用時と近い評価を有する設計案に加え、異なる評価を有する設計案が新たに多数得られることが示された。

さらに、本システムを使用することにより新たに得られた設計案に関する評価と、すべての設計案に関する評価との差について、有意水準 0.05 の仮説検定を行った結果、「個性的な」、「目新しい」、「曲線的な」、「立体的な」、「非対称な」という意匠面に関わる項目とともに、「安定な」、「軽そうな」、「ボリュームのない」という構造面に関わる項目に対して有意差が確認された。これより、新たに得られた設計案には、意匠面と構造面に関わる項目に対して高い評価を有することが確認された。これにより、本システムの意匠設計と構造設計の双方への有用性を示すとともに、両設計間の協調設計支援システムとしての可能性も示唆した。

第6章

結論

本研究においては、従来の最適化法では難しかった設計上流過程に適用可能な多様解を導出する新たな設計方法を提案した。第2章では、創発に基づく設計方法の基本構想について述べ、第3章および第4章では、提案した設計方法を人工物設計へ応用するために、3次元形状を生成する多様解導出システムの具体的な方法について述べた。さらに、第5章では、多様解導出システムを意匠と構造の協調設計問題へ適用し、その応用可能性について述べた。以下に本研究を通じて得られた成果をまとめる。

(1) 創発に基づく設計方法の提案

設計過程と創発過程の類似性に着目し、創発のボトムアップ過程に相当する発現過程およびトップダウン過程に相当する最適化過程の2つの過程を有する設計方法を提案した。さらに、本方法に基づく3次元形状を生成する多様解導出システムの基本構造を示した。以下に示す発現過程および最適化過程の2つの過程を経ることにより、大域的な解探索による多様解導出を可能とした。

- ・ 発現過程においては、特定の目的関数を設定せずに自己組織的に形状を生成する。そして、設定した低い評価基準を満足した場合に、設計解候補として抽出する。
- ・ 最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の力学特性を有限要素解析により算出し、算出された評価をもとに形状変換を行う。そして、設定した制約条件を満足した場合に設計解として抽出する。

(2) 多様解導出システムにおける形状生成方法の提案

ボクセル表現およびセルラ・オートマトンを用いた形状生成方法を提案した。その際、生物の形態多様性を生起させる発生特性の 1 つである細胞増殖の活性化を促す誘導と細胞増殖の抑制を促す頂部支配を応用した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 誘導の応用は塊状の形状生成を、一方、頂部支配の応用は平板状の形状生成を促すことが明らかとなった。この知見をもとに、本方法においては、その両者を合成することにより、骨組状の多様な形状を生成することを可能とした。
- ・ 提案した形状生成方法を椅子の形状設計へ適用した結果、初期形状を必要とせずに、単一要素から自己組織的に多様な設計解候補を、効率的に生成することを可能とした。
- ・ 大域的に多様解を導出するために、スキーマ破壊の遺伝的アルゴリズムを導入した。その結果、解探索アルゴリズムを用いない場合と同等の多様性を保持しながら効率的な解導出を可能とした。

(3) 構造設計問題における多様解導出システムの提案

多数の設計変数を有する構造設計問題に対しても適用可能な最適性規準法を用いた最適化過程を導入した。また、強度増加変換と重量減少変換の 2 つの形状変換方法を設定した。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 発現過程においては、単一要素から自己組織的に多様な設計解候補が導出された。一方、最適化過程においては、発現過程において導出された設計解候補の特徴を保持しながら最適化されることが確認された。発現過程および最適化過程の 2 つの過程を経た解の多様性解析を行った結果、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確認された。
- ・ 発現過程および最適化過程の 2 つの過程を有する本システムと従来の最適化法により導出される解の比較を行った。その結果、本システムにより導出された解は、従来の最適化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、両過程を経ることにより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が示された。

