

[別紙2]

## 審査の結果の要旨

論文提出者 Marcello Tava

工学修士 Marcello Tava 提出の論文は「Optimization Techniques for Space Transportation Systems Design」(宇宙輸送システムにおける最適化方法に関する研究)と題し8つの章からなっており英文で書かれている。

制約条件のもとで、評価関数を最小にする変数の組み合わせを見出す最適化手法を、工学的設計問題に適用するための研究が進められている。今日、航空宇宙工学における最も困難で重要な設計問題の一つは、将来の宇宙輸送システムの設計問題である。宇宙輸送システムに代表される航空宇宙機の設計には、複数の技術分野が複雑に関連し、その設計評価基準の設定も容易ではないという難しさがある。

本論文では、宇宙輸送システムの設計問題を対象として、最適化技術の様々な技術的な課題を研究し、特に、複数分野の統合的最適化問題と、多目的最適化問題に焦点を当てている。最初は二つの問題が個別に議論され、統合的最適化問題においては、宇宙帰還機の機体形状設計と帰還軌道設計の統合的最適化が検討され、多目的最適化問題においては帰還軌道設計における複数の設計評価基準の対話型満足化問題が扱われる。最終的に、SSTO (Single-Stage-To-Orbit) 機の上昇軌道と帰還軌道を含めた統合的機体設計問題として統合的最適化と多目的最適化が同時に検討されている。

序論(Introduction)では、本研究の背景と目的とを明確にし、過去の研究動向を概観している。

第1章では最適化手法の数学的定式化を整理し、特に、飛行軌道最適化問題の数値計算法に関する技法をまとめている。

第2章では本論文で検討する宇宙輸送システムの概念設計に必要となる数学モデルを記述している。主な技術分野は軌道計算、飛行力学、熱・空気力学、重量推算であり、軌道計算では質点モデルの運動方程式が、飛行力学では剛体モデルによる安定微係数が使用される。空気力学ではスレンダー・ボデー理論と修正ニュートン流理論が採用され、熱空力特性の推算には加熱率の経験式が利用される。重量推算には統計的な推算公式であるWATTSとHASAが用いられた。

第3章では、宇宙帰還機を対象として、機体形状と帰還軌道の同時最適化問題が扱われている。機体形状として二重円錐が仮定され、形状を決定する変数が、制御入力と共に最適化される。評価関数にはクロスレンジ、総加熱量が、制約条件としては最大加熱率、機体重量、縦安定微係数などが考慮され、制約条件、評価関数をさまざまに変化させ、最適解の特性が詳細に検討されている。一連の検討によって、クロスレンジの確保には揚抗比最大での飛行と、機体の細長比向上が効果的であり、総加熱量と最大加熱率のトレードオ

フには急激な沈下と滑空帰還の切り替えと、機体先端形状が重要であることなど、帰還軌道と機体形状に関する総合的な設計指針を導くことに成功している。

第4章では、帰還軌道の設計を、複数の評価基準を多目的最適化手法によって満足化させる方法により検討している。第3章では、様々な評価基準から一つの目的関数を設定し、残りを制約条件として定式化しているが、実際の設計問題では、こうした明確な区別は困難な場合が多く、試行錯誤的な検討が不可避である。著者は、対話的な多目的最適化手法を新たに開発し、並列的な計算機環境で効率よく多目的最適解を探索する方法を提案し、帰還軌道設計に適用している。計算例では、クロスレンジ、最大加熱率、総加熱量、制御コストの4つの目的関数が同時に考慮され、多目的最適化手法を適用することで、目的関数と制約条件の区別が不要となり、探索領域も結果的に拡大され、制約条件の削減により計算効率が向上することなどが確認されている。

第5章では、第3章の複数分野の統合的最適化と第4章の多目的最適化が、SSTOの上昇軌道と帰還軌道の両者の最適化を考慮した機体形状の最適化問題として結合することが試みられている。上昇問題では消費燃料の最小化が、帰還問題ではクロスレンジ最大化が目的関数となり、機体形状や離陸重量が両者に関連する大域的な最適化変数となる。著者は、二つのフェーズの問題を動的に優先権を交換することで分割して最適化する定式化を新たに提案し、この複雑な問題の数値最適解を得ることに成功している。上昇フェーズと帰還フェーズの重み付けによって最適解は変化し、上昇フェーズを重視すると、構造効率を向上させるために機体の細長比が小さくなり、帰還フェーズを重視すると、揚抗比を向上させるために細長比が大きくなるという解を得ている。最適解は重みの変化とともに連続的に変化し、その傾向も合理的であり適切な解が得られていると判断できる。

結論 (Conclusions) では、本研究で得られた主な成果が要約されている。

以上、要するに、本論文は宇宙輸送システムの飛行軌道と機体形状の設計問題を対象として、複数の技術分野や飛行フェーズを統合化して最適化するとともに、複数の目的関数を満足化させるための多目的最適化を検討した。特に、並列計算環境における対話型の多目的最適化手法と、複数フェーズの多目的最適化アルゴリズムに新たな提案をしており、提案する最適化手法の有効性は宇宙輸送システムの設計問題によって詳細に検証されており、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であると認められる。