

論文審査の結果の要旨

氏名 本間 直彦

本論文は、「空力環境に適応する可変形状柔軟構造エアロキャプチャ衛星の最適設計 (Design Optimization of Spacecraft for Aerocapture with Aerodynamic-Environment-Adaptive Flexible Aeroshell)」と題し、本文5章および付録3項から成っている。

第1章は序論であり、研究の背景と目的を述べている。惑星探査において、探査機を惑星間軌道から周回軌道に投入するためには大きな減速を必要とし、それをロケット噴射で行うと、燃料重量が観測機器への重量配分を圧迫してしまう。惑星間軌道から大気圏に直接突入し、その際の空気抵抗で減速を得て、周回軌道に入るエアロキャプチャ衛星は、必要な搭載燃料を大幅に減らし、ペイロードを増やすものと期待されている。しかし、1) 大気圏飛行中の空力加熱対策、2) 大気密度など不確定要素がある中で高い成功率確保などの技術課題があるため、実現には至っていない。筆者は、この問題を解決するため、風圧に応じて柔軟に変形できる膜構造をエアロシェルに用いた「空力環境に適応する可変形状柔軟構造エアロキャプチャ衛星(Spacecraft for Aerocapture with Aerodynamic-Environment-Adaptive flexible aeroshell: SA-AEA)」を提案している。SA-AEA が、1) 軽量大面積の膜構造エアロシェルにより弾道係数が低下して、高高度での減速が実現され、空力加熱が低減する、2) 大気密度が増加しても風圧の増加に従って膜面が伸びて機体全体の細長比が増え、逆に抵抗係数は減少するため、空気抵抗変化が緩和される、ことから上記技術課題を解決できると述べている。SA-AEA は、大気圏飛行中の軌道を制御する付加的装置を必要とせず、環境適応型デザインを惑星探査機に用いる先駆的提案と言える。

本研究では、火星到着時 1200kg の探査機を高度 300km の火星周回軌道に投入するミッションを対象にしており、詳細な機体最適設計により SA-AEA の有効性を示している。第2章では具体的な問題設定と数値解析モデルの詳細が述べられている。火星大気モデルとその不確定性、大気圏飛行の力学モデル、大気圏離脱後の軌道修正法、機体重量推算法などを説明している。柔軟構造エアロキャプチャ衛星の形状には、シンプルさや空力的安定性などに加え、飛行実験による実績から軸対称フレアを選択し、設計変数を定義している。不確定要素への対応能力は、Corridor と呼ばれるエアロキャプチャ成功のために許容される大気圏突入経路角の幅で評価できる。目的関数は Corridor の最大化、最大よどみ点空力加熱の最小化、エアロシェル重量の最小化とし、フレア膜面の強度とその外枠であるインフレータートラスフレームの強度を拘束条件に設定している。

第3章では、飛行軌道、空力特性、柔軟構造エアロシェルの変形などを統合した多目的 GA による最適設計手法が詳細に説明されている。構造変形と連成した複雑な空力特

性変化を **Kriging** 法による応答曲面モデルで精度よくかつ効率的に表現している。

第4章は得られた結果を説明している。空力加熱低減と **Corridor** の拡大はトレードオフ関係にあるが、変形のない剛体の機体に比べ、**SA-AEA** ではパレート面が最良方向に前進、すなわち、同一の加熱率では **Corridor** が広がり、同一の **Corridor** では加熱率が低減されることが示された。解集団の特性や制約条件の影響等も詳細に調べられており、1) 設計変数の自由度はエアロシェル半径、フレア広がり角、膜材料のヤング率の順で狭くなること、2) 膜面の最大歪み量に対する制約を厳しくすると機体性能が下がること、3) 膜材料について最適なヤング率が存在し、最大歪みや耐熱性を向上させることで **SA-AEA** 機体の性能も向上すること、などエアロキャプチャ衛星設計に有用な知見を得ている。重量も含めた最適設計により、**SA-AEA** 機体が従来法に比べて重量メリットを生むことを明らかにしている。

第5章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上要するに、本論文は柔軟膜構造の空気ブレーキを用い、少ないロケット燃料消費で周回軌道に入ることのできる火星探査機の最適設計研究を行い、軽量かつ弾性変形可能な膜面の利用で、空力加熱の緩和と大気密度不確定性に対するロバスト性増大が実現されることを示した点で、先端エネルギー工学、特に深宇宙探査学に貢献するところが大きい。

なお、本論文の第2章から第4章は鈴木宏二郎氏との共同研究であるが、論文提出者が主体となって解析を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（科学）の学位を授与できると認める。

以上1996字