

はやぶさ型再突入カプセルまわりの流れ場とカプセル表面圧力の関係

The Relation between Flow Field around Hayabusa-type Capsule and Surface Pressure

- 鶴本徹, 北大, 北海道札幌市北区北 13 条西 2 丁目, E-mail: tsuru-yeah@eis.hokudai.ac.jp
高橋裕介, 北大, E-mail: ytakahashi@eng.hokudai.ac.jp
寺島洋史, 北大, E-mail: htera@eng.hokudai.ac.jp
大島伸行, 北大, E-mail: oshima@eng.hokudai.ac.jp
Toru Tsurumoto, Hokkaido University, N13W8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido, Japan
Yusuke Takahashi, Hokkaido University
Hiroshi Terashima, Hokkaido University
Nobuyuki Oshima, Hokkaido University

Aerodynamic instability in the transonic flow regime is one of the critical problems for the Hayabusa-type sample return capsule (SRC) during atmospheric reentry phase, which can cause self-excited oscillation by aerodynamic force. In this study, we numerically investigated flow fields around the Hayabusa-type SRC to clarify the mechanism of aerodynamic instability using a computational fluid dynamics (CFD) and proper orthogonal decomposition (POD) approaches. Flow fields at subsonic and supersonic speeds in a transonic wind tunnel were reproduced here. The computed results indicated the different tendency of stability between two Mach numbers of 1.1 and 0.7. POD results provided oscillation modes, which indicated that the effect of base pressure is relatively small.

1. 緒言

近年宇宙開発の発展と共に、宇宙からの物資を持ち帰るサンプルリターンミッションが提案されつつある。サンプルリターンミッションにおいて宇宙から地球大気への再突入は、避けられない過程である。再突入時にはサンプルリターンカプセルに様々な重大な問題が生じるため、カプセルの設計開発では慎重な対応が求められている。

再突入時に生じる問題の一つとしてカプセルの姿勢不安定性が挙げられる。姿勢安定が再突入軌道において全高度、全速度域で保たれなかった場合、機体に予期しない振動や回転が生じることがある。その結果、軌道予測とは異なる地点に着陸するなど、ミッションに重大な損害を与える可能性がある。

2010年に小惑星イトカワから地球へと帰還し、サンプルリターンミッションを行ったはやぶさ再突入カプセルは、静的な空力安定性を確保した構造になっている。しかし、実際にはカプセルの姿勢はゆっくりと変化するものではなく、回転軸を中心として、ある程度の角速度をもって姿勢が変化している。このため運動の中に見かけ上の迎角変化に動的な効果が現れており、システムの安定性の確保にはこの動的な効果を含めた安定性、すなわち動的安定性を考えなければならない。動的安定性を全高度および全速度域で確保することは難しく、これまで様々な研究が行われてきた。

風洞試験を用いたはやぶさ型カプセルの動的安定性先行研究 [1]では、一様流速度が関係していることが明らかにされている。特に遷音速域においてははやぶさ型カプセルは不安定化しやすいことが明らかにされた。

数値流体力学 (CFD) を用いたはやぶさ型カプセルの動的安定性先行研究 [2]では、カプセル背面に形成される渦が迎角変動に対する流れ場の変動に位相遅れを生じさせ、カプセルを不安定化すると結論付けられた。しかしこの研究においては、カプセル近傍において詳細な渦構造をとらえられる乱流モデルが用いられていない。つまりカプセル近傍の渦が、迎角変動時に流れ場にどのように影響を与えているか評価されていないため議論の余地を残している。

現在新たなミッションに対する再突入カプセルの開発について、

はやぶさ再突入カプセルをベースとしたカプセル開発が進められている。そのため、はやぶさ型カプセルに対して動的安定性に対する知見を得ることが、今後のカプセル開発に貢献と期待される。

