

# 形状発想支援に関する研究

平 俊男 菱田 元樹\*

Study of assistant system for shape creation

Toshio HIRA and Motoki HISHIDA

On industrial shape creation, human designer intuitively establishes shape based on his/her own experiences and knowledge. In order to assist this process by artificial system, it is important to consider the subjective aspect of each designer as well as objective one. In this article, we propose an interactive design assistant system in the case of bottle shape design. When human designer draws a bottle's profile on the window of this system, the profile curve is represented by a chain of local curvatures and is encoded to chromosome in the genetic manner. The varieties of profile curve are randomly generated and are also encoded to chromosomes. All of the curves, the drawn one and the generated ones, are evaluated by the system with objective criterion based on the conventional structural analysis and by the human designer interactively with subjective his/her preference. At the next stage, the chromosomes represent the profiles are gathered to objective- and subjective- gene-pools in terms of the genetic algorithm. At the last stage, design alternatives are reproduced from gene-pools through the crossover and mutation operations, and are suggested to the human designer. Through the case study, the proposed framework demonstrates the applicability to suggest the various design alternatives reflects the subjective preferences.

## 1. はじめに

工学設計に対するコンピュータの利用は、主に設計問題の客観的側面から進められており、機械工学分野においては、有限要素法(FEM)に代表される構造解析手法<sup>(1)</sup>や、数理的解法による形状最適化手法<sup>(2)</sup>が定着している。一方で、形状意匠の発想など、設計者による主観的意思決定が支配的となる場面に関しては、紙と鉛筆の延長としてのコンピュータの利用が進んでおり、発想行為そのものに対するコンピュータの利用については、未だ様々な試みや議論がみられる<sup>(3)</sup>のが現状である。

これらの議論を通じて、人間の発想行為を含むような広義の設計問題に関するコンピュータの利用に関しては、

- 1) コンピュータが設計過程を駆動するのではなく、設計者を主体とすること。
- 2) 設計者は、知識のみに基づいて演繹的に解を求めているのではなく、設計事例の再利用が多いこと。

3) 実現可能な設計解を厳密に求めるのではなく、多様な設計候補を示唆できること。

4) 明示的に記述できない設計者個人の選好などの価値観を取扱えること。

などの指摘がなされている。すなわち、設計の自動化を目指すアプローチとは異なり、コンピュータには、個別の設計者のアシスタントとして多様な設計候補を示唆することで異なる視点から刺激を与え、設計者の発想能力を増幅させる役割<sup>(4)~(7)</sup>が求められている。

ここでは、形状意匠の例として回転対称な容器形状をとりあげ、その発想支援についてケーススタディを試みる。容器形状の設計では与えられた仕様に対して力学的に十分な強度を持つことはもちろんであるが、意匠的には設計者の主観的な好みにも強く依存している。

まず、形状発想のモデルとして、設計事例の組合せによる新規形状の生成を考え、断面形状を表現型ととらえその遺伝型表現とそれらに対する交叉・突然変異などの遺伝的アルゴリズムの操作による個体生成を試みる。これらの遺伝的的操作は設計者が実際に行っていると考え

えられる設計事例の部分的な置換および一部の変更に相当する操作である。次に、形状候補に対して客観的に定まる力学的評価と設計者による主観的評価とを考慮した設計評価を用いた候補生成を行う。このとき、客観的評価は有限要素法による構造解析に基づいて与え、設計者による主観的評価の反映には対話型進化計算法の利用を試みる。

## 2. 形状発想支援に対する遺伝的アルゴリズムの利用

コンピュータによって人工物の形状意匠を取扱う試みには、その検索機能を活用することを主眼にしたもの<sup>(8),(9)</sup>や、ラピッドプロトタイピングとの連携により商品開発のサイクルを向上させようとする試み<sup>(10)</sup>がみられる。ここでは、設計者による形状の発想過程そのものの支援に注目し、遺伝的アルゴリズムの利用を考える。

