多数非劣解集合からの設計支援手法の開発

ジェットエンジン最適化を通して

Development of a Design Support System that Can Efficiently Utilize Non-dominated Solutions

Through an Example of Turbojet Engine Design

渡邊 真也
Shinya Watanabe

室蘭工業大学 情報工学科
Department of Computer Science & Systems Engineering, Muroran Institute of Technology
sin@csse.muroran-it.ac.jp, <http://is.csse.muroran-it.ac.jp/>

湊 亮二郎
Ryojiro Minato

室蘭工業大学 機械システム工学科
Department of Mechanical Systems Engineering, Muroran Institute of Technology
r-minato@mmm.muroran-it.ac.jp

keywords: Design Support Method, Selection Support Method, Non-dominated Solutions, Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Jet-Engine Optimization

Summary

This paper proposes a new design support approach, which efficiently utilizes the information of many non-dominated solutions obtained from evolutionary multi-criterion optimization (EMO). The proposed approach consists of four mechanisms: grouping (clustering), reducing the number of candidates (selecting the representative solutions), dimensionality reduction, and estimation.

Non-dominated solutions can be regarded as a beneficial subspace in whole search space, which have the feature of being non-inferior to other solutions. Therefore, we think the proposed approach can be used to estimate the characteristics of a problem through the interaction with the designer.

In this paper, we examine the characteristics and effectiveness of the proposed approach through computational experiments on a design problem of a counter rotating axial fan turbojet engine. A counter rotating axial fan turbojet engine with two spools is chosen for the design target of the present study. We handle this task as a seven-objective design problem.

1. はじめに

進化的多目的最適化 (Evolutionary Multi-criterion Optimization: EMO) に関する研究は、近年盛んに行われるようになり大きな進歩を見せている [K. Deb 01]。特に、NSGA-II, SPEA2 といった高性能探索アルゴリズムの登場以降、実問題に対する応用事例が数多く行われるようになり、幅広い領域においてその成果が報告されている [Coello Coello 04]。

これまでの研究により、良質な非劣解を効率的に探索するメカニズムが解明される一方、多変数、多目的の解集合からどのように問題の特性や傾向を読み取れば良いのかという点が大きな課題として浮かび上がってきた。この背景には、多くの現場において最良解そのものよりも問題の特性について知りたいという要望が非常に強いことが挙げられる。

しかしながら、これまで数多くの EMO に関する研究が行われているものの非劣解集合から問題の特徴量および傾向を抽出しようとする研究はほとんど行われていない。設計者の解の絞り込みを支援するための選好支援に

関しては、設計者の好みを解探索や解の絞り込みに反映させる方法など、多数報告されているものの [Cvetković 00, Coello Coello 00]、これらの多くは設計者の好みを理想点として入力してもらう、幾つかの質問を通して設計者の好む目的関数の重みを推定するなど、高次元非劣解集合の特性を推定し設計者に情報を提示する仕組みとはなっていない。一方、高次元非劣解集合全体の把握を支援する取り組みとしては、SOM などを利用し高次元非劣解集合を 2 次元に可視化する取り組みが報告されている [Obayashi 03]。これらの方法は、空間全体の把握に非常に効果的であるものの、設計者側が望む問題特性を効率良く提供するという設計支援の視点まで考慮されていない。

我々は、非劣解集合の全体像を提示するだけでなく、「その目的関数にはどのパラメータが大きく寄与しているか」、「解どうしの目的関数の異なりが何に大きく起因しているか」といった設計者側からの要求に対話的に応え、最終的な解設計を効率良く支援するような仕組みが必要であると考えている。

そこで、本研究では多目的最適化により得られた非劣

解集合から解の特性を推定し、設計者の支援を行う新たなアプローチを提案する。多目的最適化により得られる非劣解集合は、多変数、多目的かつその解候補の数も多数存在するという特徴がある一方、解空間全体から見て「他の解と比較して一意に劣っていない」という特徴を持つ有用性の高い部分空間と見ることができる。提案するアプローチは、そのような解集合から問題の特性・傾向を抽出し、設計者の求める情報を効率良く提供することを目的としており、設計者が嗜好する最適解そのものを選択するための支援というよりも、問題の傾向、最適解を設計するためのプロセスに関する情報を提供することに主眼を置いている。

提案するアプローチでは、主に下記の 4 つのメカニズムを組合わせて用いることにより、効果的な設計支援の実現を試みる。

- 非劣解集合のクラスタリング（グループ化）
- 小数個の代表解の抽出
- 高次元非劣解集合の可視化
- 各クラス間への比較に基づく解特性の推定

本手法に対する実際の設計問題への適用の可否を検証するため、小型反転軸流ファンターボジェットエンジン設計問題への適用を試みた。このエンジンは室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターで、研究・開発が進められている小型無人超音速機の推進エンジンとして搭載が想定されており、出来るだけ小さいファン径（200mm 以下）で、大推力であることが要求される。このエンジンは、二段の互いに反転するファンで空気を吸込み、圧縮するので、二軸のタービンシャフトを有し、それぞれ一段のタービンで駆動している。このエンジンの設計には、多数のパラメータを適切に選択する概念設計の段階を経て、それらを元にファン翼形状やタービン翼形状等の詳細設計の段階を踏まなくてはならない。それ故、概念設計の段階で適切にパラメータを選択する必要があり、有効な最適化手法が望まれる。

本設計問題における最終的な目標は、小型で、大推力のターボジェットエンジンの実現であるが、概念設計の段階では、ファンやタービンが空力的に成立できるように、ファン動翼の翼負荷やタービンの流入方向等の翼間流れの状態についても評価しなくてはならない。そこで、本設計問題を 7 目的、27 変数として定式化し、EMO アルゴリズムの 1 種である SPEA2+[Kim 04] を用いて多目的最適化を行い、得られた非劣解集合に対して提案するアプローチの適用を試みた。

