

令和 5 年 5 月 22 日現在

機関番号：11201

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20390

研究課題名（和文）大気突入カプセルの減速時における動的不安定振動の数値モデルの構築

研究課題名（英文）Mathematical modeling of the dynamically unstable oscillation of atmospheric entry capsule in deceleration

研究代表者

竹田 裕貴（Takeda, Yuki）

岩手大学・理工学部・助教

研究者番号：70911634

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：大気突入カプセルには遷音速飛行時にパラシュートの開傘を妨げる動的な不安定振動が存在することが知られています。本研究では数値シミュレーションを用いてカプセルのまわりの流れによって誘起されるカプセルの自励振動の再現を目指します。特に、自由回転試験における亜音速型振動と超音速型振動の再現および、カプセルが大気中で減速する過程のピッチング振動を予測するモデル式の構築に向けたデータの取得を目指します。

本研究では、カプセルに生じる亜音速型振動と超音速型振動の再現に成功しました。また、超音速型振動におけるピッチングモーメントの動的成分に生じる位相進みがマッハ数によらずほぼ一定であることを明らかにしました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カプセルのまわりの流れ場が誘起するピッチング運動の再現が可能な数値シミュレーションコードを開発しました。また、その数値シミュレーションコードを用いて亜音速および超音速領域における特徴的なピッチング振動形態の再現に成功しました。

数値シミュレーションにより得られたピッチングモーメントの時間履歴に対して後処理を行うことで、従来明らかでなかったピッチングモーメントの動的成分に生じる位相進みのマッハ数依存性を明らかにしました。今後、得られたデータをもとに減速時の動的不安定現象を再現することが可能なモデル式の構築を目指します。

研究成果の概要（英文）：Dynamic instability of the atmospheric entry capsule is a well-known problem that potentially causes parachute deployment failure. This study aims to reproduce the pitching oscillations caused by the aerodynamic force by the numerical simulation. Furthermore, this study aims to obtain fundamental information for the modeling of the pitching oscillation during the deceleration of the atmospheric entry capsule.

Numerical simulations of this study achieve to reproduce the subsonic-type oscillation and supersonic-type oscillation of the atmospheric entry capsule as well as the experiment. Furthermore, the Mach number dependency of the phase advance in the dynamic component of the pitching moment is revealed.

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：大気突入カプセル 数値流体解析

### 1. 研究開始当初の背景

大気突入カプセルには遷音速飛行時にパラシュートの開傘を妨げる動的な不安定振動が存在する [1] ことが知られている。従来から動的不安定性の解明のために自由回転風洞試験や自由飛行試験が行われている。

カプセルを風洞中にピッチング振動が可能な形で保持する自由回転風洞試験では、振幅の成長が一定の振幅までとどまるリミットサイクル回転振動が遷音速域で観測されている [2]。一方、カプセルの動的に不安定な回転振動はカプセルの飛行速度が抗力によって減速する際に現れる。これは、最大ピッチ角付近での静的な復元力が減少することに起因する [3] とされている。実際にカプセルが抗力によって減速する自由飛行試験では、減速に伴う振幅の増加が確認されている [4]。自由飛行試験は取得可能な情報量に制限があるため、自由回転試験から減速時の動的安定性の予測が可能となれば開発コスト低減への寄与が大きい。しかしながら、大気突入カプセルの動的安定性の評価法として何が適切なものは未だに結論が出ていない。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は大気突入カプセルの減速時における動的不安定性を予測するためのモデル式作成に向けたデータ取得である。

従来、大気突入カプセルの動的安定性の評価にはモーメント係数の数値モデルから導出される動安定微係数が重視されてきた。動安定微係数(図1)は作図した際の複雑な波形の解釈の難しさと最大ピッチ角付近でその値が発散してしまう点が問題となる。そのため、動安定微係数を用いない形でのモーメント係数の数値モデルがいくつか提案されており [5]、研究代表者らもリミットサイクル回転振動時のフーリエ係数を用いた数値モデル [6] を提案している。

研究代表者らの提案したモデルではリミットサイクル振動時のモーメント係数の時間履歴データをもとにモーメントの3倍高調波成分に着目している。また、3倍高調波に着目したモデリングを行うことで、ピッチングモーメントの動的成分の極大値に位相進みが存在することを明らかにした(図2)。

位相進みは位相面上の無次元量である位相角を用いて定義されるため、マッハ数をはじめとした飛行条件に依存しない動的安定性を評価できるパラメータとして期待できる。しかしながら、このモデル式の妥当性や位相進みは非粘性解析におけるマッハ数 1.3 の1条件でしか確認されていない。