以上をふまえて本研究では、Large eddy simulation と強制振動によってはやぶさカプセルのピッチ角振動を再現し、カプセルの空力不安定性のメカニズム解明を最終的な目的とする。また流れ場の理解には固有直行分解 (POD) [3]を用いる。POD はモード解析手法の一つであり、時空間データである流体データを直交モード-空間データに変換する手法である。結果として式(1)のように、元々の流体データを線形モードの重ね合わせとして近似することが出来る。

$$\mathbf{z}(x, t) = \sum_{k=0}^m \mathbf{a}_k(t) \phi_k(x) \quad (1)$$

ただし \mathbf{z} は流体データ、 \mathbf{a} は時係数、 ϕ は直交モードである。本解析では POD を用いることで、動的不安定に関する知見を獲得することを目的に流体データの特徴的な構造を抽出する。

2. 計算手法

はやぶさ型カプセルの動的安定性に対する知見を得るために、二つの速度域 ($M=1.1, 0.7$) の条件下において数値解析を行い比較する。本解析においては、圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として用いた。解析ソフトウェアとして JAXA (宇宙航空研究開発機構) と北海道大学が開発した汎用圧縮性流体解析コード RG-FaSTAR [4] (Version 2.1.6) を使用した。乱流モデルとして LES (Large Eddy Simulation) を導入し、サブグリッドスケールモデルに標準 Smagorinsky モデルを適用した。離散化手法として、非構造格子のセル中心有限体積法を使用した。移流項評価には SLAU を用い、MUSCL 法で高精度化を行った。粘性項は隣り合うセルの間の平均で評価し、不安定化を防ぐための補正がなされている。時間積分法には LU-SGS 法を用いた。

本解析における強制振動の再現には、カプセルを固定した状態で、カプセルの回転による移動速度をセル境界に通過する流束に加え、一様流速度の方向を変化させることで再現した。

また本解析で行った POD は、処理データ数を削減するため Snapshot POD [3] と呼ばれる手法を用いた。そのため計算されるモードは空間方向 (格子数) ではなく時間方向の制約を受けている。

3. 解析格子と解析条件

本研究では、Fig.1 に示した解析領域を使用した。境界条件として”Inflow”では一様流条件を与え、”Outlet”では 0 次外挿を課している。カプセル表面”Wall”では滑りなしの等温壁条件とし、表面温度は 300 K で固定した。計算格子については Fig. 2 に示した格子を使用し、カプセル近傍には詳細領域を用意し、カプセル壁面近傍には三角柱形状のプリズム層を形成、それ以外の領域には四面体形状の格子を用いた。計算セル数は約 3100 万である。本研究で”Inflow”に与えた一様流条件及び強制振動に用いた条件を Tab. 1 に示す。先述した風洞試験における先行研究 [1]と同じ条件を与えており、強制振動には正弦波を与えて解析を行った。ここで無次元振動数 (Reduced frequency) は以下の式(2)で与えられる。ここで f は振動周波数、 D はカプセル直径、 U_∞ は一様流速度である。

