

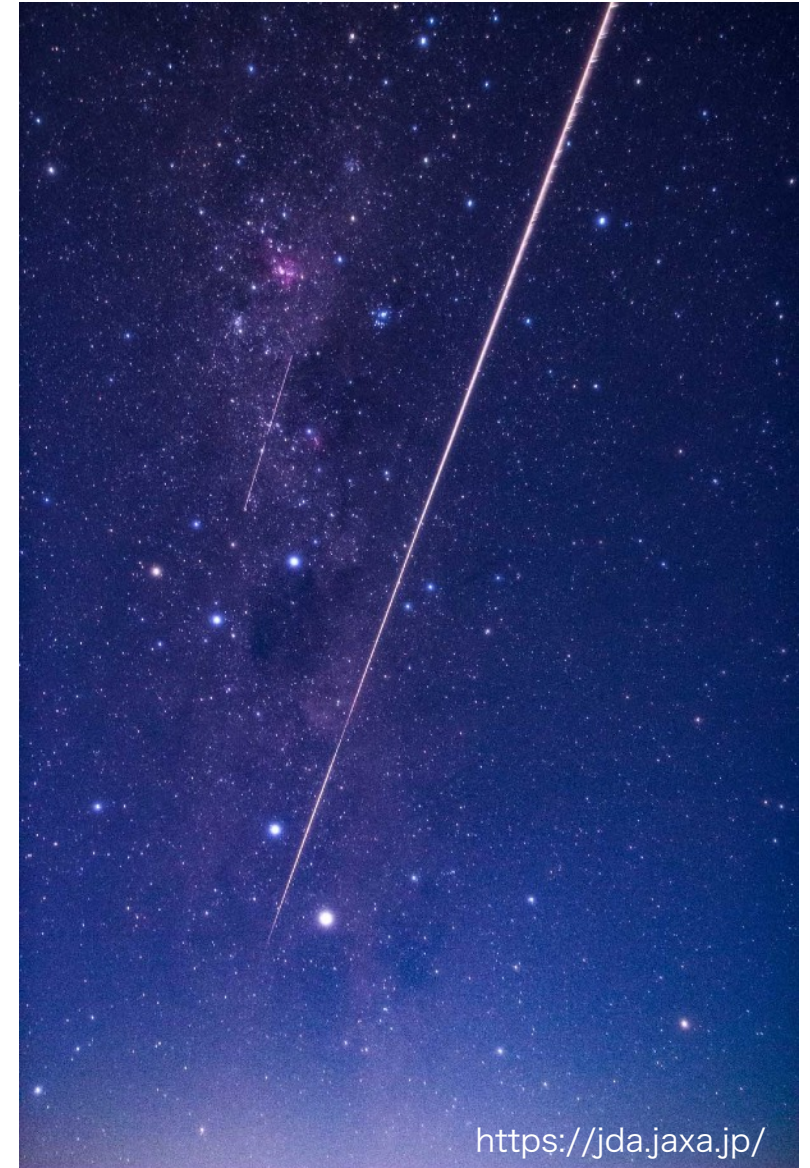
はやぶさ型再突入力プセルの動的不安定メカニズムの解明と低減化

高橋裕介、高澤秀人（北海道大学）

謝辞：本研究は、九州大学情報基盤研究開発センター2021年度先端的計算科学研究プロジェクトによる支援を受けた。本解析結果は宇宙航空研究開発機構が所要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。

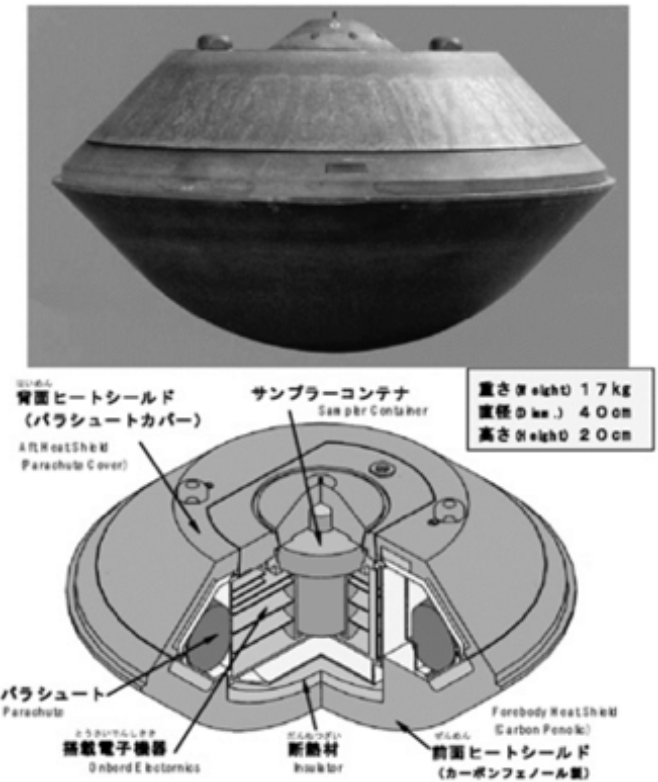
はやぶさサンプルリターンカプセル

- 2010年小惑星探査機「はやぶさ」が小惑星イトカワからのサンプルリターンに成功。
- 現在はやぶさをベースにした新しいサンプルリターンカプセルの開発が進められている。
- 大気突入において、カプセルの姿勢安定性は重要な問題→**空気力による自励振動現象（動的不安定）**が特に遷音速域で報告されている。



動的不安定性

動画



1. 山田哲哉ら, 「はやぶさ」カプセルの地球大気圏再突入時におけるプラズマ現象とその周辺. プラズマ核融合学会誌2006.
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, 103巻, 1999

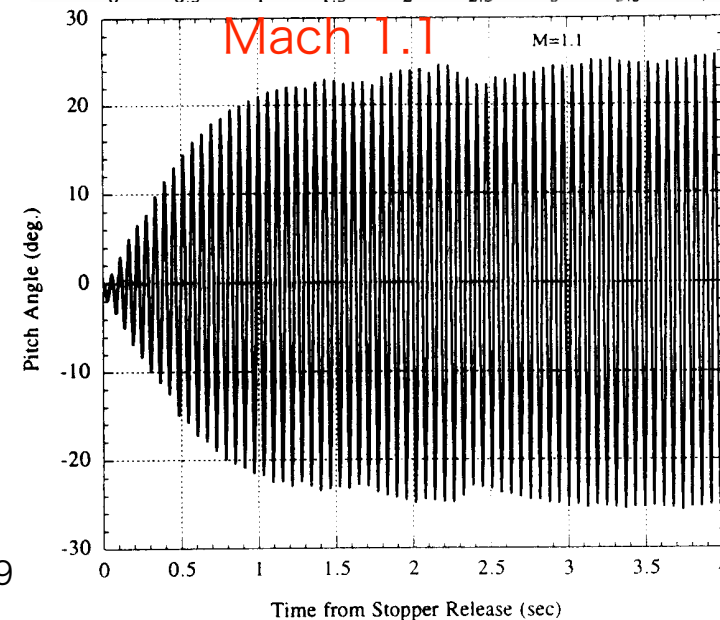
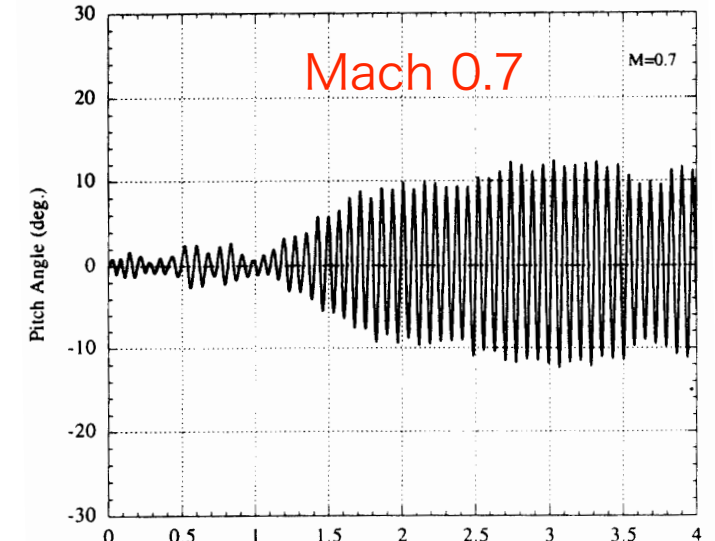
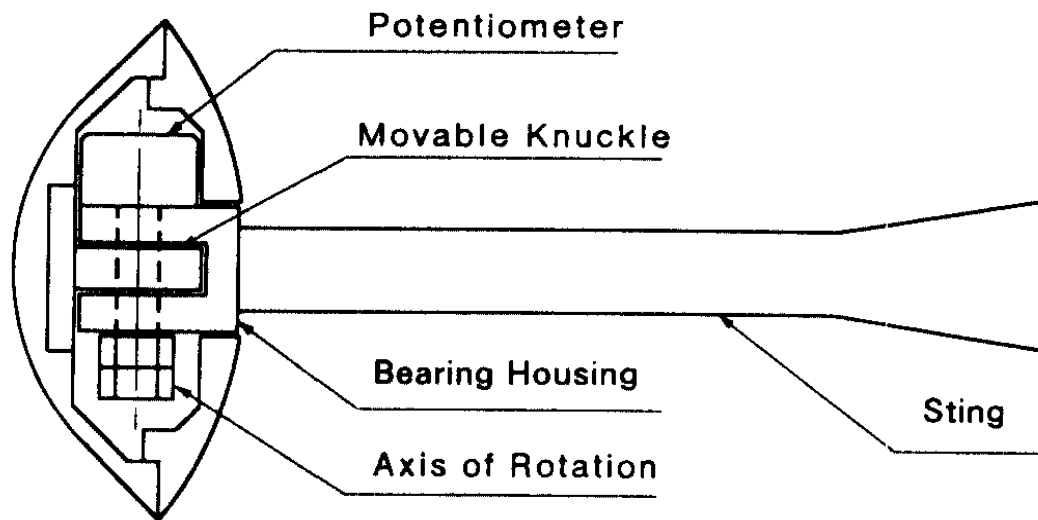
空力安定

- 大気突入機は空気力によってその姿勢を維持する。そのため姿勢安定は重要な課題となる。
- 静的安定：つり合いの位置に姿勢を戻す方向にモーメントが作用する。
- 動的安定：上記の復元力（モーメント）が働くことに加えて、姿勢運動の減衰項が負である必要がある。



過去に行われた研究（風洞試験）

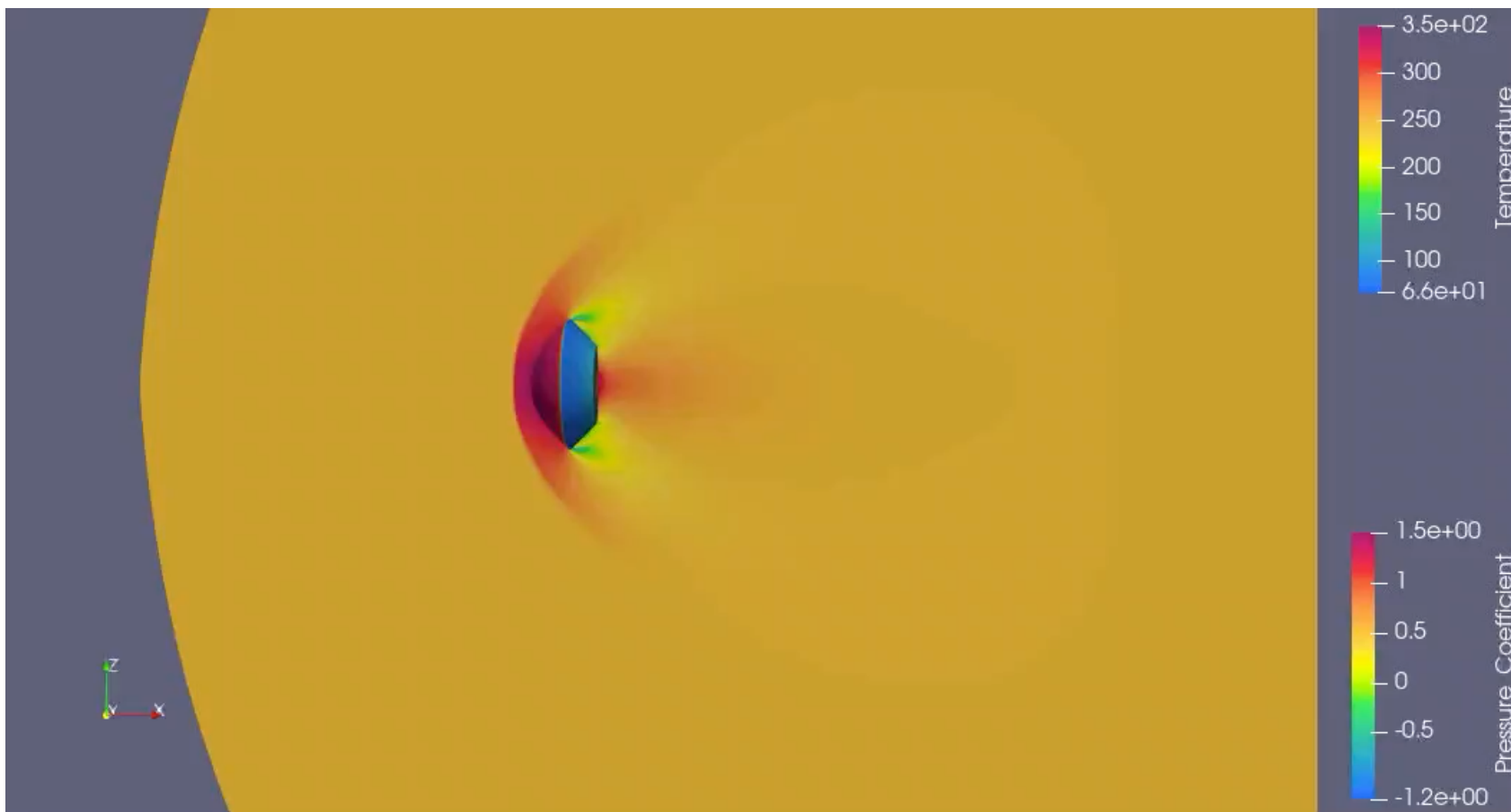
- 遷音速風洞試験によって動的不安定性が再現された。
- 姿勢不安定性は一様流マッハ数の影響を受ける。