一般に、遺伝的アルゴリズムは、解を表現する個体からなる個体群に対して、選択・交叉・突然変異の3種類の遺伝的操作と、与えられた問題に対する適合度評価を繰返し、良い形質を持つと期待される新たな個体を作っていく過程である。すなわち、自然界の生物進化(選択淘汰・突然変異)を模擬した確率的探索・学習・最適化の一手法と考える事ができる<sup>(11)</sup>。

設計の上流側に位置づけられる概念設計において設計者は、経験や知識に基づき過去の設計事例の組合せや、一部の変更によって新たな形状の生成を行っていると考えられる。このような発想過程の計算モデルとして、遺伝的アルゴリズムの交叉や突然変異の操作によって多様な設計解候補を生成し、設計者へ提示することで設計支援を行う試み<sup>(12),(13)</sup>がみられる。これらは、遺伝的アルゴリズムの確率的探索の側面を利用するものである。

また、意匠デザインのように人間の主観的意思決定が強い分野に対しては、遺伝的アルゴリズムにおける適合度に応じた個体の選択を、あらかじめ定義された適合度関数によらず、個々の個体の表現型に対して利用者が持つ主観的判断の結果に基づいて行い、対話的にそのプロセスに介入する手法が多く試みられている。この枠組は、生物進化における「自然選択」に代わって「人為選択」によって次世代の形質を決定していくことに相当し、遺伝的アルゴリズムを利用する問題解決のなかでも、特に対話型進化計算法<sup>(14)</sup>や、模擬育種法<sup>(15)</sup>などと呼ばれている。また、コンピュータグラフィクスアートへの応用では、この手法が明示的には記述されない人間の選好基準を引き出し、単なる好みの選択にとどまらず、創造力の増幅にも寄与することが指摘されている<sup>(16)</sup>。

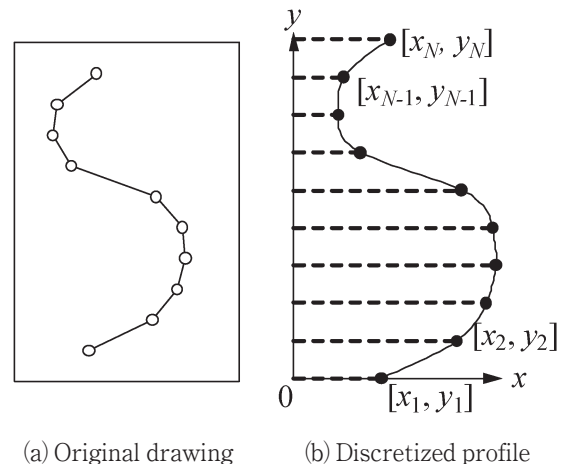


Fig.1 Original and processed drawing

ここで取扱う形状意匠を考慮する工学設計では、単なる意匠デザインとは異なり、設計対象物の強度など従来の工学理論によって客観的に支持される理論的側面も考慮する必要がある。したがって、個別の設計者の経験や好みといった主観的側面とのバランスをとる形状候補生成が重要となる。

## 3. 対話型進化計算法による形状候補生成

### 3.1 設計者による形状意匠の入力とその表現

ここでは、回転対称な容器形状の意匠を取扱い、その形状を構成する断面曲線に着目する。図1(a)に示すように、設計者は計算機ディスプレイをキャンバスとしてマウス入力により形状を表現するものとし、容器形状の断面曲線を点列としてプロットする。この点列は対話的な変更が可能である。

キャンバス上に配置された点列を3次スプライン関数により補間した後に、高さ方向に $N-1$ 等分して正規化し、 $y$ 軸方向に等間隔の $N$ 個の座標 $P_i(x_i, y_i)$  ( $i=1, \dots, N$ )を得る(図1(b))。断面曲線を示すこの2次元データ列は、設計者が主観的な評価を行う際の3次元形状の提示や、汎用構造解析ソフトによる力学的評価の基本となるものである。

形状には、定量的に表すことが可能な寸法などの局所的な形状情報と、形状の全体的な特徴を表現する大局的な形状情報が存在する。形状発想の段階では、設計者は曲率の定性的な大小や変曲点に注目するなど対象を大局的に把握していると考えられる<sup>(17)</sup>ことから、ここでも曲率推移に基づき形状を表現する。