以下、本論文の構成について述べる。まず 2 章において、これまでに提案されてきた選好支援、選好方法について概観するとともにその問題点について言及し、3 章において設計支援に求められるメカニズムとその関連研究について述べる。その上で、4 章では、提案する設計支援アプローチについて述べ、本論文で対象としたジェットエンジン設計問題について 5 章において説明する。6

章において提案手法の検証実験を行い、最後にまとめる。

2. 意志決定・設計支援に関する先行研究

これまで、多目的環境下における意志決定 (multiple criteria decision making, MCDM)、設計支援 (multiple criteria decision aid, MCDA) に関する研究は、様々な角度、様々な対象に対して行われてきた [Cvetković 02, Coello Coello 00]。

Coello らの調査 [Coello Coello 00] によると、これまでの意志決定に関する手法としては、2 つの対象比較に基づく「The French school」手法と各目的を何らかの方法で単一の嗜好関数化する「The American Multi Attribute Utility Theory : MAUT」の 2 つのアプローチに大別することができる。これらの両アプローチともに、その多くは対話的な方法に基づいて意志決定者の嗜好を推定、反映させながら解探索を進めるというものである。

また、進化的アルゴリズム (Evolutionary Algorithm: EA) を利用した意志決定手法についても、事前に目標状態を追加の目的として扱い探索効率を向上させる方法 [Fonseca 93]、MAUT のように選好者の嗜好に基づいて多目的問題を単一評価関数化する方法、ファジィ論理を用いて選好者の嗜好を推定する方法など多数のアプローチが提案されている [Coello Coello 00]。しかしながら、その多くは EA における探索範囲を限定化することにより探索効率の向上を図るものであり、EMO により得られた多数の非劣解集合から問題特性を推定し選好者側の求める情報を提供するといった設計支援を意図した方法は提案されていない。

一方、近年の EMO 分野の発展により、2 目的以上の多数目的を対象にした応用例も数多く報告されるようになり [Coello Coello 04]、高次元の多数非劣解集合からどのようにその解特性を推定するかが大きな問題となっている。この問題を解決するには、得られた高次元の多数非劣解集合をどのように視覚化し、解集合の持つ有用な情報をどのように引き出すかといった視点が必要であり、解探索の効率化および探索空間を絞り込むことを目的とするこれまでの意志決定に関するアプローチでは解決することができない。

3. 設計支援に求められるメカニズムとその関連研究

2 章で述べた従来研究の問題点を解決し、実用的な設計支援を実現するためには下記のメカニズムを実現する必要がある。

- 多数目的の解空間を視覚化

- 非劣解集合のクラスタリングおよびクラスタリング結果を通じた傾向の抽出

- 膨大な数の解候補を一定数まで削減（絞り込み）

多数目的空間の視覚化は、目的関数空間全体を設計者が把握するために不可欠な事柄であり、高次元空間の低次元化（次元縮約）の手法を適用する必要がある。低次元化に関する研究はこれまでに多数行われており、後述するとおり既に SOM を利用した高次元非劣解集合に対する低次元化が試みられている [Obayashi 03]。

また、非劣解集合のクラスタリングおよび傾向の提示は、設計者が求める解集合の傾向を効率良く分析するメカニズムであり、設計者が膨大な解候補を吟味し解集合の傾向を掴む労力を軽減するために必要なものである。膨大な解集合の大まかな傾向を把握するための方法としては、解集合をいくつかのクラスタに分割し、それぞれのクラスタの特徴を把握する方法が有効である。また、クラスタごとの比較を通じてクラスタ間の傾向を容易に推測することができるため、解集合のクラスタ化において設計者の意図を適切に組み込むことにより設計者の求める情報を効率良く提供することも可能となる。

最後の解候補の絞り込みは、設計者が解候補の詳細な傾向を把握することを支援するために必要な事柄である。一般に、設計者は目的関数空間における解候補の分布のみに基づいて解選択している訳ではなく、解候補の持つ設計パラメータ等の情報を詳細に吟味しながら選好作業を進める。そのため、膨大な解候補の 1 つ 1 つを吟味することは物理的に困難であり、何らかのサンプリングが必要になる。本研究では、膨大な解候補から適当に選んで吟味するよりも、特徴の異なる代表的な解候補を抽出し、それらの解候補を設計者に吟味してもらうことでより効率的に解候補探索、全体的な解候補の傾向を把握が可能になると考えている。

3.1 設計支援に SOM を利用することの問題点

多数目的空間の視覚化およびクラスタ分析を通じたデータマイニングを行っている先行研究として、大林らによる SOM を用いた事例が挙げられる [Obayashi 03]。彼らは、4 目的非劣解集合を SOM を用いて 2 次元平面に写像し、得られたマップをそのままクラスタ分析として利用する方法を用いている。このことにより、単に高次元非劣解集合全体を視覚化するだけでなく、クラスタ分析を通して大まかな特性をわかりやすく提示することに成功している。

SOM では、データ間の距離に基づいて多次元データを 2 次元上に縮約し、その 2 次元マップにおける近傍関係（厳密にはデータ空間の位相的順序も考慮）に基づきクラスタリングを行う。2 次元マップを作成する際、重要になるのは「どの属性（変数）を用いるか」「どの変数がどれだけ他の変数よりも重要であるか」を決定することであり、クラスタリング結果はその定義に基づいて決

定する。

しかしながら、設計者側に希望するクラスタリングが存在し、その要求に基づく分類分けを行う場合、SOM には次のような問題点がある。SOM では、データ間の距離を適切に定義することにより要求に近いクラスタリングを実現することができる。しかし、そこで得られた 2 次元マップは設計者側が定義した距離に基づく近接度合いで得られたものであり、設計者側の定義から抜けている属性値の類似度は全く考慮されていない。その結果、得られた 2 次元マップ上での個体間の類似度はあいまいなものになり、2 次元マップを基に候補解を選好する際に問題となる。すなわち、個体間の距離の定義が実現したいクラスタリングに完全に依存したものとなり、適切な個体間の類似度定義と矛盾する場合が起こりうる。

