

特集論文 「データマイニングとシミュレーション」

相関ルール分析に基づく非劣解分析支援システムの提案

ハイブリッドロケットエンジンへの適用を通して

A Proposal on Analysis Support System Based on Association Rule Analysis for Non-dominated Solutions

Through the Application to the Conceptual Design of Hybrid Rocket Engine

渡邊 真也

Shinya Watanabe

室蘭工業大学大学院 しくみ情報系領域

College of Information and Systems, Muroran Institute of Technology

sin@csse.muroran-it.ac.jp, http://is.csse.muroran-it.ac.jp/

千葉 祐大

Yuta Chiba

アクセンチュア株式会社

Accenture Japan Ltd

hartmann1661@gmail.com

金崎 雅博

Masahiro Kanazaki

首都大学東京 システムデザイン研究科

Graduate School of System Design, Tokyo Metropolitan University

kana@sd.tmu.ac.jp

keywords: non-dominated solutions, analysis support system, association rule

Summary

This paper presents a new analysis support system for analyzing non-dominated solutions (NDSs) derived by evolutionary multi-criterion optimization (EMO). The main features of the proposed system are to use association rule analysis and to perform a multi-granularity analysis based on a hierarchical tree of NDSs. The proposed system applies association rule analysis to the whole NDSs and derives association rules related to NDSs. And a hierarchical tree is created through our original association rule grouping that guarantees to keep at least one common features. Each node of a hierarchical tree corresponds to one group consisting of association rules and is fixed in position according to inclusion relations between groups. Since each group has some kinds of common features, the designer can analyze each node with previous knowledge of these common features.

To investigate the characteristics and effectiveness of the proposed system, the proposed system is applied to the concept design problem of hybrid rocket engine (HRE) which has two objectives and six variable parameters. HRE separately stores two different types of thrust propellant unlike in the case of usual other rockets and the concept design problem of HRE has been provided by JAXA. The results of this application provided possible to analyze the trends and specifics contained in NDSs in an organized way unlike analysis approaches targeted at the whole NDSs.

1. はじめに

進化型アルゴリズムを多目的最適化問題へ適用した進化型多目的最適化 (Evolutionary Multi-criterion Optimization: EMO) では, NSGA-II といった高性能アルゴリズムの登場および計算機環境の飛躍的向上にともない様々な分野への応用, 4 目的を超える多数目的問題への適用など新たな盛り上がりを見せている [Coello Coello 04, Deb 12].

一方, このような様々な応用事例および多数目的問題への適用により得られた非劣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問題が大きな課題として浮かび上がってきた. この背景には, 3 目的

を超える多数目的問題では目的関数空間において解を直接可視化することができないこと, 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強いことなどがある.

EMO により得られた非劣解集合は, 多変数, 多目的であり, その数も膨大であるため解析が困難である一方, 「他の解と比較して一意に劣っていない」という特徴を有する設計に有用なスイートスポット領域としてとらえることができる. EMO により得られた解を分析することの有用性については, 既に多数の研究者から指摘されており [渡邊 09, Watanabe 10, Obayashi 03, 山代 08], Deb は EMO により得られた非劣解集合の分析を通じてこれまで見えてこなかった新たな Innovation が生まれるという思いを

込め、EMO を通じた対象問題の分析を「Innovization」と呼びその重要性を指摘している [Deb 12] .

これまでに、自己組織化マップ (Self Organizing Map: SOM)、多重判別分析 (Multiple Discriminant Analysis: MDA)、カーネル次元削減法 (Kernel Dimensionality Reduction, KDR) といった様々な可視化手法を用いて非劣解集合を可視化、分析しようとする試みが行われており、それぞれ一定の成果をあげている [渡邊 09, Obayashi 03, 山代 08] . しかしながら、これらの手法を通して得られた可視化マップの多くは、分析や意味解釈が必ずしも容易ではない上、非劣解集合の大まかな傾向、特性についてしか読み取ることができず、求める情報が埋もれている可能性がある .

そこで本研究では、設計者の要求に応じた多粒度な非劣解集合分析手法として、相関ルール分析に基づく新たな分析支援システムの提案を行う . 提案手法は、これまでの非劣解集合全体の統計情報に基づく可視化、分析手法とは異なり、まず非劣解集合に対して相関ルール抽出を行い、その中に含まれる特性情報を基に非劣解集合全体を階層木の形で再構造化した後に、設計者にとって関心の高いノード (グループ) を選択してもらい必要部分の分析を行う . 本手法の特徴は、特徴抽出に相関ルールを利用している点、得られた相関ルール同士を階層的にグループ化することにより多粒度分析を実現している点である . 特に、共通性を保持した相関ルールの階層的グループ化を用いることで、全てのノードにおいて解集合に関する何らかの共通性保持を保障しており、使用者にとって意味解釈のしやすい階層木の実現を試みている .

また、階層木と多粒度については、先行研究で提案されている階層型クラスタリングによる多粒度分析システム [Watanabe 10] を参考に実装しており、非劣解集合の大部分に関わる広域的な分析情報から限られた部分にのみ関わる特殊性の高い分析情報まで粒度と関連付けた情報の提供を実現している .

提案システムの有効性を検証するため、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) に設置されているハイブリッドロケット研究ワーキンググループ (HRrWG) での研究の一環として大山、金崎らが構築したハイブリッドロケットエンジン (Hybrid Rocket Engine: HRE) 概念設計問題 [小杉 10] に対する数値実験を行った . 本対象は、非常に多くの要素が複雑に絡み合い推力や装備重量、到達高度といった評価値が決まる問題であり、従来の分析法では必要かつ詳細な設計情報が得られていない . ここでは扱う変数を 6 つに限定し総重量最小化と最高到達高度の最大化の 2 目的最適化問題として扱った .

2. 関連研究

著者自身の研究成果も含めた非劣解集合分析に関する先行事例について、可視化とデータ分析、非劣解集合の

部分化の 3 つの視点に分けて説明する .

2.1 非劣解集合の可視化

目的関数の数が 4 目的を超える場合、非劣解集合を直接可視化することができないため何らかの低次元化が必要となる . また、少数目的の場合においても設計変数次元を含めた次元で考えた場合、3 次元を超える高次元となるため、解の持つ情報全体を把握するためにはやはり何らかの低次元化が必要となる . 高次元データの可視化に対しては、これまで様々なアプローチが試みられており、以下、代表的ないくつかの事例について紹介する .

自己組織化マップ (SOM)

大林らは、自己組織化マップ (Self Organizing Map: SOM) を用いて非劣解集合を可視化 (2 次元化) し、クラスタ分析により非劣解集合の特性を読み取る方法を提案している [Obayashi 03] .

SOM に代表される非線形写像に基づく低次元化では、入力データのデータ間距離とクラスタ間距離を考慮した可視空間が構築できることから、データ間の近傍の類似性や散布状況を反映した図を得ることができる . SOM の最大の特徴は、高次元データを教師なし学習により自動的にクラスタリングできる点であり、得られた 2 次元マップに対して例えば各成分についてカラーリング (等高線図) を行うことで各成分間の相関について分析することができる .

ただし、SOM により得られた 2 次元マップには方向性やユークリッド距離の定義が行われていないため、その読解には注意が必要である . 2 次元マップの軸に物理的な意味はなく、近傍ユニット間の類似度が高いことは保障されているもののユニットごとに周りのユニットに対して異なる近さを持っており、離れたユニット同士が類似していないことは推察できても数個離れたユニットがどの程度類似しているのか (非類似なのか) を正確に推し量ることはできない . そのため、可視化されたデータの特徴を把握するためにはグラフ上にプロットされた個々の個体やクラスタの実際の数値データを吟味しながらの解析となる . そのため、データ数やクラスタ数が多い場合に可視化結果の解釈が困難であり、全体分析には有用である一方、データの分布構造の詳細な把握には適していないことが指摘されている [渡邊 09, 山代 08] .

ファジィ多重判別分析 (FMDA)

多重判別分析 (Multiple Discriminant Analysis: MDA) はクラスタ分割が既知のデータに対して、クラスタ内分散とクラスタ間分散の比を最大にするような線形変換を求める手法である . 山代らは、クラスタリングに Fuzzy C-Means (FCM) を使用し、各クラスタが最も分離するよう射影軸を Fuzzy MDA (FMDA) により求め、可視化する手法を提案している [山代 08] . この手法では、各射影軸に対する目的関数ごとの係数 (固有ベクトル) を参考にして、各軸の意味するところを推定することができ

るため、可視化したグラフ上のクラスタの分布からその特徴を比較的容易に把握することができる。

カーネル次元削減法 (KDR)

カーネル次元削減法 (Kernel Dimensionality Reduction, 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、任意の次元へ低次元化可能な手法である。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適用できる点、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 も MDA 同様、クラスタ間分散の比が最大となるよう低次元化を試みるが、非線形写像である点が大きく異なる。渡邊らは、クラスタリングした解集合に対して KDR を用いて低次元化し、解集合を可視化する手法を提案しており、各クラスタの特性が事前に既知である場合には、クラスタ間の類似度、重なり度合いなどから全体特性が読み取れることを示している [渡邊 09]。

2.2 非劣解集合に対する分析

2.1 節で述べた可視化手法を通して解集合全体の大きなトレンドは読み取ることはできても、変数と目的関数の部分的な関係、非劣解集合の中に含まれる特徴的なルールといった細かな情報を読み取ることは困難である。

