

直交カットセル法を用いた大気突入カプセルまわりの流れと回転運動の連成解析

課題責任者

竹田 裕貴

岩手大学理工学部

著者

竹田 裕貴^{*1}, 上野 和之^{*1}, 馬場 直樹^{*2}, 北原 歩^{*2}

^{*1} 岩手大学理工学部, ^{*2} 岩手大学大学院総合科学研究科

キーワード: 直交カットセル法, 数値流体解析, 圧縮性流れ, 大気突入カプセル

1. はじめに

はやぶさははじめとした大気突入カプセルには遷音速以下の低速度域における動的な不安定振動が存在することが知られている。日本の大気突入カプセルの回収においては、従来亜音速域でパラシュートを解散するためパラシュート開傘直前に相当する遷音速域や亜音速域における動的不安定性はミッションの成否にかかる重要な問題のひとつである。

2020 年 12 月に回収されたはやぶさ 2 では、実機の飛行データを用いた飛行後解析において遷音速域以下における急激な回転加速度の増加とレンジアウトが確認されており、動的不安定性の影響が示唆されている。動的不安定性は非定常な流れとカプセルの運動との連成現象であるため、両者を同期させた連成解析が必要となるが、計算コストの高さから実施例は少ない。

本研究で用いる直交カットセル法は、計算セルを横切る微小平面の組み合わせとして物体形状を再現する手法である。直交カットセル法は同様の直交格子を用いる計算手法であるボクセル法と比較して、物体形状の再現性において優れる。また、埋め込み境界法 (Immersed Boundary Method) では満足されない物体近傍での質量・エネルギー保存則を満足することができる。上記に加えて、直交格子法の特長である格子生成コストが低い点から、計算領域内における物体の姿勢が時々刻々と変化する連成解析に適した計算手法といえる。

本研究では、直交カットセル法を用いた連成解析コードの開発を行った。開発した CFD コードを用いて、はやぶさおよび HRV のふたつの形状のカプセルに対する連成解析をそれぞれ実施した。

2. はやぶさ型カプセルの回転 1 自由度連成解析

はやぶさ型カプセルのピッチング 1 自由度連成解析を実施した。本研究の内容を令和 5 年度宇宙航行の力学シンポジウム [1] で学会発表を行った。主流条件は平木による風洞試験を参考に、マッハ数を $M_\infty = 0.7$ 、レイノルズ数を $Re_\infty = 1.33 \times 10^6$ とした。

保存方程式は圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、直交カットセル法による有限体積法を用いた数値解析を実施した。数値流束の算出には SLAU 法を用

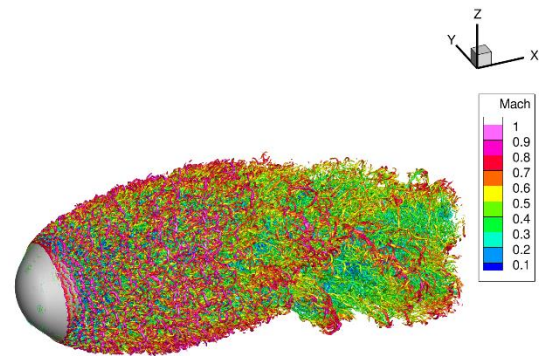


図 1 はやぶさカプセルまわりの Q 値等値面

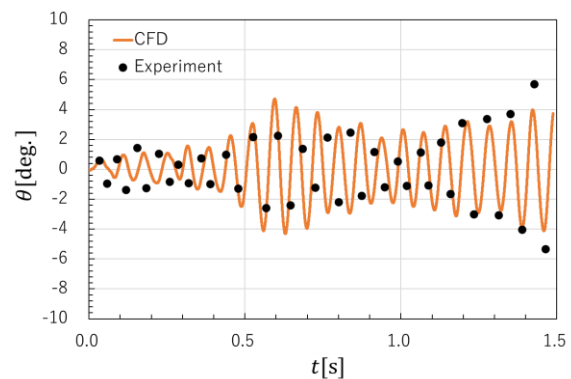


図 2 はやぶさカプセルのピッチング振動の時間履歴

い、セル界面における原始変数は圧力、密度は 5 次精度 MUSCL、流速 3 成分は 6 次精度 WENO を用いて補完した。流速 3 成分については、6 次精度 WENO での補完後に、Thorner らによって提案された修正を加えた。時間発展方式は 2 次精度 TVD Runge-Kutta 法とし、カプセルのピッチング運動は 4 次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。また、カプセル周囲の格子解像度 Δx ははやぶさカプセルの肩部の直径 D に対して $\Delta x/D = 1/200$ とした。

