

2A08 支持干渉の影響評価のための、カプセルとスティングを組み合わせた1自由度連成解析

○ 猫塚啓太, 竹田裕貴, 上野和之 (岩手大)

Investigation of support interference by 1-degree of freedom Coupled CFD Analysis of An Atmospheric Entry Capsule and sting .

Keita Nekozuka, Yuki Takeda, Kazuyuki Ueno (Iwate University)

Key Words : Coupled Analysis, Atmospheric Entry Capsules, Support Interference, Dynamic Instability

Abstract

To investigate influence of support interference, rotational motion in pitch angle is implemented on computational fluid dynamics (CFD) solver. The 1-degree of freedom coupled CFD analysis is performed for the wind tunnel model of Hayabusa sample return capsule. Comparing pitch oscillation with and without sting, the model with sting has slower amplitude growth rate than without sting.

1. はじめに

大気突入カプセルは、宇宙飛行士や小惑星から採取したサンプルなどを宇宙から地球に運搬するときに使われる宇宙機である。このカプセルは遷音速域で動的に不安定な振動が発生することが知られている。¹⁾ この動的不安定性によってカプセルの姿勢が不安定になり、着地点の予測精度やパラシュートの開傘に悪影響を及ぼす恐れがある。カプセルの安全な帰還と着地点の予測精度の向上を実現するためには、遷音速域内での動的に不安定な振動の解明が必要である。

動的に不安定な振動の解明のために平木²⁾ は、はやぶさカプセルを対象として模型背面に支持具（スティング）を取り付けた自由回転風洞試験を行っている。この風洞試験では運動中のカプセルの表面圧力の計測を行っており、背面に作用する空気力が不安定の要因であると考察している。しかし、模型背面では、スティングと流れ場が干渉することによる支持干渉が生じるため、実機と異なる圧力場となっている恐れがある。

宇宙機の風洞試験における支持干渉の影響の調査は数値解析を用いて行われてきた。Takahashi ら³⁾ は展開型エアロシェルを対象とした静的解析による空力係数の算出をしており、スティングの存在により背面の圧力係数の絶対値が小さくなったと述べている。また、Nagai ら⁴⁾ は、HRV 型カプセルを対象に、動的解析の1つである強制振動解析を行っている。しかしカプセルとスティングが一体となって回転してしまっており、カプセル背面の後流の評価ができていないことが言及されている。

本研究では、はやぶさカプセルを対象としてカプセルのみがピッチ振動をする流れと運動の連成解析コードの開発を行う。そしてスティングあり・なしの1自由度連成解析について、長時間の時間発展計算を行い、支持干渉の影響を評価する。

2. 支配方程式と離散化手法

支配方程式は3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式に従うものとする。数値解析には直交格子型解法の1つ

であるカットセル法⁵⁾を用いる。カットセル法における保存方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial H \mathbf{Q}}{\partial t} + \frac{\partial H(\mathbf{E}_a - \mathbf{E}_d)}{\partial x} + \frac{\partial H(\mathbf{F}_a - \mathbf{F}_d)}{\partial y} + \frac{\partial H(\mathbf{G}_a - \mathbf{G}_d)}{\partial z} = \delta_D \boldsymbol{\sigma}. \quad (1)$$

式(1)左辺の \mathbf{Q} は保存量, \mathbf{E} , \mathbf{F} , \mathbf{G} はそれぞれ x , y , z 方向のセルインターフェースを通過する流束成分である。下添え字 a は移流流束, 下添え字 d は粘性流束である。ここで, H は次のようなヘヴィサイド関数である。

$$H(t, x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{in the air} \\ 0 & \text{in the object} \end{cases} \quad (2)$$

また、式(1)の右辺の $\boldsymbol{\sigma}$ は、壁面流束（空気と物体との相互作用）を示す。

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} 0 \\ p n_x - \mu \frac{\partial(u_x - u_n n_x)}{\partial n} \\ p \tilde{n}_y - \mu \frac{\partial(u_y - u_n n_y)}{\partial n} \\ p \tilde{n}_z - \mu \frac{\partial(u_z - u_n n_z)}{\partial n} \\ p(u_{w_x} n_x + u_{w_y} n_y + u_{w_z} n_z) - u_{w_x} \mu \frac{\partial(u_x - u_n n_x)}{\partial n} \\ \quad - u_{w_y} \mu \frac{\partial(u_y - u_n n_y)}{\partial n} \\ \quad - u_{w_z} \mu \frac{\partial(u_z - u_n n_z)}{\partial n} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

空気と物体の間では相変化による質量の受け渡しはなく断熱壁を仮定するため、圧力と壁面せん断応力を介した運動量・エネルギー交換だけが行われる。式(3)中の p は圧力, \mathbf{u}_w は壁面の移動速度, \mathbf{n} は壁面の法線ベクトルである。また, δ_D はセルスケールで離散表現