断面曲線の $N$ 個の離散点 $P_i(x_i, y_i)$ で近似的に得られる符号付きの曲率半径は

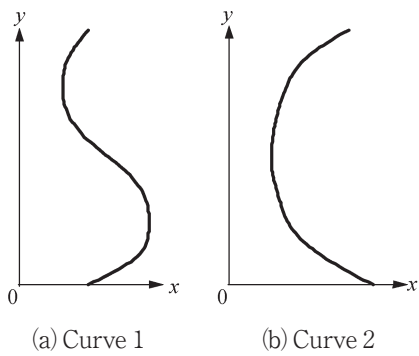


Fig.2 Examples of profile curves

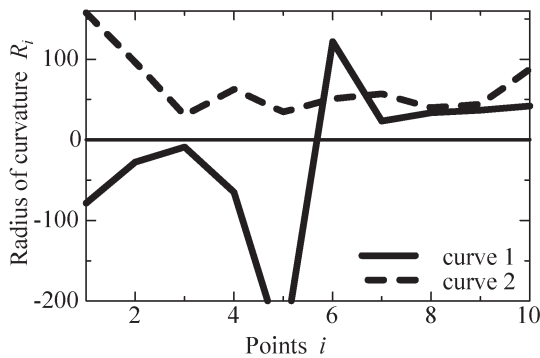


Fig.3 Radius of curvature of profile curves

$$R_i = \frac{[1 + x_i^{(1)2}]^{\frac{3}{2}}}{x_i^{(2)}} \dots\dots\dots (1)$$

で定義できる。ただし、上付き添字(1), (2)はそれぞれ差分による1階導関数, 2階導関数の近似値を表す。これによって設計対象である断面曲線は

$$R = \{R_1 R_2 \dots R_N\} \dots\dots\dots (2)$$

と、 $N$ 個の要素を持つリストとして表される。

図2の2つの異なる断面曲線の曲率半径の推移を図3に示す。図3において曲率半径の符号が変わる断面曲線1は離散点5と6の間に変曲点を持ち、変曲点が存在しない断面曲線2では曲率半径の符号に変化がないことなど、それぞれの形状を表現している。

### 3.2 形状の遺伝型表現と初期個体群

形状意匠候補の生成に遺伝的アルゴリズムを適用するために、形状を遺伝型として表現する。設計者が描いた形状に対する曲率半径リスト(式(2))に容器形状の底部半径( $x_1$ )と底面からの曲線の角度( $\theta_1$ )を加えた、

$$G_1 = \{R_{11} R_{12} \dots R_{1N} x_1 \theta_1\} \dots\dots\dots (3)$$

を遺伝型とし個体とよぶ。この個体は $N+2$ 個の遺伝子座をもち、表現型として断面形状を発現させる際の形状

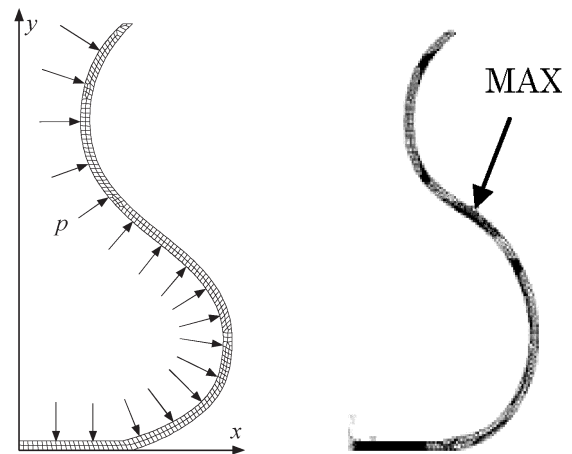


Fig.4 Structural analysis for objective evaluation

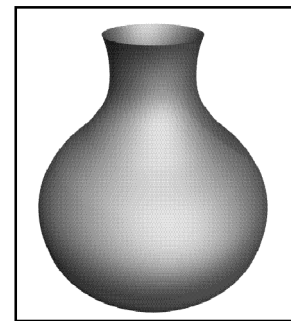


Fig.5 Ray-traced 3D image for subjective evaluation

情報である。また、遺伝子プールとしての個体群の個体数を $M$ とし、残りの $M-1$ 個体について、 $N+2$ 個の遺伝子座それぞれに対して適当な範囲での実数を乱数により発生させた同様のリスト