一般的には、分散分析、相関分析などにより目的関数、設計変数の相関、相互作用について分析するが、依存関係が強い場合など必ずしも非劣解集合に含まれる相関を適切に炙り出せる訳ではない。

山代や渡邊は、非劣解集合全体をいくつかのクラスタに分類し、クラスタリングに基づく可視化および分析手法について提案している [渡邊 09, 山代 08]。これは、設計者の興味および意図を反映させたクラスタリングを行い、それらのクラスタに対してクラスタ間比較に基づく分析を実現することで設計者側の要求する情報提供を行うとするものである。

これらの研究結果より、非劣解集合全体を類似性に基づきいくつかのグループに分類することの有用性が示される一方、どのようにクラスタを生成するのか、クラスタリング結果に完全に依存した傾向しか読み取れないなど課題も明らかとなり、未解決のままとなっている。

一方、杉村、大林らは、従来の統計分析とは異なる決定木、ラフ集合、相関ルールといった論理分析ツールの有用性について報告している [SUGIMURA 09]。これらのツールは、目的関数、設計変数の相関、相互作用を定量的なルールで表現しているため、ユーザが結果からその意味を解釈する必要のある統計分析と違い、恣意性を排除した特性情報を得ることができる。しかしながら、彼らのツールはあくまで解集合全体への適用しか考慮されていないため、限定された解集合に潜む傾向といった局所的な特性の分析には向いていない。また、多粒度な分

析という視点についても考慮されていないため、ユーザの関心のある傾向がどの程度の汎用性と特殊性を持ち、より大局的な視点で見た場合のどの傾向のグループに含まれるのかといった系統的な分析を行うことは不可能という問題点がある。

2.3 非劣解集合の部分化について

単純に非劣解集合全体を対象とするのではなく、何らかのグループ化、クラスタ化手法により幾つかの部分集合に分割した上で非劣解集合を分析しようとする試みが幾つか行われている [Obayashi 03, 渡邊 09, 山代 08]。非劣解集合を部分化するメリットとしては、グループ間比較を通じた傾向の分析が可能になること、部分ごとに見た場合の情報量が大きく減少するため局所的な傾向を含んだより詳細な分析が実現できることなどが考えられる。

これまでに SOM を利用したクラスタ分析 [Obayashi 03] や k-means や FCM といったクラスタリング手法を用いてグループ化するアプローチが提案されているが、そのいずれも原理としては解集合の近接度合いに基づいたグループ化を実現している。

しかしながら、著者らの先行研究 [Watanabe 10] において示されているように、類似性に基づくグループ化では、本論文で提案するシステムのような階層的な分析の実現が困難という問題がある。これは、類似性に基づき分割した各グループ内の類似性は非常に高く、それ以上のグループ分割が実質的に行うことができないためである。また、各グループの中身や傾向について事前にはできないため、ユーザは1つ1つのグループをすべて吟味し主観に基づき傾向を分析する必要があるため、分析の効率という意味においても単純な類似性に基づくグループ化には問題がある。

3. 相関ルール分析

本研究において提案する非劣解分析手法では、まず非劣解集合の持つ特性や傾向を相関ルールとして抜き出し、その結果に基づいて情報の整理、再構造化を行っている。ここでは、相関ルールに関する最も基本概念およびその導出方法について簡単に説明する (詳細は、文献 [Linoff 97] を参照のこと)。

3.1 相 関 ル ル

相関ルールとは、ある事象が発生すると別の事象が発生しやすいという共起性を意味し、 $B \rightarrow H$ という相関ルールは $B(Body)$ という事象 (条件部) が起こると $H(Head)$ という事象 (結論部) が起こりやすいことを意味する。

一般的に相関ルールの重要性を測る指標として支持度 (support value) と確信度 (confidence value) が使用される。支持度とは、ルールが全トランザクションデータ

どの程度出現するかを表す割合であり、下記の式で表される*1。

$$\text{sup}(B \rightarrow H) = \frac{n(B \cap H)}{N} \quad (1)$$

ここで、 $n(B)$ は条件部 B を含むトランザクション数であり、 N は総トランザクション数を意味する。

支持度の高いルールにおける条件部の出現頻度は高いため、多くのデータに当てはまる重要なルールとみることができる。一方、確信度とは、条件部が起こったときに結論部が起こる割合であり、次式で表される。

$$\text{conf}(B \rightarrow H) = \frac{n(B \cap H)}{n(B)} \quad (2)$$

上式における $n(B \cap H)$ は、 B と H を含むトランザクション数を表している。

確信度の高いルールは、条件部と結論部の結びつきが強く信頼できるルールと言えるが、その条件部の出現頻度が低いルール（支持度の低いルール）の場合、確信度が高くてもルールとしての重要性はあまりない。つまり、ルールの信頼性を判断する上で確信度が高いことは重要であるが、支持度もある一定以上の高さが必要となる。

そのため、相関ルールの抽出では支持度と確信度にある閾値を設け、その値以上の支持度と確信度を有する相関ルールのみを抽出するのが一般的である。それぞれの閾値を最小支持度、最小確信度といい、最小支持度以上の支持度を有するアイテム集合を多頻度アイテム集合と呼ぶ。

3.2 相関ルール抽出方法

相関ルールは以下の 2 つのステップにより抽出される。

- Step1** ユーザから与えられた最小支持度以上の支持度を有するアイテム集合（多頻度アイテム集合）をすべて抽出する。
Step2 抽出された多頻度アイテム集合から、最小確信度以上の確信度を有する相関ルールを導出する。

Step2 は、すでに求められた多頻度アイテム集合からルールを導出する処理であり、その負荷は比較的小さいのに対し、Step1 は、アイテム集合の支持度を計算する度にデータベースを繰り返しスキャンし、そのスキャンに時間がかかることから Step1 の効率性が問題となる。Step1 を効率良く抽出するアルゴリズムとしては、Agrawal らの提案した Apriori アルゴリズム [Agrawal 94] が最も代表的であり、本研究においても Apriori アルゴリズムに基づく論理分析ソフトウェアである Weka [Witten 05] を相関ルール抽出に利用している。

*1 トランザクションとは 1 つのデータのこと、各トランザクションに含まれている項目をアイテムと呼ぶ。

4. 提案する分析支援システム

情報視覚化の設計方針について、Shneiderman は “Over first, zoom and filter, then details on demand.” という 3 つのレベルで表現しており [Shneiderman 98]、全体の概略から詳細なマイクロ部分の分析までをユーザの要求に従って提示できるような可視化であるべきとの指針を示しているが、2 章で述べたいずれの方法もこの指針要求を満たせていない。

本研究では、上記の指針要求を考慮した新たなアプローチとして、相関ルールに基づき非劣解集合を複数のグループに分割し、共通のルールに該当する非劣解集合のみを可視化、分析する多粒度に対応した分析支援システムを提案する。非劣解集合全体を複数の意味のある部分集合に分けて分析することで、含まれる情報量が単純に削減されるだけでなく、共通性を見出すことで分析の容易化を期待することができる。

従来研究の多くが非劣解集合全体を対象にした全体的な傾向の分析、もしくは何らかの方法により部分集合化した非劣解集合に対してグループ間の差異を分析しようとしているのに対して、提案システムではグループ内の共通性を必ず保持する階層グループ化を利用した多粒度分析を実現している。そのことにより、共通性という設計上の特徴を表すタグを目印にユーザは関心のあるグループを効率的に見つけ出すことができるだけでなく、グループ間の親子関係に着目した共通性の差異から体系的な関係についても容易に把握することができる。重要な点は、すべてのグループにおいて何らかの共通性保持が保障されており、その情報を分析対象となるグループの特徴および性質に関する既知情報として利用できる点である。

提案システムではグループを階層的にグループ化した階層木により多粒度を実現しているが、上記の共通性保持の特性により、仮に得られたグループ数が膨大であり階層木が複雑であってもユーザは共通性の情報に基づき容易に関心のあるグループを効率的に検出することができる。

以下、提案するシステムの詳細について述べる。

4.1 システムの手順

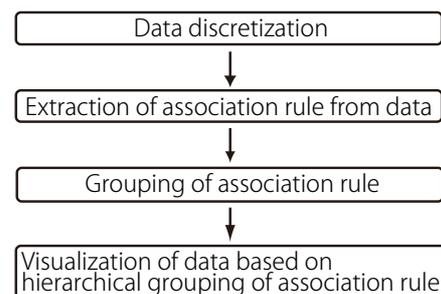


図 1 The flow of the proposed system.

