

# 多目的 GA による超音速旅客機主翼の複合最適設計

## Multidisciplinary Design Optimization of Supersonic Transport Wings Using Multiobjective GA

正 大林 茂 (東北大)、 竹口 幸宏 (東北大・院)

Shigeru OBAYASHI, Tohoku University, Aoba-yama 01, Aoba-ku, Sendai

Yukihiro TAKEGUCHI, Tohoku University

A multiobjective GA is applied to multidisciplinary design optimization of supersonic wings and its feasibility is examined. First, several generational and sharing models as GA operators were examined by using a simple test case and an appropriate combination was identified. Then, the resulting GA was applied to design supersonic wings. The present multidisciplinary optimization problem looks for optimal supersonic wing planform shapes using linearized aerodynamics and wing weight algebraic estimation.

### 1. はじめに

航空機の主翼形状設計を行う際には、空力(抗力最小化)、構造(翼重量最小化)、装備(燃料タンク最大化など)等を考慮する必要がある。これらの要素は、互いに相反する要素を持っているので、最適化を行う際には、各要素の妥協解(パレート最適解)を得ることが重要である。

このような問題に対しては、遺伝的アルゴリズム(GA)を拡張した多目的遺伝的アルゴリズム(MOGA)を用いた最適化が有効である。MOGAによって複数のパレート最適解を同時に求めることができるが、この特徴を活かすためには進化させる集団に多様性を持たせることが重要になる。

そこで本研究では、GAの重要な要素である世代交代モデルとニッチングを数種類組み合わせ、簡単な多目的最適化問題に用いて、多様性を保ちつつパレート最適解を効率的に得るために有効なGAの手法を検討する。さらにより実用的な問題として超音速主翼形状最適化を試みる。

### 2. GA

GAは生物の進化を模倣したアルゴリズムである。GAの流れを以下に示す。

1. 「初期集団」をランダムに発生する。
2. 目的関数に従って各個体の適応度を「評価」する。
3. 評価に従って親となる個体を「選択」する。
4. 「交叉」を行い、子を作る。
5. ある確率で「突然変異」を行う。
6. 「世代交代」をする。

1の後、2から6を集団が収束するまで繰り返す。

MOGAでの個体の評価には、複数の目的関数を単一関数に組み合わせる必要のない「パレート・ランキング方式」<sup>(1)</sup>を用いる。多目的最適化では複数の目的関数間の重みがあらかじめ明確でないことが多い。一般的にこうした場合は単一の最適解を持たず、ある目的関数をよくしようとすると別の目的関数が悪くなるようなトレードオフを持つ非劣解の集合が解となる。これをパレート解と呼ぶ。「パレート・ランキング」では、集

団中の非劣解をランク1とし、残りは集団のパレート面からの位置に応じてランクを割り振る。

世代交代のモデルは、親と子を実条件で入れ替える「Simple GA (SGA)」、親2個体・子2個体の家族の中から最良の2個体を次世代に残す「Elitist Recombination (ER)」、そして親集団と子集団を合わせた2世代の中から、適応度の順に集団サイズ分の個体を次世代に残す「CHC」<sup>(2)</sup>(バストN選択法と呼ばれることもある)を用いた。

また、解の多様性を維持するために、2種類のニッチングを試した。個体が密集している部分に存在する個体の適応度を下げる「フィットネス・シェアリング(FS)法」<sup>(1)</sup>と、経済学の「独占的競争」の概念を利用し、個体を経営者と顧客に分けて解をうまく分布させようとする「CSN法」<sup>(3)</sup>である。「CSN」は、経営者はより多くの顧客を集めるために競争者のより少ない地域に進出し、顧客はどこでも均一のサービスが受けられるならばより空いている店を選ぶという行動をモデル化している。

### 3. テスト問題

最初に世代交代とニッチングの手法について、多目的最適化に適した組み合わせを簡単な数値実験で求めた。テスト問題として以下の最適化問題を考える。

設計変数  $x, y$

制約条件  $0 < x < 1, 0 < y < 1$

$$x^2 + y^2 < 1$$

目的関数  $x, y \rightarrow$  最大化

ここでは実数値関数最適化のために実数コーディングを用いることにし、制約条件が単純化できるように極座標を用いてコーディングした。交差は乱数を用いた加重平均とする。

まず世代交代モデルに関して「SGA」、「ER」、「CHC」を比較する。ニッチングにはFSを用いる。30世代後の結果を図1に示す。SGA、ERはパレート解である円周の一部しか捕らえず、解の多様性が保たれていない。一方、CHCは円周を

