



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_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 高澤 秀人

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)

深宇宙からのサンプルリターンに向けて、低弾道係数の薄殻エアロシェル型カプセルが提案されている。深宇宙から地球への帰還時には、大きな重力ポテンシャル差により地球大気圏再突入時にはより高速で突入するため、カプセルは厳しい空力加熱環境に晒されてしまう。この空力加熱を抑制するというコンセプトで低弾道係数のカプセルが考えられた。一方、このカプセルはパラシュートレスのもと軽量化を図っているため、空気力により十分減速するとともに適切な姿勢で着地する事で衝撃を逃がす必要がある。しかし大気圏再突入時には、流体から力を受けてカプセルが振動、最悪の場合発散してしまう空力不安定性現象が確認されている。特に再突入時の運動挙動から遷音速や亜音速領域でこれらの現象が報告されている。先行研究により流れの剥離と再付着や、圧力の位相遅れが姿勢不安定性の一因であると解明されつつある一方、地上試験や数値解析結果を用いた再突入時の挙動予測は難しく、風洞試験において安定的と考えられていた速度域でも運動が発散した結果も報告されている。したがって、本論文ではまず低弾道係数の薄殻エアロシェル型カプセルを新規提案し、その再突入軌道や基本的な空力特性について整理する。さらに、実飛行時の挙動予測に向けて、慣性モーメントなどの質量特性パラメータが不安定性に与える影響について1軸自由振動法を用いて評価、予測手法の構築を行った。加えて、これまではパラシュートを展開し飛行していたためデータの少ない低速領域における実飛行挙動を確認するために、成層圏気球を用いた投下試験を実施した。

第1章では、研究背景および目的について述べた。

第2章では、薄殻エアロシェル型カプセルの地球再突入条件について検討した。小惑星帯以遠、すなわち土星重力圏からの帰還を想定し、再突入初期速度と初期フライトパスアングルのパラメータを振り軌道解析を行うことで、最大熱流束と総熱荷重、最大減速度の条件を満たす初期条件 15 km/s, -11.0 deg が求められた。本初期条件下において、最大熱流束は 11 MW/m² であり、はやぶさ型カプセルよりも熱流束を抑制することが示唆された。薄殻カプセルは、低弾道係数により大気密度の薄い高高度から減速することが可能である。この減速により、同高度においてははやぶさカプセルよりも低速で飛行できるため、空力加熱を抑制できることが示された。

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た。大気圏再突入時にカプセルは幅広い速度域を飛行するため、空力特性取得には、低速風洞、遷音速風洞、超音速風洞を用いた。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章では、気球実験手法について述べた。気球実験において用いられたカプセル諸量や計測系についての詳細を示す。また再突入モデルと同サイズかつ軽量のカプセルを用いた。

第5章では、カプセルを固定した静特性評価に向けた流れ場解析と、1軸自由度の回転運動と流れ場の連成解析手法を記載している。有限体積的にナビエストークス方程式を解いており、Standard

Smagorinsky モデルを採用した LES により乱流を解いている。運動とのカップリングは分離型連成解法により行われている。

第 6 章では、これらの実験、解析結果を述べる。静的な風洞試験結果から、亜音速領域では抵抗係数 0.9 程度だが、マッハ数が 1 を超えると特に前面と背面の圧力差が大きくなり、抵抗係数 1.5 程度と大きい抵抗となった。また、カプセルの空力中心は全速度域において最低でもカプセル高さの 2 倍の位置であり、カプセルの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が確認できた。数値解析によるカプセル表面の圧力分布から、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が示された。

1 軸自由振動試験では、亜音速域の一樣流マッハ数 0.6 条件においては、振動振幅が増減する亜音速型振動現象が確認された。また慣性モーメントの影響は少なくカプセルの持つエネルギーは一定であった。ただし、初期迎角が大きいケースにおいて、徐々に減衰する過程では慣性モーメントの影響が確認された。慣性モーメントが変化する事で周波数が変化し、動安定微係数の影響が小さくなったためと考えられる。一方、遷音速域となる一樣流マッハ数 1.3 において、一定の振動で振幅するリミットサイクルが観測された。さらに慣性モーメントにより振幅の大きさに差が確認できた。相平面における角加速度履歴に着目すると、振動が成長するにつれ位相遅れが小さくなり、静的モーメントにより生じるモーメント近づく傾向を示していた。すなわち、位相遅れ等により迎角 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系に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付いたと考えられる。また、このヌルクラインに着目した新たな数理モデリング手法を構築した。本モデリング式により、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が可能となった。

気球実験結果から、カプセルはマッハ数 0.2 以下、レイノルズ数 105 オーダーの流れ場を飛行しており、低速域において姿勢安定であることが示された。カプセルに搭載された姿勢センサから、加速度においては 2 Hz 弱と 1 Hz 弱の振動が支配的であったが、角速度では 2 Hz 弱の振動が支配的であった。2 Hz 弱の振動はカプセルの慣性モーメントと静的モーメント勾配から見積もられる値と一致している。また低速域を対象とした静的な数値解析結果から、抗力方向の並進振動と肩部から放出される螺旋渦による振動が確認された。1 Hz 弱の加速度結果のみに見られる振動は、ストローハル数が一致する並進振動によるものと考えられる。本カプセルは安定的であったため、回転振動だけでなく並進振動も同程度の影響が確認できた。ロールの角速度運動は誘起する要因がほとんどないため比較的すぐに落ち着いたが、ピッチ・ヨーの運動は時間をかけてエネルギーを減少させていた。テイラー展開により機体に働くモーメントを角度と角速度の関数として記載した場合、ダンパー項は周波数に比例する。風洞試験と比較しカプセルの慣性モーメントが大きくなっているため、周波数が増加しダンパー項が小さくなる。その結果としてエネルギーロスにかかる時間が増大したことで徐々にエネルギーを落としたと考えられる。

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。