一般に、設計者は問題に対する事前知識を有しており、設計者側の確認したい事項は明確である場合が多い。そのため、設計者側の意図を直接クラスタリングに組み込むことができ、かつ次元縮約における個体間の類似度定義が要求するクラスタリングに依存しない方法が求められる。そのため、本研究ではクラス分類が既知であるデータ（ラベル付きデータ）に対して低次元化を行う手法が目的とする設計支援には適した方法であると考えられる。

3.2 解候補の絞り込みに関する先行研究

一方、解候補の絞り込みに関連する先行研究としては、Laumanns らによる ϵ -dominance [Laumanns 02]、池田らによる α -domination [Ikeda 01] や佐藤らの提案する方法 [Sato 07a, Sato 07b] などいくつか提案されている。これらはすべて多目的における支配領域の変化に基づく手法であり、合理的に解候補を絞り込む方法として利用することができる。本論文では、解候補の絞り込み手法としてその利便性と計算コストの面から佐藤らの提案する方法を採用した。絞り込みに関する詳細については 4.2 節に示す。

4. 提案する設計支援アプローチ

本論文では、EMO により得られた高次元非劣解集合を基に問題の特性を推定し、設計者の求める情報を効率良く提供する設計支援アプローチを提案する。本アプローチは、これまでの意志決定問題に対するアプローチと異なり、非劣解集合から問題の特徴量および傾向を抽出することを目的としている。すなわち、多数の非劣解集合の中から設計者の嗜好する解を効率良く見つけ出すことよりも、設計者が最適解を設計するためのプロセスに関する情報を提供することに主眼を置いている。

我々は、3 章で述べた 3 つの事柄（全体像の視覚化、クラスタリングおよび傾向の抽出、絞り込み）を実現するため、以下のツールを組み込み、それらのツールを連動させるアプローチを提案する。

- 1) クラスタリング
- 2) クラスタ内での代表解の抽出
- 3) 高次元空間の低次元化
- 4) クラスタ間の比較に基づく特性抽出

提案するアプローチでは、図 1 に示すように上記の 4 つのツールを連携させるモデルを考えている。本提案手法における最大の特徴は、非劣解集合全体を幾つかのクラスタ（グループ）の集まりとして捉え、クラスタを 1 つの塊として問題の特性推定に利用している点である。具体的には、クラスタの特徴を保持したまま低次元化し、クラスタ間の比較を通じた問題特性の推定を試みている。

クラスタに基づく解析を行っている理由は、解集合をクラスタに分割する際に設計者の意図を組み込むことができるためである。各クラスタの特徴を保持したまま低次元化する手法を採用することにより、低次元に視覚化された解分布に設計者側の意図を強く反映させることができる。その結果、設計者側の結果分析の負荷を軽減するとともに効率の良い設計支援が実現できるものと考えている。

本研究では、上記のアプローチを異なる角度から繰り返し適用することで設計者の求める要求にインタラクティブに返答する仕組みを最終的な支援システムとして想定している。例えば、異なるクラスタリング設定での適用から様々な角度からの問題特性を得ることができる。また、クラスタリングの対象とする非劣解集合を徐々に削除（不要と思われる解集合を削減）することにより効率の良い解の絞り込みを支援できると考えている。

以下、本アプローチで用いた各ツールについて説明する。

4.1 クラスタリング

提案手法では、基本的に設計者の意図に基づくクラスタリング（グループ分け）を前提としているが、クラスタリングを補助、もしくは代用するツールとして k-means 法や Fuzzy c-Means (FCM) 法等の代表的なクラスタリング手法を用いたクラスタリングも想定している。

クラスタリング手法を用いたクラスタリングでは、解どうしの距離の定義（近接度合い）を定義する必要があるが、本研究では距離定義として以下の 3 種類を想定する。

- 設計変数空間での距離定義に基づくクラスタリング
- 目的関数空間での距離定義に基づくクラスタリング
- 設計変数空間・目的関数空間での距離定義に基づくクラスタリング

本提案手法では、クラスタリングにおいて積極的に設計者側の意図を組み込むことを想定しており、クラスタ化した段階において設計者側が各クラスタの特性を把握していることを前提にしている。これは、後述する 2 次元縮約の段階において設計者が 2 次元縮約マップを容易に解釈できるようにするためである。

そのため、クラスタリング手法を補助的に用いる場合においても、設計者側の意図を反映させた距離定義を用

図 1 提案手法のフローチャート

いる必要がある。なお、本論文における数値実験では、解集合のグループ分けにおいてクラスタリング手法を利用していない（6.1 節参照）。

4.2 代表解の抽出法

代表解の抽出法として、佐藤らの提案する Local Dominance (LD) を採用した [Sato 07a, Sato 07b]。LD は解の支配の概念を一般化し、個体間の支配関係に強弱を導入するための手法であり、他の手法に比べて計算量も小さく強弱制御が柔軟に行えることから採用した。

LD における評価値変更の概念図を図 2 に示す。図 2 は、2 目的の場合において解 x の目的関数値 $f_i(x)$ を $f'_i(x)$ へ変更している例を示している。図中における $f(x)$ は解の目的関数値ベクトルであり、横軸 f_i は LD により変更しようとしている目的関数、縦軸は f_i 以外の目的関数である。また、 r は、 $f(x)$ のある点（図では原点）からの距離（ノルム）を表している。

LD では、図 2 に示すように $f(x)$ のノルム r と、一意に定まる f_i 軸と $f(x)$ が作る角度 ω_i に変化パラメータ φ_i を用いて f'_i に変更し、その値を用いて優越関係の評価を行っている。 $\varphi_i = S_i \cdot \pi$ と表し、パラメータ S_i による LD の一般式を下記に示す。

$$f'_i(x) = \frac{r \cdot \sin(\omega_i + S_i \cdot \pi)}{\sin(S_i \cdot \pi)} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