ほぼ一様に円周上を捕らえることができ、なおかつ収束も速かった。

次にニッチングに関して「FS」と「CSN」とを比較する。結果を図2に示す。まず世代交代モデルに「SGA」を用いた。すると「CSN」は「FS」と比較してはるかに解の多様性を保つことができ、「SGA」との組み合わせでは「FS」よりも「CSN」が優れていることがわかった。また、「CHC」と「CSN」を組み合わせた場合、結果は「SGA」と「CSN」の場合より改善されているが、「CHC」と「FS」を組み合わせた場合よりは若干収束が悪かった。

「FS」、「CSN」ともに近さを判定するためのパラメータを必要とする。実用上はこのパラメータの決め方が問題となるが、「FS」については文献(1)の方法で比較的うまく決めることができる。しかし「CSN」は新しい手法なので、対応するパラメータの決定法に確立された方法がなく、今後改良の余地があるといえよう。

#### 4. 超音速機主翼の平面形最適化問題

航空機の形状を決定する上で、主翼を上から見た平面形的设计は全体に影響を与える非常に重要な問題である。その設計では、空力性能を高めるだけでなく、構造強度を持たせる一方で重量を減らし、しかも翼内の燃料タンク等の装備性も考慮する必要があるなど、さまざまな要求を満たす必要がある。特に最近注目されている次世代超音速旅客機的设计では、翼の体積が空力抵抗に直接関係するため翼体積を減らそうとすれば構造や装備の点で問題が生じることになり、なるべく正確に空力と構造のトレードオフを考慮する必要がある。

そこで次に、テスト問題で、比較的良好な結果を得られた「CHC+FS」を用いて、超音速機主翼の平面形最適化を行う。設計条件は、以下のとおりである。

|      |                                       |                  |
|------|---------------------------------------|------------------|
| 飛行条件 | 巡航マッハ数 2.0 (非粘性流れを仮定)                 |                  |
| 設計変数 | 翼根とキंक位置での前縁後退角、<br>翼幅方向のキंक位置 (計3変数) |                  |
| 制約条件 | 翼根長                                   | 14.3 ft          |
|      | 縦横比                                   | 0.45             |
|      | 前縁後退角                                 | 60.0~85.0 (deg.) |
| 目的関数 | 誘導抵抗                                  |                  |
|      | 翼重量                                   | → 最小化            |
|      | アスペクト比 (構造強度を模擬)                      |                  |

抵抗や重量の評価には、空力・構造の2分野にわたる解析コードが必要となるが、この計算では多目的最適化の定式化に重点をおくため、線形化された空力計算法<sup>(4)</sup>と翼重量推定の経験式<sup>(5)</sup>による非常に単純化されたモデルを考える。空力計算では翼厚を無視して平板翼とみなす。従って造波抵抗は考慮せず、誘導抵抗のみを計算する。重量計算では翼根の最大翼厚を翼弦長の5%とし、翼端の3%まで線形に減少させた。また、実際に構造強度を計算する替わりに、アスペクト比が小さければ構造強度が強くなると仮定した。GAには100個体を用いた。

収束履歴をランクの平均値を用いて図3に示す。数世代で全

集団がランク1に到達しているが、ニッチングのためランク1と2の間で収束が停滞する。また、ランク1への収束がパレート解への収束とは限らないが、現段階ではこれに代わるよりよい収束の指標は確立されていない。

最適化結果を図4、5に示す。図4は目的関数空間におけるパレート解の分布を示している。パレート面の形状を近似的に表している。この面の接線からトレードオフを定量的に求めることができる。図5には、パレート面からそれぞれ誘導抵抗最小、翼重量最小、アスペクト比最小である個体と、パレート面中央の個体を取り出し、その個体のもつ平面形を示す。抵抗最小と重量最小の形状はよく似ており、どちらも後退角が大きく、翼面積が小さい。一方、アスペクト比最小の翼は、後退角が小さく、翼面積が大きい。パレート面中央では、それぞれの最適化目的の最も良く満たした平面形の妥協解が得られていることがわかる。