- ・ 本システムにより導出された多様解および従来の最適化法により導出された唯一解を重量とひずみエネルギーの総和との関係について解析した。その結果、設計目標である軽量化に対し高い評価を有した多様解のなかに、設計条件として考慮していないひずみエネルギーの総和に対しても、従来の最適化法により導出された唯一解と比較して高い評価を有する設計解が含まれることが確認された。

以上より、大域的に多様解を導出することが可能な本システムの適用可能性として、設計条件や設計目標が新たに加わるような設計問題への適用や設計目標を定量的に表すことが難しい設計問題への適用可能性を示唆した。

(4) 多様解導出システムの意匠と構造の協調設計問題への応用

本システムから導出された解を設計者に提示させた場合と提示させなかった場合に得られる設計案に関して、多次元尺度構成法を用いて多様性解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 本システムの使用時と不使用時における各設計案間の分散について有意水準 0.05 の仮説検定を行った結果、有意差が確認された。本システムの使用時の方が不使用時よりも高い値を示したことから、本システムの使用により、大域的に解探索が行われ、本システムの不使用時と近い評価を有する設計案に加え、異なる評価を有する設計案が新たに多数得られることが示された。
- ・ 本システムを使用することにより新たに得られた設計案に関する評価と、すべての設計案に関する評価との差について、有意水準 0.05 の仮説検定を行った結果、「個性的な」、「目新しい」、「曲線的な」、「立体的な」、「非対称な」という意匠面に関わる項目とともに、「安定な」、「軽そうな」、「ボリュームのない」という構造面に関わる項目に対して有意差が確認された。

以上より、新たに得られた設計案には、意匠面と構造面に関わる項目に対して高い評価を有することが確認され、本システムの意匠設計と構造設計の双方への有用性を示すとともに、両設計間の協調設計支援システムとしての可能性も示唆した。

謝辞

本研究をご指導いただきました慶應義塾大学理工学部機械工学科 松岡由幸教授に心より感謝の意を表します。松岡教授には、研究に関するあらゆる事柄に対して親身かつ細やかなご指導を頂いたばかりでなく、研究者・教育者としてあるべき姿勢についてもご指導を賜りました。

本論文の執筆に際し、多くの貴重なご指導、ご助言をいただきました慶應義塾大学理工学部機械工学科 山崎信寿教授、同大理工学部情報工学科 萩原将文教授、同大理工学部システムデザイン工学科 青山英樹教授、ならびに同大理工学部機械工学科 小茂鳥潤助教授に心より御礼申し上げます。

本研究を筆者が携わる以前から研究の方向性を固めるうえでの基礎を築いて下さった塚田有人氏(現 株式会社日立製作所デザイン本部)をはじめとする研究室の諸先輩方には感謝申し上げます。三笠晋氏(現 パナソニックモバイルコミュニケーションズ株式会社)、澤田憲茂氏には、研究室に入った当初から研究の進め方に対して細やかなご指導をいただきました。改めて感謝の意を表します。

齋藤宏幸氏(現 キヤノン株式会社)とは、最適化法に関する議論を交わすなかで、本研究の方向性を固めることができました。また、最適化のプログラム作成に関しても協力をいただきました。藤井健史氏(現 株式会社相鉄ビルマネジメント)には、本システムの意匠設計への適用に関する実験に関して協力をいただきました。彼らは、慶應義塾大学卒業後においても、筆者の研究について、いつも気にかけて励まし続けてくれました。彼らの多大なる協力なしには、本研究をまとめることはできませんでした。改めて感謝の意を表します。

宮田悟志氏(エンジニアス・ジャパン(株))には、本設計方法のシステム化に向けた貴重なご意見をいただきました。また、荻野直樹氏(現 防衛庁)には、本システムの数値解析において協力をいただきました。そして、祝原礼司氏(慶應義塾大学大学院総合デザイン工学専攻修士課程 2 年)とは、本システムの適用可能性について深く議論を交わすことにより、研究の内容を深めることができました。ここに感謝の意を表します。さらに、本システムを意匠設計へ適用する際に、多くのデザインスケッチをしていただいた氏家良樹氏(慶應義塾大学大学院総合デザイン工学専攻後期博士課程 3 年)、篠崎直人氏(現 トップラン・フォームズ株式会社)、千葉大学工学部デザイン工学科の学生の方々、そして認知実験の被験者を快く引き受けてくださった慶應義塾大学理工学部の学生の皆様には、心より感謝の意を表します。