式 (1) における S_i を変更することで支配の強弱を変更することができる。具体的には、 $S_i = 0.5$ のとき従来

図 2 支配領域の変化による適合度 $f(x)$ の変化 図 3 パラメータ S による支配領域の変化

の支配の強さと等価となり、 $S_i > 0.5$ で従来よりも弱い、 $S_i < 0.5$ で従来よりも強い支配を実現する。本研究では、解の抽出方法として LD を用いるため支配の強制御である $S_i < 0.5$ のみを使用する。

S_i と支配関係の変化に関する概念図を図 3 に示す。2 目的関数空間に分布した解 a, b に対して、従来の支配 ($S_1 = S_2 = 0.5$) では解 a と b は互いに支配しない関係にある。対して、パラメータを ($S_1 = S_2 < 0.5$) とすると評価値のマッピングにより各個体が支配する領域が拡大し、解 a' は b' を支配するようになる。図 3 では、LD により従来よりも強い支配を定義することができ、解の精緻な支配関係が実現できることを示している。LD の詳細については、文献 [Sato 07a, Sato 07b] を参照のこと。

本研究では、LD を用いた支配領域の拡張を“領域の指向方向”に基づいて行った。具体的には、クラスタリングで分割された各領域内での目的関数値の平均をそのクラスタにおける指向方向であると考え、以下の計算式によってパラメータ S_i の重み ω_i を決定した。

$$\omega_i = 1 - \frac{f_i}{f_{\text{sum}}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

式 (2) における f_i は、クラスタ内の目的関数 i 番目の平均値を表しており、 f_{sum} は $f_i (i = 1, 2, \dots, m)$ の総和を表している。なお、式 (2) ではすべての目的関数が最大化であり、すべての目的関数値が 0~1 にスケールされている条件のもと、代表解抽出を行うことを想定している。

上記の“領域の指向方向”に基づく支配の拡張を行うことにより、その領域を最も代表する解候補を抽出することができると考える。

4.3 カーネル次元削減法

本提案手法では、可視化および特性推定のための方法として福水らの提案するカーネル次元削減法 (Kernel dimensionality reduction, KDR) を用いた [Fukumizu 06]。KDR は、線形判別法と同様にクラス分類が既知である高次元データから、クラスの情報をできるだけ保持するような低次元空間を求めることを目的としており、説明変数 X (属性) を用いて応答変数 Y (クラス) の統計的依存関係をみる回帰問題、または識別問題を対象とし、 X に含まれる Y の情報をすべて保持するような説明変数空間の低次元空間 (有効部分空間) S を求める。その特徴は、カーネル法を利用しているため非線形の問題にも対応できる点、問題に対しモデルや制約をなるべく置かず、セミパラメトリックなアプローチをとる点である。

KDR の簡単な概要について説明する。KDR では、低次元部分空間 S の推定を確率変数の条件付き独立性の問題として定式化し、それを再生核ヒルベルト空間を用いて解くことにより、低次元部分空間 S を求めている。低次元部分空間 S は、下記の最小化問題の解として与えられる。

$$\min \frac{\det \sum [YU][YU]}{\det \sum_{YY} \det \sum_{UU}} \quad \text{ただし } U = B^T X \quad (3)$$

上式は、クラス番号 (出力値) を表す Y をよりよく説明する行列 U を求めることを意味している。すなわち、行列 U の張る空間が最適な有効部分空間 S であり、行列 U は各属性に B 行列の各要素を掛け合わせたものであるため、この B 行列の要素を推定することが KDR の目的となる (KDR に関する詳細については文献 [Fukumizu 06] を参照のこと)。

KDR ではカーネル関数として、RBF カーネル関数 $k(x_1, x_2) = \exp(-\frac{\|x_1 - x_2\|^2}{2\sigma^2})$ を使用し、最適な行列 B の各要素を求めるために、ガウス核関数の分散パラメータを徐々に小さくしていく一種のアニーリング手法を利用している。なお、RBF 関数における x_1, x_2 は内積計算したい 2 つのベクトルを表しており σ は RBF カーネルに関する実数パラメータである。

4.4 解集合の特徴分析

本研究では、“2 クラスタ間において各クラスタを特徴付けている属性は何か”を分析するため KDR を利用した。

4.3 節で述べたとおり、KDR において行列 U の張る空間が最適な有効部分空間であり、行列 U は各属性に B 行列の各要素を掛け合わせたものであることから、最適化により得られた B 行列の各要素は各属性の重みを表していると考えられる。すなわち、 B 行列の値の絶対値が大きいほど対応する属性は重要視されており、逆に B 行列の値が小さければ、対応する属性は最適な有

図 4 反転軸流ファンターボジェットエンジンの断面図

効部分空間を求める際に役に立っていない属性と捉えられる。

そこで、本研究では 2 つのクラスタに対して KDR の 1 次元縮約を行うことにより、2 つのクラスタ間においてどの属性がそのクラスタの特徴付けに大きく寄与しているかを推測することができると考えた。具体的な手順を以下に示す。

- 1) 各クラスタの情報および各クラスタ内において選択された代表解の結果より、着目する 2 つのクラスタを選択する。
- 2) 選択したクラスタに含まれるデータ点に対して KDR の 1 次元縮約を行う。
- 3) B 行列の値から各属性値のクラス特徴付けへの寄与を推定。

上記の特徴分析により、近接するクラスタ間の特徴の明確化することができ、クラスタ間の差異がどの属性により生じているのかといった情報を設計者側に提供することができる。

5. 小型超音速機用反転軸流ファンターボジェットエンジン設計問題

本論文では、提案アプローチの実際の設計問題への適用の可否を検証するため、小型反転軸流ファンターボジェットエンジンの設計問題を用いた。対象とするターボジェットエンジンの設計図を図 4 に示す。対象とするエンジンは、二段のファンが反転すること以外、通常のターボジェットエンジンと同様のサイクルで作動しているため、以下のような制約条件がある。