#### 5. まとめ

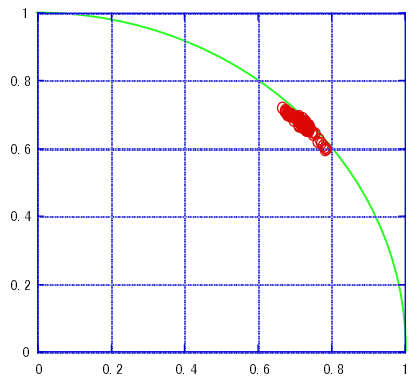
いくつかの世代交代モデルとニッチングを組み合わせて、単純化された多目的最適化問題を解いた。その中から、「CHC+FS」がMOGAに有効であることがわかった。

さらにこの手法を、超音速旅客機主翼の平面形を線形の空力解析と構造重量の経験的推定式により複合最適化する問題に適用し、様々なパレート解を得ることができた。個々の解のうち、特に単一の目的に適した解はその目的にかなった形をしており、またパレート面中央の解はそれらのよい妥協解を与えていることがわかった。

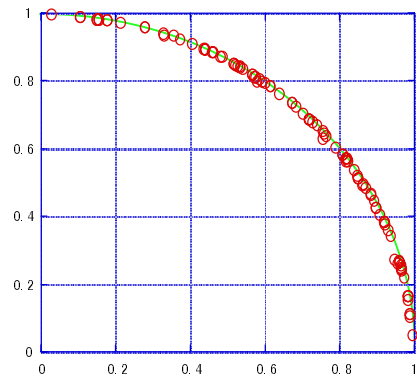
今後は、空力や構造の解析モデルのレベルをあげ、また、設計変数を増やして形状の自由度を上げ、より実用的な設計を試みてみたい。

#### 6. 参考文献

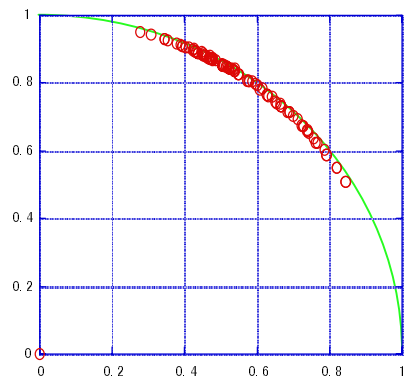
1. Fonseca C. M., and Fleming, P. J.: Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation, discussion and generalization, *Proceedings of the 5th International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, 1993, pp. 416-423.
2. Eshelman, L. J.: The CHC adaptive search algorithm: How to have safe search when engaging in nontraditional genetic recombination, *Foundations of Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann Publishers, Inc., San Mateo, 1991, pp. 265-283.
3. Goldberg, D. E. and Wang, L.: Adaptive niching via coevolutionary sharing, Quagliarella, D., Periaux, J., Poloni, C. and Winter, G. (Eds.), *Genetic Algorithms and Evolution Strategies in Engineering and Computer Science*, John Wiley and Sons, Chichester, 1998, pp. 21-38.
4. Carlson, H. W. and Middleton, W. D.: A numerical method for the design of camber surfaces of supersonic wings with arbitrary planforms, NASA TN D-2341, June 1964.
5. Torenbeek, E.: *Synthesis of Subsonic Airplane Design*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1982.



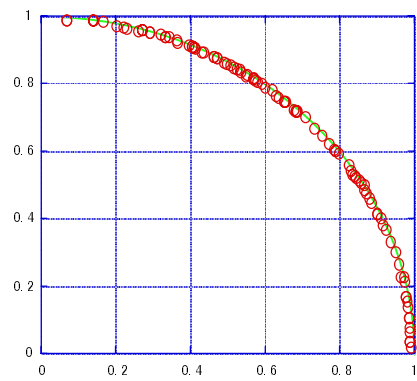
a) Pareto solutions obtained from SG + FS