研究室同期の氏家良樹氏とは学部 2 年から博士 3 年までの 8 年間の長い付き合いですが、お互い切磋琢磨して研究を進めてまいりました。公私ともに充実した時間を過ごせたことを心から感謝致します。さらに、慶應義塾での研究生活を共に過ごした慶應義塾大学理工学部機械工学科松岡研究室の諸先輩方、同輩下川真人氏(現 パラマウントベッド株式会社)、後輩諸君に深く感謝致します。

筆者は、博士 2 年より慶應義塾大学理工学部機械工学科助手を務めさせていただきました。学生と教員を両立させるうえで、多くのご配慮を賜りました慶應義塾大学理工学部機械工学科の先生方、事務の方々には心より感謝致します。特に、助手の先輩である宮本泰行氏には、いつも筆者を励まし続けていただき、公私ともに大変お世話になりました。心から感謝致します。また、竹村研治郎氏(現 東京工業大学精密工学研究所助手)、大槻真嗣氏(現 慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科助手)には、筆者をいつも温かく励ましていただきました。ここに感謝の意を表します。そして、筆者を常に励まし続けてくれた多くの友人にお礼申し上げます。

経済的な援助をいただいた日本育英会(現 独立行政法人 日本学生支援機構)、小泉信三記念大学院特別奨学金、田村淳記念大学院特別奨学金、慶應義塾先端科学技術研究センター研究助成金には感謝致します。また、国際会議参加の

謝辞

渡航費の援助をしていただいた財団法人慶應工学会，小泉基金に感謝の意を表します．

最後に，本研究を遂行するにあたり，筆者を献身的に支えてくれた家族に心より感謝致します．筆者の不規則な研究生活に対しても理解を示し，常に温かく見守ってくれた父 井上正義，そして，常に健康面に関して細やかな気配りをしてくれ，研究に没頭できる環境を与えてくれた母 井上順子，さらに，いつも温かい言葉で筆者を励まし続けてくれた姉 岩谷まどか，義兄 岩谷賢伸，姪 岩谷まりかに対して，改めて感謝の意を表したいと思います．

2005年2月

参考文献

- [赤木 90] 赤木新介, 藤田喜久雄, 設計エキスパートシステムの基礎と応用, コロナ社, pp.6-13, 1990.
- [赤木 91a] 赤木新介, 設計工学(下)－新しいコンピュータ応用設計, コロナ社, pp.54-58, 1991.
- [赤木 91b] 赤木新介, 設計工学(上)－新しいコンピュータ応用設計, コロナ社, pp.10-12, 1991.
- [赤木 92] 赤木新介, システム工学－エンジニアリングシステムの解析と計画, 共立出版, 1992.
- [Bennet85] Bennet, J. A., Structural Shape Optimization with Geometric Problem Description and Adaptive Mesh Refinement, Journal of AIAA, Vol.23, No.3, pp.458-464, 1985.
- [Bendsøe88] Bendsøe, M., Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, pp.197-224, 1988.
- [Burczynski85] Burczynski, T., The Boundary Element Formulation for Multiparameter Structure Shape Optimization, Appl. Math, Modelling, Vol.9, pp.195-200, 1985.
- [Burks58] Burks, A., The Collected Papers of Charles Sanders Peirce, Harvard University Press, Vol.VII-VIII, 1958.
- [Cao98] Cao, Y. J., A Cellular Automata Based Genetic Algorithm and its Application in Mechanical Design Optimisation, Proceeding of UKACC International Conference on Control, 1998.