提案システムの手順を図1に示す。本システムでは、連続値データである非劣解集合に対して後述する分布に基づいた離散化を行い、離散化したデータに対して Weka による相関ルールの抽出を試みる。ここでは、グループ化した際の特徴が分かりやすい様、結論部に目的関数を含む相関ルールに限定し抽出を行った。次に、後述する相関ルールのグループ化により抽出した相関ルールの階層構造を有するグループ化を実現し、得られたグループ単位でそのグループに属するデータの可視化を行っている。分析後は任意の可視化手法を用いて結果の観察を行うが、ここでの可視化手法としては SOM を採用した。

以下、提案システムにおける離散化と相関ルールのグループ化および階層化について述べる。

4.2 非劣解集合の離散化

対象が連続値の場合、相関ルール抽出を行うためには、すべての変数に対して離散化処理を施した上で、Apriori アルゴリズム [Agrawal 94] 等を用いて相関ルール抽出を行う必要がある。離散化処理は、データに内在する情報を欠損させる危険性があるだけでなく、得られる相関ルールの数および質にも大きく影響を及ぼす非常に重要な役割を持っている一方、その実現方法は無限に存在する上、事前に適切な離散化方法を知ることが難しいという特徴を有している。

最も単純な離散化手法としては、最大値と最小値間を一定間隔で分割を行う等間隔区間と一定のデータの個数ごとに分割を行う等頻度区間があるが、これらの手法ではデータの傾向を無視した区間決定を行うため、元のデータの性質が大きく損なわれる危険性がある。そこで、本研究では、次に述べるデータの隔たりに基づく方法を採用した。

データの隔たりに基づく離散化

データの離散化は、変数ごとに行われるため原則、1次元空間が対象となる。データの隔たりに基づく離散化の手順を以下に示す。

Step1: 対象データを昇順にソーティングし、隣り合うデータ間の距離を測定。

Step2: データ間の距離の大きい区間順に指定分割数の数だけ選び、それらを離散化における区分として使用し、離散化を実現。

上記の手法の使用により、単純な等間隔、等頻度に比べ、データの偏り具合を反映させた離散化を実現できると考えられる。

4.3 相関ルールのグループ化と階層化

個々の相関ルールをグループ化することにより、グループに該当する解集合が多い(支持度の高い)集合を作成することができ、マクロな視点での分析を実現することができる。一方、統合したルール間に一貫した性質がない場合には、統合グループに属する解集合の性質が不明瞭

となり、提案システムの特徴の1つである「解集合の特徴および性質をある程度既知として分析する」が崩れる。

そのため本研究では、求めた相関ルール同士の単純な類似性に基づく統合ではなく、グループとして何らかの共通性質が保たれるグループ化の実現を目指した。具体的には、全相関ルールに含まれる設計変数及び目的関数を抽出し、それらの組み合わせを条件部もしくは結論部に持つ相関ルールを探索し、グループを生成するという方法を用いた。この方法を利用することにより、統合によるグループの不明瞭化のリスクを回避できる上、組み合わせ間の包含関係から階層構造を容易に生成することができる。具体的な手順を下記に記す。

Step1: 非劣解集合全体より結論部に目的関数を含む相関ルールを抽出。

Step2: 個々の相関ルールに含まれる設計変数及び目的関数の離散値を抽出し、重複を持たないすべての組み合わせを算出。

Step3: Step2 で求めた設計変数及び目的関数の離散値の組み合わせを条件部もしくは結論部に持つ相関ルールを探索し、グループを生成。

Step4: Step2 で求めた設計変数及び目的関数の離散値の組み合わせ間の包含関係から Step3 で求めたグループを階層構造化。

上記の手順に関する概念図を図2に示す。図2では、Step1により得られた5個の相関ルールに含まれる設計変数 A1, A2, B4 と目的関数として C2, D1 の5つが抽出されたと仮定している*2。まず、Step2において、A1, A2, B4, C2, D1 のすべての組み合わせについて算出し、Step3ではそれらの組み合わせに該当する相関ルールを検出しグループ生成を行っている。Step4では、A, B, C, Dの組み合わせにおける包含関係に基づきグループの階層化を行い、階層構造を持つグループ化を実現している。

上記のように相関ルールの統合、階層化を行うことで、統合したグループにおいても一貫した性質を保持した階層グループを実現している。このことにより、階層構造における横方向の関係(例えば、図2 Step4における A1 と A2)および縦方向の関係(例えば、図2 Step4における A1 と A1B4, A1C2)から特徴的な傾向を容易に分析することが可能となる。例えば、同じ親を持つ横方向のグループ間の比較からは共通性の違いがどのように結果に影響を及ぼすのかを明確に知ることができ、縦方向の親子関係を持つグループ比較により親グループがどのような特性を持つ子グループから成立しているのかを知ることができる。特に、縦方向の親子関係は多粒度における拡大/縮小に該当しており、関心のあるグループの特性を詳細に分析するのに効果的である。

*2 A1 は設計変数 A を離散化した際の1番目のカテゴリを意味し、B4 は変数 B の4番目のカテゴリを意味する。

Step1: Detection of all appearance parameters

Rule1	A1 and B4 → C2
Rule2	A2 and B4 → D1
Rule3	A2 and C2 → D1
Rule4	A1 and B4 and D1 → C2
Rule5	A2 → D1

➡ A1, A2, B4, C2, D1

Step2: Detection of all combination

1	2	3	4	5
A1	A1A2 A1B4 A1C2 A1D1	A1A2B4 A1A2C2 A1A2D1 A1B4C2 A1B4D1 A1C2D1	A1A2B4C2 A1A2C2D1 A1A2B4D1 A1B4C2D1	A1A2B4C2D1
A2	A2B4 A2C2 A2D1	A2B4C2 A2B4D1 A2C2D1	A2B4C2D1	
B4	B4C2 B4D1	B4C2D1		
C2	C2D1			
D1				

Step3: Grouping Rule

(the assignment of Rule of Step1 to combinations of Step2)



Step4: Hierarchization of group

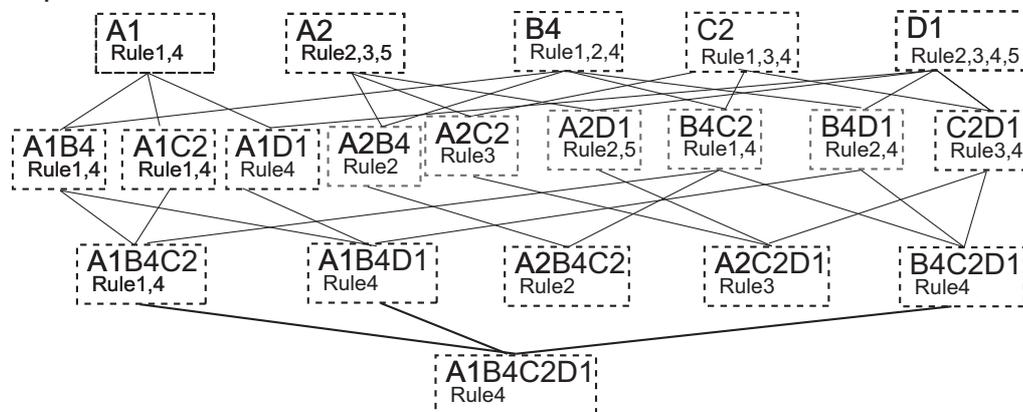


図 2 The concept of grouping rules.

表 1 The objectives of Hybrid Rocket Engine design problem

Initial total working weight[kg]	Minimize M_{tot}
Highest attainment altitude[km]	Maximize H_{max}

表 2 The design variables of Hybrid Rocket Engine design problem

Design variable	Range of design
Oxidant flow rate [kg/sec]	$1.0 \leq \dot{m}_{oxi} \leq 30.0$
Length of fuel room[m]	$1.0 \leq L_{fuel} \leq 10.0$
Initial port radius [mm]	$1.0 \leq r_{port} \leq 200.0$
Combustion time[sec]	$15.0 \leq t_{burn} \leq 35.0$
Fuel room pressure [MPa]	$3.0 \leq P_{ch} \leq 4.0$
Open area ratio [-]	$5.0 \leq \varepsilon \leq 7.0$

5. ハイブリッドロケ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有効性を検証するため、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) に設置されているハイブリッドロケット研究ワーキンググループ (HRrWG) での研究の一環として大山、金崎らが構築したハイブリッドロケットエンジン (Hybrid Rocket Engine:HRE) 概念設計問題 [小杉 10] を用いた。

HRE は従来型のロケットとは異なり、推進剤を異なる 2 つの状態に分離し貯蔵するロケットエンジンであり、燃料形状が推力を決定付ける明示的な要素となるため、ロケット全備重量と到達高度を同時に検討できる多分野融合最適化問題とすることでその設計知識を獲得することが効率的な推進系設計には必要となっている。

本対象は、本来考慮すべき要素が非常に多岐にわたる上、パラメータ同士が互いに複雑に絡み合った変数依存性の強い問題であるため、最適化が非常に困難な問題である。そのため、ここでは表 2 に示す 6 つパラメータに限定し、表 1 に示す全備重量 M_{tot} [kg] および最高到達高度 H_{max} [km] を評価値とする 2 目的 6 変数問題として扱った。対象となる HRE の概念図を図 3 に示す。HRE の設定に関する詳細については、文献 [小杉 10] に譲り、ここでは基礎事項に絞り概説する。

評価値のうち全備重量 M_{tot} [kg] は、(5) に示すようにエンジン重量 M_{eng} [kg]、ペイロード重量 M_{pay} [kg]、非エンジン部重量 M_{ex} [kg] の和から求めることができる。ここでは、簡単のため M_{ex} [kg] は M_{eng} [kg] の $2/3$ ((3))、 M_{pay} [kg] は 50 [kg] (一定) に設定した。また、 M_{eng} は(4) に示すように酸化剤重量 M_{oxi} [kg]、燃料重量 M_{fuel} [kg]、燃焼室重量 M_{ch} [kg]、酸化剤タンク重量 M_{res} [kg] の和として求めている。 M_{oxi} 、 M_{fuel} といった値は、それぞれ推進剤流量の時間変動 \dot{m}_{prop} [kg/s]、燃料流量の時間変動 \dot{m}_{fuel} [kg/s] の積分として求める必要があるがここで

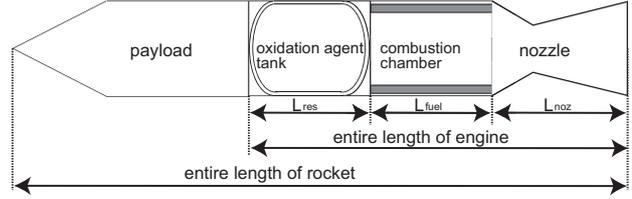


図 3 The concept of HRE rocket.

