



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study of Aerodynamic Instability for Reentry Capsule with Thin Aeroshell [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	高澤, 秀人
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16117号
Issue Date	2024-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/93319
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hideto_Takasawa_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 高澤 秀人

審査担当者 主 査 准教授 高橋 裕介
副 査 教 授 永田 晴紀
副 査 教 授 村井 祐一
副 査 教 授 戸谷 剛
副 査 准教授 寺島 洋史
副 査 客員准教授 山田 和彦 (宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所)

学位論文題名

Study of Aerodynamic Instability for Reentry Capsule with Thin Aeroshell
(薄殻エアロシェル型再突入カプセルの空力不安定性に関する研究)

本論文は、将来の深宇宙サンプルリターンミッション実現に向けた新しいカプセルを具象化している。これは軽量・大面積の薄殻エアロシェルを採用することで低弾道係数飛行を実現し、大気突入時の空力加熱を緩和するものである。しかし、突入時の静的・動的な姿勢安定の確保が課題となった。本論文は、風洞試験、数値解析、成層圏気球投下による自由飛行を用いて、亜音速、遷音速、超音速における姿勢安定と、動的な姿勢不安定の挙動を明らかにした。加えて、ヌルクラインに着目した新たな数値モデルを構築し、遷音速域の慣性モーメントが及ぼす影響を定性的に予測することを可能とした。

本論文は全7章から構成されており、各章の要旨を以下に述べる。

第1章では、本論文の背景と動機、目的を述べている。現在、土星重力圏からのサンプルリターンが検討されている。大きな問題となるのは地球帰還時の極めて高い大気突入速度と、それに伴う厳しい空力加熱環境である。この課題を緩和するために軽量で大面積の低弾道係数型薄殻エアロシェルが見出された。着地速度の低減も期待され、パラシュートフリーであることも特徴である。過去の研究に基づき提案カプセルが空気力を受けて振動、発散にも至る空力不安定性の可能性を指摘している。空力動的な不安定性メカニズム解明は依然不完全である。本研究は、薄型エアロシェルカプセルの低速域での自由飛行を実証し、質量特性の影響を予測できる新しい運動モデルの提案を目的としている。

第2章では、薄殻エアロシェルの地球大気突入条件について検討している。土星重力圏からの帰還を想定し、初期突入速度とフライトパスアングルを変更した軌道解析を行うことで、最大熱流束、総熱荷重、最大減速度の要求を満たすミッション成立解を求めた。この条件において最大熱流束は11 MW/m²であり、薄殻エアロシェル技術によって、はやぶさカプセル以下の加熱環境を実現することを指摘している。

第3章では、静的な空力特性取得のための実験装置及び1軸自由振動試験手法について記載している。大気突入時にカプセルは極超音速から亜音速の幅広い速度域を飛行するため、空力特性として重要な速度域をカバーする低速風洞、遷音速風洞、超音速風洞を用いた。とくに1軸自由振動試験は、これまで不安定性が報告されている遷音速域を対象とするため遷音速風洞を採用した。

第4章は、小型成層圏気球投下による自由飛行環境の再現手法に焦点を当てている。気球実験におけるフルスケールのカプセル諸量や計測系について詳述している。

第5章では、カプセルを固定した静的空力特性評価のための数値流体解析、1軸自由度回転運動と流体・運動連成解析手法を提案している。ナビエ・ストークス方程式を有限体積的に離散化し、効率的な数値計算スキームを示している。乱流モデルとして Large eddy simulation を採用し、カプセル近傍の非定常流を表現した。

第6章では、実験、解析結果について述べている。風洞試験から、カプセル重心が機軸上のどこにあっても静的に姿勢安定であることを確認した。数値解析によるカプセル表面圧力分布から、カプセル前面が静安定に寄与する割合が大きく、迎角がついた際の圧力差により、静安定となるモーメントが駆動されることを示した。1軸自由振動試験では、一様流マッハ数 0.6 条件において振動振幅が増減する亜音速型振動現象の確認と質量特性の影響を指摘した。一方、遷音速域となる一様流マッハ数 1.3 において一定振幅で振動するリミットサイクルを観測し、慣性モーメントの影響を明らかにした。相平面における角加速度履歴に着目し、振動が成長するにつれ動的な効果が弱まり、静的モーメントに近づく傾向を示した。すなわち、位相遅れにより迎角 0 度を超えてもカプセルにエネルギーが入るため成長する一方、リミットサイクル時はエネルギーがほとんど入らないため、静的モーメントに近づく。加えて、ヌルクラインに着目した新たな数値モデルを構築し、遷音速域において慣性モーメントが及ぼす影響を定性的に予測することを可能とした。気球実験より低速の自由飛行環境において姿勢安定であることを示した。飛行中に観測された支配的な加速度・角速度は、抗力方向の並進振動とカプセル肩部から放出される螺旋渦による振動であることを見出した。加えて風洞試験と自由飛行時の減衰にかかる時間の差異も明らかにした。

第7章は結論であり、本研究の総括を記載するとともに今後の研究の展開について述べている。これを要するに、著者は新しい大気突入カプセルを空力特性・空力姿勢安定の観点から具体的に提案するものである。これは深宇宙を見据えた将来サンプルリターンの実現に不可欠であり、ミッション成立に大きな貢献をする。これらは流体力学および宇宙工学の発展に寄与する成果である。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。