$$G_j = \{R_{j1} R_{j2} \dots R_{jN} x_j \theta_j\} \quad (j=2, \dots, N) \dots\dots\dots (4)$$

を作成する。ここで $j$ は個体を表す添字である。得られた個体数 $M$ の個体群 $G_j$  ( $j=1, 2, \dots, M$ )を遺伝的操作による個体生成のための初期個体群とする。ただし個体 $G_1$ は設計者自身が作成したものを表す。

### 3.3 形状候補に対する適合度の評価

#### 3.3.1 力学的評価に基づく個体評価

初期個体群の遺伝型をもとに形状を表現型として発現させ、個体適合度の客観的指標として力学的評価を行う。ここで行う力学的評価は、断面曲線を法線方向に一定量オフセットし、底断面を加えた容器形状断面に対して回転対称の境界条件を与えた有限要素解析に基づく(図4)。解析モデル(最大高さ100mm)の材料特性は線形弾性体(縦弾性係数73GPa, ポアソン比0.3)を仮定し、境界

条件として底面の垂直方向(y軸方向)の変位を0, 内表面に一定の圧力(1kPa)を与える. ここでは, 形状全体について得られるひずみエネルギーの分布のばらつきを評価し,

$$E_j = \frac{\text{ひずみエネルギーの標準偏差}}{\text{ひずみエネルギー平均値}} \dots\dots\dots (5)$$

の無次元量を各個体  $G_j$  の客観的指標とする. この指標値が小さい程, その形状に対する力学的評価は高い.

### 3.3.2 設計者の主観的評価に基づく個体評価

設計者による容器形状意匠の主観的評価は, 遺伝型から得られる断面形状を基にレイトレーシング法により生成した3次元形状(図5)を提示することで行う. 個体群を構成する  $M$  個の全ての形状が同時に設計者に提示され, 設計者はそれらに順位付けを行う. ただし, この順位付けには順序尺度以上の意味はもたせない.

### 3.4 形状候補の選択と交叉, 突然変異による世代更新

力学的評価と主観的評価をともに反映する形状候補生成を個体群の更新として行う. まず, 前節での個体評価をもとに, 各個体に適合度を割当てて. 各個体  $G_j$  に対する評価の順位  $O_j$  ( $O_j = 1, \dots, M$ ) をもとにそれぞれの個体適合度を  $f_j = M - O_j + 1$  とする. すなわち, 順位が1位であった個体( $O_j = 1$ )は  $f_j = M$  となり, 最下位であった個体( $O_j = M$ )は  $f_j = 1$  となる.

個体群の更新には, エリート保存戦略とルーレット選択を用いることとし, 最良個体( $f_j = M$ )は, 次の世代へ無条件に残し, 残り  $M - 1$  個体については,