- 同じ軸を有するファンとタービンの回転数は一致する。
- 同じ軸を有するファンの圧縮仕事とタービン仕事は一致する。
- ファンで吸込んだ空気流量とタービンを通過する流量との差は、タービンをバイパスさせた流量から燃料流量を差し引いた量に等しい。
- 高圧タービンの入口圧力は、第 2 ファンの出口圧力から燃焼器の圧力損失を差し引いた圧力に等しい。

これらの条件を満たしながら、ジェットエンジンのサイクル諸元を決定する必要がある。ここでは、空気流量 (1 パラメータ)、回転数 (高圧タービンと低圧タービン

表 1 設定した目的

Maximize	Thrust per unit area (F/A)
Minimize	Wing surface load of 1st fan (Diffusion)
Minimize	Wing surface load of 2nd fan (Diffusion2)
Minimize	Specific heat of constant pressure of pitch circle diameter on 2nd fan (cp_l_pcd2)
Minimize	Specific heat of constant pressure of tip on 2nd fan (cp_l_tip2)
Maximize	Relative fluid inlet angle of high pressure turbin inlet (β_{inh})
Minimize	Relative fluid inlet angle of low pressure turbin inlet (β_{inl})

図 5 圧縮機の段の構成と翼列

で 2 パラメータ)、ファン圧力比 (2 つのファンで計 2 パラメータ)、2 つのファン断熱効率 (2 パラメータ)、ファン動翼コード長 (2 パラメータ)、タービン動翼の反動度 (二つのタービンで計 2 パラメータ)、タービン動翼入口絶対マッハ数 (2 パラメータ)、二つのタービン入口絶対流入角 (2 パラメータ)、各翼列間の流路半径 (合計で 12 パラメータ) の計 27 項目を設計パラメータとして与え、ジェットエンジンのサイクル諸元を決めることとした。ジェットエンジンサイクルの計算方法は、[Oates 84, Mattingly 06]などを参照のこと。またタービンに関する性能計算は、[Glassman 94, Glenn Research Center 74]などを参照のこと。

また、制約条件としては以下の項目を設定した。

- ファンの翼列では、空気の修正流量が $190\text{kg}/\text{m}^2$ 以下であること．タービンでの流量がチョーク流量以下であること．
- ファンのチップ周速（ブレードの最外径における回転速度）は $460\text{m}/\text{sec}$ 以下であること．タービンでは、チップ周速は $370\text{m}/\text{sec}$ 以下であること
- ファンの圧力上昇係数が 0.6 以下であること
- 流路の内径が 70mm 以上であること
- タービンにおいて、 $U/C0$ （ブレード回転数とガスの絶対噴射速度の比）が 0.7 以下になること
- タービンにおいてガスが、タービンブレードの圧力面に確実に噴射されること

また、目的関数には表 1 に示す単位ファン断面積当りの推力 (F/A)、2 つのファンの拡散係数 (Diffusion, Diffusion2)、二段ファンのピッチ円直径位置における空力負荷係数 (cp_l_pcd2)、二段ファンのチップ直径位置における空力負荷係数 (cp_l_tip2)、2 つのタービンの相対流入角 (β_{inh} , β_{inl}) の計 7 つを設定した．

単位ファン断面積当りの推力はエンジン性能に関わってくるパラメータであり、この値が大きいほど推力の大きなエンジンであることになる．最終的には、単位ファン断面積当りの推力が最大になることが目的になるが、現段階では概念設計の段階であり、得られたエンジン諸元がファンやタービンにとって成立するかどうか検証するため、次の 6 個の目的関数を設定した．

ファンの拡散係数は、ファン翼列において流れが剥離する限界をチェックするパラメータで、圧力上昇係数に類似したパラメータである（両者とも翼列流れの剥離限界を示している）．また拡散係数は小さい方が、ファン効率が良くなる傾向にあるため、制限関数としての役割を持たせるのと同時に、ファン効率を向上させるため拡散係数が小さくなるように最適化に組み入れた．

空力負荷係数は、ファンの周速に対してどの程度のファン仕事があるかを評価したパラメータであり、通常の場合、0.4 強以下の値となる．しかしながら、本研究で扱っている反転ファンの場合、空力負荷係数の制限は緩やかになるもののその特殊性から設計データベースが不足しており明確な設計基準を定めることができない．そのため、本実験では目的関数として設定し、極力小さい値となるよう最適化に組み入れた．

タービン流入角は、制約条件に直接関わってくる目的関数であり“タービンにおいて、タービンブレードの圧力面に確実に噴射されること”の制約条件をチェックする役割を果たしている．

通常、翼列間の流れの状態を把握するのに、速度三角形が用いられる．速度三角形は任意の翼列の入口と出口の絶対速度ベクトルと相対速度ベクトルを二辺に持つ三角形で、動翼の場合、これに翼の周速度が加わる．その例を図 5 に示す．

表 2 GA Parameters.

population size	300
bit length	270
crossover rate	1.0
mutation rate	1/bit length
terminal generations	500

速度三角形は、一般に圧縮機やタービンの流れの状態を概略的に扱うことができ、翼列設計の検討で最も基本的な事項になる．また翼列の成立性を検討する上で重要な役割を果たすことになるので、本研究でも解候補の特性を表現する方法として用いている．

6. 数 値 実 験

数値実験として、5 章で述べた 7 目的、27 変数のファンターボジェットエンジンの設計に対して多目的遺伝アルゴリズムの 1 種である SPEA2+[Kim 04] を用いた多目的最適化を行い、得られた 474 個の非劣解に対する提案手法の適用を試みた．