- [Chakrabarti96] Chakrabarti, A. and Thomas P. B., An Approach to Functional Synthesis of Mechanical Design Concepts: Theory, Applications, and Emerging Research Issues, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol. 10, No. 4, pp. 313-331, 1996.
- [Cross93] Cross, N., Science and Design Methodology: A Review, *Research in Engineering Design*, Vol.5, No.2, pp.100-123, 1993.
- [Delorme99] Delorme, M., *An Introduction to Cellular Automata*, Kulwer Academic Press, 1999.
- [Diaz93] Diaz, A. R., On Optimum Truss Layout by a Homogenization Method, *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol.115, pp.367-373, 1993.
- [Dixon87] Dixon, J. R., On Research Methodology Towards a Scientific Theory of Engineering Design, *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing*, Vol. 1, No. 3, pp. 145-157, 1987.
- [藤田 02] 藤田喜久雄, 菊池慎市, 分散協調型設計支援システムのためのプロセスモデルと操作モデル, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol.68, No.666, pp.666-674, 2002.
- [Glegg69] Glegg, G.L., *The Design of Design*, Cambridge University Press, 1969.
- [Goel94] Goel, V., A Comparison of Design and Nondesign Problem Spaces, *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 53-72, 1994.
- [Hajiri99] Hajiri, K., A Model on the Explanation Word Meaning Using Autonomously Emerging Boundary Computation, *Proceedings of IEEE International Conf.Syst.Man.Cybern*, 1999.
- [Halloy00] Halloy, J., Modeling the Dynamics of Human Hair Cycle by a Follicular Automaton, *Proceedings of Natl. Acad. Sci. USA*, 2000.
- [Hartshorne31-35] Hartshorne, C. and Weiss, P., *The Collected Papers of Charles Sanders Peirce*, Harvard University Press, Vol. I-VI, 1931-35.
- [林 76] 林知己夫, 飽戸弘, 多次元尺度解析法, サイエンス社, 1976.
- [Hemp72] Hemp, W. S., *Optimum Structures*, Oxford, p.20, 1972.

- [井口 94] 井口征一, 感性情報処理, オーム社, 1994.
- [池上 93] 池上高志, 遺伝的アルゴリズムと創発的進化, 計測と制御, Vol. 32, No. 1, pp. 63-68, 1993.
- [伊能 95a] 伊能教夫, 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), 日本機械学会論文集(A 編), Vol.61, No.585, pp.1109-1114, 1995.
- [伊能 95b] 伊能教夫, 力学構造物を自己組織化するセル・オートマトン(ローカルルールによって生じるシステム全体の挙動), 日本機械学会論文集(A 編), Vol.61, No.586, pp.1416-1422, 1995.
- [伊能 97] 伊能教夫, 構造物の組織化, 機械の研究, pp.199-208, 1997.
- [Inou99] Inou, N., Uesugi, T., Todoroki, K., and Ujihashi, S., Self-Organization of Topological Structures by a Cellular Automaton, Synthesis in Bio Solid Mechanics, Kluwer Academic Publishers, pp.21-32, 1999.
- [Inou00] Inou, N., A Cellular Automaton Self-Organizing a Mechanical Structure with L-System, Proceedings of IFAC Symposium(Modeling and Control in Biomedical System), pp.257-362, 2000.
- [Inoue01] Inoue, M. and Matsuoka, Y., Evolutionary Form-Generation System Based on Emergence, The Science of Design, Vol. 48, No. 2, pp. 1-8, 2001.
- [石田 98] 石田良平, セル・オートマトンを用いた二次元構造物の位相設計, 日本機械学会論文集(A 編), pp.1895-1900, 1998.
- [岩下 83] 岩下豊彦, SD 法によるイメージの測定, 川島書店, 1983.
- [加藤 98] 加藤恭義, セルオートマトン法, 森北出版, 1998.
- [Kauffman95] Kauffman, S., The Search for Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford University Press, 1995.
(米沢富美子監訳, 自己組織化と進化の論理—宇宙を貫く複雑系の法則, 日本経済新聞社, pp. 51-59, 1999.)
- [川面 98] 川面恵司, 横山正明, 長谷川浩志, 最適化理論の基礎と応用—GA および MDO を中心にして—, コロナ社, pp.68-70, 2000.