$$P_j = \frac{f_j}{\sum_{i=1}^M f_i} \dots\dots\dots (6)$$

を個体  $G_j$  の選択確率  $P_j$  としたルーレット選択を行い,

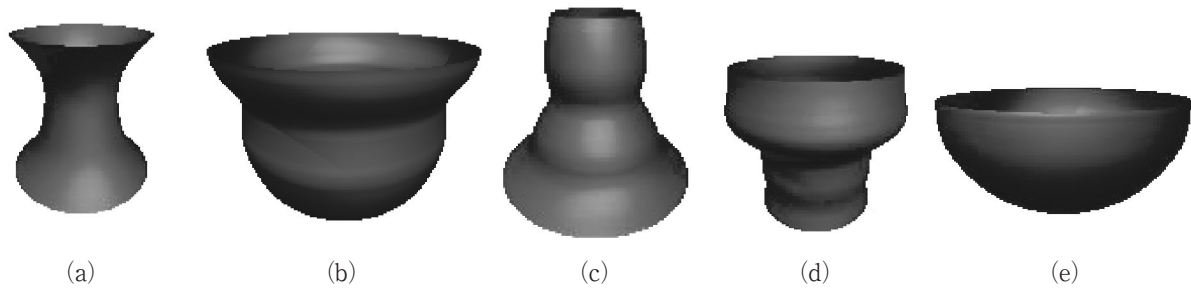


Fig.6 Varieties of phenotype in the initial population

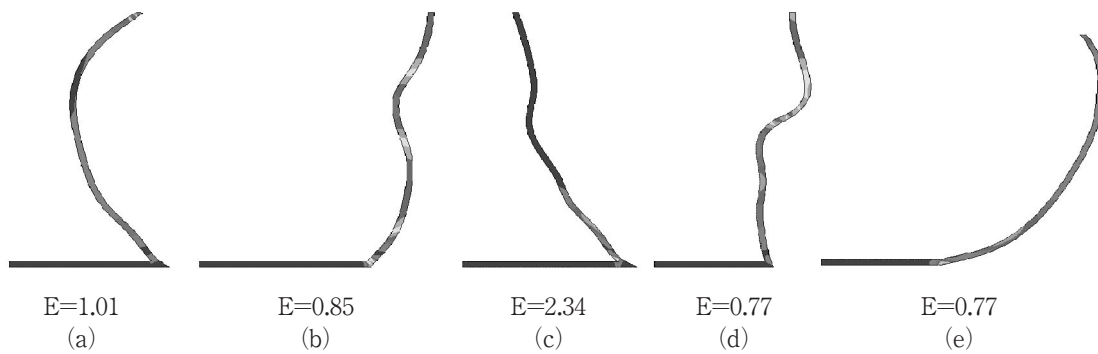


Fig.7 Evaluated initial shapes by means of strain energy with structural analysis

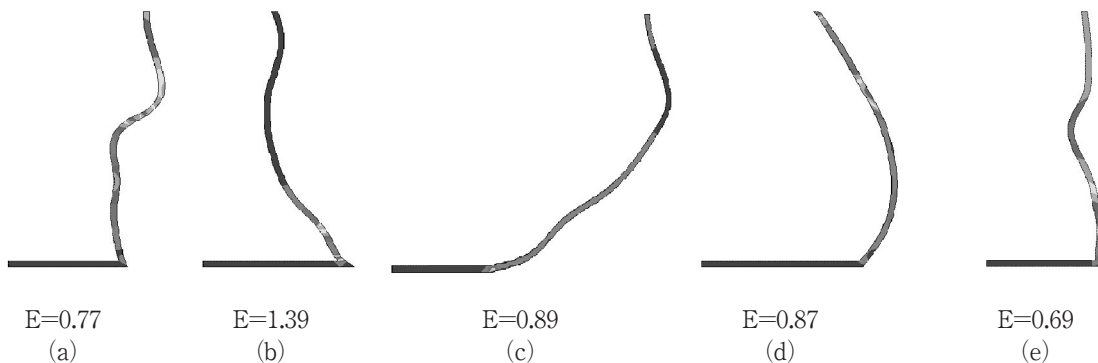


Fig.8 Reproduced shapes by genetic operations and their evaluation

次の世代の個体数  $M$  の個体群を得る。

さらに、個体群からランダムに選んだ個体ペアに対する一点交叉と突然変異の操作を行う。これらは、2つの形状を表す遺伝型(式(4))を部分的に交換する操作と、ある確率でランダムに選んだ遺伝子座の値を乱数によって置換える操作によって新たな形質を得ようとするものである。ただし、この操作によって得られる個体には、表現型において断面曲線が交叉するようなものが生じ得るので、この遺伝型を致死個体として破棄し、再び遺伝的操作を繰り返す。これらの選択、交叉、突然変異の一連の過程を、ここでは世代更新とよぶ。更新された個体群では、選択によって個体適合度の高かった個体の形質が継承される確率が高くなるが、交叉、突然変異によって形質の多様性は保たれている。