$$\text{Reduced frequency} = \frac{2\pi f D}{U_\infty} \quad (2)$$

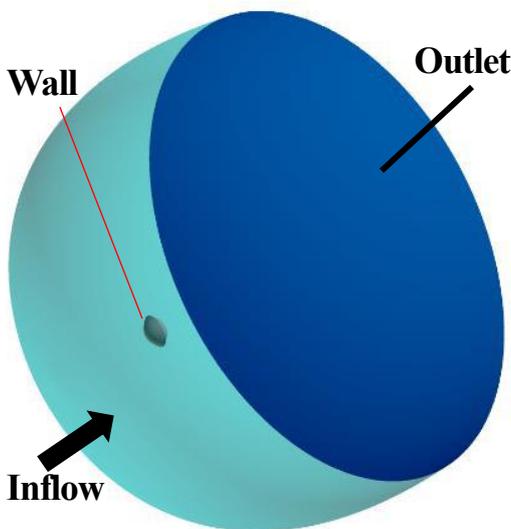


Fig. 1: 解析領域

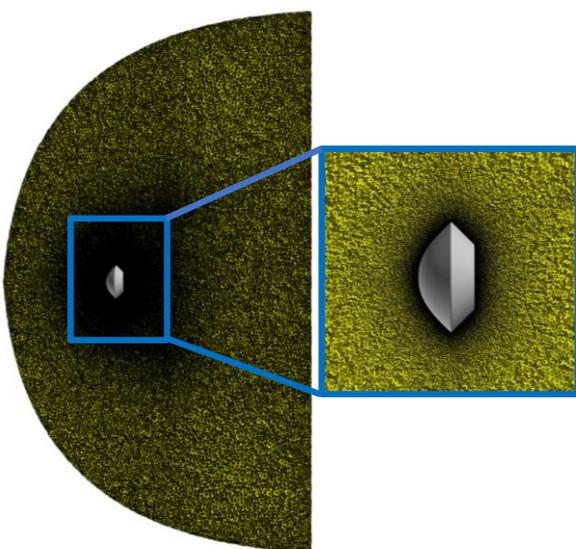


Fig. 2: 計算格子

Tab. 1: 一様流条件

マッハ数	1.1	0.7
一様流速度 [m/s]	342.8	232.1
一様流温度 [K]	241.3	273.1
一様流密度 [kg/m ³]	1.013	1.349
一様流圧力 [Pa]	7.02×10^4	1.08×10^5
レイノルズ数	1.3×10^6	1.6×10^6
振動周波数 [Hz]	16	13
振幅 [deg]	20	10
Reduced frequency	0.030	0.035

また POD については時間データ数を 1 周期分にし、流体データの平均が振動中心となるようにした。

4. 解析結果

本解析では迎角に対する復元力をピッチングモーメント係数を用いて評価する。ピッチングモーメント係数は式(3)で与えられる。ここで、 M はピッチングモーメントであり、 ρ_∞ は一様流密度である。加えて S_l は機体の代表面積、 l は代表長さである。なお、ピッチングモーメントの向きについては Fig. 3 に示すように、正の迎角に対して姿勢を復元する方向にモーメントが作用する時のモーメントの向きを負と定めている。つまり、迎角の符号とピッチングモーメント係数の符号が異なる時にカプセルには復元力が作用している。

$$C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 S_l l} \quad (3)$$

本解析においては強制振動にともなう迎角変動に対するピッチングモーメント係数をプロットすることで、振動一周期に対して動的な効果がどのように表れるのかを考察する。

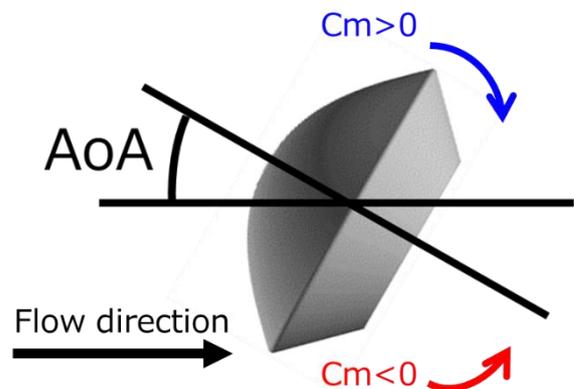
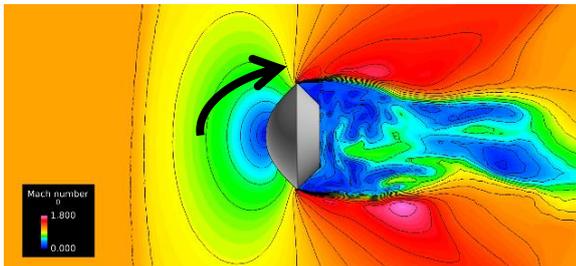
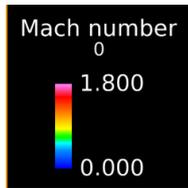