SPEA2+は、NSGA-II や SPAEA2 といったアルゴリズムと同様に非劣解集合を保存するアーカイブ機能を有しており、目的関数空間上での多様性だけでなく設計変数空間での多様性を保持するメカニズムを持っている．SPEA2+において用いたパラメータを表 2 に示す．ここでは、SPEA2+における交叉方法として 1 点交叉、突然変異手法としてビット反転を用いた．SPEA2+では、目的関数空間、設計変数空間のそれぞれで個体数分のアーカイブ領域を保持しているが、本実験ではそれらのアーカイブ個体群のうち解の重複を除いた 474 個を最終的に得られた非劣解集合として扱った．

提案する設計支援アプローチは、4 章において述べたように「クラスタリング」「クラスタ内での代表解の抽出」「高次元空間の低次元化」「クラスタ間の比較に基づく特性抽出」の 4 つのツールを連携させることにより成り立っている．以下、それぞれのツールの適用結果およびその考察について述べる．

6.1 クラスタリングおよびクラスタ内での代表解の抽出

まず、得られた非劣解集合に対してクラスタリングおよび、各クラスタ内での代表解の抽出を行う．ここでは、設計者の意向に従いファン周速に基づく分類分けを行った．ファン周速は、ファンのチップ半径と回転速度から求められるものであり、一般に高速であるほどファンの圧縮仕事を大きくすることができる．

本実験におけるクラスタリングでは、k-means 法といった代表的なクラスタリング手法を用いずに第 1 ファン、第 2 ファンの周速を基に表 3 に示す分類分けを行った．

SPEA2+を用いた最適化の結果、エンジンサイクルの諸制約を満たす解集合のファン周速分布として、第 1 ファ

図 6 各クラスでの目的関数値の分布

表 3 ファン周速に基づくクラスタリング

Cluster No.	1st Fan Circumferential Velocity	2nd Fan Circumferential Velocity
1	Low	Low
2	Low	Middle or High
3	Middle	Middle
4	Middle or High	Low
5	High	High

表 4 クラスタリングにおける第 1 ファン, 第 2 ファン周速レベルの割付

Cluster No.	(1st Fan Level, 2nd Fan Level)
Cluster 1	(1,1),(1,2),(2,1),(2,2)
Cluster 2	(1,3),(1,4),(1,5),(2,4),(2,5),(3,5)
Cluster 3	(2,3),(3,2),(3,3),(3,4),(4,3)
Cluster 4	(3,1),(4,1),(5,1),(4,2),(5,2),(5,3)
Cluster 5	(4,4),(5,5),(4,5),(5,4)

ンは $410 \sim 428 \text{ m/sec}$, 第 2 ファンは $430 \sim 450 \text{ m/sec}$ が得られた。本実験では, 各ファン周速に対しその速度に応じて周速度下位 (低速) 20% をレベル 1, 20% から 40% をレベル 2, 40% から 60% をレベル 3, 60% から 80% をレベル 4, 80% から 100% をレベル 5 とラベル付けを行い, 表 4 に示すような第 1 ファンおよび第 2 ファン周速レベルに応じたクラスタリングを行った。表 4 における括弧内は, 各ファンの周速レベルを表しており, 例えば (1,3) という表記は第 1 ファン, 第 2 ファンの周速レベルがそれぞれレベル 1, レベル 3 に該当する解集合を指している。具体的には, 第 1 ファン, 第 2 ファンの周速度がともにレベル 1 もしくは 2 に該当する個体をクラスタ 1 に, 逆に両ファンの周速度がともにレベル 4 もしくは 5 に該当する個体をクラスタ 5 と設定した。また, 両ファンの周速度におけるレベル差が 1 未満かつクラスタ 1, クラスタ 5 に該当しない個体をクラスタ 3 と設定した。クラスタ 2 は, 上記のクラスタ 1, 5 に該当しない個体のうち第 1 ファン周速のレベルが第 2 ファン周速のものよりレベル差 2 以上で小さいものであり, クラスタ 4 はクラスタ 2 における第 1 ファン周速レベルと第 2 ファン周速レベルの組み合わせを逆転したものである。

上記のクラスタ分類の結果, クラスタ 1 は第 1 ファン, 第 2 ファンともに周速が小さい個体群, クラスタ 5 は双方のファン周速が共に大きい個体群となり, クラスタ 2 および 4 は第 1 ファンと第 2 ファンの周速に差がある個体群, クラスタ 3 は双方のファンともに平均的な周速を持つ個体群による構成となっている。

クラスタリングの後, クラスタ化された各個体群に対して 4・2 節で述べた Local Dominance (LD) による代表解の抽出を行った。それぞれのクラスタから 2 個の代表解が抽出されるようにパラメータ S_i を動的に変化させ, 最終的に 10 個の解を抽出した。

本研究では, クラスタ化された個体群の特徴を設計者に提示するため, 各クラスタでの目的関数値および第 1 ファン, 第 2 ファンの周速度の分布を示すと共に代表解の速度三角形の形状を示した。これらの図をそれぞれ, 図

図 7 代表解の持つ速度三角形

6, 図 7 に示す。図 6 では, ダイヤモンドボックスを利用した解分布を示している。図中のダイヤモンドの上下の頂点がそれぞれデータ分布の 25% および 75% の位置を示しており, ボックスの水平ラインはデータ 50% の位置を示している。また, 小さな×印はデータ分布 5%, 95% を表しており, 小さなマイナス (-) 印はデータの最高値, 最低値を表している。また, 図 7 では紙面の都合上, 最も特性の異なるクラスタ 1 および 5 における代表解の速度三角形のみを示した。

設計者は, これらの結果より各クラスタと目的関数の関係を把握するとともに, 代表解の持つ速度三角形の形状からそのクラスタ内の持つ解候補の妥当性について吟味することができる。

図 6 から, 推力 (F/A) を除く他の目的についてはクラスタ 5 が良好である一方, クラスタ 1 では推力が高くその他の目的関数値が悪い様子が分かる。このことから, ファン周速が高い場合には設計上の負荷が軽くなる一方で大推力を得ることが難しく, ファン周速を遅くした場合は設計上の負荷が高くなるものの大推力が得られることが読み取れる。ファン周速が平均値に近いクラスタ 3 による結果が, クラスタ 1 およびクラスタ 5 の中間に近いものとなっていることからこの推測が確からしいことが分かる。