図 1 にカプセル周囲の速度勾配テンソルの第二不変量 (Q 値) の等値面を示す。等値面はマッハ数によって色付けをしてある。流れがカプセルの肩部で剥離し、後流に細かな渦を形成していることが確認できる。また、カプセルが負のピッチ角をとっているほか、後流にもうねりが生じていることがわか

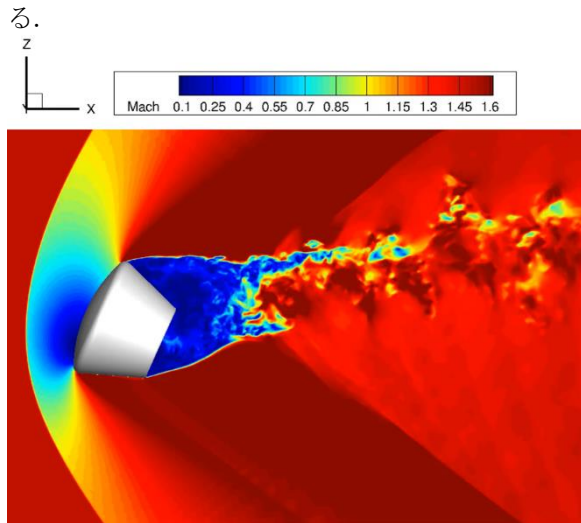


図 3 HRV 型カプセルまわりのマッハ数分布

図 2 にカプセルのピッチング振動の時間履歴を示す。図中のオレンジの線は連成解析におけるピッチング振動の時間履歴を示し、黒の点は平木による風洞試験結果から振動のピークを抜き出したものである。本研究の連成解析結果は実験結果とよく一致しており、振幅が不規則に増減を繰り返す亜音速型の振動を再現できていることがわかる。また、連成解析における振動の周波数は14.5Hzで、実験の13.5Hzとよく一致している。

以上より、本研究の連成解析では亜音速型振動をよく再現できているといえる。今後、論文投稿に向けて亜音速型振動が発生するメカニズムの解明を進める。

3. HRV 型カプセルの回転 3 自由度連成解析

HRV 型カプセルの回転 3 自由度連成解析を実施した。本研究の内容を日本航空宇宙学会北部支部 2024 年講演会[2]および、令和 6 年度宇宙航行の力学シンポジウム[3]で学会発表を行った。主流条件は Hiraki らによる風洞試験を参考に、マッハ数を $M_\infty = 1.5$ 、レイノルズ数を $Re_\infty = 1.75 \times 10^6$ とした。

保存方程式は圧縮性 Navier-Stokes 方程式とし、直交カットセル法による有限体積法を用いた数値解析を実施した。はやぶさカプセルと同様に、数値流束の算出には SLAU 法を用い、セル界面における原始変数は圧力、密度は 5 次精度 MUSCL、流速 3 成分は 6 次精度 WENO を用いて補完した。流速 3 成分については、6 次精度 WENO での補完後に、Thornber らによって提案された修正を加えた。時間発展方式は 2 次精度 TVD Runge-Kutta 法とした。カプセルの 3 自由度回転運動表現にはオイラー角を用い、オイラー角の時間発展には 4 次精度 Runge-Kutta 法を用いた。また、カプセル周囲の格子解像度 Δx ははやぶさカプセルの肩部の直径 D に対して $\Delta x/D = 1/106$ とした。