Fig. 3: ピッチングモーメント係数 C_m の符号

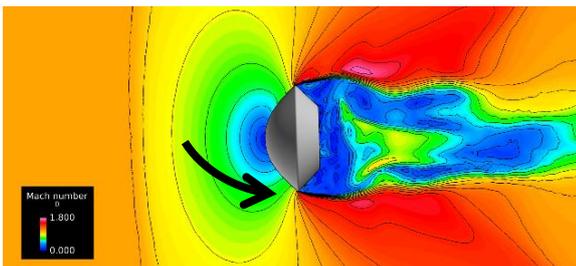
M1.1 の時の振動解析で得られた迎角 0° 付近におけるマッハ数分布を Figs. 4 に、M0.7 の時のマッハ数分布を Figs. 5 に示す。Figs.

4, Figs. 5 はそれぞれ(a),(c)は時計回り, (b),(d)は反時計回りに回転している。また Figs. 6 に得られた迎角とピッチングモーメント係数の関係を 15 周期分平均したグラフを示す。グラフの青い線が時計回り, 赤い線が反時計回りに回転する時を表しており, 上が M1.1, 下が M0.7 の時である。

Figs. 4, Figs. 5 を見比べると。マッハ数の差異による流れの構造の差異は見られるものの, マッハ数が同じとき, 時計回りのときと反時計回り時の差異は一見してわからない。一方で Figs. 6 から振動の安定性を評価することができ, サイクルが反時計回りの時は安定, 時計回りの時は不安定であることを示している [5]。つまり, Figs. 6 は M1.1 の時は不安定, M0.7 の時は安定であることを示しており, これは平木の実験 [1] で得られた傾向をとらえている。また Figs. 6 に表れているヒステリシスから, 動的な効果が表れていることを確認できるが, 先述したように Figs. 5 を見比べてみてもこのヒステリシスの要因となるものが見えない。そこでここからカプセル表面の圧力係数と, カプセルまわりの圧力場について, POD を用いつつ詳しく見ていく。

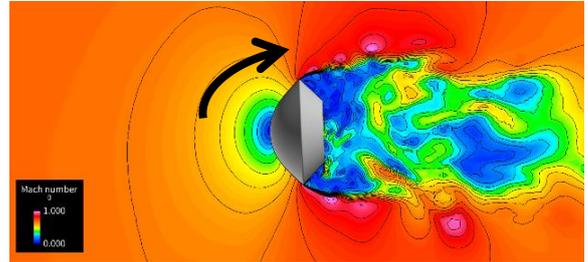
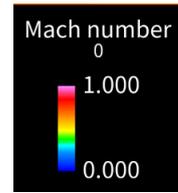