過去に行われた研究（数値解析）

- Teramotoら(2001, 2002)
 - ✓ 遷音速領域におけるBoldwin-Lomax乱流モデルを用いたはやぶさカプセルの数値解析
 - ✓ カプセル後流とそれによる背面圧力の位相遅れが動的不安定性に対して大きなインパクトをもつことが示唆された。
- Hashimotoら(2016)
 - ✓ HRV(HTV Return Vehicle)の強制振動法によるダンピング係数算出
 - ✓ 乱流モデル：URANS(SA), SA-DES, SA-IDDES
 - ✓ カプセル側面で繰り返される剥離と再付着によってピッチングモーメントのヒステリシスが生じる

高速気流のシミュレーション技術



- 大型計算機とそれらに対応したソフトウェアの発展
- 特に非定常乱流解析に対して近年大きな進捗が確認される
- 動的不安定性の鍵は乱流モデル・機体運動モデル

研究の目的

- はやぶさカプセルを対象とし計算科学アプローチを用いて空力不安定性メカニズムの調査を実施する。

- 非定常乱流場を解析する上で大規模時空間データの取り扱いが必要
- 計算機の制約（計算速度、メモリ、ストレージ、データ転送など）の中でこの大きなデータをどのように取り扱うか？
- モード分解によるデータ縮約を利用し、計算機・人間側においてより扱いやすいデータとして抽出し、流れ場の特徴的な構造を明らかにしたい

必要とする計算資源

- 非定常乱流計算：高い計算性能・大並列が必要とする一方で、メモリ/1ノードは小さくても良い。広範囲な時空間データが出力されるため大ストレージが必要。
- POD計算：計算性能は低くても実施可能・並列化しづらい。上記の時空間データ処理において大容量メモリ・大容量ストレージが必要。
- ITO-A+フロントエンドの相性は良い（？）

対象：JAXA遷音速風洞の実験環境



JAXA遷音速風洞

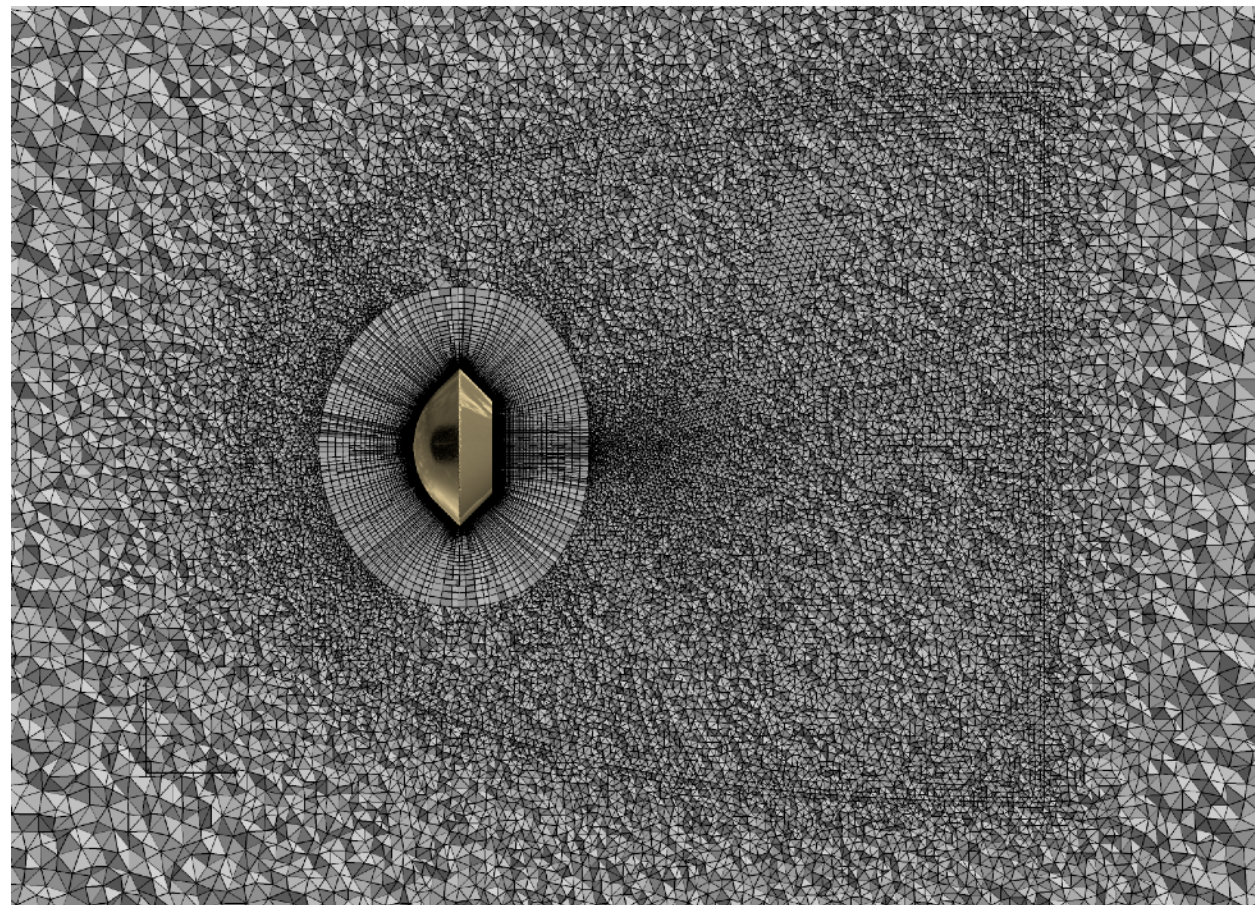
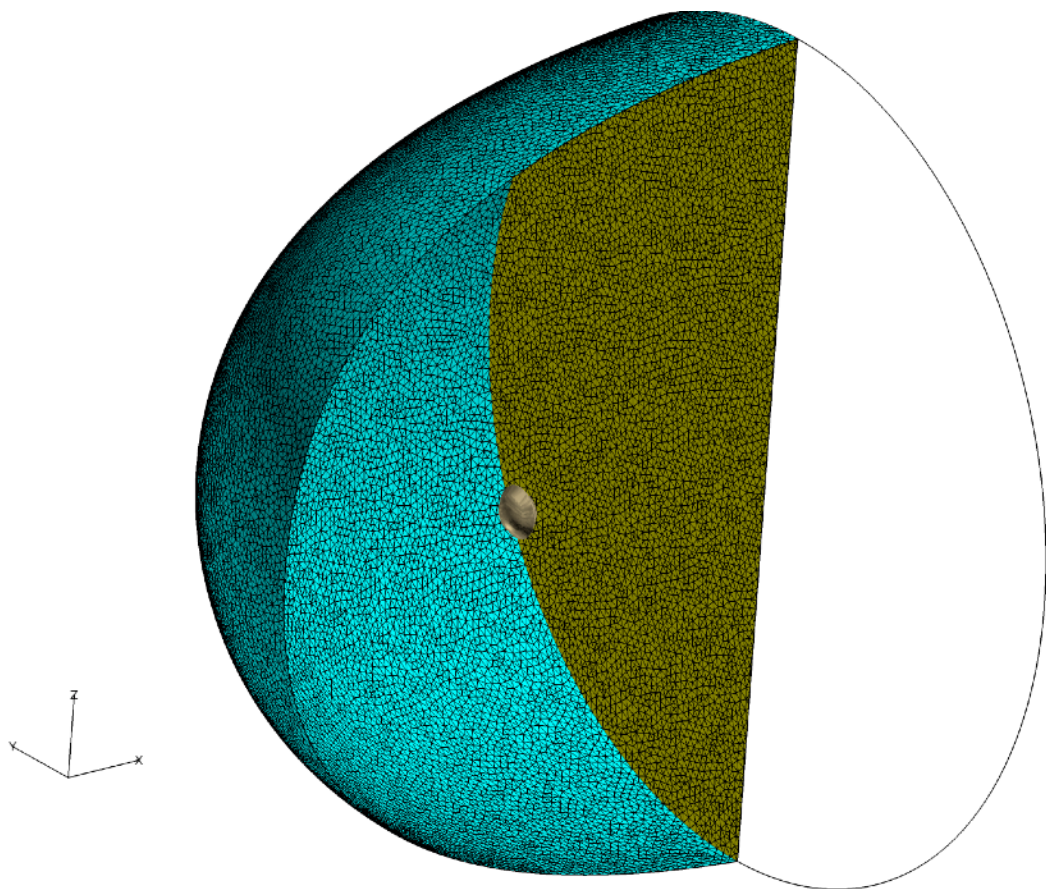
一様流条件

マッハ数	0.3	1.1
一様流速度, m/s	104.4	382.7
一様流温度, K	300.0	300.0
一様流密度, kg/m ³	1.77	0.482
一様流圧力, Pa	7.02E+04	4.17E+04
レイノルズ数	1.00E+06	1.00E+06

数値解析手法

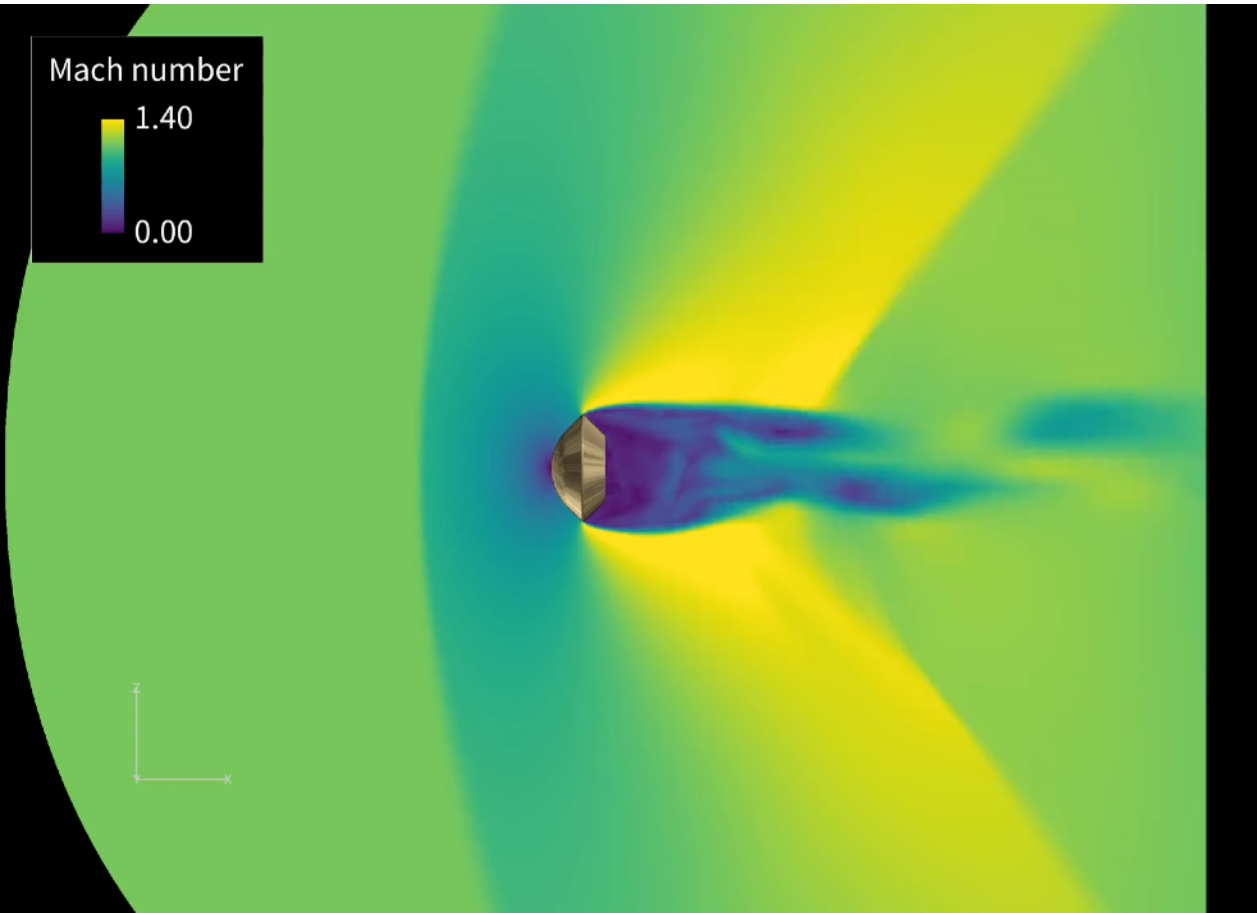
- 支配方程式：Navier-Stokes方程式(質量・運動量・エネルギー保存)、状態方程式
- 乱流モデル：Large eddy simulation (標準Smagorinskyモデル)

Software package	RG-FaSTAR-v2.1.7
Gas model	Ideal gas
Transport properties	Sutherland
Discretization	Cell-centered finite volume method
Gradient calculation	Weighted Green-Gauss method
Numerical fluxes	Advection term: HLLEW
Time-marching method	Dual time stepping
Turbulence model	LES (Standard Smagorinsky model)
Parallel computing	MPI with domain partition