一般に, ファン周速が高いほど高い圧力比が得られる。そのため, エンジン推力も大きくなると考えていたが, ジェットエンジンが自立運転して作動するための制約, 空気力学的な制約, 構造強度上の制約といった数々のジェットエンジンシステムとして成立するための制約を考慮した場合, ファン周速と推力の間にはある種トレードオフの関係があることがこの結果より分かった。

図 8 カーネル次元削減法による低次元圧縮

また図 7 の速度三角形より、低压タービンにおける転向角（入口からの相対流出角と出口における相対流入角の差）が 30 度程度しかないと分かる。通常、この転向角は 40 度以上であることが望まれるため、実際の設計段階において出口偏差角を解のパラメータ値よりも大きく取るなどの必要があるが、同時に損失を発生させかねないので注意が必要である。

6・2 解集合の低次元化

クラスタリングした非劣解集合をカーネル次元削減法 (Kernel dimensionality reduction, KDR) を用いて 2 次元化した結果を図 8 に示す。

SOM を利用した場合と異なり解どうしが一部重なり合っているものの、5 個のクラスタの塊が 2 次元上にそれぞれまとまって縮約されている様子が分かる。また、クラスタとして最も特性が異なるクラスタ 1 とクラスタ 5 が大きく離れ、その間に中間の特性を持つ 3 つにクラスタが分布している点からも、この分布に一定の妥当性があることが読み取れる。

ここで重要なのは、図 8 における“軸”の明確な意味はないものの、設計者が各クラスタの特性を把握しているため得られた 2 次元マップを解釈しやすいという点である。この点は、SOM といったクラス分類されていないデータ（ラベルなしデータ）に対して縮約を行う低次元化手法と大きく異なる。

本研究では、2 次元に縮約された解候補点（図 8）を設計者が 1 つ 1 つ吟味していくことを想定しているが、図

表 5 クラスタ 1 とクラスタ 3 の比較より得られた上位 5 つの属性

Rank order	Name	Value of matrix B
1st	Number of rotations of 2nd FAN	0.67
2nd	Tip diameter of 1st FAN inlet	0.56
3rd	Number of rotations of 1st FAN	0.37
4th	Absolute direction angle of 1st turbine	0.15
5th	Tip diameter of 1st FAN outlet	0.13

表 6 クラスタ 3 とクラスタ 5 の比較より得られた上位 5 つの属性

Rank order	Name	Value of matrix B
1st	Tip diameter of 1st FAN inlet	0.63
2nd	Number of rotations of 2nd FAN	0.61
3rd	Tip diameter of 2nd FAN outlet	0.28
4th	Number of rotations of 1st FAN	0.18
5th	compression efficiency of 1st FAN	0.17

6 および図 7 の結果を併せて用いることで、よりスムーズに設計者が有望な解候補を探し出すことができると考えている。なお、図 8(b) および (c) に示すように図中に代表解の位置を明示することも可能であり、代表解周辺を特に調べたいといった場合にも本アプローチは対応することができる。また、図 8(b) から LD を用いて抽出した代表解どうしは必ずしも近傍付近に存在するわけではないことが分かる。

6・3 クラスタ間の比較に基づく特性抽出

ここでは、周速度の変化はどのようなパラメータに大きく影響を受けているのかについて、クラスタ間の比較に基づく提案アプローチを適用し調査した。具体的には、2 つのファンの周速の小さなクラスタ 1 と平均値に近いクラスタ 3、およびクラスタ 3 と周速の大きなクラスタ 5 の 2 つの場合について調査を行った。KDR の 1 次元縮約により得られた B 行列の要素の内、上位 5 つの値についてまとめたものを表 5、表 6 に示す。

表 5、表 6 の結果より、ファンに関する設計パラメータが大きく寄与していることが分かる。その中でも、総体的な値の大きさから 1 段目ファンの入口直径、2 段目ファンの回転速度が非常に大きな重要性を持っていることが分かる。

ファン周速度はファン径と回転速度の積により決定されるため、本実験の結果より、第 1 ファンについては回転数よりもファン径がより決定的であり、第 2 ファンについてはファン径よりも回転数がより支配的であることが読み取れる。この理由としては、タービンが大きく関わっていると考えられる。タービンの流路形状は、下流

にいくに従い流路を大きく設計しなければならず、そのため低压タービンの半径は高压タービンの半径よりも大きくなる。タービンの周速度は高温環境下で作動するため、ファンの周速度よりも厳しい制限を受ける。そのため、半径の大きな低压タービンの回転数は大きくしにくくなり、第1ファンの周速度を大きくするには回転数よりもファン径を大きくする解が多くなるものと考えられる*1。

一方、第2ファンと連動している高压タービンは、半径が小さいため回転数をより広範囲に変化させることができる。そのため、第2ファンの周速度に関しては、回転数がより大きく寄与するものと考えられる。

7. 結 論

本論文では、進化的多目的最適化 (Evolutionary Multi-criterion Optimization: EMO) により得られた多数非劣解集合から解の特性を推定し、設計者の支援を行う新たなアプローチを提案した。提案したアプローチは、クラスタリング (グループ化)、代表解の抽出、解分布の視覚化、クラスタ間比較による特性の推定という4つのメカニズムから成っており、設計者に対して非劣解集合の持つ情報をより効率良く提供することを目的としている。その最大の特徴は、クラスタ化およびクラスタ間比較の段階において設計者側の意向をくみ入れる仕組みを有しているため、設計者にとって得られた結果を分析する負荷が軽く、また効率良く求める情報を提供することができる点である。