(a) M1.1, clockwise

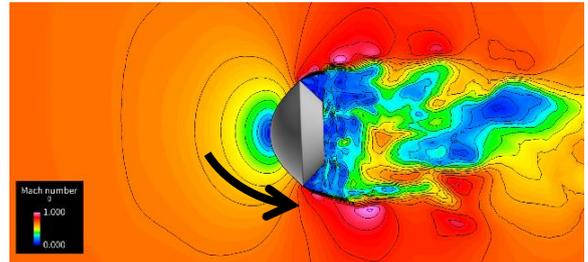


(b) M1.1, counter clockwise

Figs. 4: M1.1 の時のマッハ数分布

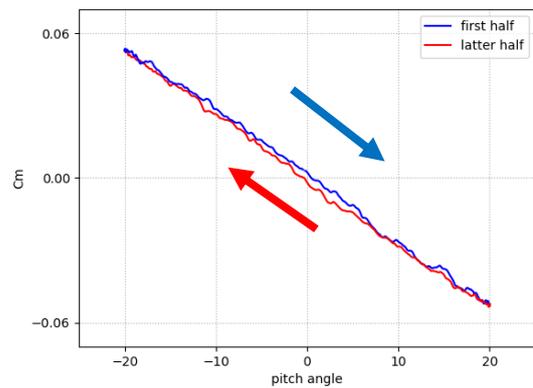


(c) M0.7, clockwise

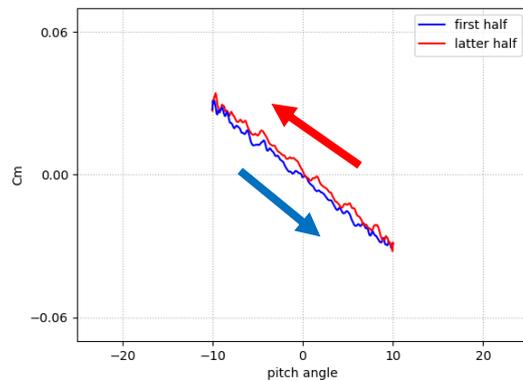


(d) M0.7, counter clockwise

Figs. 5: M0.7 の時のマッハ数分布



M1.1



M0.7

Figs. 6: C_m と AoA の関係

カプセルまわりの圧力場に対して POD を適用した結果を示す。Fig. 7 に Mode1 を除いた M1.1 の時の固有値分布を示す。横軸はモード、縦軸は全固有値の和で正規化された固有値の値を示しており、赤のプロットが積算された固有値、青のプロットが各モードの固有値を示している。Mode1 は POD を適用した 1 周期の平均場を表しているが、ここでは変動場に注目しているため、Mode1 を除いて考慮している。

次に、Fig. 8 に Mode2 のモード基底分布を示す。この図中の白部分がこのモードでは振動しない部分である。また Fig. 9 に時係数の時間履歴を示す。Mode2 における圧力場は、Fig. 8 の赤部分が Fig. 9 に青線で示した時係数と同位相で変動し、Fig. 8 の青部分が逆位相で変動する。この Fig. 9 に示した時係数に注目すると、強制振動で与えた振動周期とよく一致していることから、迎角変動に伴い変化する圧力場をとらえたものと考えられる。つまりこのモードの変動がピッチングモーメント変動の主要因である。一方で時係数と迎角変動の位相差に注目すると、Mode2 の時係数は迎角変動に対して位相遅れを持っていることがわかる。この位相遅れはカプセルが不安定化する要因の一つであると考えられる。この Mode2 はカプセル前面の変動が大きく、カプセル背面の振動はほとんどないことが Fig. 8 からわかる。さらに、Fig. 7 においては Mode2 の固有値割合が 80% を超えていた。そのため、M1.1 の時に不安定性が表れていた要因はカプセル前面の影響が一つの要因となっていると考えられる。

その一方で、Mode2 に表れた振動は強制振動で与えた振動と対応していることから、振動の振幅が小さくなるとこのモードの寄与度は小さくなり、相対的に他のモードの寄与が大きくなる可能性がある。そのため Mode2 を除いた他のモードについて、各モードの時係数の変動と、迎角変動の位相にも着目しながら考察する。

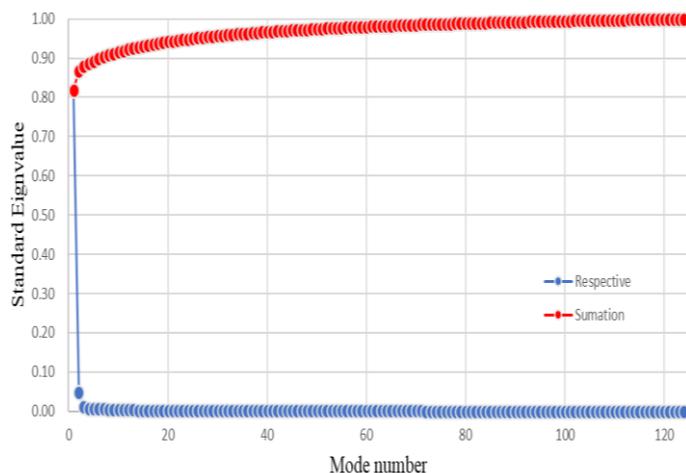


Fig. 7: M1.1 の時の固有値分布 (Mode1 を除く)