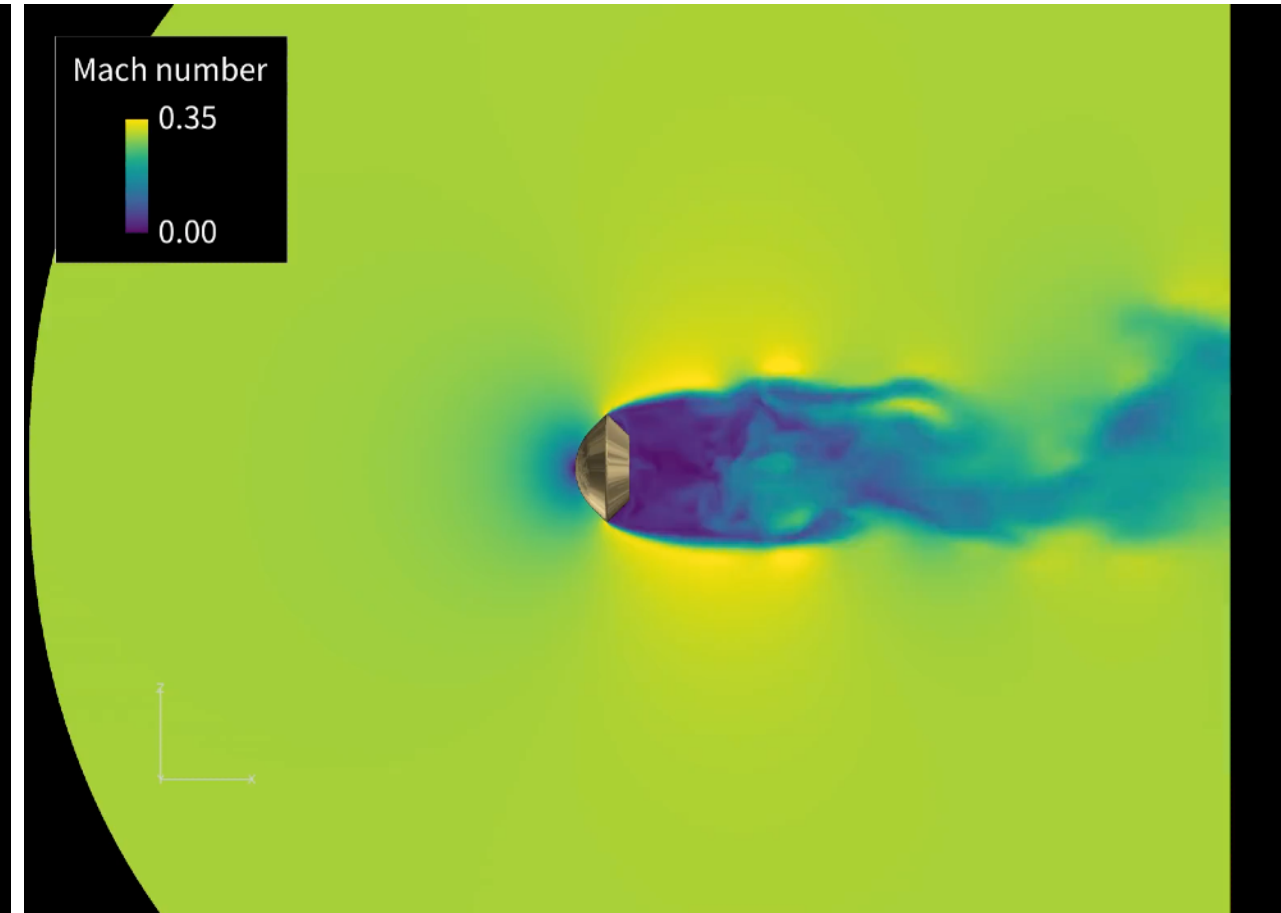


- カプセル直径：100 mm, 回転中心: (25, 0, 0) mm
- 非構造格子データタイプ、計算格子数は1588万セル数

静的解析（マッハ数分布）



Mach number 1.1

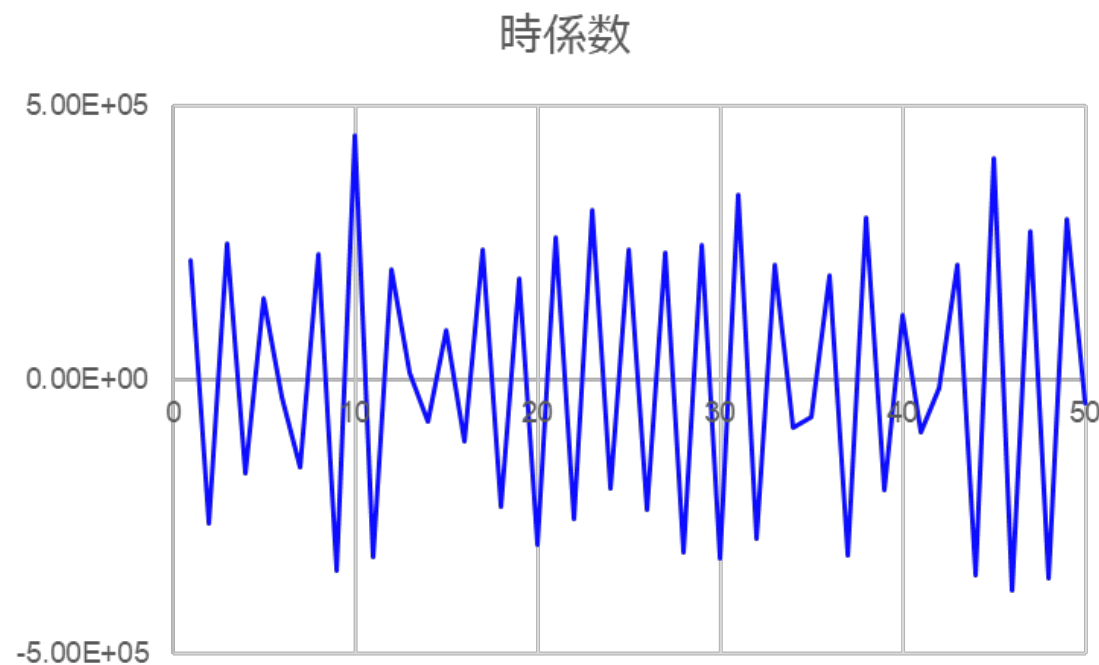
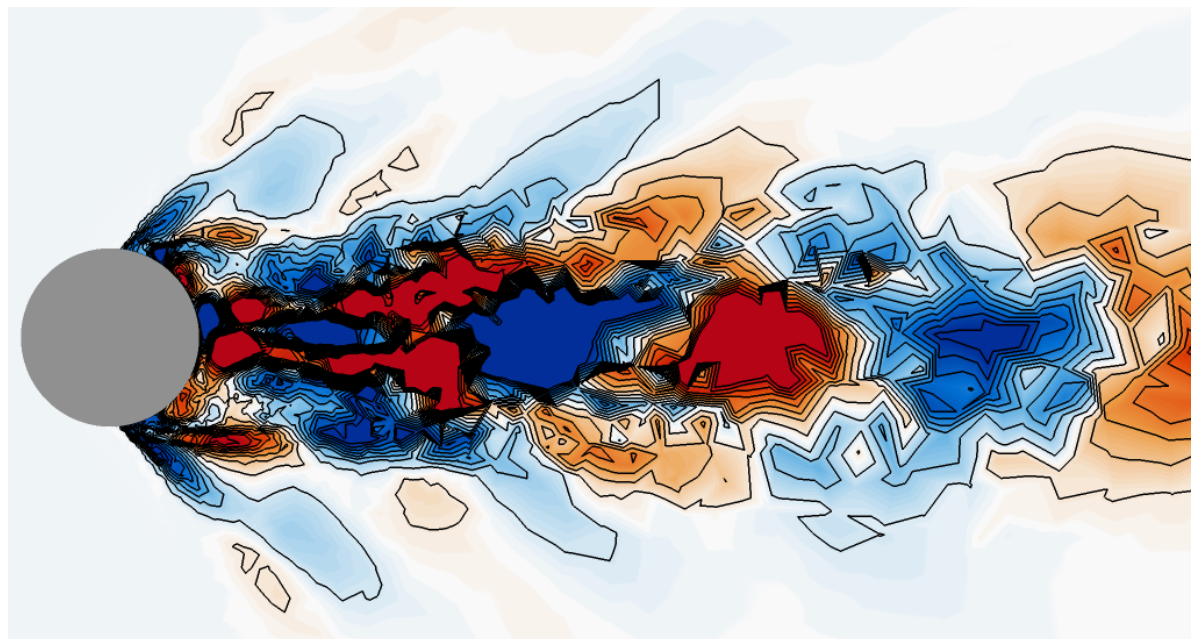


Mach number 0.3

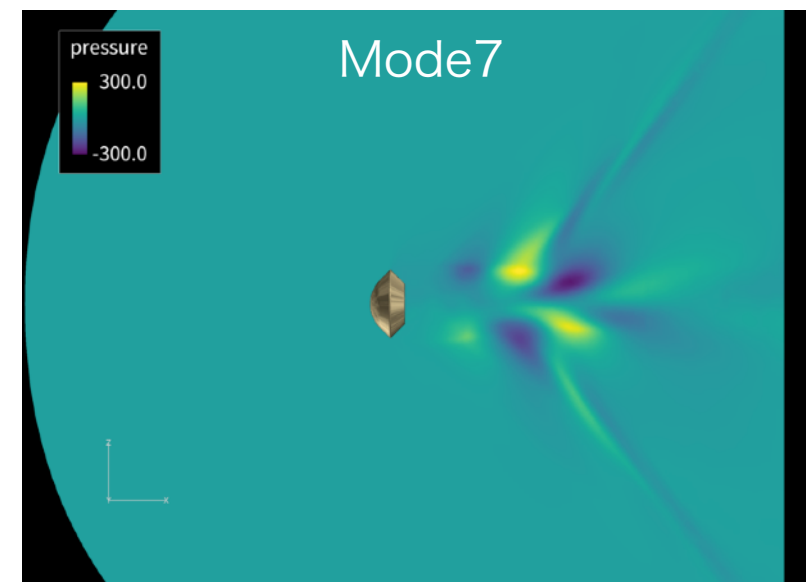
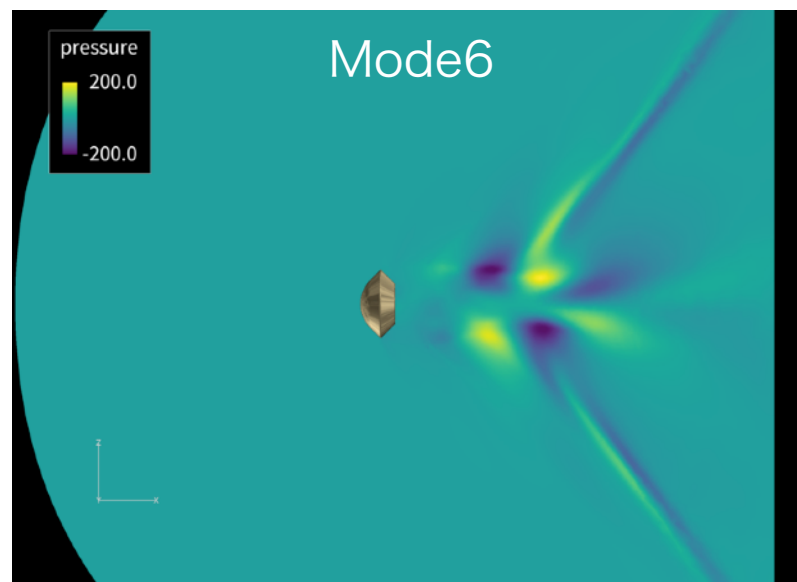
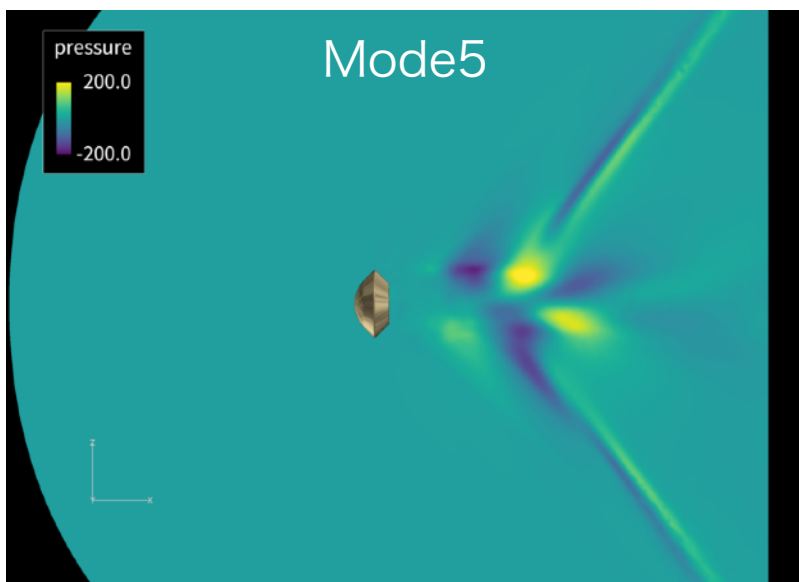
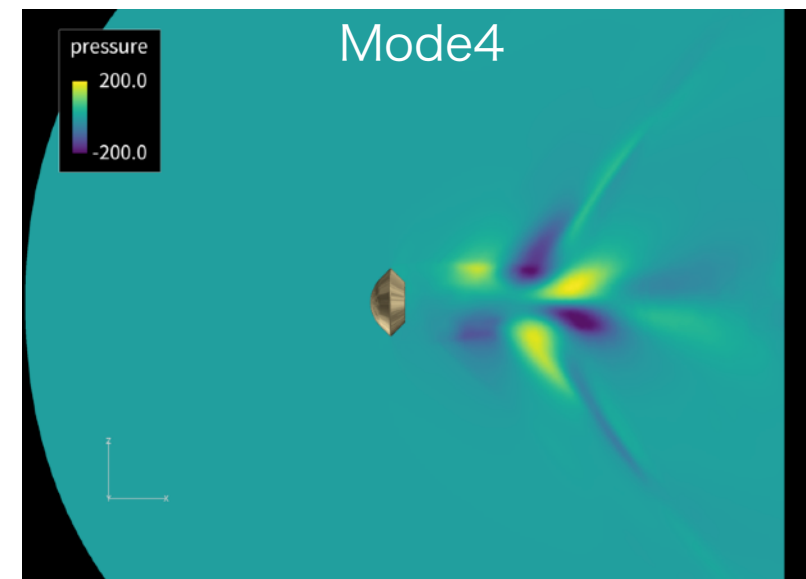
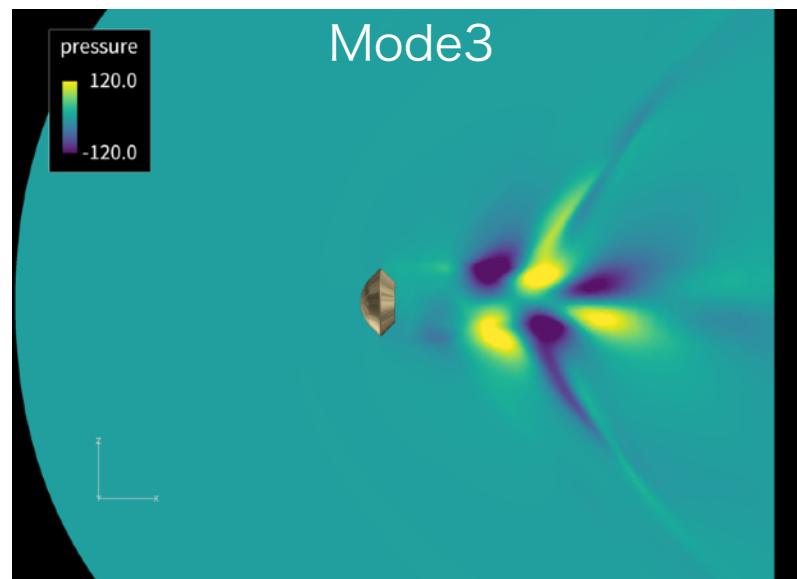
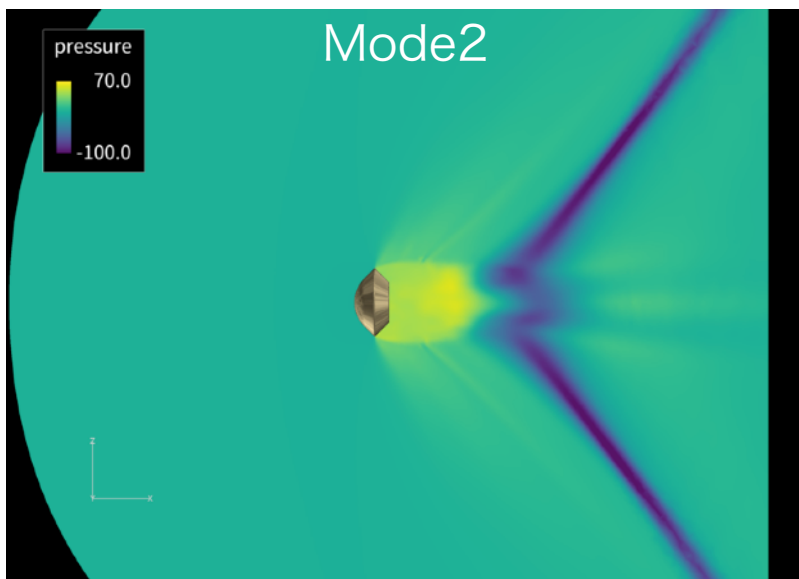
固有直交分解