はその説明を割愛する。

$$M_{ex} = \frac{2}{3} M_{eng} \quad (3)$$

$$M_{eng} = M_{oxi} + M_{fuel} + M_{ch} + M_{res} \quad (4)$$

$$M_{tot} = M_{eng} + M_{pay} + M_{ex} \quad (5)$$

一方、最高到達高度 H_{max} [km] を算出するためにはロケットの推力 $T(t)$ [N] と加速度 $a(t)$ [m/s^2] を計算する必要がある。ロケットの推力 $T(t)$ [N] は (6) で得られ、加速度 $a(t)$ [m/s^2] は (7) により得られる。

$$T(t) = \eta_T (\lambda \dot{m}_{prop}(t) \mu_e + (P_e - P_a) A_e) \quad (6)$$

$$a(t) = \begin{cases} \frac{T(t) - D(t)}{M_{tot}(t)} - g, & (V(t) > 0) \\ \frac{T(t)}{M_{tot}(t)} - g, & (V(t) = 0) \\ \frac{T(t) + D(t)}{M_{tot}(t)} - g, & (V(t) < 0) \end{cases} \quad (7)$$

(6) において、 η_T はノズル損失係数 (ここでは $\eta_T = 1.0$ と設定) であり、 P_a [Pa] は大気圧、 λ は運動量修正係数を表している。ノズル出口流速 μ_e [m/s]、ノズル出口圧力 P_e [Pa] は混合比 O/F の値を用いて計算され、ノズル出口面積 A_e [m^2] はノズルスロート面積から計算されるがここでは割愛する。

また、(7) 中における $V(t)$ [m/s] は速度であり、 g は重力加速度を表している。抵抗 $D(t)$ は (8) に示すように、摩擦抵抗 $D_{f,Design}$ と圧力抵抗 $D_{p,Design}$ との和で表わされる。

$$D(t) = D_{f,Design} + D_{p,Design} \quad (8)$$

6. 数値実験

数値実験として、5 章で述べた 2 目的 6 変数のハイブリッドロケットエンジン (Hybrid Rocket Engine:HRE) の概念設計問題に対して著者らの提案する手法 [渡邊 12] を適用し得られた 502 個の非劣解集合に対する提案手法の適用を試みた。[渡邊 12] の手法は、EMO アルゴリズムにより得られた解候補に対して少なくとも局所的な最適性を保証し、複数存在する非劣解フロントを隙間なく検出する *posteriori* 型局所探索手法であり、数値実験により EMO アルゴリズム単体の場合に比べ高品質な解集合が得られることが示されている。

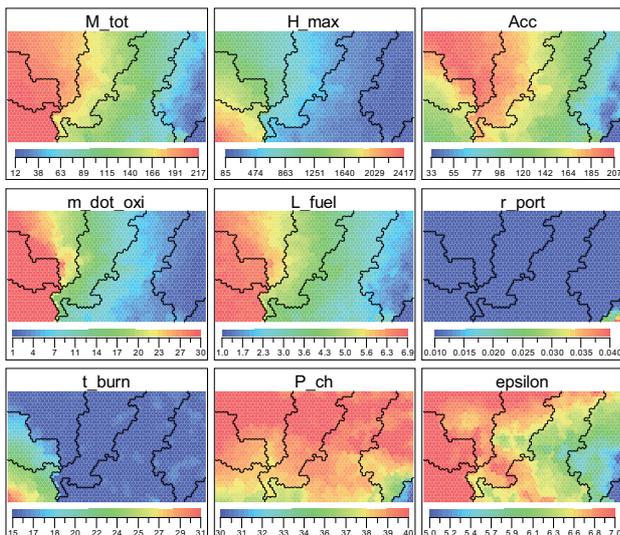


図 4 The SOM results of the whole NDSs.

ここでは、従来の解集合全体に対する分析と提案手法による階層的グループ化を用いた詳細分析に分けて考察を述べる。

表 3 The correlation coefficient of each component in the whole NDSs.

M_tot	0.86	0.82	0.94	0.98	-0.18	0.5	0.21	0.84
H_max	0.42	0.94	0.92	-0.09	0.83	-0.04	0.68	
Acc	0.65	0.74	-0.22	-0.07	0.43	0.74		
m_dot_oxi	0.99	0.99	-0.11	0.6	0.11	0.75		
L_fuel	-0.16	0.57	0.17	0.81				
r_port	-0.04	-0.53	-0.25	0.39				
t_burn	-0.26	0.39						
P_ch	0.36							
epsilon								

6.1 非劣解集合全体に対する従来の分析

従来より広く行われてきた非劣解集合全体を対象にした場合の分析結果として、対象とした 502 個すべての非劣解集合に対して SOM を適用した結果^{*3}を図 4 に示す。この図では 2 目的 6 変数に加速度の値を加えた計 9 つの値が、最小値に近いほど深青、中間値を緑、最大値に近いほど赤で色付けされ示されている。また、マップ内に描かれている黒い分離線は全体をクラスタ分析した結果を示しており、ここでは合計 7 つのクラスタに分割されている様子が分かる。なお、SOM による色づけ（値と色の関係）は、次節における結果を含めすべて同一の基準を使用した。

また、各目的および変数間の相関を定量的に評価するためそれぞれの相関係数を表にまとめたものを表 3 に示すとともに、図 4 により得られた 7 つのクラスタの特性を分析するため、各クラスタにおける変数の分布を示した図を図 5 に示す。

図 4 および表 3 から、対象とする非劣解集合における

要素間の相関および値の分布を読み取ることができる。具体的には、初期全備重量 (M_tot)、最高到達高度 (H_max)、加速度 (Acc)、酸化剤流量 (m_dot_oxi) といった項目に強い相関がみられる一方、初期ポート半径 (r_port) および燃焼時間 (t_burn) の値は多くの個体において非常に低いことなどを読み取ることができる。

また、表 3 および図 5 から、7 つのクラスタはそれぞれ異なる特性を有していることを確認することができる。例えば、初期全備重量に関して比較的高いクラスタ 1 から 3 と中間辺りを広くとる 4 および 5、低い値をとるクラスタ 6, 7 といった特徴付けをすることができる。また、初期全備重量の値が高いクラスタ 1, 2, 3 間においても燃焼時間が比較的高いクラスタ 1 と比較的低いクラスタ 2, 3 のように異なる特徴を有していることから、それぞれのクラスタごとに異なる傾向を有していることを推察することができる。

このことから、クラスタごとに分析を行うことで全体のみを対象にした場合と比べ、解集合に内在する部分的で特徴的な傾向を読み取れることが分かる。しかしながら、クラスタごとの特性は実際に中身を分析するまで分からないため、ユーザは必ずすべてのクラスタを主観に基づき逐一選択し、分析する必要がある上、解の近接度合いに基づくグループ化ではユーザにとって関心の高い傾向がクラスタ間の差異として読み取れるかどうかは完全に偶然性に左右される。また、ユーザの関心に基づいた距離の定義もしくはグループ化の基準を利用することにより、その意図を考慮したグループ化を実現することができるが、その場合、意図に関連した傾向が強調される一方、ユーザが事前に想定していなかった重要な傾向や特性を得ることは難しくなる。

実際、SOM によるクラスタリング結果である図 5 では、クラスタ 4 と 5 において微細な異なりによるグループ分けが行われており、示される変数の分布からは両クラスタ間においてどのような特性の違いがあるのか明確に読み取ることができない。また、高い最高到達高度を実現するためにはクラスタ 1 を分析する必要があることは分かるものの、クラスタ 1 における最高到達高度の分布は広く、高い最高到達高度を実現するための傾向がどういったものであるのかこの結果からだけでは明確に読み取ることができない。

6.2 提案手法による詳細分析

提案手法による分析として、(1) 得られた非劣解集合全体に対する分析と (2) 設計者の関心が高い領域に絞った分析の 2 つの適用結果について考察を行った。前者が 502 個すべての解集合を対象にしているのに対して、後者は前者の結果を確認した設計者の要望に基づき 136 個に絞り込んだ解集合のみを対象にしている。以下、これら 2 つの場合に分けて結果と考察を示す。

*3 本実験における SOM の作成には、Viscovery® SOMine 4.0 を使用し、その推奨設定に基づいた設定を行った。具体的には、格子の形状として 6 角形格子、近傍関数としてはガウス関数を利用している。