されたディラックのデルタ関数である．このディラックのデルタ関数とセル体積 $\Delta x \Delta y \Delta z$ の積は数値的にカット面の断面積を与える．

計算手法は，式 (1) をセル中心有限体積法で離散化し，移流流束には SLAU 法⁶⁾を採用した．空間高次精度化は速度成分 (u_x, u_y, u_z) に 6 次精度 WENO 法⁷⁾，密度と圧力 (ρ, p) に 5 次精度 MUSCL 法⁸⁾を採用した．さらに，速度成分に対しては Thornber らによって提案された修正⁹⁾を適用した．粘性流束は 2 次精度中心差分法で評価し，保存方程式の時間積分は 2 次精度の TVD Runge-Kutta 法¹⁰⁾を用いた．カプセルの回転運動の時間積分には，4 次精度の Adams-Bashforth 法¹¹⁾を用いた．

3. 解析条件

本研究で用いるカプセル模型を図 1，解析条件を表 1 に示す．解析対象をはやぶさカプセルとし，寸法は平木²⁾の 1 自由度自由回転試験で使われた模型を参考に，ショルダー径を $D=100\text{mm}$ とした．またスティングの直径も同様に 16mm とした．格子幅 Δx はショルダー径に対して $\Delta x/D = 0.01$ とした．

ピッチ角 θ については，時計回りを正とする．ピッチ方向の慣性モーメントは $6.07 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ とした．

4. 解析結果

4.1 静的解析

連成解析の前段階として，ピッチ角を固定した静的解析を行った．図 2 に $\theta = 10^\circ$ ， $y = 0$ 断面の時間平均した擬似シュリーレンを示す．カプセル前方に弧状衝撃波，後流に再圧縮衝撃波が形成されている．また，カプセルのショルダー部で膨張波が確認できる．これらのことから，鈍頭物体まわりの超音速流れにおける典型的な流れ場¹²⁾を再現できており，本計算結果は妥当であるといえる．

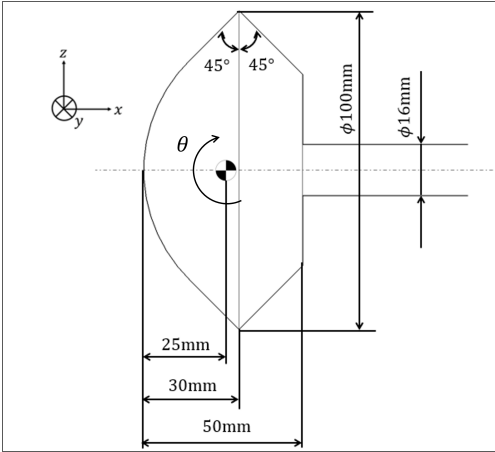


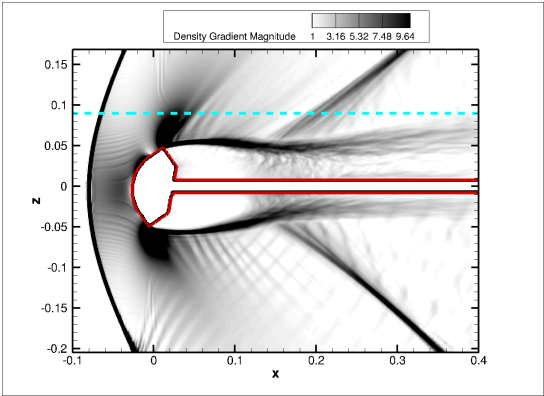
図 1: カプセル模型の寸法

表 1: 解析条件

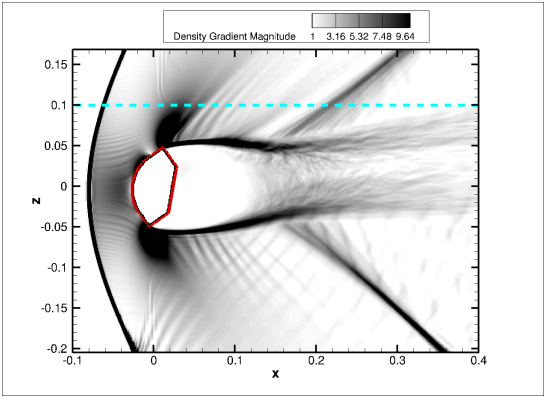
主流マッハ数	$M_\infty = 1.3$
レイノルズ数	$Re_\infty = 1.65 \times 10^6$
動圧 $[\text{kg}/\text{cm}^2]$	$\frac{1}{2}\rho u^2 = 0.646$