- POD: モード分解によって流れ場の特徴的な振動構造を抽出する。

$$z(x, t) = \sum_{k=1}^m a_k(t) \phi_k(x)$$



固有モード：静的解析, Mach number 1.1

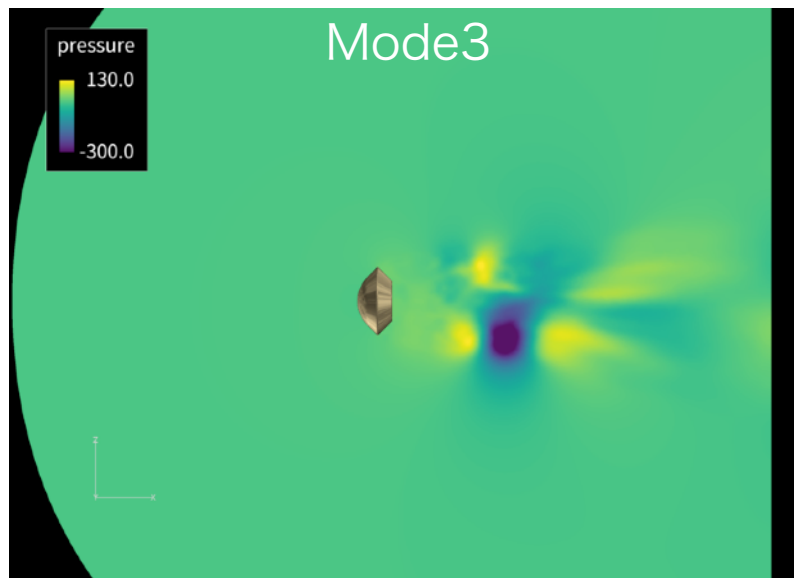


固有モード：静的解析, Mach number 0.3

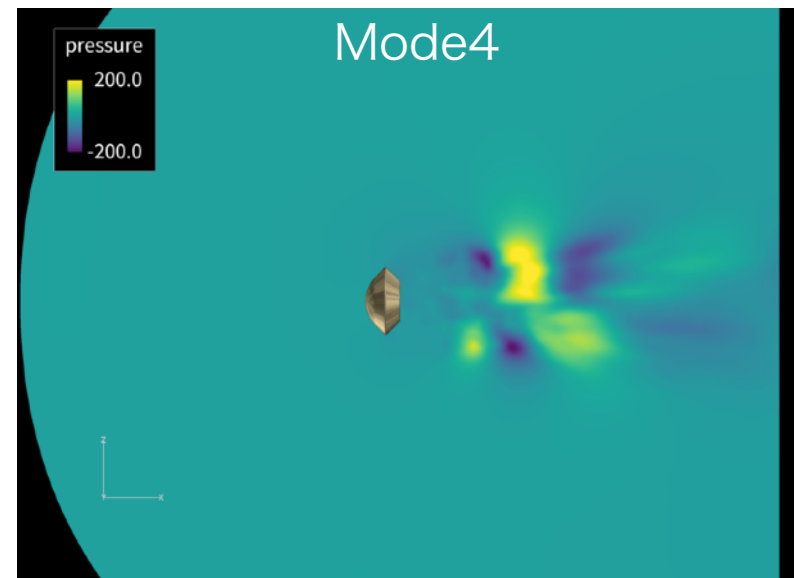
Mode2



Mode3



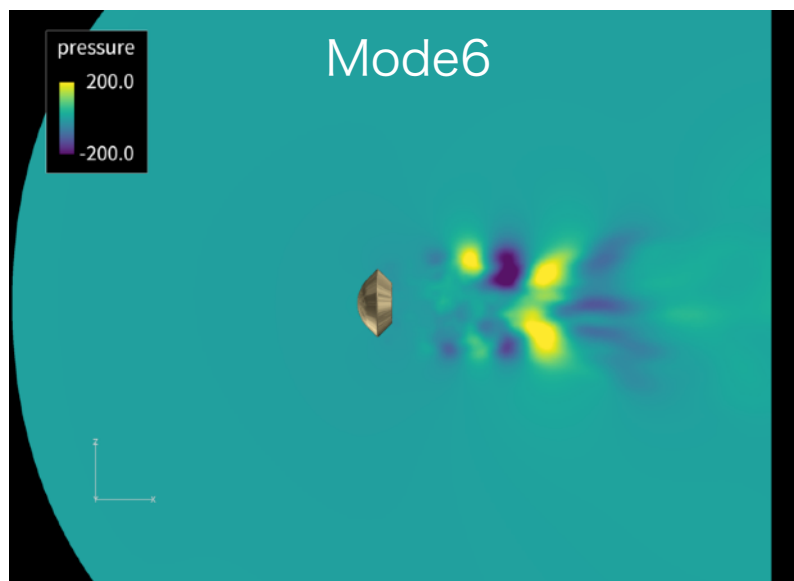
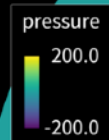
Mode4



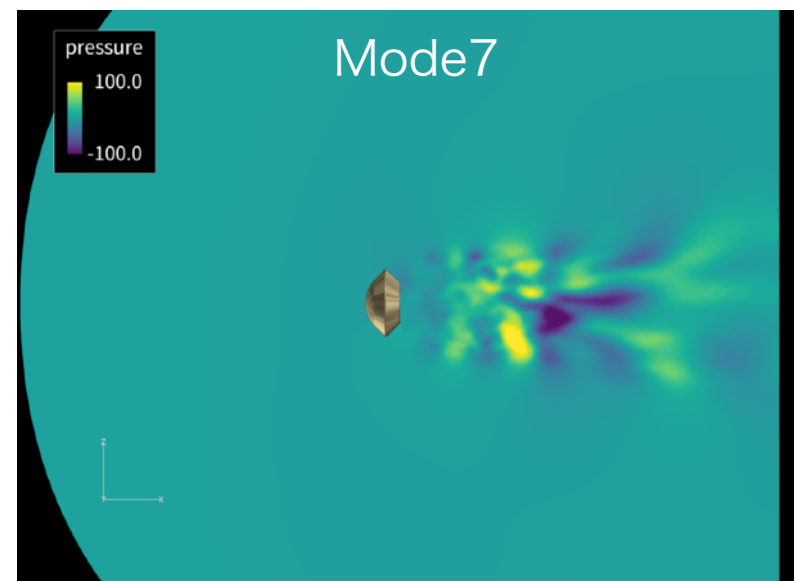
Mode5



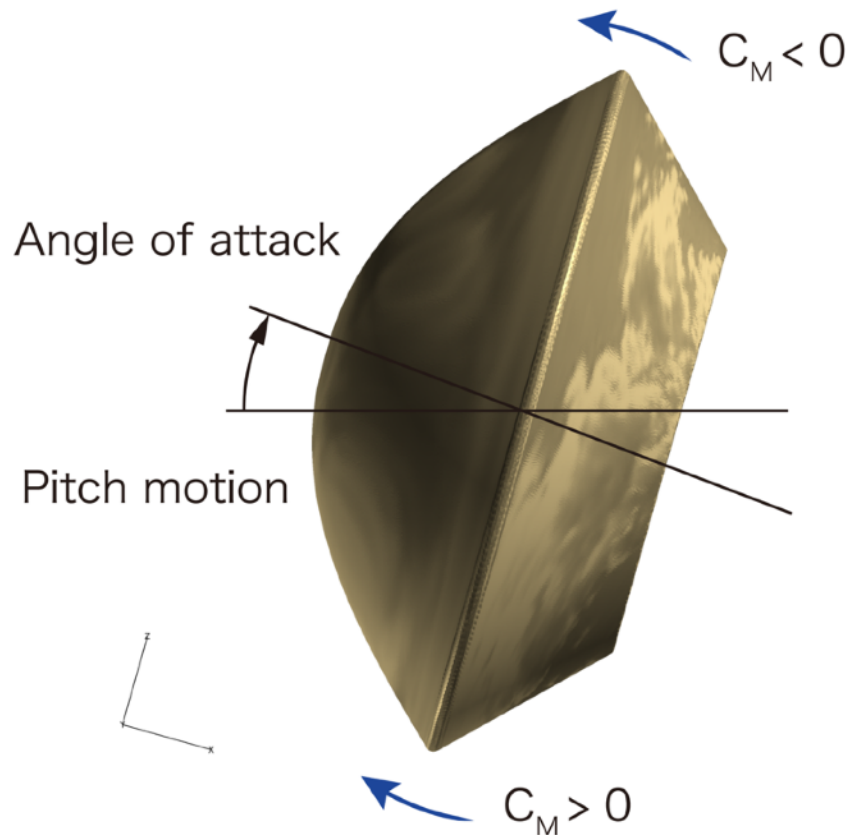
Mode6



Mode7



強制振動法



- 機体運動を 1 軸自由度(軸回り)の強制振動法によって再現。
- 支配方程式をRotating frameでの表現に書き直した。
- y軸回りの振動に対し、迎角を適当な関数として与えることで表現。