- [菊池 93] 菊地昇, 均質化法による最適設計理論, 応用数学, Vol.3, No.1, pp.2-26, 1993.
- [Kikuchi86] Kikuchi, N., Adaptive Finite Element Methods for Shape Optimization of Linear Elastic Structures, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol.57, pp.67-89, 1986.
- [King91] King, R., Structural Analysis, Design, and Optimization with High/Order Finite Elements, Rasna Corp, Vol.9, 1991.
- [Kita00] Kita, E., Structural Design Using Cellular Automata, Struct Multidiscip Optim, Vol. 19, No.1, pp.64-73, 2000.
- [北村 95] 北村新三, 創発的機能形成のシステム理論に向けて, 計測と制御, Vol.37, No.7, pp.492-495, 1995.
- [北村 96] 北村新三, 複雑系と創発システム, 精密工学会誌, Vol.62, No.8, pp.1087-1090, 1996.
- [小林 93] 小林重信, 特集 遺伝的アルゴリズム, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 38, No.7, pp.328-329, 1993.
- [Langton89] Langton, C. G., Artificial Life, Addison-Wesley Publishing Company, pp. 1-48, 1989.
- [Levitt98] Levitt, R. E., Toward Analysis Tools for the Engineering Process, Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis, and Manufacturing, Vol. 12, No. 1, pp. 13-28, 1998.
- [Lewes1874] Lewes, G. H., Problems of Life and Mind, Trubner, pp.411-415, 1874.
- [Matsuoka97] Matsuoka, Y., Application of Simultaneous Process by Development of Quantitative Design Methods, Proceedings of Asia Design Conference, pp.63-68, 1997.
- [松岡 02] 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, Vol.49, No.3, pp.93-103, 2002.
- [百瀬 97] 百瀬春夫, 分子遺伝学, 丸善, 1997.
- [Moore70] Moore, G.T., Emerging Methods in Environmental Design and Planning, MIT Press, 1970.

- [Mota84a] Mota, S.C.A., Shape Optimal Structural Design Using Boundary Elements and Minimum Compliance Techniques, Transactions of the ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design, Vol.106, No.4, pp.516-521, 1984.
- [Mota84b] Mota, S.C.A., Optimization of the Geometry of Shafts Using Boundary Elements, Transactions of the ASME Journal of Mechanisms, Transmission, and Automation in Design, Vol.106, No.4, pp.199-203, 1984.
- [中埜 86] 中埜栄三, 発生生物学, 裳華房, 1986.
- [中沢 75] 中沢信午, 形態形成の原理, 裳華房, 1975.
- [Nishiwaki98] Nishiwaki, S., Structural Optimization Considering Flexibility (Integrated Design Method for Compliant Mechanisms), JSME International Journal, pp.476-484, 1998.
- [野口 95a] 野口尚孝, 目的論的視点からの設計行為の本質と発想の構造—デザイン発想支援の枠組に関する考察(その 1), デザイン学研究, Vol.42, No.1, pp.51-60, 1995.
- [野口 95b] 野口尚孝, デザイン行為の特徴とそれに基づくデザイン発想支援の枠組—デザイン発想支援の枠組に関する考察(その 2), デザイン学研究, Vol.42, No.1, pp.61-68, 1995.
- [野口 98a] 野口尚孝, 発想支援研究の動向と今後の課題—デザイン発想支援システムの研究の一助として, デザイン学研究, Vol.44, No.6, pp.45-52, 1998.
- [野口 98b] 野口尚孝, 「支援」の観点から見たデザイン, デザイン学研究, Vol.44, No.6, pp.53-60, 1998.
- [長町 89] 長町三生, 感性工学, 海文堂, 1989.
- [長町 93] 長町三生, 感性商品学(感性工学の基礎と応用), 海文堂, 1993.
- [Oda94] Oda, J., Study of Structural Optimization Technique Using Evolutionary Cellular Automata, JSME International Journal, pp.348-354, 1994.
- [尾田 97a] 尾田十八, 形態形成のための一般化セルラ・オートマトンについて, 日本機械学会論文集(A編), Vol.63, No.605, pp.152-157, 1997.