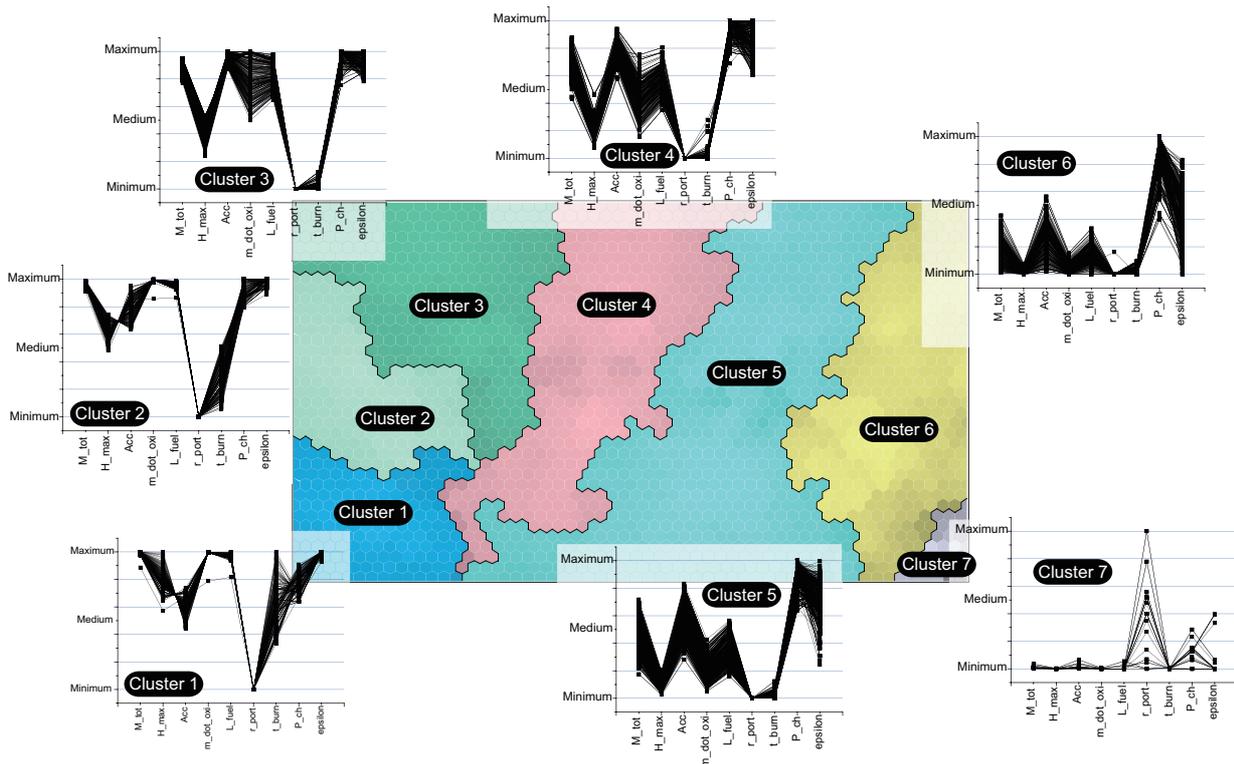


図 5 The distributions of each component in each SOM cluster.

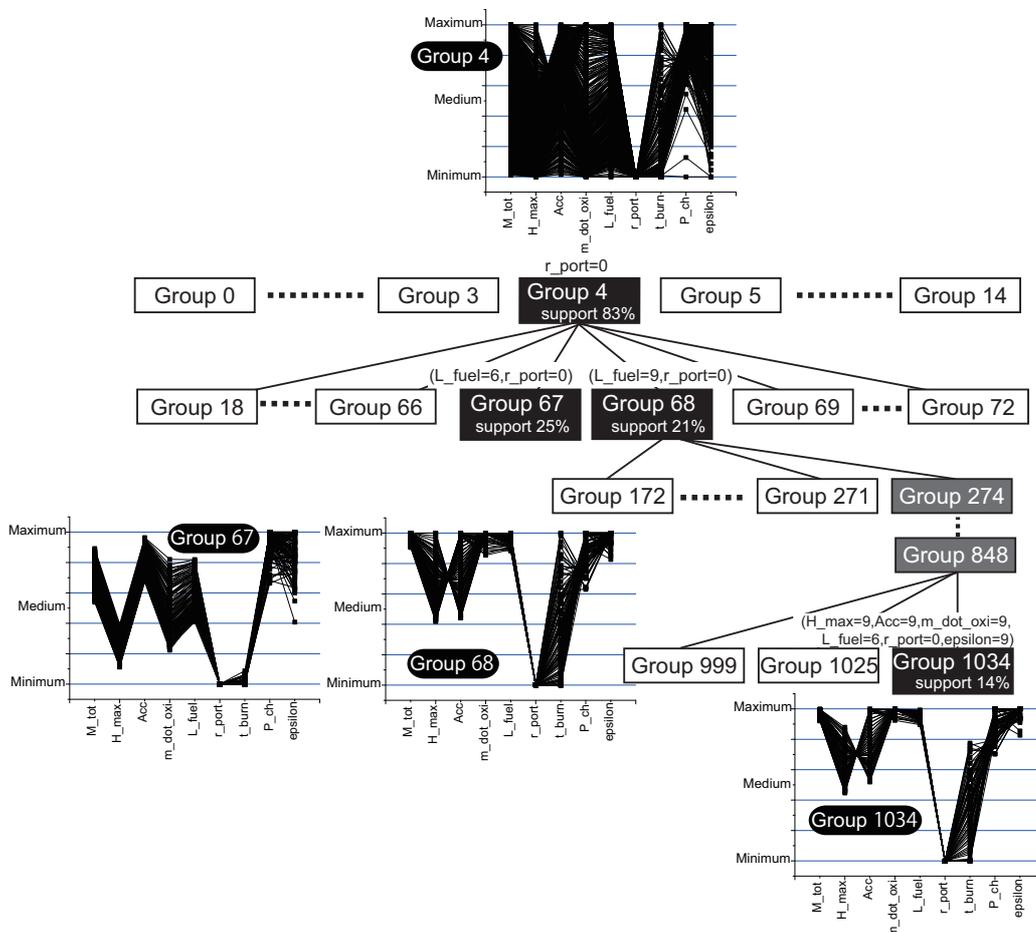


図 6 The hierarchization with all NDSs.

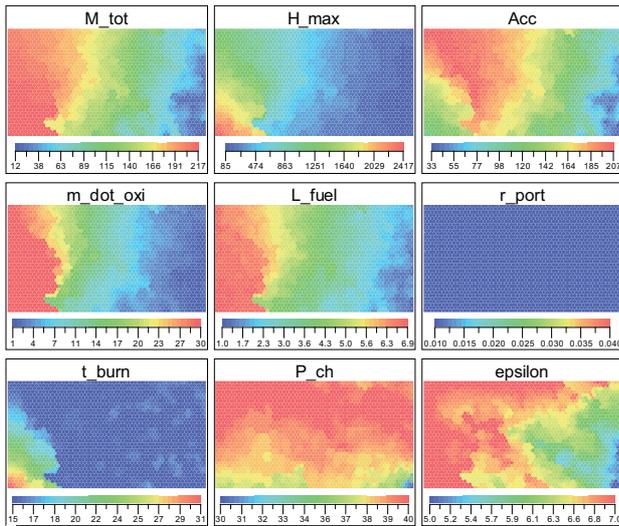


図 7 The SOM results of group 4.

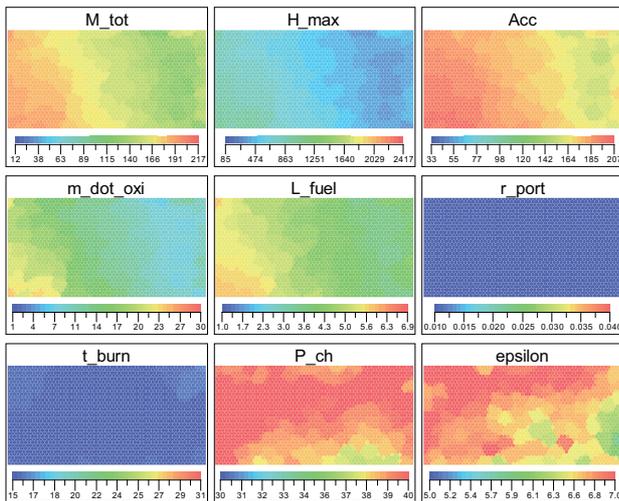


図 8 The SOM results of group 67.

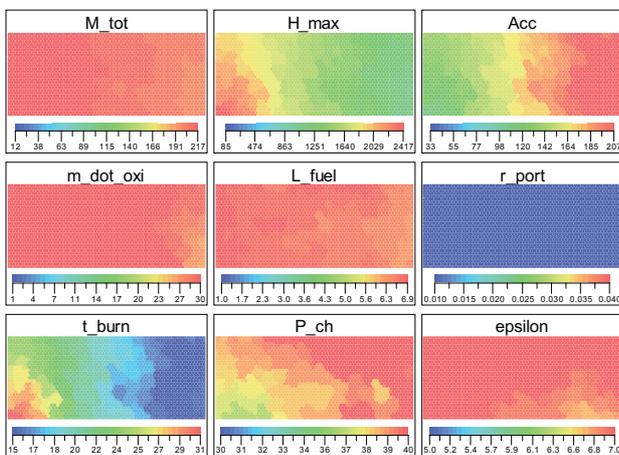


図 9 The SOM results of group 68.

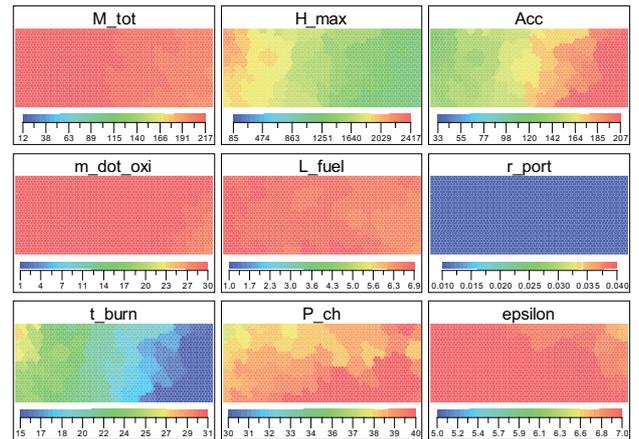


図 10 The SOM results of group 1034.