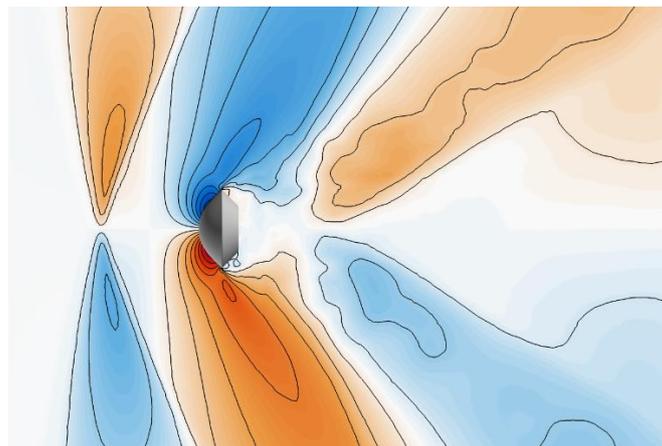


Fig. 8: Mode2 におけるモード基底分布

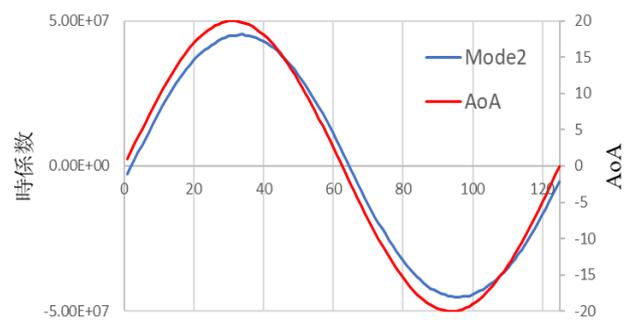


Fig. 9: Mode2 における時係数と迎角変動の時間履歴

Fig. 10 に Mode1,2 を除いた固有値分布を示す。ここではこの内 Mode3,4,5 に注目する。Fig. 11-13 にそれぞれ Mode3,4,5 のモード基底分布を示し、Fig. 14 に各モードの時係数の時間履歴、及び迎角の時間履歴を示す。Mode3 の時係数を見ると、迎角変動の倍周波数で変動していることがわかる。この変動はカプセル前面の頭頂部付近の圧力変動と類似しており、その要因はカプセル前面頭頂部とよどみ点の距離の関係が大きく影響している。そのため Fig. 11 においても、カプセル頭頂部付近のみ大きな値が表れている。一方 Fig. 11 のその他の部分については、カプセルまわりに生じる衝撃波面の変動と関連していると考えられる。そのためこの衝撃波の変動をさらに考察すると、さらなる知見が期待できる。

次に Mode4 に注目すると、Fig. 12 からカプセル背面で異なるモード基底分布を持つことがわかる。すなわちカプセル背面部で正のモード基底分布(赤部分)と負のモード基底分布(青部分)が存在しており、それぞれの圧力変動が互いに逆位相である。つまりカプセルが振動している間に、カプセル背面でピッチ方向に圧力分布が生じるため、この分布によってカプセルにピッチングモーメントが働く。このモードの時係数に着目すると、迎角変動の周波数や、Mode3 の周波数とも異なる周波数の変動をしていることがわかる。この変動が何に起因するかはまだ考察段階である。

次に Mode5 に注目すると、Fig. 13 からカプセル前面に生じる衝撃波の影響が表れていない変動を抽出したと考えられる。このモードの時係数に注目すると、高周波の変動をしていることがわかる。この変動周波数はカプセル背面の圧力変動周波数と類似しており Fig. 15 に示すカプセル背面の中心部における周波数解析結果には、この変動周波数と考えられるピークが立っている。先述したように本解析ではこのカプセル背面の変動がもたらす影響は小さいと考えられるが、振動始まりのような振幅が小さい時はこの