力学的評価と主観的評価とを反映する個体群の生成

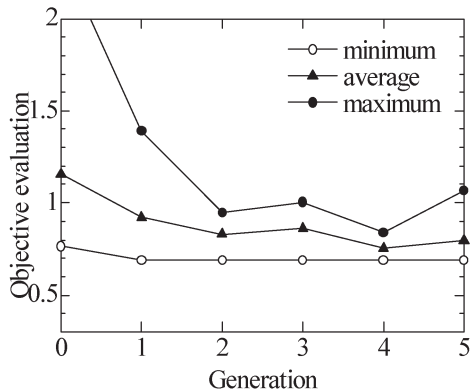


Fig.9 Objective evaluation vs generation

のために、2つの個体群(それぞれの個体数は  $M$ )を用意し、それぞれ3.3.1項と3.3.2項で得た評価に基づいた適合度を用いた世代更新を行う。2つの個体群には、それぞれ力学的評価がよい形質と主観的評価がよい形質が多く含まれていると期待できる。さらに、これらの個体群をあわせて1つの個体群(個体数は  $2M$ )とし、このなかからランダムに親ペアとなる個体を選び一点交叉を行うことを  $M$  回繰り返して新規個体群を生成し、これを候補個体群とする。これは、複数の評価基準が存在する多目的最適化において遺伝的アルゴリズムを適用する際の「移住」とよばれる操作<sup>(18)</sup>に対応している。

#### 4. 候補生成に関するケーススタディ

##### 4.1 遺伝的アルゴリズムによる個体群更新の検討

ここでは、個体数  $M=5$  の個体群を用いる。図6は(a)が設計者がキャンバス上に描いた形状、(b)~(e)が曲率半径、底部半径、角度がランダムに生成された形状を示している。これらに対して3.3.1項に示した有限要素解析を行い、得られたひずみエネルギーの分布を図7に示す。この図では、ひずみエネルギーの大きさを濃淡によって表しているが、これらはそれぞれの形状における相対的なものであり、他の形状との対応関係はない。また客観的指標  $E$  の値は式(5)によって求めた無次元量である。

これらの指標値をもとにそれぞれの個体に対して適合度を割り当て、3.4節に示した世代更新により生成された第1世代の個体群が表現する断面形状とひずみエネルギー分布に基づく客観的指標値を図8に示す。なお、こ