後流の流れ場にはスティングの有無による差異がみられた．図 2 の水色の点線は $x = 0.4$ における後流の上下動の位置を表している．スティングありモデルの方が後流上下動の位置が低くなっており，スティングを取り付けたことによって流れ場に変化が生じていると考えられる．

後流の上下動の大きさがカプセルに与える影響について，平均からの変動の RMS を用いて比較する．表 2 に $\theta = 10^\circ$ における揚力 L_{RMS} とピッチングモーメント M_{RMS} の時間平均に対する変動の RMS の算出結果を示す．この表からスティングありモデルのほうが揚力，モーメントともに RMS の値が小さいことがわかる．図 2 の比較をふまえると，スティングを取り付けることで，後流の時間変動の幅が小さくなり，空気力の変動もその影響で小さくなったと言える．



(a) スティングあり



(b) スティングなし

図 2: $y = 0$ 断面の擬似シュリーレン ($\theta = 10^\circ$ ，時間平均の流れ場)

表 2: 平均からの変動の RMS による物体運動に関わるパラメータの比較

	スティングあり	スティングなし
$L_{RMS} [\text{N}]$	7.208×10^{-1}	8.384×10^{-1}
$M_{RMS} [\text{N} \cdot \text{m}]$	2.529×10^{-2}	2.537×10^{-2}

4.2 連成解析

スティングありとなしの2種類のモデルでピッチング1自由度連成解析を行った。初期のピッチ角は、 $\theta = 0^\circ$ である。連成解析の初期解には十分に流れ場が収束した静的解析の結果を用いている。

図3にスティングあり・なしモデルの双方のピッチ振動を重ね合わせた時間履歴を示す。現時点において、振幅の増加は収束傾向にあり、その値に大きな差がないので最終的には同程度の振幅のリミットサイクル振動になると予想される。一方でピッチ角の成長について、 $\theta = 10^\circ$ までの到達時間を比較すると、スティングなしモデルは $t = 0.51\text{s}$ 、スティングありモデルは $t = 0.74\text{s}$ である。このことからスティングを取り付けることで振幅の成長速度が遅くなっていることがわかる。

振幅が 11° である1周期分のモーメントの時間履歴を用いて比較する。図4に時刻 $t = 0.812\text{s} \sim 0.868\text{s}$ （スティングあり）、 $t = 0.536\text{s} \sim 0.593\text{s}$ （スティングなし）のピッチ振動1周期分におけるピッチングモーメント係数 C_M のヒステリシスループを示す。2つのヒステリシスループに共通して、ピッチ上げとピッチ下げにおける C_M の大小関係が入れ替わる角度が $\pm 4^\circ \sim 6^\circ$ 程度となっている。この角度は、この周期における振幅のおよそ半分であり、平木²⁾の風洞試験の結果と一致している。

図3より、ピッチ振動の振幅の増加量が小さくなっているため、振幅が一定となるリミットサイクル振動に入りつつある。今後、2つのモデルの比較をおこない、より詳細な支持干渉の影響評価を行う予定である。また、連成解析は後流の格子解像度に強く依存するため¹³⁾¹⁴⁾、格子を細かくした解析も行っていく予定である。

5. まとめ

スティング支持されたはやぶさカプセルを対象に、カプセルのみがピッチ振動をする1自由度連成解析を行った。

連成解析の前段階として静的解析を行い、スティングが後流の時間変動に影響を与えていることを確認

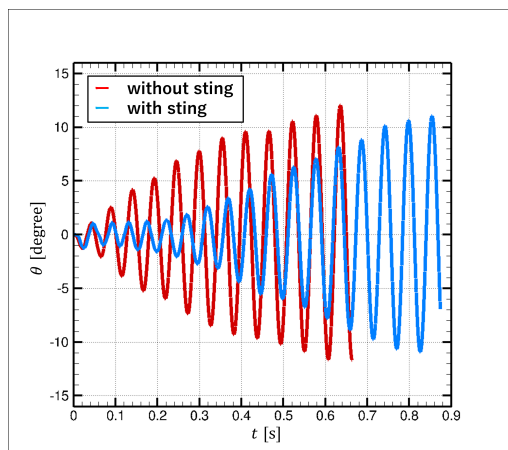
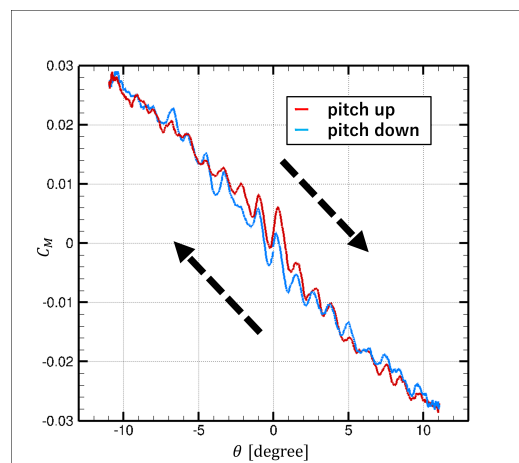
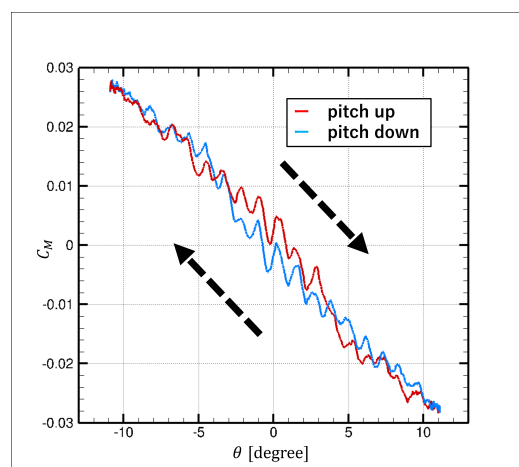