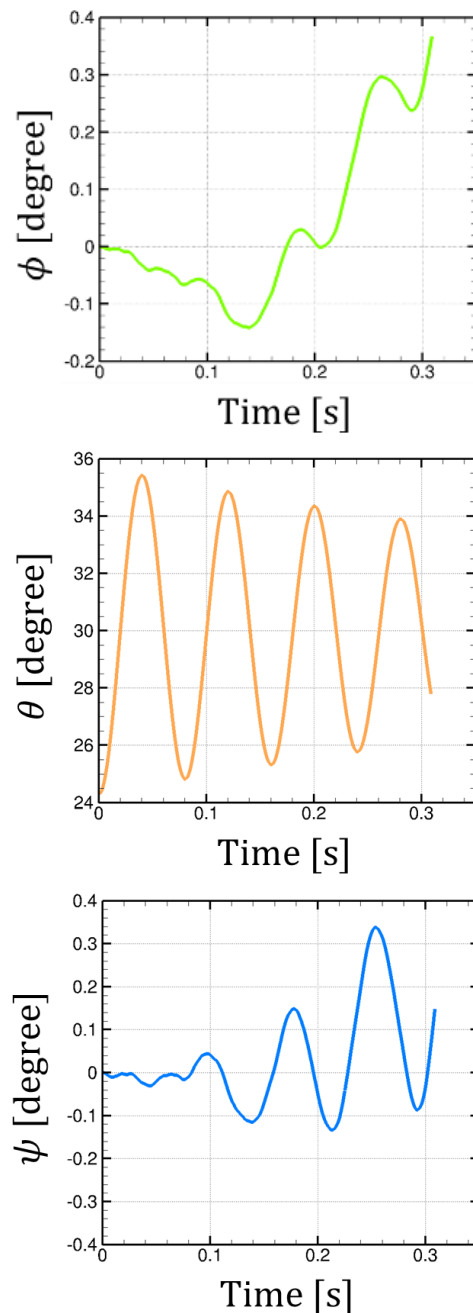


図 4 HRV 型カプセルの姿勢角の時間履歴

図 3 にカプセル周囲のマッハ数分布を示す。カプセルの上流に離脱衝撃波が形成されていることがわかる。また、カプセル上部ではカプセルの肩部で流れが剥離する一方で、下部では流れが付着しており、流れはカプセルの背部で剥離している。

図 4 に姿勢角の時間履歴を示す。 ϕ はロール角、 θ はピッチ角、 ψ はヨー角を示す。これより、3 自由度の連成解析を行うことで、3 軸すべてに回転が生じていることがわかる。

各軸の運動に着目すると、ロール角は概ね 1 方向に回転している一方、ピッチ角およびヨー角は時間的に振動していることがわかる。また、ピッチ角が

減少傾向にあるのに対して、ヨー角は増加傾向にある。

HRV 型のカプセルでは揚力を得るために重心位置を中心軸上からオフセットしているため、非ゼロのトリム角を中心とした振動形態や、上下に非対称な流れが形成される。今後、流れ場の詳細な分析やカプセルの形状をパラメータとした数値解析を行うことで、HRV 型のカプセルに対する空気力学的な理解を進める。

4. まとめ

直交カットセル法による流れと回転運動の連成解析コードの開発を行い、はやぶさおよび HRV の両カプセル形状に対する連成解析を行った。これらの結果から、連成解析によってカプセルの振動現象を再現できていることを確認した。今後、流れ場やカプセルの慣性特性の振動への影響の調査を通じて動的不安定現象の解明を目指す。

謝辞

本研究成果は令和 6 年度地球シミュレータ公募課題により、海洋研究開発機構の地球シミュレータを利用して得られたものである。一部の数値解析結果は東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムによって得られた。ここで謝意を示す。

文献

- [1] 竹田裕貴, 上野和之, 「亜音速飛行するはやぶさ型大気突入カプセルのピッチング振動におけるヨーイングモーメントの影響」, 令和 5 年度宇宙航行の力学シンポジウム (2023 年 12 月) .
- [2] 馬場直樹, 竹田裕貴, 上野和之, 丹野英幸, 「大気突入カプセルの回転 3 自由度連成解析」, 日本航空宇宙学会北部支部 2024 年講演会 (2024 年 3 月) .
- [3] 竹田裕貴, 北原歩「揚力型大気突入カプセルの多自由度連成解析」, 令和 6 年度宇宙航行の力学シンポジウム (2024 年 12 月) .