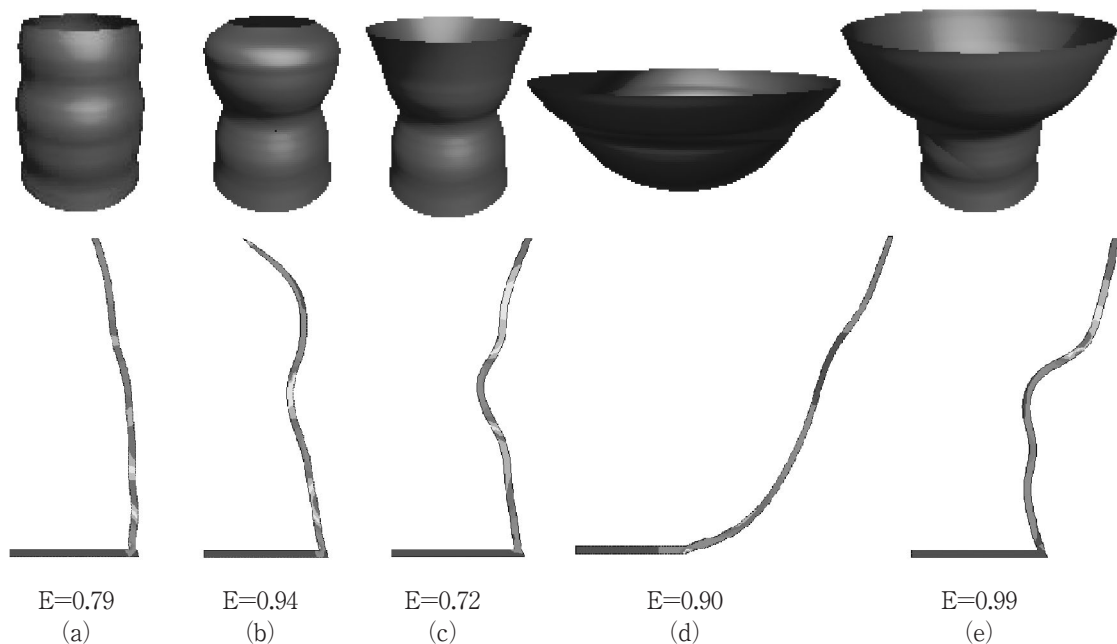


Fig.10 Population of design alternatives with subjective and objective evaluation



ここでは遺伝的操作による個体群の更新について検討を行うために、個体の適合度には構造解析から求まる客観的評価のみを用いる。更新された個体群中の形状(a)は初期個体群の最良候補がエリート保存戦略によって選択されたものである。初期個体群にみられた、指標値 $E$ が小さく適合度の高い形状(図7(e))の特徴が、第1世代の個体群の形状(図8(c)や(d))にみられるなど、世代更新によって、最良個体の形質が部分的に継承されていることがわかる。

また、図9に、力学的評価のみを考慮する世代更新を第5世代まで行った際の、世代毎の客観的指標値の推移を示す。第1世代で最も指標値の小さい個体(図8(e),  $E=0.69$ )が生成されてからは最良個体の交代はみられないが、個体群全体の平均指標値は減少していることがわかる。

#### 4.2 個体の力学的評価と設計者との対話による主観的評価を反映する設計候補生成

図6に示した初期個体群を用い、力学的評価によって世代更新を行った個体群(図8)と、設計者による形状候補の評価によって更新を行った個体群をあわせて個体数10の個体群を構成する。図10は、この個体群からランダムに親ペアを5つ選び、一点交叉を行うことで生成された新規個体が表す各形状と、ひずみエネルギー分布および客観的指標を示したものである。この図より、最初に設計者がキャンパス上に描いた形状(図6(a))にみられる中央部が細くなる特徴が含まれるような新たな形状がみられることがわかる。また、客観的指標に注目すると、力学的評価のみを反映させた第1世代の個体群では平均値が0.92であったものが、ここで生成した個体群では平均値が0.87となり向上がみられた。

これらのことより、設計者の好みを表す主観的評価を反映させながらも、力学的評価の適合度を上げる候補提示になったと考えられる。また、この結果は、設計者がそれぞれの形状に対する力学的評価を陽に知らされなくても、その主観的な好みは力学的評価とある程度一致することを示唆していると考えられ興味深い。

また、ここに示した個体群はあくまでも形状候補であり、設計解を示すものではない。場合によっては、設計者自身が描いた形状(図6(a))を採用することを含め、最終的な形状の選択に関する判断は設計者に委ねられるべきものである。

#### 5. おわりに

形状発想の例として容器形状をとりあげ、対話型進化

計算法を利用する枠組を示した。まず、設計者は設計対象である容器形状の断面曲線を大局的に把握していると考えられるので、曲率半径による形状表現を行った。ここでは新たな形状を生成するために遺伝的アルゴリズムの適用を考え、曲率半径の推移を遺伝型として表した。人間の発想過程は、形状を部分的に置換することや一部を変更することで行われていると考えられるので、交叉や突然変異の遺伝的操作によって新たな形状を生成する枠組を示した。形状意匠に対する評価には、構造解析によるものと設計者自身による順位付けとを考え、これらを個体の適合度として個体群を更新することで新規個体群を生成する枠組を示した。ケーススタディを通じて、力学的評価と設計者の主観的嗜好を反映しつつ、多様な候補個体群を設計者に示唆することが可能であることを確認した。