§ 1 すべての非劣解集合を対象にした分析

502 個すべての非劣解集合に対して、4.2 節で述べたアプローチに基づき全数値属性を 0 から 9 の 10 区間へ離散化、次に述べる最小支持度、最小確信度の閾値を超え、結論部に目的関数を含むことを条件に相関ルールの抽出を行った。ここでの最小支持度は少なくとも全体の 1 割には該当する汎用性を持つルールという意図に基づき 0.1 以上と設定し、最小確信度については原則としてある程度高い信頼性を持つ（前提部と結論部の結びつきの強い）ルールという意図に基づき 0.9 以上と設定した。その結果、1171 個の相関ルールが得られ、得られた相関ルールに対して 4.3 節で述べた階層的グループ化手法を適応した結果、9 階層 1111 個のノードを持つ階層グループが生成された。提案手法を適用して得られた階層結果の一部を各グループにおける変数分布とともに図 6 に示す。

図 6 におけるグループ（ノード）は、それぞれ共通する性質を持つ相関ルールが複数統合されたものとなっており、グループに含まれる相関ルールのいずれかに該当する非劣解集合をそのグループに属する解集合として扱った。ここでは、図中の白抜きで書かれたグループ 4, 67, 68, 1034 の 4 つグループに焦点を当て考察を行った。これは、グループ 67 および 68 を比較することで横の列に位置する特性の異なるグループ間比較を、グループ 4, 67 およびグループ 1034 を比較することで縦の列に属する親子間比較を行うためである。白抜きで書かれたこれらのグループ上に書いてあるのがそのグループの共通属性であり、グループ内に書かれた支持度 (support value) はそのグループに属する非劣解集合の割合を示している。ただし、グループに含まれる非劣解集合は共通属性の性質を持つ解そのものではなく、そのグループに含まれる相関ルールに該当する解である点を注意する必要がある。

図 6 の結果より、各グループの分布がグループの共通性質に従っていることが分かる。また、各グループのもつ共通性質の違いが明確であるため、その差異が分布全体にどのような影響を持っているのか把握しやすくなっ

ていることが分かる。

提案手法の適用により得られたグループ 4, 67, 68, および 1034 に対して SOM を適用した結果をそれぞれ図 7 から図 10 に示す。

最上位グループ (グループ 4)

グループ 4 は「初期ポート半径が 0^{*4} (0.01mm 以下)」を共通性質として持つ相関ルールの集合から成っており、すべての非劣解のうち 83% がこのグループに含まれる相関ルールのいずれかに該当する最大支持度を持つ最上位層のグループである。

すべての非劣解の結果である図 4 と図 7 を比較すると、初期ポート半径が最小値付近を示す青で統一されている点のみが異なっている以外、概ね同様の結果であり、図 6 におけるグループ 4 の分布においても初期ポート半径を除き、全て広範囲に分布していることが確認できる。

これらの結果より、初期ポート半径が低いからといって他の変数に支配的な影響を持っているわけではないことが推察される。

中間層グループ (グループ 67 および 68)

グループ 67, 68 は、グループ 4 の共通性質に加えて燃料長さに関する性質を持つグループである。ただし、グループ 67 は「燃料長さが 6(3.4-5.9m)」なのに対してグループ 68 は「燃料の長さ 9(6.25m 以上)」であり、同じ「初期ポート半径が 0」の性質は有しているもののグループ間における非劣解の重なりは全くない。

これら 2 つのグループにおける支持度が、それぞれ 25%、21% であり、グループ 4 の支持度が 83% であることから、グループ 4 の半数以上がグループ 67, 68 に含まれていることが分かる。

図 6 に示される変数のばらつきおよび図 7, 図 8, 図 9 に示される SOM の結果から、グループ 67 および 68 ではグループ 4 の結果と比べ多くの変数値においてばらつき幅が減少しており、燃料長さが他の目的関数、設計変数に対して支配的な影響を持っていることが読み取れる。

図 6 および図 8 から、燃料長さが中間値程度の場合、燃焼時間は明らかに低い値をとり、初期酸化剤流量も中間値付近をとるため、最高到達高度もそれらによって中間値付近の値となっていることが分かる。一方、図 6 および図 9 から、燃料長さが長い場合には初期全備重量は大きくなり、必要とされる初期酸化剤流量や開口比も高い値に集中していることが読み取れる。

このことから、燃料長さが中間値と高い値では各数値に与える影響が全く異なり、しかもその影響はかなり強いことが読み取れる。このような分析結果は、解集合を適切な部分集合に分けて分析しなければ決して読み取ることとはできないため、本手法の有効性を示す結果と言える。

最下位グループ (グループ 1034)

*4 ここでの 0 は、数字ではなく離散化した記号を意味。0 から 9 に離散化した 0 であるため離散化したグループ中で最も小さな値を持つグループ。

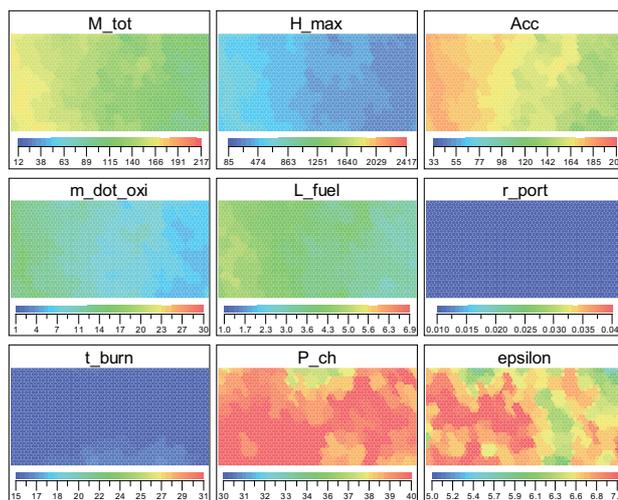


図 12 The SOM results of the limited NDSs based on designer's demand.

グループ 1034 は、グループ 4 に包含され、グループ 68 にも包含されている末端に位置するグループであり、下記に示す多数の共通性質を有している(下記における括弧内は離散値を表す)。

初期全備重量が 2375.5kg 以上 (9) かつ、加速度が $123.5[m/s^2]$ 以上 (9) かつ、酸化剤流量が $27.069[kg/sec]$ 以上 (9) かつ、燃料長さが 6.25m 以上 (9) かつ、初期ポート半径が 0.01mm 以下 (0) かつ、開口比が 5.84 以上 (9)

図 6 および図 9, 図 10 より、燃焼室圧力がより大きい値に均一化されている点、燃焼時間が最大値付近をとらなくなっている点以外は、グループ 68 における傾向とほぼ同じであることが分かる。グループ 68 との含有率が 7% しか変わらないこと、両グループにおける SOM の傾向がほぼ同じことから、グループ 1034 の持つ共通性は、グループ 68 の持つ「燃料の長さ 9(6.25m 以上)」とかなり強く結びついていることが分かる。

§2 実用的な非劣解集合に絞った詳細分析

文献 [小杉 10] による概念検討では、従来型ロケットとの比較などから次に記す条件を満たす設計情報分析が求められている。

最高到達高度が 100km 以上であり初期全重量が 650kg 以下の解集合に対する燃焼室圧力の特性、最高到達高度が大きい場合と小さい場合の特性の違いについて知りたい。

そのため、要望の条件(最高到達高度が 100km 以上かつ初期全重量が 650kg 以下)を満たす 136 個の非劣解を対象とした提案手法の適用を行った。

ここでは、対象とした非劣解を最高到達高度および初期全重量に基づき限定しているため、数が少ないだけで

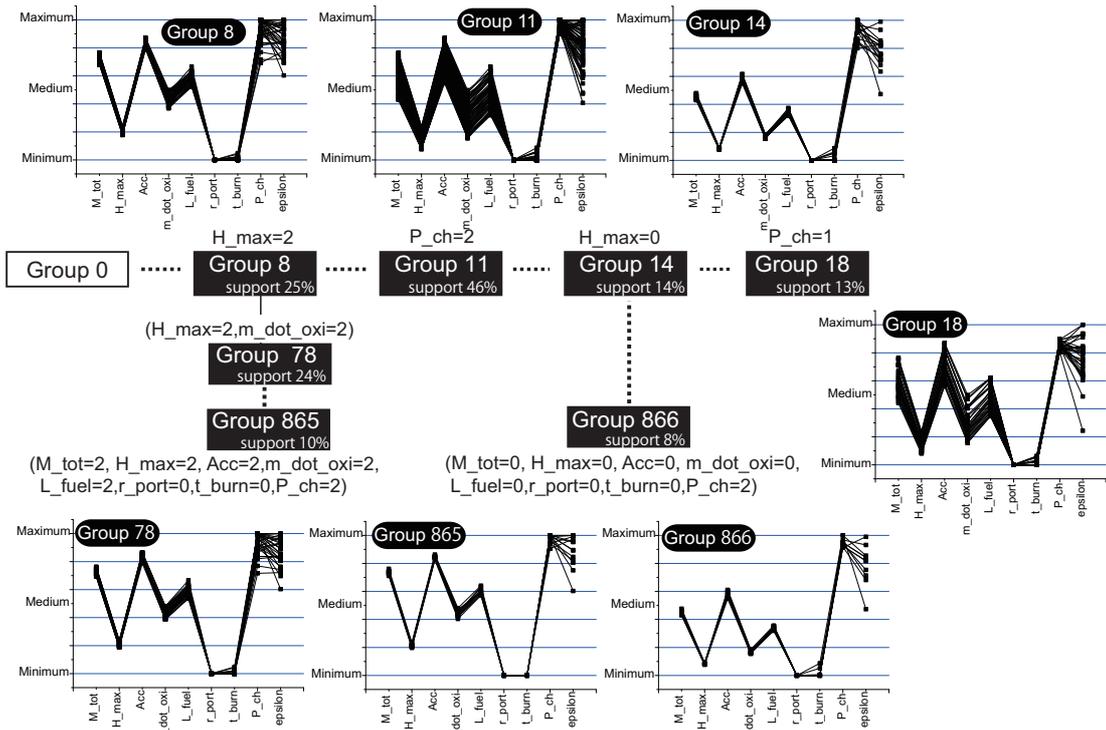


図 11 The hierarchization with the limited NDSs.