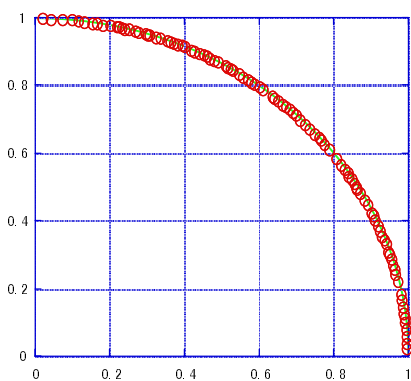
a) Pareto solutions obtained from SG + CSN



b) Pareto solutions obtained from ER + FS



b) Pareto solutions obtained from CHC + CSN



c) Pareto solutions obtained from CHC + FS

Fig 2. Comparison of the generational models using CSN.

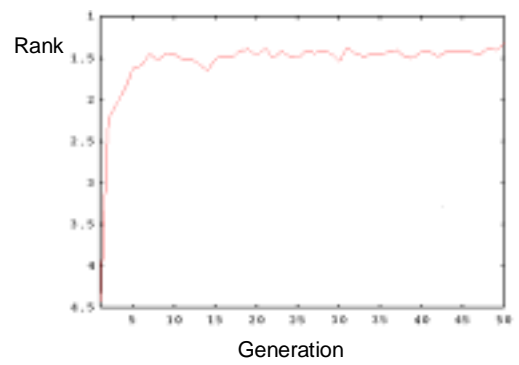


Fig 3 Rank-based convergence history.

Fig 1. Comparison of the generational models using FS.

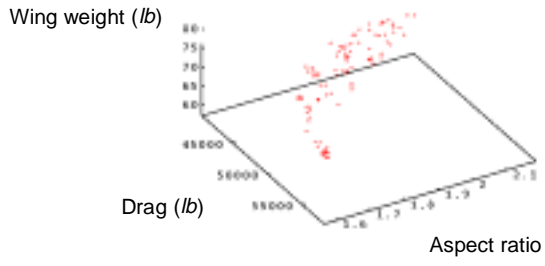
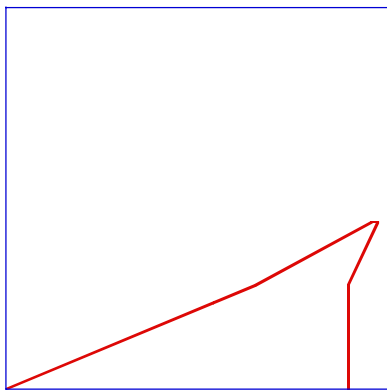
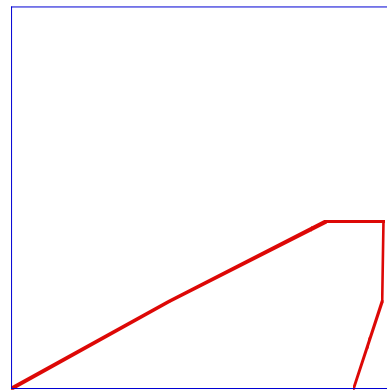


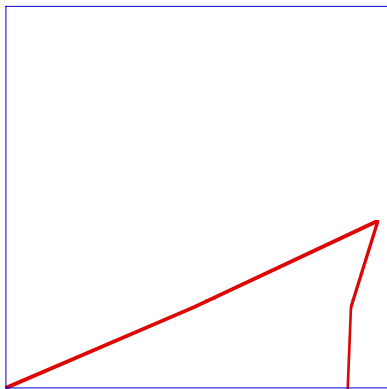
Fig. 4 Pareto solutions in objective function space.



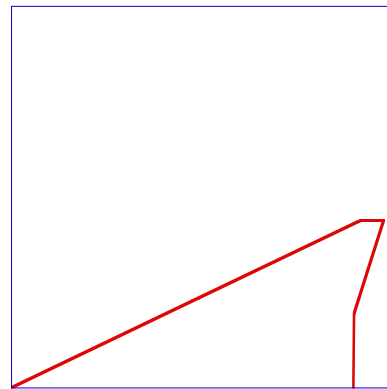
a) Minimum drag



c) Minimum aspect ratio



b) Minimum weight



d) Center of Pareto surface

Fig. 5 Planform shapes of Pareto solutions.