### 3. 研究の方法

本研究ではモデル式構築のための元データ

の取得を目的とした、流れとカプセルの1自由度回転運動の連成数値解析を行う。

従来の非粘性解析コードを粘性ありのナビエ・ストークス解析に向けて拡張する。拡張した数値解析コードを用いて、マッハ数 0.7、0.9、1.1 および 1.3 の4条件における流れとピッチング運動の連成解析を行い、亜音速型振動と超音速型振動の双方を再現可能か検証する。

連成解析結果から位相進みを算出し、位相進みのマッハ数依存性を明らかにすることで、位相進みを用いた運動のモデル化に向けた基礎データを取得する。

### 4. 研究成果

マッハ数 1.3 の連成解析における流れ場の様子を図3に示す。大気突入カプセルの肩部から放出される渦構造を速度勾配テンソルの第2不変量(Q値)の等値面で作図している。Q値の等値面はマッハ数で色付けされている。カプセルの背後の渦構造は、カプセルにピッチ角がついているために上側に偏向している。マッハ数が高い領域も同様に上側が広がっている。また、後流には再圧縮による衝撃波が存在するため、そこでマッハ数が減少している様子が確認できる。再圧縮による衝撃波は後流内の再循環領域の後端に生じる。再循環領域の後端まで細かな渦構

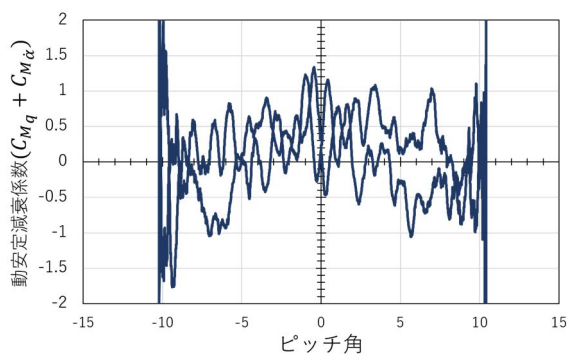


図1 ピッチング振動1周期内における動安定微係数の履歴。最大ピッチ角付近で値が発散している。

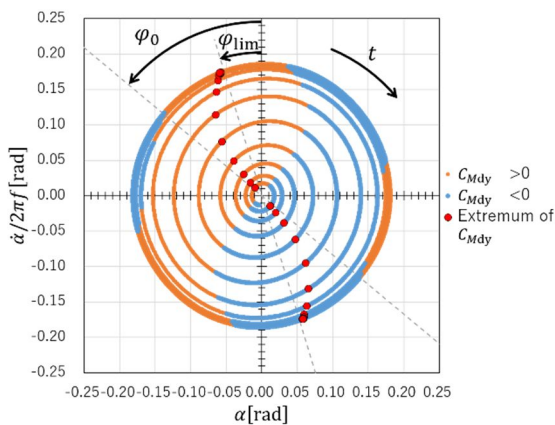


図2 位相面上におけるピッチングモーメントの動的成分 $C_{Mdy}$ の分布と位相進み $\varphi_0, \varphi_{lim}$ 。

造を再現できているため、本計算では後流の流れ場を十分に格子解像できているといえる。

カプセル表面のカラーコンターは大気突入カプセル表面の圧力分布を示す。カプセル前面の圧力が高くなる領域は赤で、カプセル背面の圧力が低くなる領域では青で色付けされている。最も圧力が高くなるよ

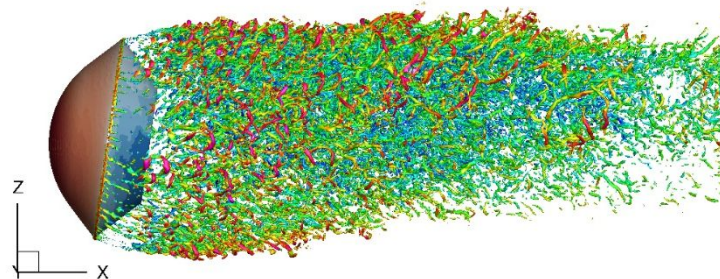


図 3 マッハ数 1.3 のカプセルまわりの流れ場

み点はピッチ角がついた結果、カプセルの対称軸から下側に移動している。一方、カプセルの背面では下側の圧力がより低くなっており、カプセル全体としてはピッチ角を減少させるモーメントが生じている。

上記の結果より、カプセルの周囲に生じる基本的な流れ場を適切に再現できているとみられる。また、同様の連成解析をマッハ数 0.7, 0.9, および 1.1 に対して行い、いずれの解析でも同様にカプセルの周囲に生じる流れ場を再現することができた。