参考文献

- [尾田 97b] 尾田十八, 局所ルールによる大規模構造物の最適化について, 日本機械学会論文集(A編), Vol.63, No.606, pp.425-430, 1997.
- [尾田 98] 尾田十八, 進化的セルラ・オートマトンによる構造最適化の研究, 日本機械学会論文集(A編), Vol.64, No.628, pp.1-6, 1998.
- [尾田 02] 尾田十八, 室津義定, 機械設計工学 1, 培風館, 2002.
- [岡田 96] 岡田益吉, 発生遺伝学, 裳華房, 1996.
- [大河内 95] 大河内禎一, 修復構造形状の極小重量計画(連続体における補強構造の創成法), 日本機械学会論文集(A編), Vol.61, No.591, pp.2508-2513, 1995.
- [太田 87] 太田行人, 植物発生生理学, 岩波書店, 1987.
- [Osgood57] Osgood, C.E., Suck, G.J. and Tannenbaum, P. H., The measurement of meaning, University of Illinois Press, 1957.
- [Pahl88] Pahl, G. and Beitz, W., Engineering Design: Systematic Approach, Springer-Verlag, 1988.
(設計工学研究グループ訳, 工学設計—体系的アプローチ, 培風館, 1995.)
- [Perkins94] Perkins, D. N., Creativity: Beyond the Darwinian Paradigm, Dimensions of Creativity, Chap. 5, MIT Press, pp. 119-142, 1994.
- [Poon97] Poon, J. and Maher, M. L., Co-evolution and Emergence in Design, Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 319-327, 1997.
- [Pugh90] Pugh, S., Total Design, Integrated Methods for Successful Product Engineering, Addison Wesley Publishing Co, 1990.
- [Reich93] Reich, Y., A Model of Aesthetic Judgment in Design, Artificial Intelligence in Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 141-153, 1993.
- [Reddy95] Reddy, G., An Improved Shape Annealing Algorithm for Truss Topology Generation, Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design, Vol.117, pp.315-321, 1995.
- [酒井 73] 酒井寛一, 生態遺伝学, 共立出版, 1973.

- [Santos98a] Dos Santos, R. M., Immunization and Aging: A Learning Process in the Immune Network, *Physical Review Letters*, 1998.
- [Santos98b] Dos Santos, R. M., Immunization and Aging: A Learning Process in the Immune Network, *Physical Review Letters*, 1998.
- [佐々木 94] 佐々木本道, 細胞遺伝学, 裳華房, 1994.
- [佐藤 98] 佐藤啓一, デザイン方法論研究の展望, *設計工学*, Vol.33, No.10, pp.18-24, 1998.
- [瀬口 03] 瀬口靖幸, 尾田十八, 室津義定, *機械設計工学 2*, 培風館, 2003.
- [Shea97] Shea, K., A Shape Annealing Approach to Optimal Truss Design with Dynamic Grouping of Members, *Transactions of the ASME Journal of Mechanical Design*, Vol.119, pp.388-394, 1997.
- [塩川 91] 塩川光一郎, 発生生物学(上・中・下), トッパン, 1991.
- [Simon69] Simon, H. A., *The Science of the Artificial*, MIT Press, 1969.
(高宮, 稲葉訳, システムの科学, ダイヤモンド社, 1977.)
- [新家 68] 新家浪雄, 細胞学, 岩波書店, 1968.
- [Soufi96] Soufi, B. and Edmonds, E., The Cognitive Basis of Emergence: Implications for Design Support, *Design Studies*, Vol. 17, No. 4, pp. 451-463, 1996.
- [Suh90] Suh, N.P., *The Principles of Design*, Oxford University Press, 1990.
(畑村洋太郎監訳, 設計の原理－創造的機械設計論, 朝倉書店, 1992.)
- [住本 94] 住本正, コンカレントエンジニアリングシステムの構築, *機械設計*, Vol.38, No.5, pp.65-74, 1997.
- [Suzuki91] Suzuki, K., A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, pp.291-318, 1991.
- [鈴木 96] 鈴木克幸, 均質化手法による形状, レイアウト最適設計, *応用数学*, Vol.6, No.4, pp.292-302, 1996.
- [都倉 95] 都倉信樹, オートマトンと形式言語, 昭晃堂, 1995.