このような枠組は、デザイナーがデザイン・ブックや他者の作例を見ることによって刺激を受け、自分自身のデザインを確立していくような過程の延長に、コンピュータを介在させたものと考えられる。ただし、ここで示した枠組は、設計者自身の嗜好に対して動的に提示の傾向が変わることと、客観的に支持される側面の判断はコンピュータに委ねることが特徴である。なお、現在は、形状発想支援の枠組の予備的検証段階であるが、形態と機能がより密接に関連する設計問題に対する応用や、発想そのものの向上に対する検証が今後の課題である。

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金(若手(B) 課題番号16760115)の補助を受けた。記して謝意を表する。

#### 文 献

- (1) Zienkiewicz, O. C. and Morgan, K., Finite Elements and Approximation, (1982), John Wiley & Sons.
- (2) 山川 宏, 最適化デザイン(計算力学とCAE シリーズ9), (1994), 培風館.
- (3) 萩原祐志, 造形の発想を支援するためのCAD - デザイン支援システムに関する研究, デザイン学研究, Vol.41, No.1, (1994), pp.59-64.
- (4) 堀 浩一, 設計とAIのかかわりの広がりの変化, 日本機械学会誌, Vol.94, No.877, (1991), pp.1010-1014.
- (5) Hira, T. and Tanaka, M., "Personalized Assistant for Conceptual Structural Design," JSME International Journal, Vol.42, No.2, Ser.C, (1999), pp.435-444.
- (6) Dybara, T., Tecuci, G., and Rezazad, H., "The Shared

- Expertise Model for Teaching Interactive Design Assistants," *Engineering Application of Artificial Intelligence*, Vol.9, No.6, (1996), pp.611-626.
- (7) Soufi, B. and Edmonds, E., "The Cognitive Basis of Emergence: Implications for Design Support," *Design Studies*, Vol.17, No.4, (1996), pp.451-463.
- (8) 西村 剛・紺谷精一・片岡良治・芳西 崇, 陶磁器を対象とした3次元実物体データの類似検索, 信学技報 DE2001-62, (2001), pp.109-206.
- (9) 伏見 緑・賀川経夫・西野浩明・宇都宮孝一・凍田和美, 陶磁研究に役立つ発想支援システムの考察 — 柴田コレクション作品画像の特徴抽出と陶磁研究への応用 —, 情処研報(人文科学とコンピュータ) 2003-CH-59, (2003), pp.9-16.
- (10) 野上雅彦・大谷哲也・八村広三郎, 陶器デザインのためのCGシミュレーションシステムと商品開発への応用, 情処研報(人文科学とコンピュータ) 2003-CH-58, (2003), pp.81-88.
- (11) 北野宏明, 遺伝的アルゴリズム, (1993), pp.3-7, 産業図書.
- (12) Tanaka, M. and Hira, T., "Genetic Case-Base for Conceptual Structural Design," *Proc. of Japan-U.S.A Symposium on Flexible Automation: Kobe, Vol.III, ISCIE*, (1994), pp.1337-1340.
- (13) Furuta, H., Maeda, K., and Watanabe, E., "Application of Genetic Algorithm to Aesthetic Design of Bridge Structure," *Microcomputers in Civil Engineering*, Vol.10, (1995), pp.415-421.
- (14) 高木英行・畝見達夫・寺野隆雄, 対話型進化計算法の研究動向, 人工知能学会誌, Vol.13, No.5, (1998), pp.1-13.
- (15) 武藤武士・駒形伸子・上田勝彦, 模擬育種法を用いた画像フィルタシーケンスの自動生成の試み, ワークショップ「インタラクティブ進化的計算論」, (1998), pp.7-12.
- (16) 畝見達夫, 遺伝的アルゴリズムとコンピュータグラフィクスアート, 人工知能学会誌, Vol.9, No.4, (1994), pp.518-523.
- (17) 福田収一(日本機械学会編), 形態とデザイン 一章「形態の意味」, (1993), p.7, 培風館.
- (18) Hajela, P. and Lin, C.-Y., "Genetic Search Strategies in Multicriterion Optimal Design," *Structural Optimization*, Vol.4, No.2, (1992), pp.99-107.