マッハ数 1.3 の連成解析におけるピッチ角の時間履歴を図 4 に示す。ピッチ角は時間の経過とともに増加し、振幅が一定となるリミットサイクル振動となっている。このような振動形態は、ピッチング 1 自由度自由回転試験において超音速型振動として報告されており合理的な結果といえる。また、リミットサイクル時の振幅は実験がおよそ 20 度程度に対して、本計算ではおよそ 15 度でおおむね同程度の振幅のリミットサイクル振動を再現することができたといえる。

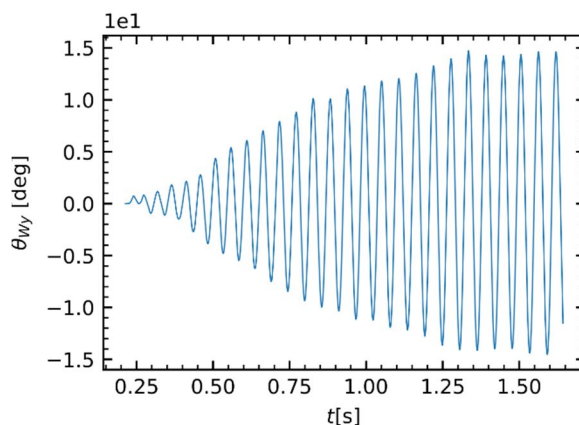


図 4 マッハ数 1.3 におけるピッチ角の時間履歴

マッハ数 1.1 ではマッハ数 1.3 と同様の超音速型のリミットサイクル振動が得られた。また、振幅もマッハ数 1.3 の条件と同様に実験と同程度であった。一方、マッハ数 0.7 および 0.9 では超音速条件とは対照的に、振幅が不規則に増減するような時間履歴が得られた。これは実験でも亜音速型振動として報告されている。そのため、本研究における連成解析では超音速型振動と亜音速型振動の双方を適切に再現することができた。

リミットサイクル振動が生じたマッハ数 1.1 および 1.3 で得られた位相進みはリミットサイクル振動の際におよそ 20 度、振動の成長段階においておよそ 70 度程度であった。このことから、リミットサイクル振動が生じる際には位相進みの値はマッハ数によらずほぼ一定であることを明らかにした。

以上で説明したように、流れとピッチング 1 自由度回転運動の連成解析が可能な数値解析コードを開発し、亜音速型振動とリミットサイクル振動を伴う超音速型振動の再現に成功した。また、マッハ数 1.1 および 1.3 のリミットサイクル振動を得られた条件では、位相進みがほぼ一定であることを明らかにした。今回の連成解析で得られたデータをもとにカプセルが減速するさいのモデル式の構築に引き続き取り組む。

[1] Kazemba, C. D., Braun, R. D., Clark, I. G., and Schoenenberger, M. "Survey of Blunt-Body Supersonic Dynamic Stability," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 54, No. 1, 2017, pp. 109-127.

[2] 平木講儒, "カプセル型物体の動的不安定性についての実験的研究," 宇宙研報告書, 第 103 号, 1999 年.

[3] Schoenenberger, M., and Queen, E. M. "Limit Cycle Analysis Applied to the Oscillations of Decelerating Blunt-Body Entry Vehicles," NATO Research and Technology Organization Symposium RTO-MP-AVT-152, Norway, May 2008.

[4] Schoenenberger, M., Yates, L., and Hathaway, W. "Dynamic Stability Testing of the Mars Science Laboratory Entry Capsule," 41st AIAA Thermophysics Conference, June, 2009.

[5] Kazemba, C. D., Braun, R. D., Schoenenberger, M., and Clark, I. G. "Dynamic Stability Analysis of Blunt-Body Entry Vehicles Using Time-Lagged Aftbody Pitching Moments," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol. 52, No. 2, 2015, pp. 393-403.

[6] Takeda, Y., Kazuyuki, U., Matsuyama, S., and Tanno, H. "Coupled Numerical Analysis of Three-Dimensional Unsteady Flow with Pitching Motion of Reentry Capsule - Investigation of the Third Harmonics of the Aerodynamic Force," *Transactions of JSASS*, Vol. 63, No. 6, 2020, pp. 249-256.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 竹田裕貴, 上野和之, 丹野英幸
2. 発表標題 大気突入カプセルの動的安定性評価に向けた ピッチング 1 自由度運動連成解析
3. 学会等名 日本航空宇宙学会北部支部2022年講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹田裕貴, 馬場直樹, 中代雄樹, 上野和之
2. 発表標題 大気突入カプセルの動的安定性推定に向けた連成数値解析の取り組み
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹田裕貴, 馬場直樹, 中代雄樹, 上野和之
2. 発表標題 大気突入カプセルの運動のモデル化に向けた流れと運動の連成解析
3. 学会等名 令和4年度 宇宙航行の力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------