- [富山 85] 富山哲男, 一般設計学の展開(第 1 報), 精密機械, Vol.51, No.4, pp.147-153, 1985.
- [富山 01] 富山哲男, 「シンセシスのモデル論」プロジェクト最終報告, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業公開シンポジウム「シンセシスの科学」講演予稿集, pp.7-60, 2001.
- [富山 02] 富山哲男, 設計の理論, 岩波書店, pp.61-63, 2002.
- [Tomiyama03] Tomiyama, T., Takeda, H., Yoshioka, M., and Shimomura, Y., Abduction for Creative Design, Proceedings of DETC'03, Published by CD-ROM, 2003.
- [上田 01] 上田完次, 「創発的シンセシスの方法論」プロジェクト, 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業公開シンポジウム「シンセシスの科学」講演予稿集, p.62, 2001.
- [梅谷 76] 梅谷陽二, 生長変形法による構造材の適応的最適形状の決定, 日本機械学会論文集, Vol.42, No.364, pp.3752-3762, 1976.
- [Wolfram96] Wolfram, S., Theory and Application of Cellular Automata, World Scientific, 1996.
- [山田 95] 山田武, アポトーシス, 日経サイエンス社, p.111, 1995.
- [山川 93] 山川宏, 最適化デザイン, 培風館, 1993.
- [米沢 95] 米沢富美子, 複雑さを科学する, 岩波書店, pp.106, 1995.
- [吉川 79] 吉川弘之, 一般設計学序説:一般設計学の公理的方法, 精密機械, Vol.45, No.8, pp.20-26, 1979.
- [吉川 80] 吉川弘之, 実験設計学, 精密機械, Vol.47, No.7, pp.46-51, 1980.
- [吉川 93] 吉川弘之, 木村文彦編, 設計とCAD, 朝倉書店, pp.21-35, 1993.
- [吉村 94] 吉村允孝, 先入観のない状態からの機械システムに対する形状・機能の創生的概念設計, 日本機械学会論文集(C編), Vol.60, No.571, pp.1098-1104, 1994.

著者論文目録

1. 原著論文

- [1] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Evolutionary Form-Generation System Based on Emergence, *The Science of Design*, Vol. 48, No. 2, pp. 1-8, 2001.
- [2] 井上全人, 松岡由幸: 生物の発生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, pp. 39-48, 2001.
- [3] 井上全人, 三笠晋, 松岡由幸: 評価過程を有する多様解導出のための形状生成システム, *デザイン学研究*, Vol. 48, No. 3, pp. 95-102, 2001.
- [4] 松岡由幸, 井上全人: 創発を応用した多様解導出システム, *設計工学*, Vol. 38, No. 8, pp. 411-420, 2003. (平成 15 年度日本設計工学会論文賞受賞)
- [5] 井上全人, 荻野直樹, 松岡由幸: 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, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol. 70, No. 690, pp. 500-507, 2004.
- [6] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Simulation of Developmental Process of Organism and Application to Structural Design, *Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Control*, Vol. 9, No. 2, pp. 142-149, 2005.