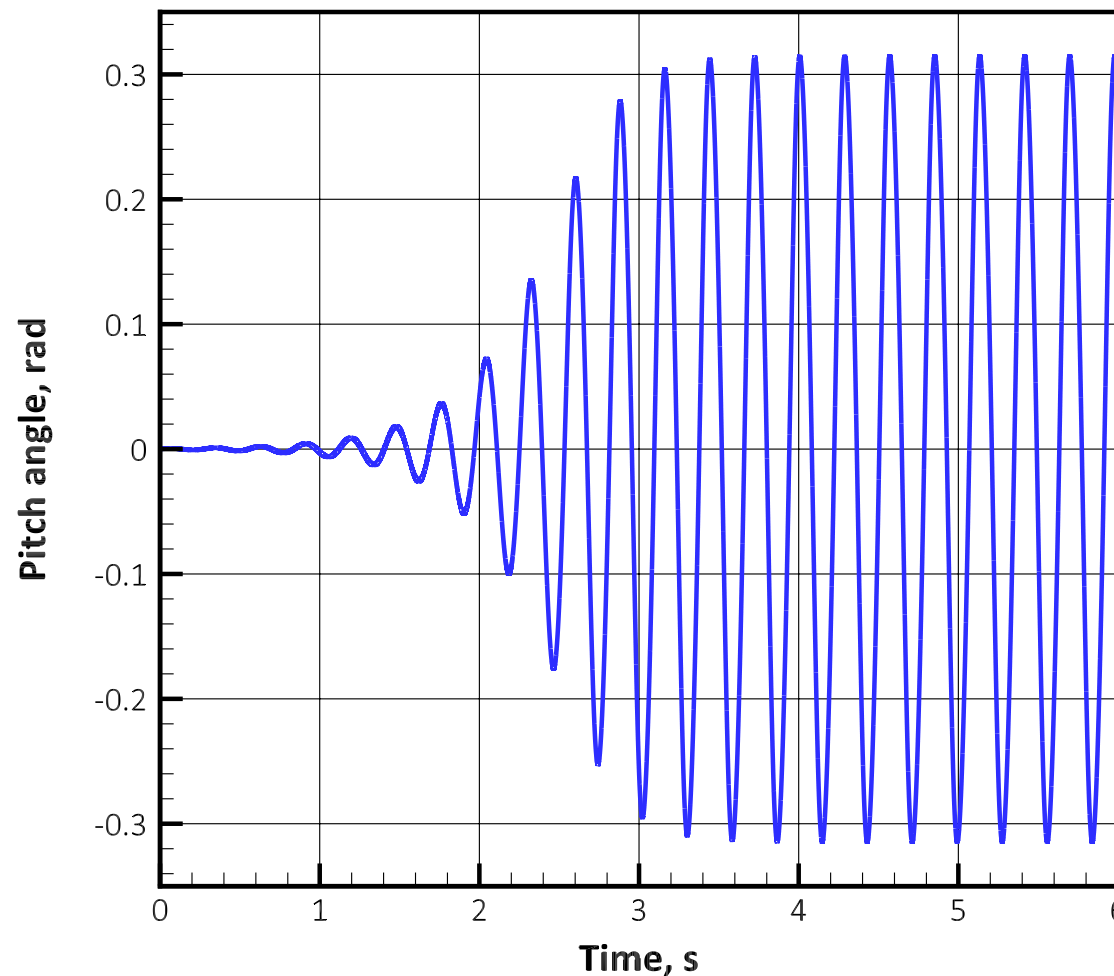
強制振動モデル

- 強制振動プロファイル

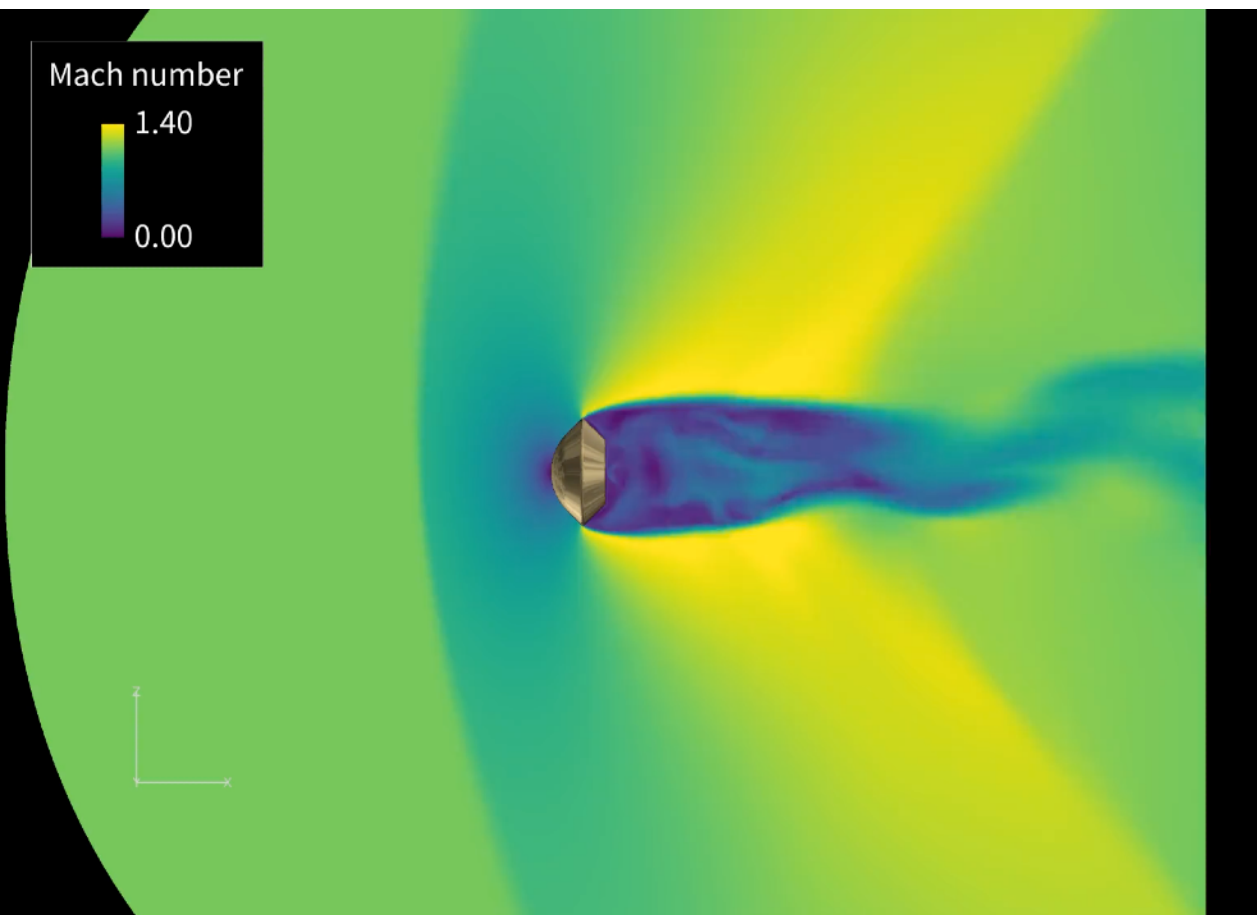
- ✓ van der Pol振動

$$\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2) + x = 0$$

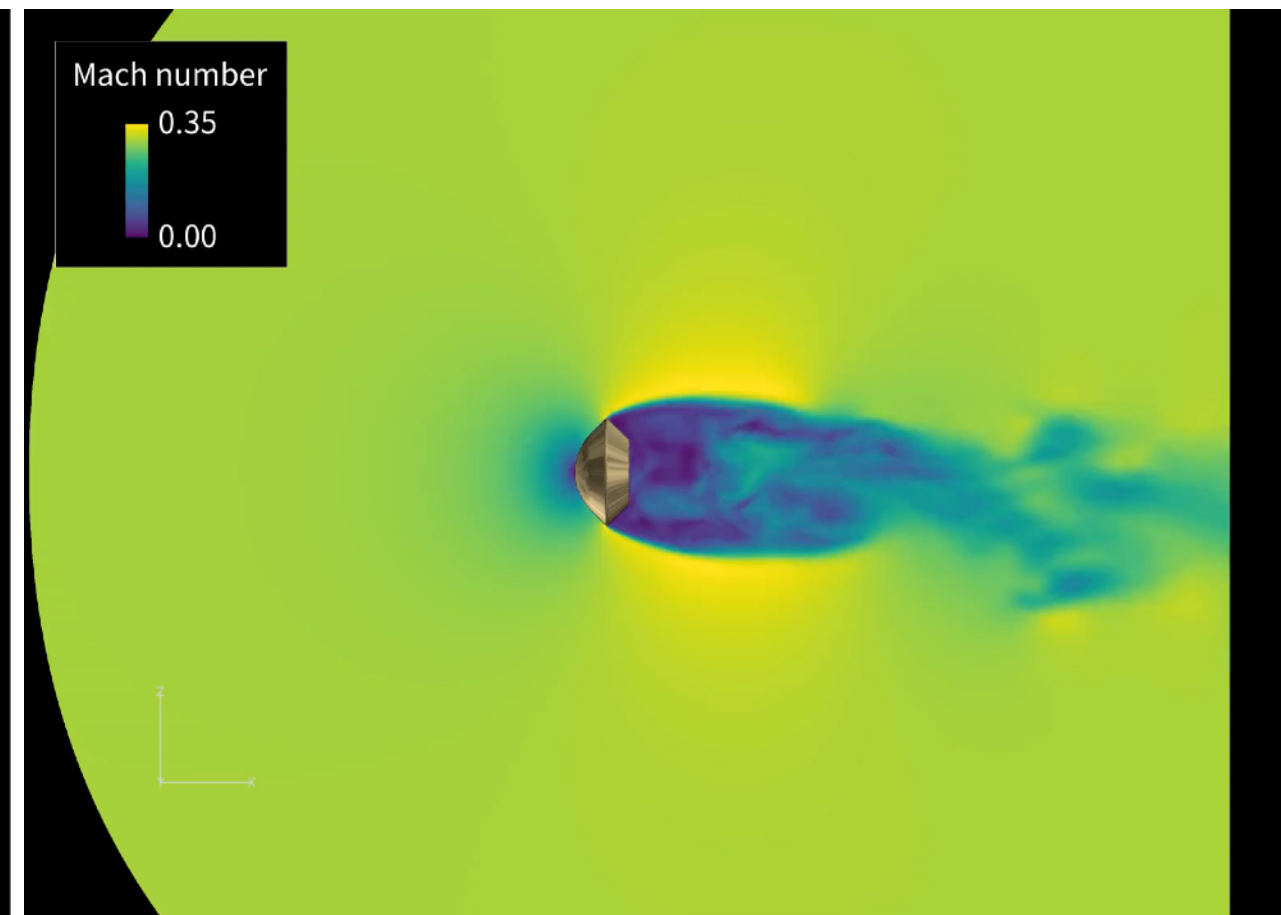
- ✓ 正弦波振動 $A \sin(2\pi ft)$



動的解析 (VDP, マッハ数分布)