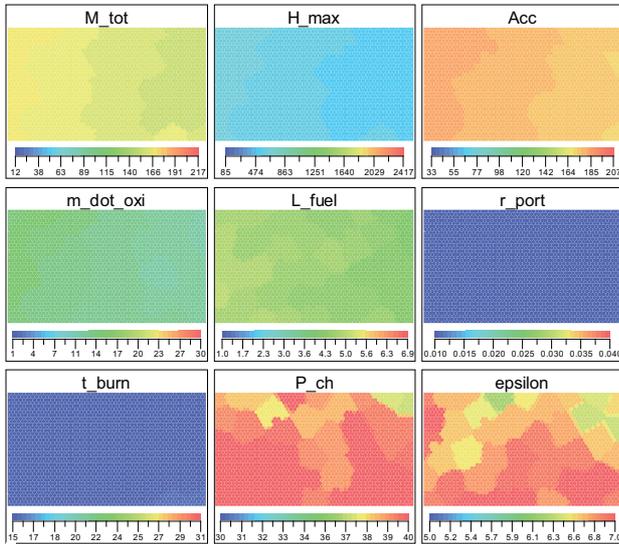


図 13 The SOM results of group 8 (in the limited NDSs).

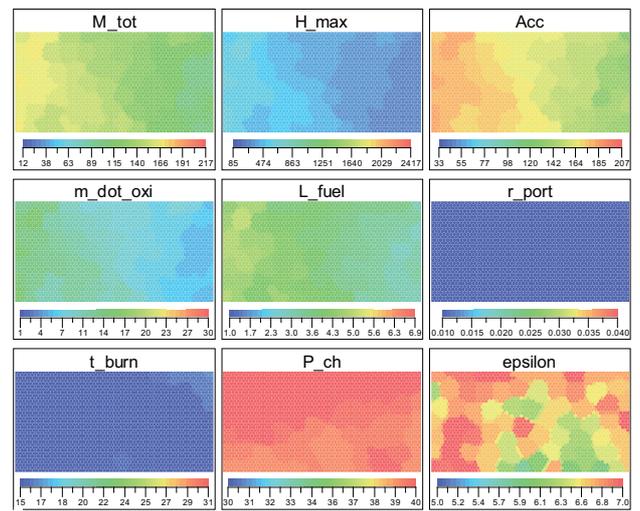


図 14 The SOM results of group 11 (in the limited NDSs).

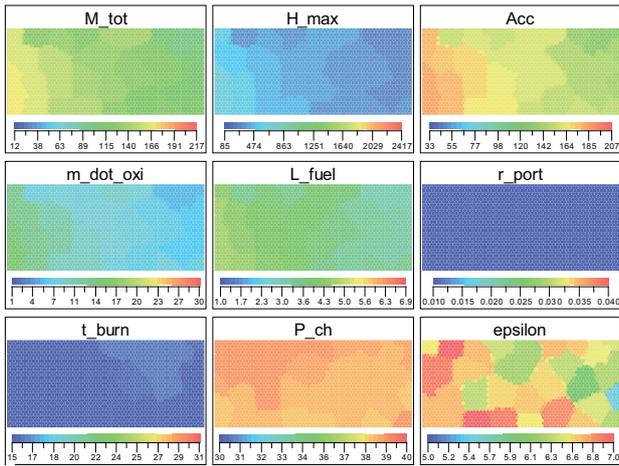


図 15 The SOM results of group 18 (in the limited NDSs).

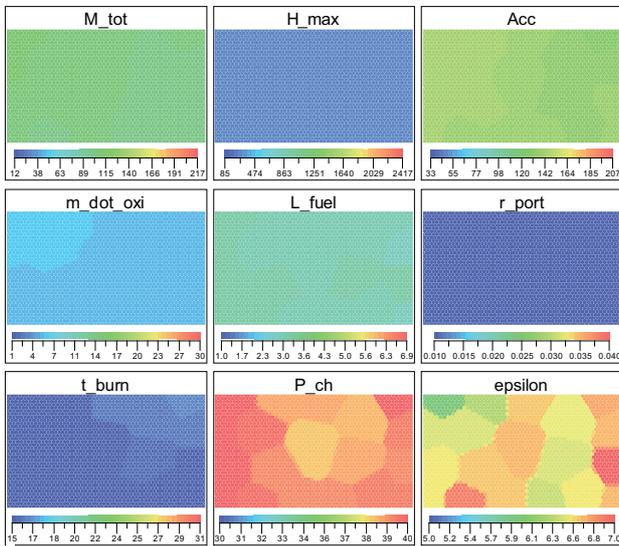


図 16 The SOM results of group 14 (in the limited NDSs).

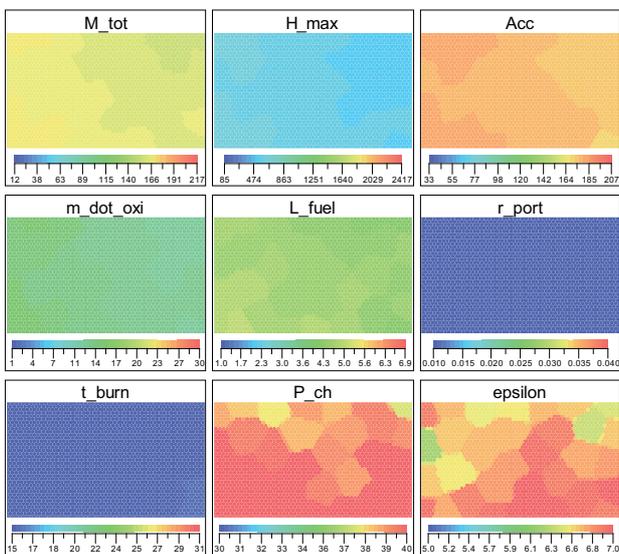


図 17 The SOM results of group 78 (in the limited NDSs).

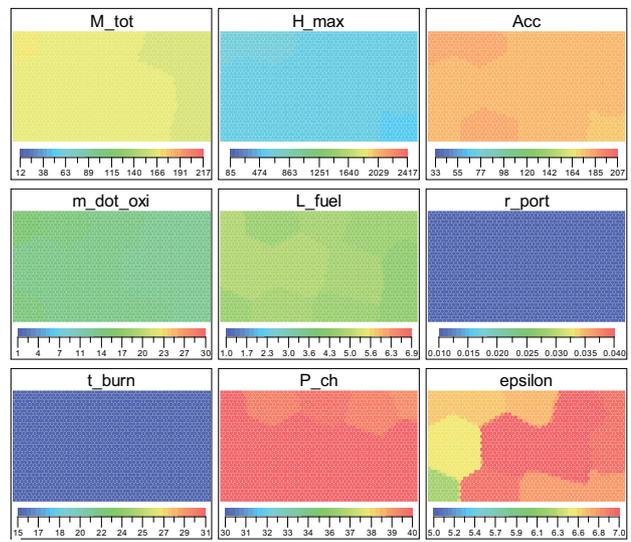


図 18 The SOM results of group 865 (in the limited NDSs).

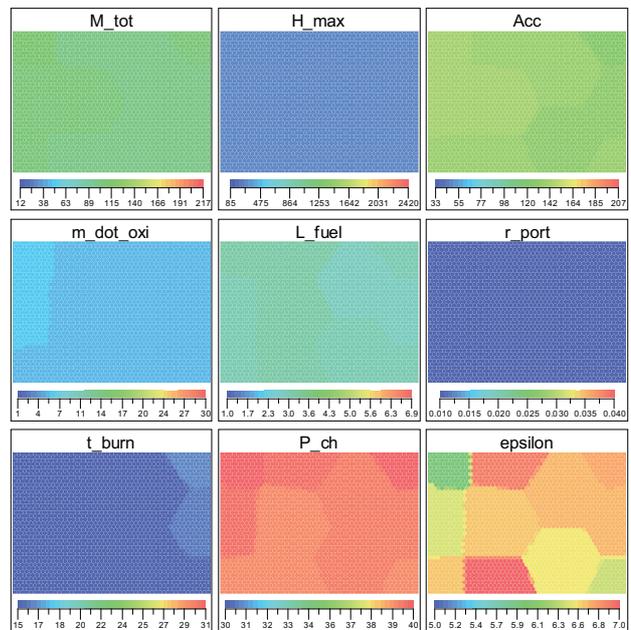


図 19 The SOM results of group 866 (in the limited NDSs).