2. 国際会議発表

- [1] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Evolutionary Form-Generation System Using “Element Generation Method”, Proceedings of 9th International Conference on Machine Design and Production (UMTIK 2000, Ankara, TURKEY), Published by CD-ROM, 2000.
- [2] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Emergent Form-Generation System Using Cellular Automata and Genetic Algorithm, Bulletin of 5th Asian Design Conference (5th ADC, Seoul, KOREA), Published by CD-ROM, 2001.
- [3] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Form-Generation System Imitating the Developmental Process of Organism for Obtaining Diverse Design Solutions, Computer-Based Design (Engineering Design Conference 2002, London, UK), pp. 327-336, 2002.
- [4] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Form-Generation System for Obtaining Diverse Design Solutions Supporting Early Process of Design in Structural Design, Proceedings of 2003 ASME International Design Engineering Technical Conferences and the Computers and Information in Engineering Conference (2003 ASME DETC&CIE, Chicago, USA), Published by CD-ROM, 2003.
- [5] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Support for Obtaining Satisfactory Design Solutions of Form and Structure by Applying the Emergent Form-Generation System, Journal of 6th Asian Design Conference (6th ADC, Tsukuba, JAPAN), Published by CD-ROM, 2003.
- [6] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Simulation of Developmental Process of Organism and Application to Structural Design, Proceedings of Joint 2nd International Conference on Soft computing and Intelligent Systems and 5th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS 2004, Yokohama, JAPAN), Published by CD-ROM, 2004.
- [7] Yoshiyuki Matsuoka and Masato Inoue: Emergent Form-Generation System, Proceedings of 11th International Conference on Machine Design and Production (UMTIK 2004, Antalya, TURKEY), Published by CD-ROM, 2004.

3. その他の国際会議発表

- [1] Masato Inoue and Yoshiyuki Matsuoka: Emergent Design System for Obtaining Diverse Solutions, Proceedings of International Workshop on Digital Design (International Workshop on Digital Design, Yokohama, JAPAN), pp. 53-67, 2004.
- [2] Yutaka Kameyama, Kimitaka Inaba, Osamu Hatano, Tokuhiko Moriya, Takeo Kato, Kotaro Suga, Masato Inoue, Makoto Watanabe, and Yoshiyuki Matsuoka, Artificial Joint System Interacting with Organism, International Workshop on Digital Design (International Workshop on Digital Design, Yokohama, JAPAN), 2004.

4. 国内学会発表

- [1] 井上全人, 松岡由幸: 生物の発生過程を模倣した形状生成方法の構築, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集, pp. 511-512, 2000.
- [2] 井上全人, 松岡由幸: 多様解導出のための創発的形狀生成システム, 日本設計工学会 2001 年度春季研究発表講演会講演論文集, pp. 53-56, 2001. (学生優秀発表賞受賞)
- [3] 井上全人, 松岡由幸: 創発過程にもとづく多様解導出のための自己組織的形狀生成システム, 第 6 回日本計算工学会講演会論文集, pp. 539-542, 2001.
- [4] 井上全人, 齋藤宏幸, 松岡由幸: セルラ・オートマトンを用いた生物模倣型多様解導出システム, 日本デザイン学会第 48 回研究発表大会講演論文集, pp. 278-279, 2001.
- [5] 齋藤宏幸, 井上全人, 松岡由幸: 創発過程にもとづく多様解導出システム, 日本デザイン学会第 48 回研究発表大会講演論文集, pp. 280-281, 2001.
- [6] 井上全人, 松岡由幸: 生物の発生過程を模倣した自己組織的多様解導出システム, 日本機械学会第 14 回計算力学講演会, pp. 317-318, 2001.
- [7] 藤井健史, 井上全人, 松岡由幸: 発想支援のための創発的形狀生成システム, 日本機械学会第 12 回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp. 77-78, 2002.
- [8] 浅沼尚, 田尾繁, 氏家良樹, 井上全人, 松岡由幸: 生命模倣のデザインーゲシュタルト, 創発一, 平成 16 年度日本デザイン学会秋季企画大会講演論文集, pp. 29-34, 2004.
- [9] 加藤健郎, 亀山雄高, 守谷徳広, 井上全人, 渡辺誠, 松岡由幸: 生体と対話する人工関節システム, 平成 16 年度日本デザイン学会秋季企画大会講演論文集, pp. 73-80, 2004.