提案したアプローチの有効性を検証するために行った小型反転軸流ファンターボジェットエンジンの設計問題への適用では、以下の事柄を非劣解集合から読み取ることになった。

- ファン周速と推進力には強い相関関係があり、ジェットエンジンのシステムとしての成立性を考慮した場合にはファン周速と推力の間にある種トレードオフの関係が生じることが確認された。
- ファン周速を向上させることで、ファンおよびタービンの翼負荷や成立性について改善されるものの推力は低くなることが分かった。
- ファン周速が低い場合には、大推力が実現されるものの、一方で設計面での成立性が犠牲になることが分かった。
- 推進力、ファン周速に関しては1段目ファンの入口直径、2段目ファンの回転速度が大きな重要性を有していることが分かった。

本対象問題では、概念設計を行うための指針を得ることを目的としており、最適解そのものよりも問題の傾向をつかむ、最適設計へのプロセスを見つけ出すことが求められている。適用実験を通じて、このような要求の問

題に対して本提案アプローチはある一定の有用性があることを示すことができた。

本研究では、提案するアプローチを繰り返し適用し、設計者の求める要求にインタラクティブに返答する設計支援システムを目標としているが、現段階では各ツールを1つのシステムで連動させ、設計者の要求に対してシームレスに返答する段階に至っていない。今後、本論文において提案したアプローチに基づく設計支援システムの実現に取り組んでいく予定である。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Coello Coello 00] Coello Coello, C. A.: Handling Preferences in Evolutionary Multiobjective Optimization: A Survey, in *2000 Congress on Evolutionary Computation*, Vol. 1, pp. 30–37 (2000)
- [Coello Coello 04] Coello Coello, C. A. and Lamont, G. B.: *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, World Scientific, Singapore (2004)
- [Cvetković 00] Cvetković, D. and Parmee, I. C.: Designer's Preferences and Multi-Objective Preliminary Design Processes, in *Proceedings of the Fourth International Conference on Adaptive Computing in Design and Manufacture (ACDM'2000)*, pp. 249–260 (2000)
- [Cvetković 02] Cvetković, D. and Parmee, I. C.: Preferences and their Application in Evolutionary Multiobjective Optimisation, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 1, pp. 42–57 (2002)
- [Fonseca 93] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J.: Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization, in *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, pp. 416–423 (1993)
- [Fukumizu 06] Fukumizu, K., Bach, F. R., and Jordan, M. I.: Kernel dimension reduction in regression, in *Technical Report 715, Department of Statistics, University of California, Berkeley* (2006)
- [Glassman 94] Glassman, A. J.: Turbine Design and Application, in *NASA SP-290* (1994)
- [Glenn Research Center 74] Glenn Research Center, : Liquid Rocket Engine Turbines, in *NASA SP-8110* (1974)
- [Ikeda 01] Ikeda, K., Kita, H., and Kobayashi, S.: Failure of Pareto-based MOEAs: Does Non-dominated Really Mean Near to Optimal?, in *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation 2001 (CEC'2001)*, Vol. 2, pp. 957–962 (2001)
- [KDeb 01] KDeb, : *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Chichester, UK:Wiley (2001)
- [Kim 04] Kim, M., Hiroyasu, T., Miki, M., and Watanabe, S.: SPEA2+: Improving the Performance of the Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2, in *Lecture Notes in Computer Science 3242, Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, pp. 742–743 (2004)
- [Laumanns 02] Laumanns, M., Thiele, L., Deb, K., and Zitzler, E.: Combining Convergence and Diversity in Evolutionary Multi-objective Optimization, *Evolutionary Computation*, Vol. 10, No. 3, pp. 263–282 (2002)
- [Mattingly 06] Mattingly, J. and Ohain, H. V.: Elements of Propulsion : Gas Turbine and Rocket, in *AIAA Educational Series* (2006)
- [Oates 84] Oates, G. C.: Aerothermodynamics of Gas Turbine and Rocket Propulsion, in *AIAA Educational Series* (1984)
- [Obayashi 03] Obayashi, S. and Sasaki, D.: Visualization and Data Mining of Pareto Solutions Using Self-Organizing Map, in *Second International Conference on Evolutionary*

*1 ここでは、同じ軸を有するファンとタービンの回転数は一致するという制約が効いている。

Multi-Criterion Optimization (EMO 2003), pp. 796–809 (2003)

[Sato 07a] Sato, H., Aguirre, H. E., and Tanaka, K.: Controlling Dominance Area of Solutions and Its Impact on the Performance of MOEAs, in *Evolutionary Multi-Criterion Optimization, 4th International Conference (EMO 2007)*, pp. 5–20 (2007)

[Sato 07b] Sato, H., Aguirre, H. E., and Tanaka, K.: Enhancing Multiobjective Evolutionary Algorithms by Local Dominance and Local Recombination: Performance Verification in Multiobjective 0/1 Knapsack Problems, in *IPSIJ Digital Courier*, Vol. 3, pp. 98–113 (2007)

〔担当委員：大林 茂〕

2008 年 6 月 10 日 受理

著 者 紹 介

渡邊 真也(正会員)

1977 年生．2003 年同志社大学大学院工学研究科 博士後期課程修了．工学（博士）．同年 産業総合研究所 生命情報科学研究センター 特別研究員，立命館大学 情報理工学部 講師を得て現在 室蘭工業大学 情報工学科 講師．進化的計算，最適設計，データマイニング等の研究に従事．IEEE，情報処理学会，日本知能情報ファジィ学会，システム制御情報学会各会員．

湊 亮二郎

1973 生．1997 年東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士前期課程修了．スバル研究所（現富士重工業）を経て 2002 年東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻博士後期課程修了．博士（工学）同年 九州工業大学 SVBL 研究員．2003 年室蘭工業大学機械システム工学科助手（現助教）．現在，小型超音速無人機用反転ファンターボジェットエンジン，熱分解吸熱反応燃料による再生冷却エンジンの研究に従事日本航空宇宙学会，日本燃焼学会，日本機械学会，AIAA（米航空宇宙学会）会員