

## 審査の結果の要旨

氏名 藤川 貴弘

博士（工学）藤川貴弘提出の論文は、「**Successive Search-Based Multi-Objective Optimization and its Application to Multidisciplinary Conceptual Design of Reusable Launch Vehicles**（逐次探索による多目的最適化および宇宙往還機の複合領域概念設計への応用）」と題し、6章および付録から構成されている。

宇宙利用の拡大のために再使用可能な宇宙往還機の実現が望まれている。宇宙往還機を早期に実現するためには、精度の良い概念設計によって目指すべき機体システムの姿とその技術課題を明確化し、研究開発の方向付けを行うことが不可欠である。宇宙往還機の場合には専門領域間に複雑な相互依存関係が存在するため、複合領域最適化手法が適用されることが多く、設計問題は主に、機体設計変数が静的変数として組み込まれた最適制御問題として定式化される。既存の研究では、ミッションや設計制約を設定したうえで、唯一の最適設計解を得る概念設計がなされている。しかし本来、宇宙往還機には、ミッション要求や技術制約に関する不確かさとそれに起因する機体規模の変化が存在するため、これらの設計指標間のトレードオフ関係を明らかにすることが望まれる。以上を踏まえ、本論文では新たな多目的最適化手法を提案し、水平離着陸型の二段式宇宙往還機の多目的・複合領域最適設計を行っている。

第1章は序論であり、宇宙往還機の複合領域最適設計、多目的最適化手法、宇宙往還機の熱防御システム（TPS）設計に関する先行研究とその課題をまとめた上で、本論文の位置づけと目的を述べている。

第2章では、多目的最適化手法、特に最適制御問題への適用に適した手法を提案している。提案手法は、ゴールプログラミング法によって多目的最適化問題を単目的最適化問題に変換し、既存の勾配法によってパレート最適解を逐次求めていくものである。既に得られている最適解集合からパレート面に沿った測地距離において最も遠い点（最遠点）付近に最適解を持つようにゴールプログラミング法のパラメータを決定している。以上を繰り返して、パレート面上に高精度かつ多様性の高い最適解集合を求める。本章では、提案手法を多目的遺伝的アルゴリズムとシューティング法の組み合わせと比較するため、平易な最適制御問題に適用している。その結果、提案手法によって、最適性、制約条

件残差の小ささ、パレート最適解の多様性に優れた最適解集合が得られることを示している。

第3章では、宇宙往還機の複合領域最適設計における TPS 解析・設計法として、非定常熱制約を効率良く扱える最適制御手法を提案している。TPS 内部の熱伝導を表す偏微分方程式を空間方向に離散化して複数の常微分方程式に変換し、従来の最適制御問題として求解する。空間方向の離散化には、擬スペクトル法を用いるとともに、境界条件を自動的に満足させる手法を適用している。本提案手法により、既存の研究で用いられている有限体積法、有限差分法及び通常の擬スペクトル法と比較して、十分な精度の解を得るために必要な離散点数を削減できることをテスト問題において確認している。

第4章では、予冷ターボジェットエンジンを搭載した二段式宇宙往還機の多目的・複合領域最適設計を行っている。まず、宇宙往還機概念設計に必要な機体形状・質量特性・空力・推進・飛行軌道・離陸の各解析領域に対して数値モデルを構築している。次に、低軌道へのペイロード質量の最大化、機体全備質量の最小化、離陸速度の最小化の3つの目的関数をもつ多目的最適制御問題が定義される。定義された問題を第2章で提案された多目的最適化手法を用いてパレート最適解集合を求め、目的関数間の定量的なトレードオフ感度を明らかにしている。その後、最適解集合から包括的な情報を抽出するために、散布図行列と固有直交分解によるデータマイニングを、それぞれ機体設計変数と飛行制御変数に対して実施している。その結果、各々の目的関数の相対的重要度が各設計要素の最適解に与える影響など、有用な知見が得られた。

第5章では、ロケット-ラムジェット複合サイクルエンジンを搭載した二段式宇宙往還機の多目的・複合領域最適設計を行っている。第4章で作成した数値モデルに加えて、空力-推進統合解析ならびに TPS 解析が含まれる。TPS のうち断熱タイルに関する設計では、第3章で提案した非定常熱制約付き最適制御手法を用いることで、その必要厚さを算出している。第4章と同様に、定義された多目的最適制御問題を第2章で提案された手法を用いて解き、得られたパレート最適解集合からデータマイニングによって設計知見を得ている。

第6章は結論であり、本研究の成果と新規性をまとめ、今後の課題や発展性を述べている。

以上要するに、本論文は、新たな多目的最適化手法を提案し、宇宙往還機の実現に向けた多目的・複合領域最適設計に応用している。提案手法によれば、宇宙往還機概念設計問題のような大規模な多目的最適設計問題であっても高精度かつ多様性の高い最適解集合を求め、トレードオフ検討や設計知見抽出を行うことが可能となり、航空宇宙工学上貢献するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。