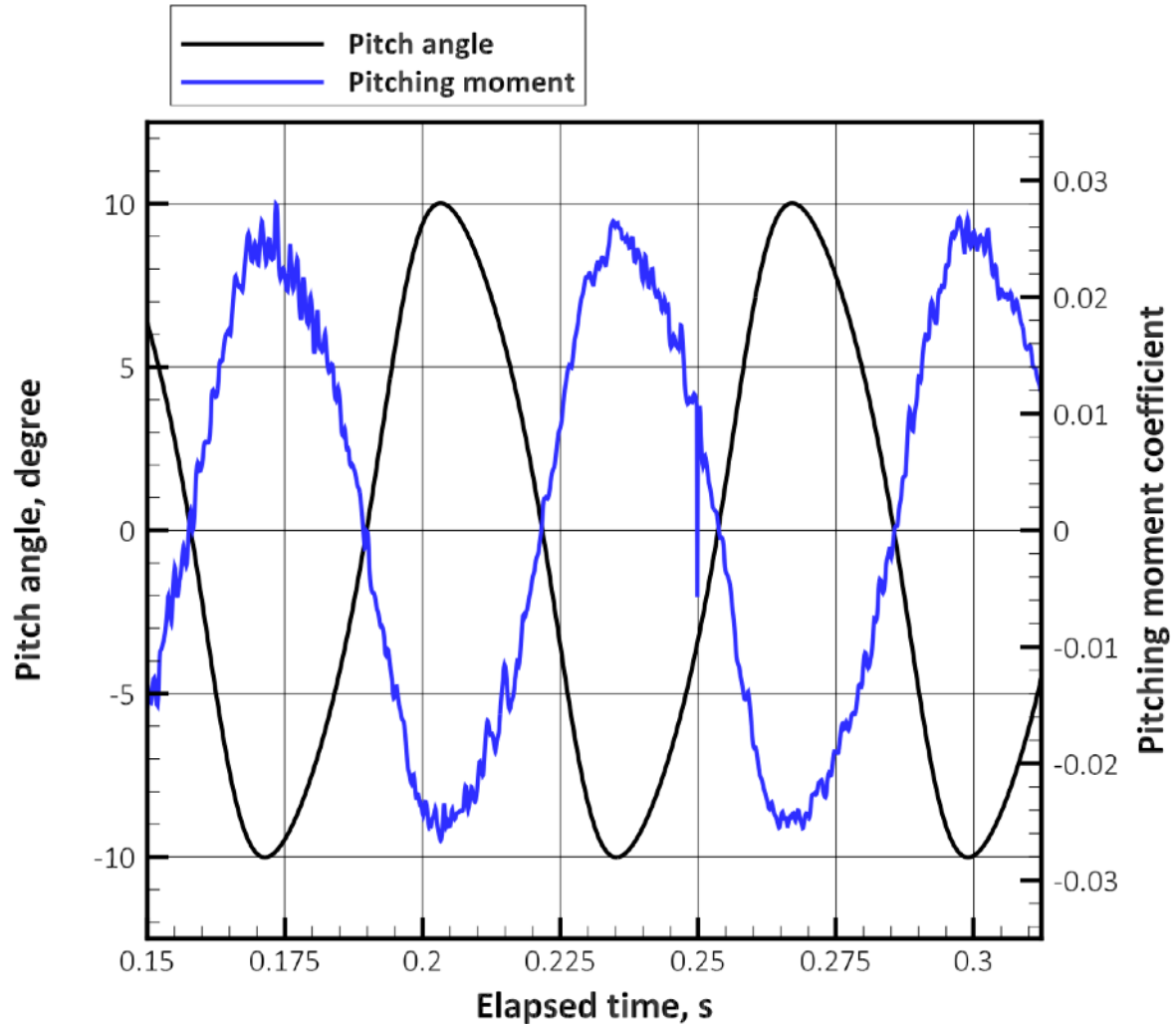


Mach number 1.1

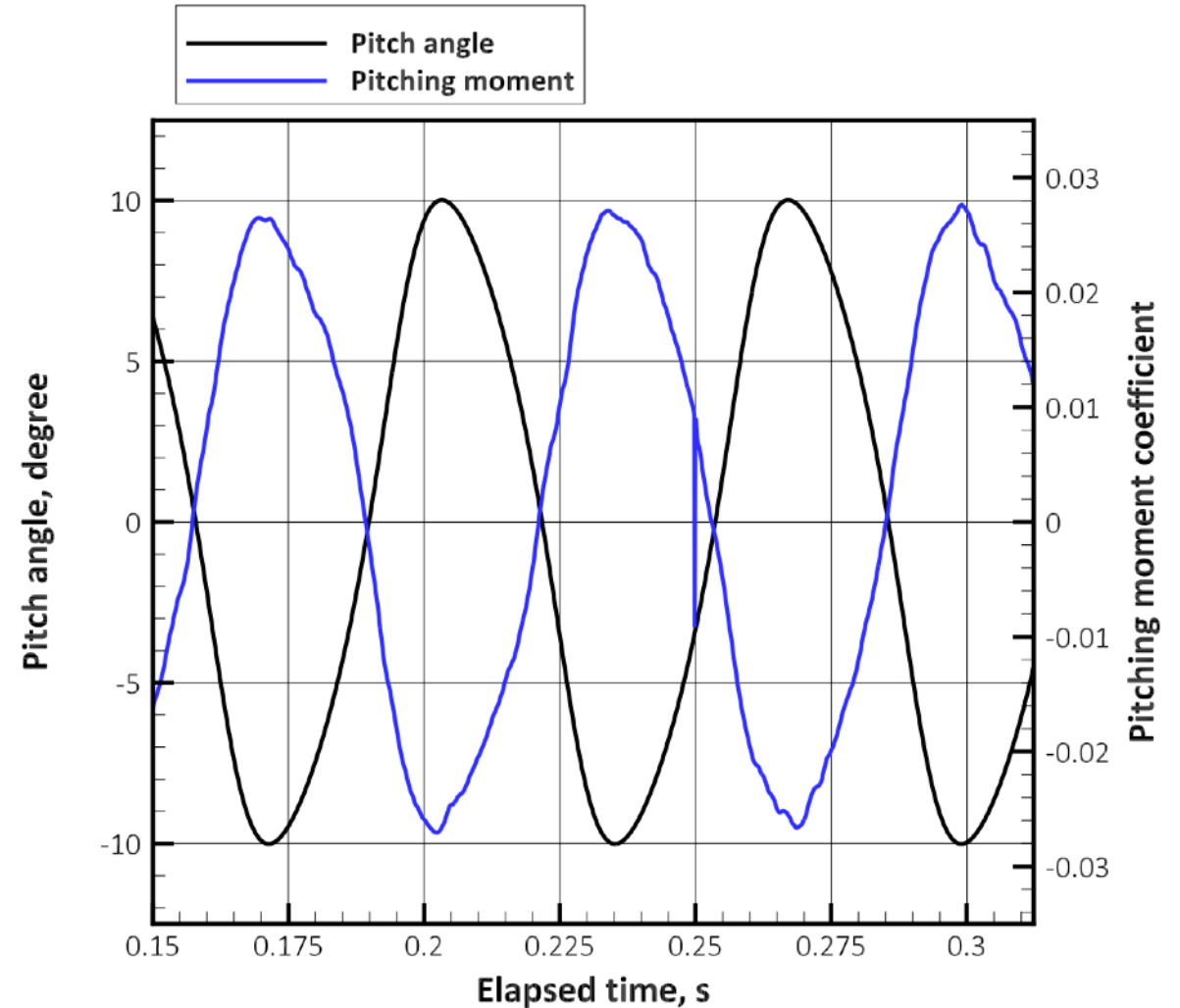


Mach number 0.3

空気力：ピッチングモーメント（回転させる力）

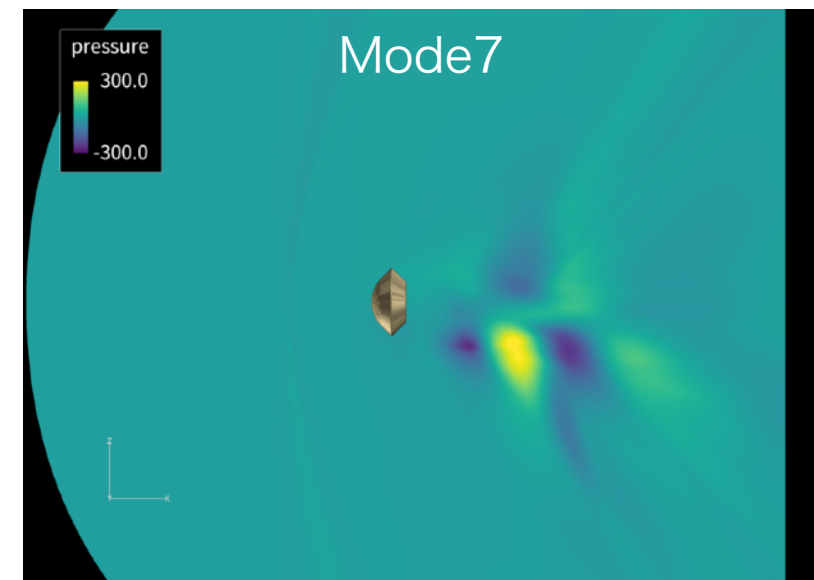
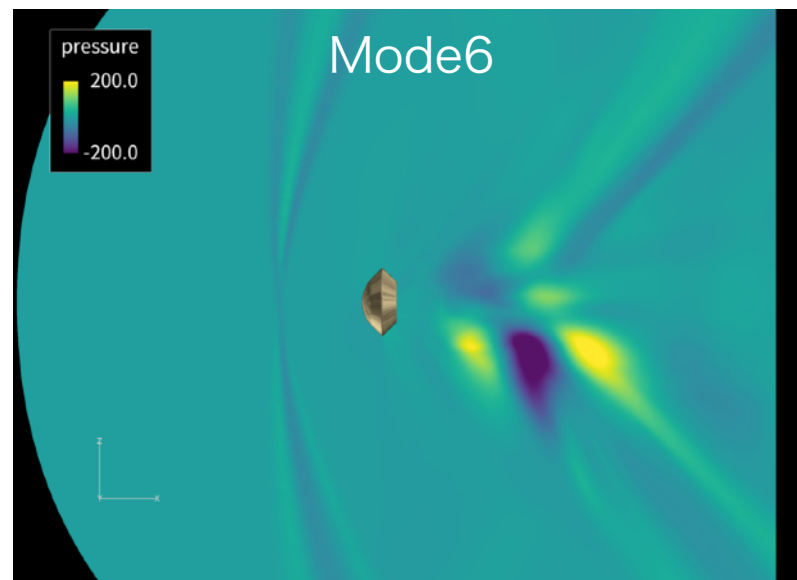
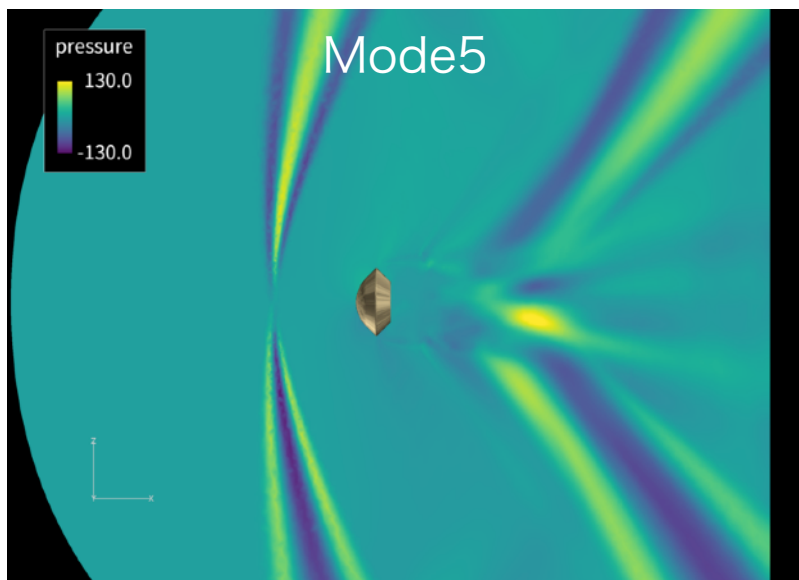
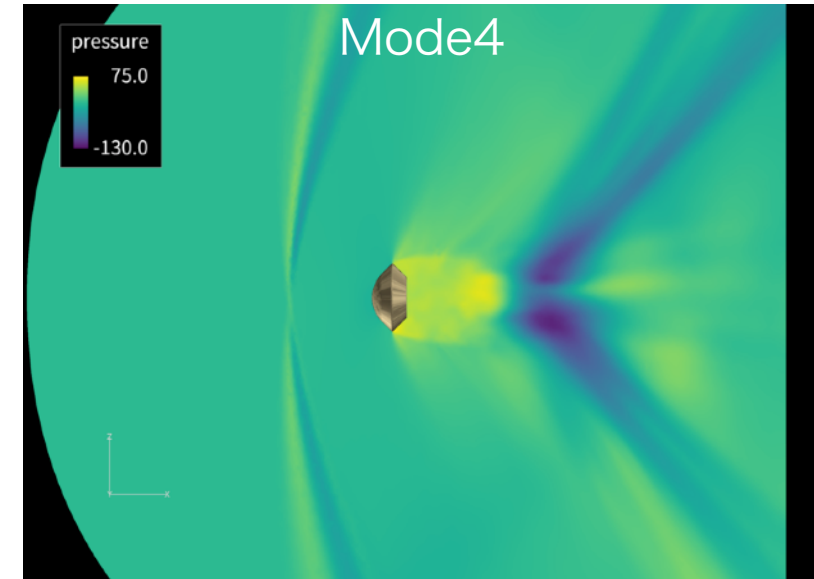
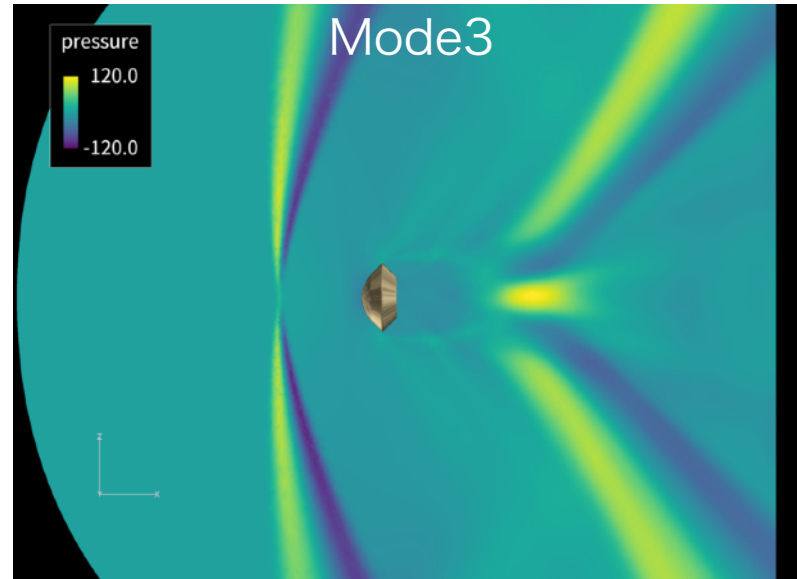
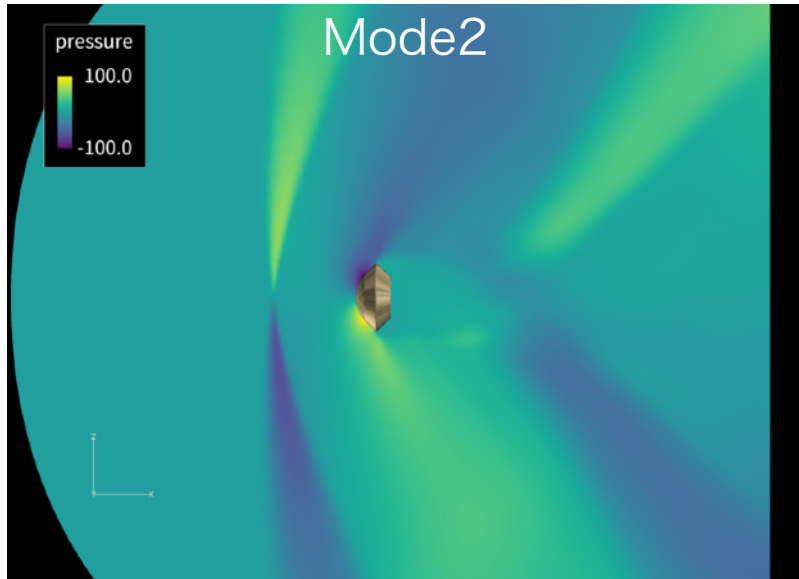