図3: スティングあり・なしのピッチ角の時間履歴



(a) スティングあり ($t = 0.812 \sim 0.868\text{s}$)



(b) スティングなし ($t = 0.536 \sim 0.593\text{s}$)

図4: ピッチ振動1周期分の C_M

した。

連成解析によるピッチ角の時間履歴から、スティングを取り付けることで振幅の成長速度が遅くなっていることを確認した。 C_M のヒステリシスループから、どちらのモデルも振幅の半分の角度で節を持っていることを確認した。これは先行研究の風洞試験の結果と一致している。

リミットサイクル振動に入り次第、両者を比較し支持干渉の影響を調査する予定である。また、格子を細かくした解析も行っていく予定である。

謝辞

本研究の計算結果は、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模計算システムを利用して得られた。ここに記して関係者各位に謝意を示す。

参考文献

- 1) 稲谷芳文, 石井信明, 山田哲哉, 平木講儒, “小惑星サンプルリターンカプセルの空気力学”, ながれ, **24**, pp. 297-305, (2005)
- 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”, 宇宙科学研究所報告, 第103号, (1999) .
- 3) Takahashi, Y., Matsunaga, M., Oshima, N., and Yamada, K., “Drag Behavior of Inflatable Reentry Ve-

- hicle in Transonic Regime” *Journal of Spacecraft and Rockets*, **56**(2), pp. 577-585, (2019)
- 4) Nagai, S., Hashimoto, A., Koga, S., Hidaka, A., and Murakami, K., “Synergistic Numerical and Experimental Investigations of Dynamic Stability of a Lifting Capsule,” *Journal of Spacecraft and Rockets*, **60**, No. 1, 2023, pp. 22–37.
 - 5) Takeda, Y., Baba, N., Ueno, K., “Wall heat flux estimation using the Cartesian cut-cell method,” *Journal of Fluid Science and Technology*, **18**, No. 3, 2023.
 - 6) Shima, E., and Kitamura, K., “On New Simple Low-Dissipation Scheme of AUSM-Family for All Speed,” AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, **47**, 2009.
 - 7) Martin, M. P., Taylor, E. M., Wu, M., and Weirs, V. G., “A bandwidth-optimized WENO scheme for the effective direct numerical simulation of compressible turbulence,” *J. Comput. Phys.*, **47**, 2006, pp. 270–289.
 - 8) Kim, K. H., and Kim, C., “Accurate, efficient and monotonic numerical methods for multi-dimensional compressible flows PartII: Multi-dimensional limiting process,” *J. Comput. Phys.*, **208**, 2005, pp. 570–615.
 - 9) Thornber, B., Mosedale, A., Drikakis, D., Youngs, D., and Williams, R. J. R., “An improved reconstruction method for compressible flows with low Mach number features,” *J. Comput. Phys.*, **227**, 2008, pp. 4873–4894.
 - 10) Shu, C. W., and Osher, S., “Efficient Implementation of Essentially Non-oscillatory Shock-Capturing Schemes,” *J. Comput. Phys.*, **77**, 1988, pp. 439–471.
 - 11) Balogun, O. D., Oluwafemi, I. O., and Famakinwa, O., E., “Review of Adams-Bashforth method for numerical solution of first order ordinary differential equations” *Global Journal of Engineering and Technology Advance* **19**(1), 2024, pp. 37–61
 - 12) Jaremenko, I. M., “Wakes, Their Structure and Influence Upon Aerodynamic Decelerators,” NASA CR-74, 1967.
 - 13) Takeda, Y., Ueno, K., 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 the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences* **63**(6), 2020, pp. 249–256
 - 14) Matsuyama, S. “はやぶさ型カプセルのマッハ 1.1 における動的不安定に関する LES 解析 “，日本航空宇宙学会 第 54 期 年間講演会 公演論文集，1D04，2023