モードも重要になる可能性があるため、さらなる調査が必要である。

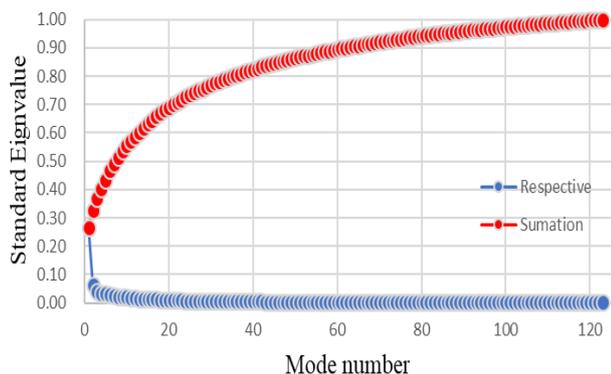


Fig. 10: M1.1 の時の固有値分布 (Mode1,2 を除く)

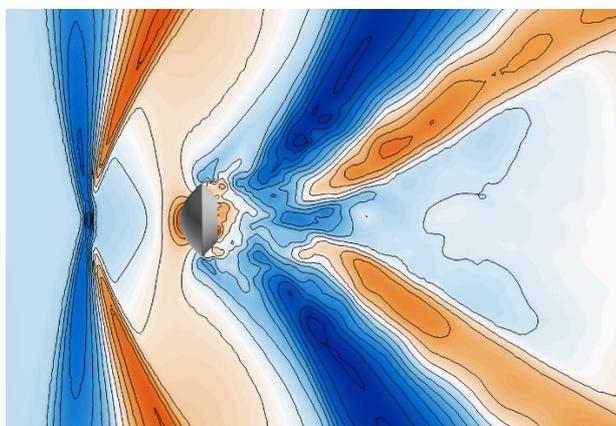


Fig. 11: Mode3 におけるモード基底分布

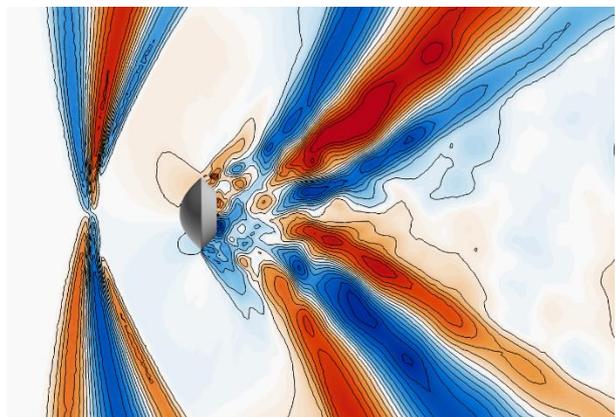


Fig. 12: Mode4 におけるモード基底分布

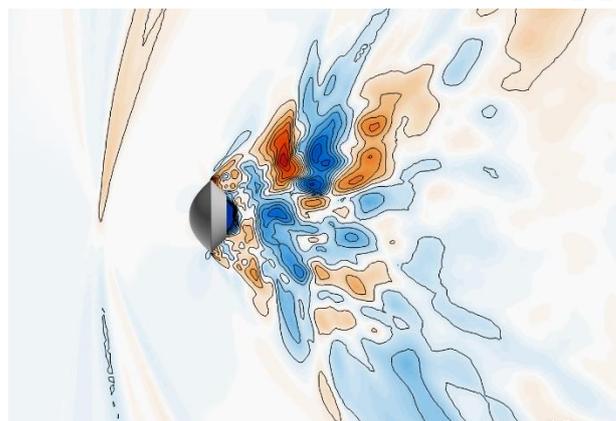


Fig. 13: Mode5 におけるモード基底分布

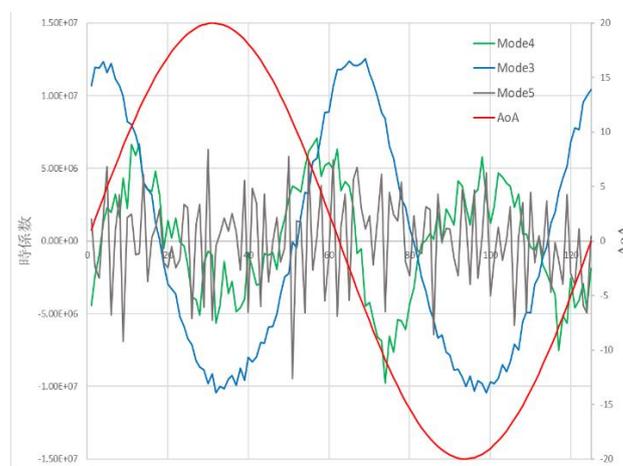


Fig. 14: Mode3,4,5 における時係数の時間履歴

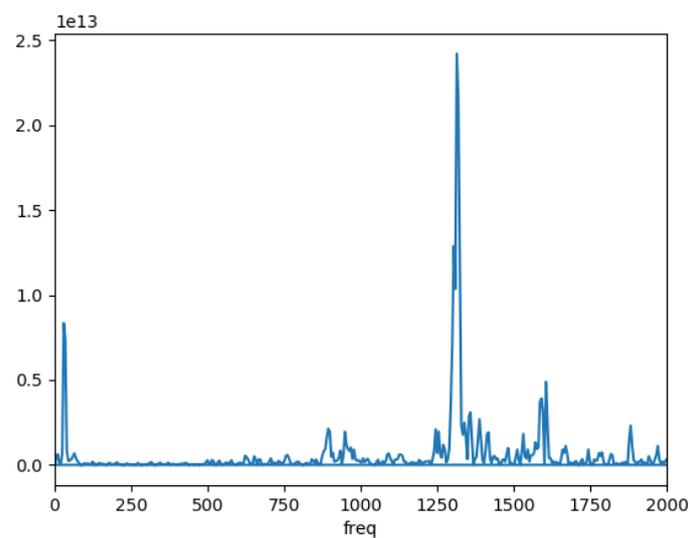


Fig. 15: カプセル背面の中心部における圧力変動に対する周波数解析結果

5. 結言

本研究でははやぶさ型カプセルの空力安定性のメカニズム解明を最終目的として、M1.1 及び M0.7 の二つのケースについて Large

eddy simulation と強制振動を用いた数値解析を行い、さらに圧力場の変動を理解するために POD 解析を実施した。解析の結果、M1.1 の時と M0.7 の時で動的安定の傾向が逆転していることがわかった。また M1.1 の条件に対して POD 解析によって混在する振動モードを分解した。分解したモードの時係数とモード基底分布を調べることで、モードとカプセル表面圧力を関連付けることが出来た。

今後は各モードが表す流れ場構造を理解する必要がある。その構造を理解できれば、カプセルが不安定化する現象の究明につながり、空力安定性を確保したカプセル設計につなげることが可能となる。

謝辞

本解析結果は、宇宙航空研究開発機構が所有する高速流体解析ソフトウェア「FaSTAR」を利用することにより得られたものである。本研究は九州大学情報基盤研究開発センターの先端的計算科学研究プロジェクトによって支援を受けた。

また本 POD 解析結果はミュンヘン工科大学の松本氏の協力によって得られたものである。

参考文献

- [1] Koju HIRAKI, Transonic Dynamic Instability of disk-shaped Capsule, The Institute of Space and Astronautical Science Report SP No.17(March 2003)
- [2] Susumu Teramoto, Kozo Fujii. Mechanism of Dynamic Instability of a Reentry Capsule at Transonic Speeds. AIAA Journal, December 2002.
- [3] Anindya Chatterjee, “An introduction to the proper orthogonal decomposition”, Current Science, Vol.78, No. 7, 10 April 2000, pp. 808-817.
- [4] Y. Takahashi, “Advanced validation of CFD-FDTD combined method using highly applicable solver for reentry blackout prediction”, Journal of Physics D: Applied Physics, Institute of Physics, Vol.49, No. 1, 2016, 015201 (15pp).
- [5] JoãoMonteiro, SébastienParis, LauraPeveroni, PatrickRambaud “ On the validation of experimental results for the dynamic stability of re-entry capsules” (2016).