Mach number 1.1



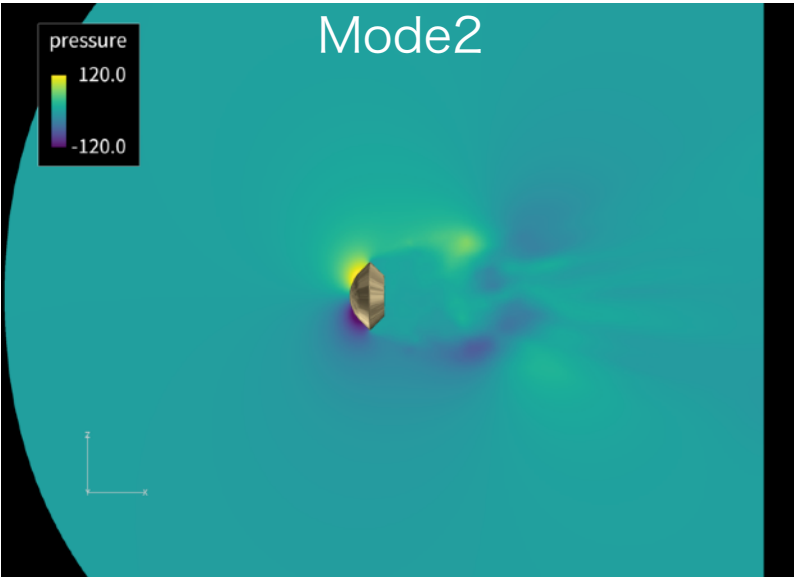
Mach number 0.3

固有モード：動的解析(VDP) Mach number 1.1

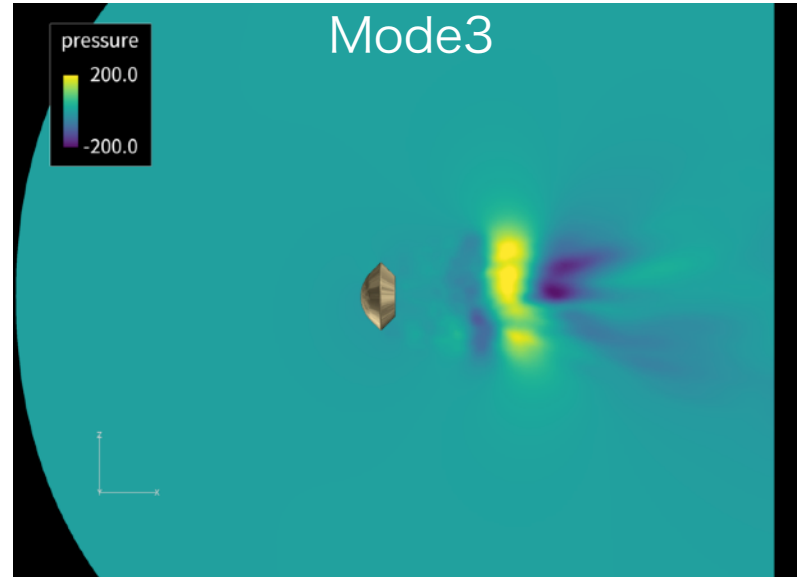


固有モード：動的解析(VDP) Mach number 0.3

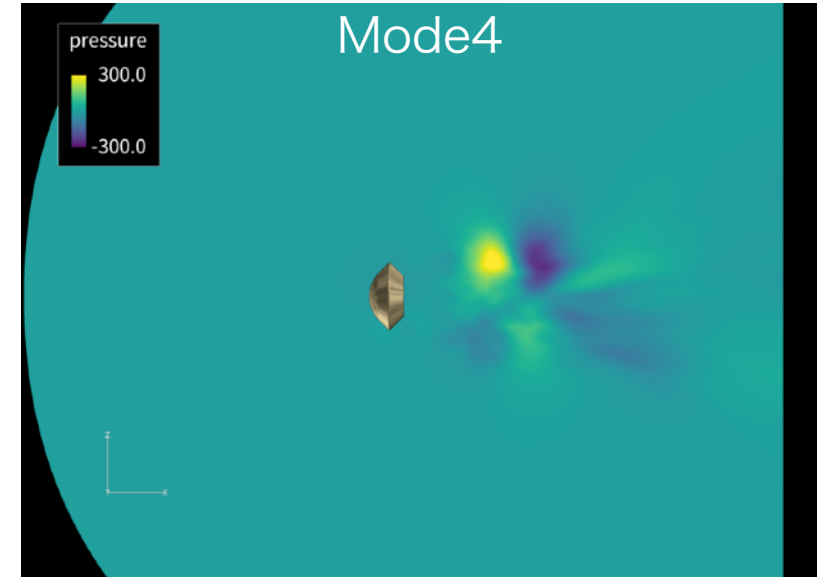
Mode2



Mode3



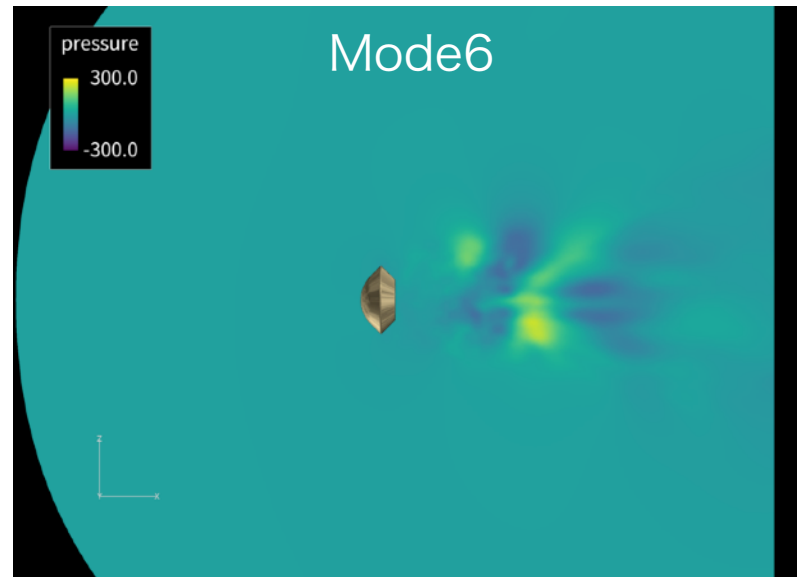
Mode4



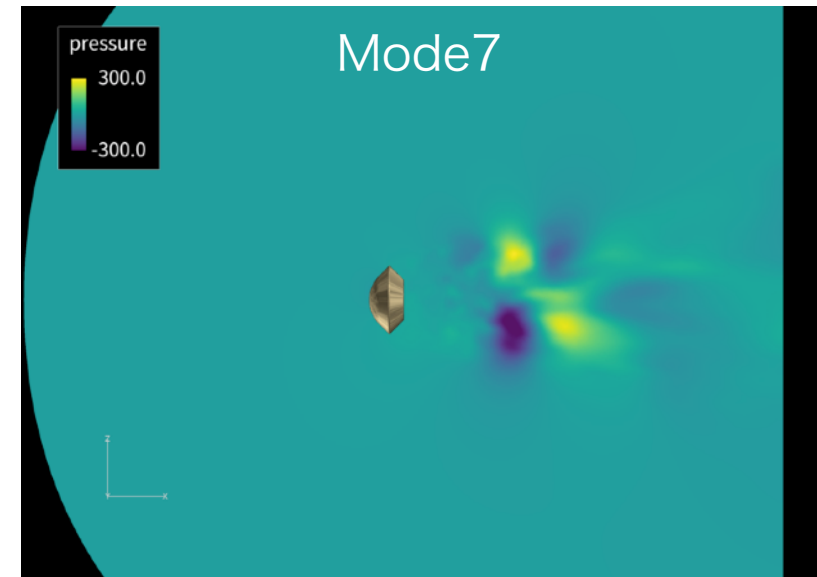
Mode5



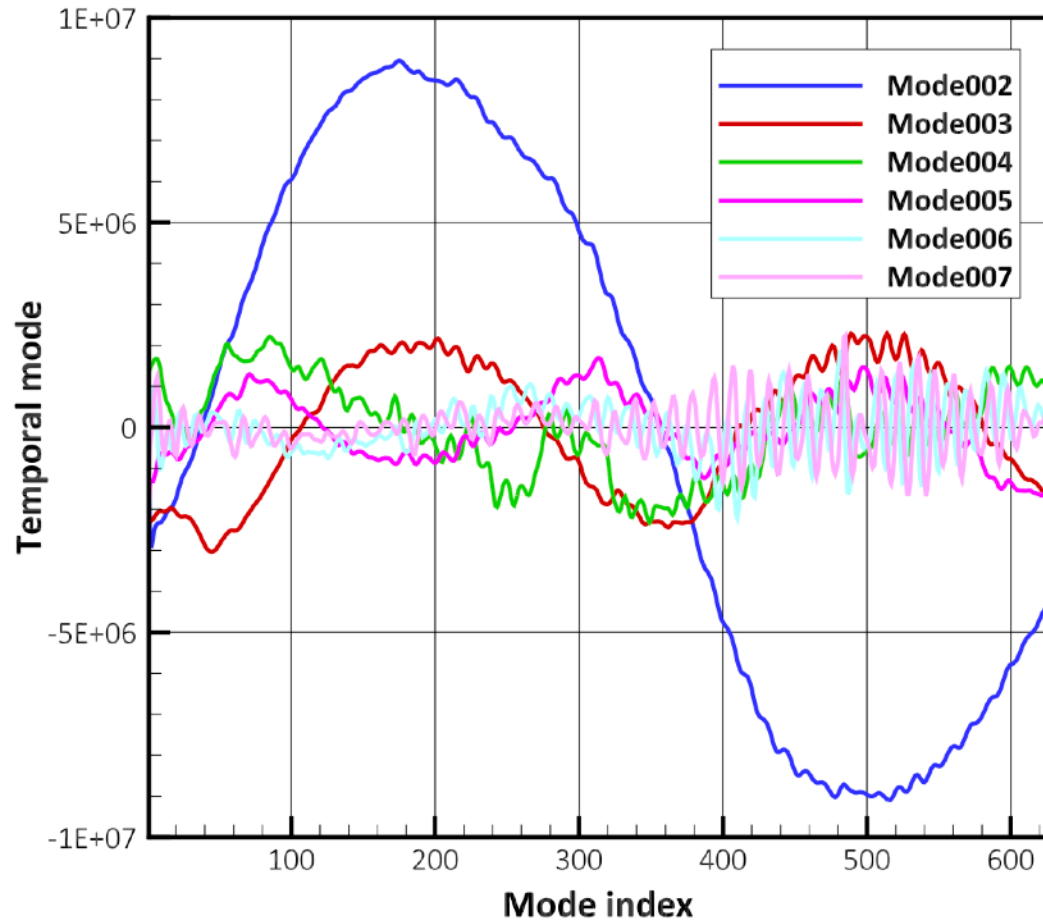
Mode6



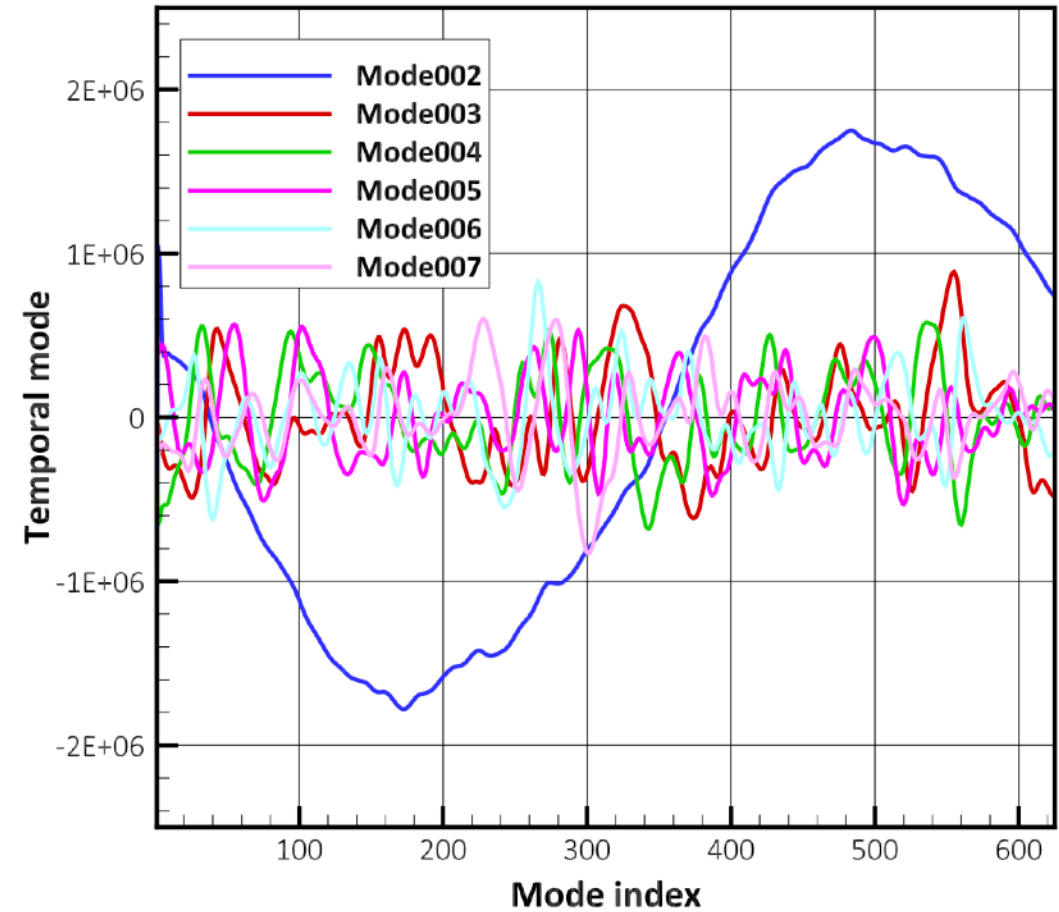
Mode7



時係数(mode2-7)