なく全体の傾向も（前節の場合に比べ）類似したものとなっている．そのため、離散化数を 10 ではなく 3 と設定し、前節と同様の方法で関連ルールの抽出、ルールのグループ化を行った．その結果、5940 個の関連ルール、866 個のグループから成る 8 階層の階層木が得られた．前節と比較して関連ルールが増加しているのは、対象とする解集合の数が大幅に減少し前節の条件では最低支持度を満たさなかったルールが検出されるようになったためである．

対象とした 136 個の非劣解全体に対して SOM を適用した結果を図 12 に、提案手法の適用により得られた階層図の一部を各グループの変数の分布とともに図 11 に示す．

前節で示した非劣解集合全体の結果である図 4 と図 12 の比較より、要望の条件を満たすための性質をいくつか読み取ることができる．具体的には、均一色で染まっている初期ポート半径、燃焼時間はそれぞれ極小値に近い値をとる必要があり、初期酸化剤流量や燃料長さといったパラメータではとりうる値の範囲がかなり限定されていることなどが分かる．

HRE 設計において重要となる初期全備重量、燃焼室圧力の特性について分析するため、図 11 中に白抜きで書かれたグループ 8, 11, 14, 78, 865, 866 について考察を行った．各グループに含まれる解集合に対して SOM を適用した結果をそれぞれ図 13 から図 19 に示す．

図 11 において選択した白抜きの 8 つのグループについて述べる．グループ 11 およびグループ 18 は、それぞれ設計者の要求の 1 つである燃焼室圧力に関する共通性質を持つ最上位のグループであり、グループ 8 および 14 は初期全備重量に関して最大と最小の共通性質を持つグループである．グループ 865 および 866 は、それぞれグループ 14 および 8 において最も大きな割合を占める末端の関連ルールのみを持つグループであり、初期全備重量の大小についてその傾向をより端的に示していると考えここでは取り上げた．

以下、燃焼室圧力と初期全備重量に分けて分析結果を述べる．

燃焼室圧力に関する分析

グループ 11 およびグループ 18 は、それぞれ「燃焼室圧力が 2(39MPa 以上)」、「燃焼室圧力が 1(38-39MPa)」という共通性質を持つ最上位のグループである．なお、ここで「燃焼室圧力が 0(38MPa 以下)」を共通性質を持つグループについて触れていないのは、この共通性質を持つ関連ルールが本実験では 1 つも生成されなかったためである．

グループ内の変数分布を示す図 11 および SOM による結果を示した図 14 および図 15 より、燃焼室圧力を除いて両者の傾向の違いがあまりないことが分かる．

このことより、対象とした解集合において燃焼室圧力の影響はほとんどないことが確認された．

初期全備重量に関する分析

初期全備重量に関して最大と最小の共通性質を持つ最上位グループであるグループ 8 および 14 の比較を行う．これらの変数分布を示す図 11 および図 13 と図 16 の比較より、初期全備重量が小さいほど最高到達高度、加速度、初期酸化剤流量、燃料長さは低い値を持っていることが読み取れる．また、燃焼時間についても初期全備重量が大きいグループ 8 に置いては極小値で統一されており、初期全備重量を大きくするためには燃焼時間は極小値に設定する必要があることが分かる．

このことは、グループ 8 および 14 において最も大きな割合を占める末端の関連ルールのみから成るグループ 865 および 866 の共通性質、変数の分布（図 11）および SOM における結果（図 18, 図 19）においてより明確な形で表れている．このことから、グループ間の特性の違いを明確化するためには、各グループにおいて影響力の大きな関連ルールの中身を分析することが有用だといえる．

また、末端のグループ 865 および 866 における結果（図 18, 図 19）では、共通性質に含まれるパラメータの多くがほぼ一意の値（カラーマップが均一色）に定まっており、目的の初期全備重量を実現するためにはどのパラメータを具体的にどの値に設定すれば良いかといった情報を得ることができる．

7. 結 論

本論文では、関連ルールに基づく多粒度に対応した新たな非劣解集合分析手法の提案を行い、ハイブリッドロケットエンジン（Hybrid Rocket Engine:HRE）の概念設計問題への適用を通じて有効性の検証を行った．

提案手法では、まず非劣解集合に対して関連ルール抽出を行い、その中に含まれる特性情報を基に情報を再構造化し、設計者に対してより意味解釈しやすい結果提示の実現を試みている．その特徴は、解集合に潜む共通性を自動的に検出し、直感的に関係性が把握しやすい階層木の形でグループ化することにより多粒度な情報分析を実現している点、各グループには必ず共通性という設計の特徴を表すタグがついており各グループの持つ特性を既知情報として扱えるため関心のある特性を持つグループを効率よく選択できる点である．

HRE 概念設計問題への適用結果から、関連ルールの性質に基づき生成されたグループに含まれる集合は共通性が事前に明確であるため分析が容易であること、共通性質の異なるグループ間の比較によりそれぞれの特性に関わるパラメータの傾向の違いを明らかにすることができること、親子関係にあるグループ間を比較することでグループ内に内在する特性を明確化することができることなどを確認することができた．これらの結果は、単純に解集合全体を対象に分析しても得ることができない情報であり、提案手法の有用性を示す結果であるといえる．

提案手法は、得られる相関ルールの質に大きく依存しており、適切な相関ルール抽出のための離散化についてはより一層の検討が必要である。また、得られた階層木を簡略化、縮小化する点が考慮されていない点も分析の容易性という観点から大きな問題であり、今後、何らかのフィルター機能の利用による、ユーザ要求に合わせた階層木の簡略化、縮小化の実現を検討していきたいと考えている。その他、ルールのグループ化に関する効率化などについても今後の課題として改善を進めていきたいと考えている。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 23500268, 24300065 の助成を受けたものである。

◇ 参 考 文 献 ◇

[Agrawal 94] Agrawal, R. and Srikant, R.: Fast Algorithms for Mining Association Rules, in *Proceedings of the 20th International Conference on Very Large Data Bases*, pp. 487-499 (1994)

[Coello Coello 04] Coello Coello, C. A. and Lamont, G. B.: *Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, World Scientific, Singapore (2004)

[Deb 12] Deb, K.: *Innovization: Innovative Solution Principles Using Multiobjective Optimization*, Springer-Verlag New York, Inc. (2012)

[Linoff 97] Linoff, G. and Berry, M.: *Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management*, Wiley Computer Publishing (1997)

[Obayashi 03] Obayashi, S. and Sasaki, D.: Visualization and Data Mining of Pareto Solutions Using Self-Organizing Map, in *Second International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization (EMO 2003)*, pp. 796-809 (2003)

[Shneiderman 98] Shneiderman, B.: *Designing the User Interface (3rd Ed)*, Addison-Wesley (1998)

[SUGIMURA 09] SUGIMURA, K., OBAYASHI, S., and JEONG, S.: A New Design Method based on Cooperative Data Mining from Multi-Objective Design Space, *Journal of Computational Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 287-302 (2009)

[Watanabe 10] Watanabe, S., Ohe, S., and Minato, R.: Development of a Multi-granularity Design Support System using Hierarchical Clustering for Non-dominated Solutions, in *World Automation Congress 2010 (WAC 2010)*, CDROM-paper (2010)

[Witten 05] Witten, I. H. and Frank, E.: *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, Second Edition (Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems)*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA (2005)

[山代 08] 山代 大輔, 吉川 大弘, 古橋 武: 可視化手法を用いた多目的最適化問題における満足解の選択支援, 知能と情報: 日本知能情報フアジイ学会誌, Vol. 20, No. 6, pp. 850-859 (2008)

[小杉 10] 小杉幸寛, 大山聖, 藤井孝蔵, 金崎雅博: ハイブリッドロケットエンジンの概念設計最適化, 宇宙輸送シンポジウム, STCP-2009-75 (2010)

[渡邊 09] 渡邊 真也, 湊 亮二郎: 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, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 1-12 (2009)

[渡邊 12] 渡邊 真也, 横内 直樹: 多目的最適化問題に対する近似勾配を利用した新たな局所探索手法の提案, 進化計算学会論文誌, Vol. 3, No. 3, pp. 143-154 (2012)

〔担当委員: 鹿島 久嗣〕

2013 年 4 月 12 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, 2004 年 立命館大学 情報理工学部 講師等を得て現在 室蘭工業大学大学院 しくみ情報系 領域 准教授。進化計算, 最適設計, データマイニング等の研究に従事。2005 年情報処理学会山下記念研究賞, 2009 年 IEEE CIS Japan Chapter Young Researcher Award 等受賞。IEEE, 情報処理学会, 進化計算学会等各会員。



千葉 祐大

1989 年生。2013 年室蘭工業大学情報工学科卒業。在学中は進化型多目的最適化に関する研究に従事。現在, アクセシチュア株式会社に勤務。



金崎 雅博

1975 年生。1999 年東北大学工学部機械航空工学科卒業, 2004 年東北大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了, 博士(情報科学)。同年宇宙航空研究開発機構研究開発本部, 2006 年宇宙航空研究開発機構航空プログラムグループ, 2008 年より首都大学東京システムデザイン学部准教授。主に, 空力などのシミュレーション技術と進化計算法による最適設計探索法とその航空宇宙分野における応用に関する研究に従事。AIAA, 日本航空宇宙学会, 日本機械学会, 進化計算学会各会員。