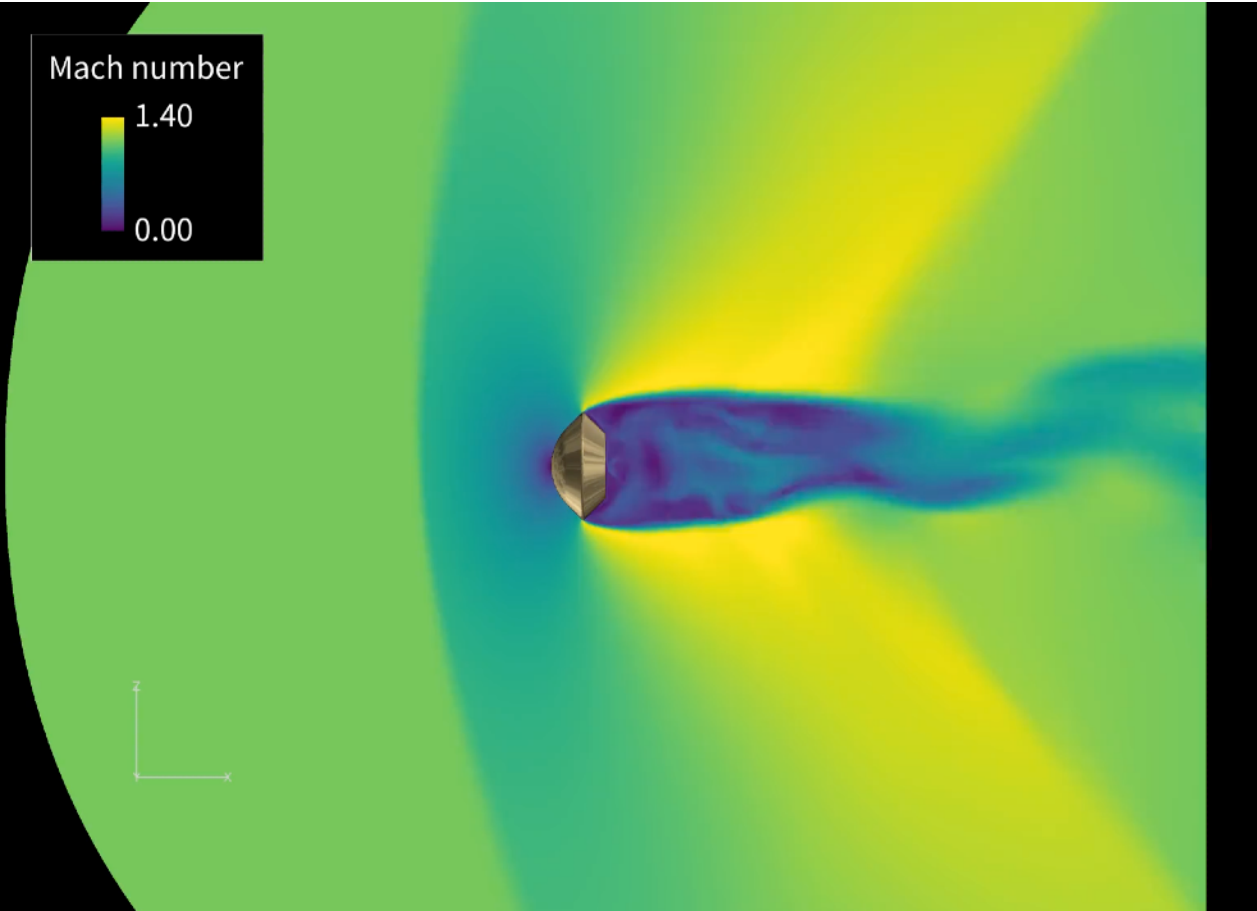


Mach number 1.1

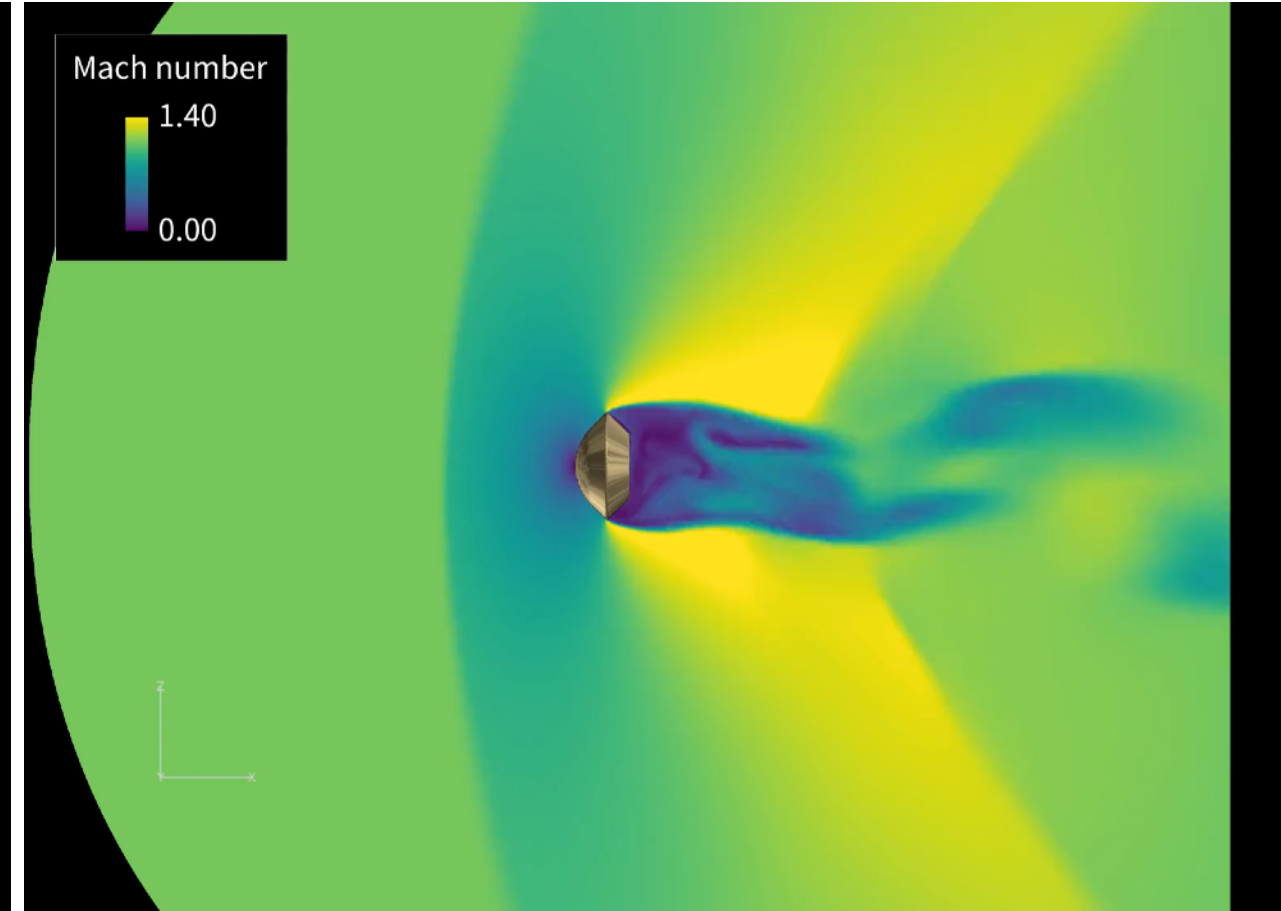


Mach number 0.3

動的解析 (VDPvs正弦波, マッハ数分布)



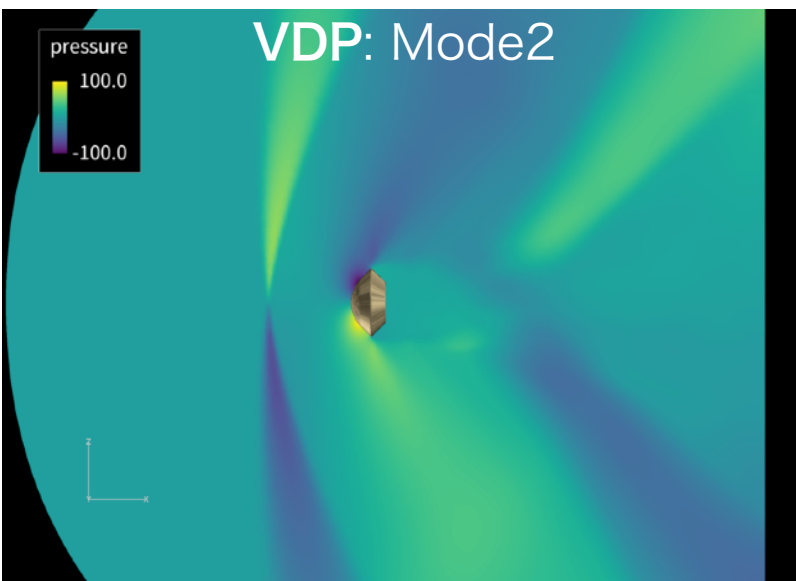
VDP振動, Mach number 1.1



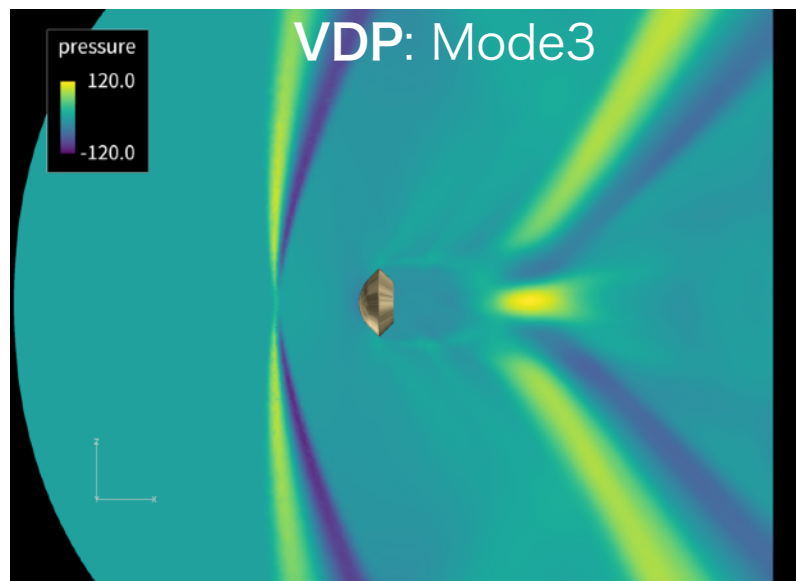
正弦波振動, Mach number 1.1

固有モード (VDPvs正弦波)

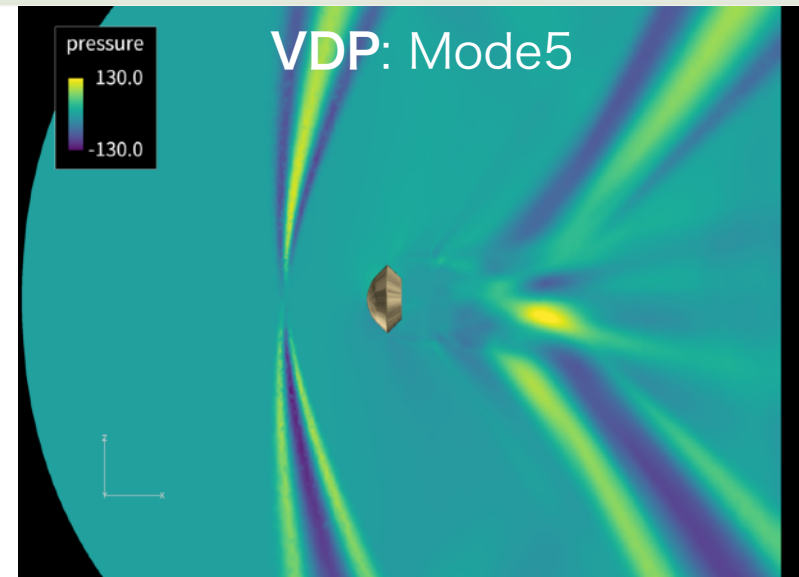
VDP: Mode2



VDP: Mode3



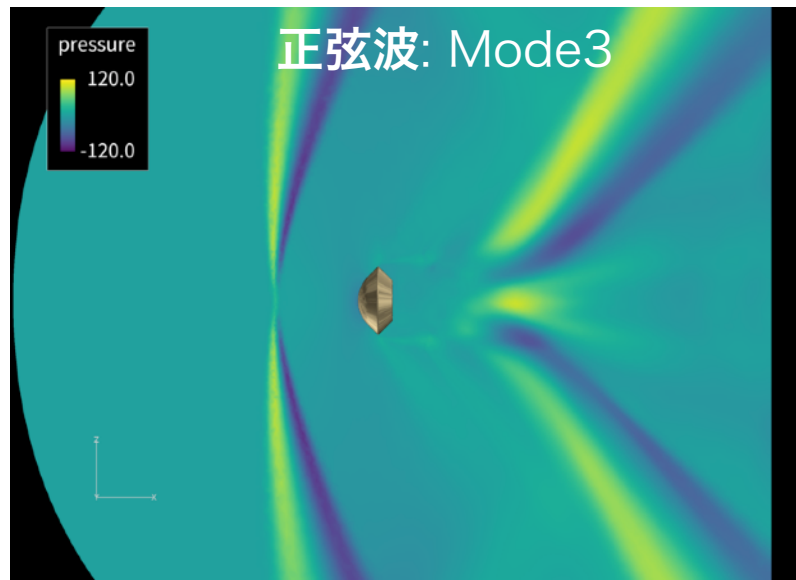
VDP: Mode5



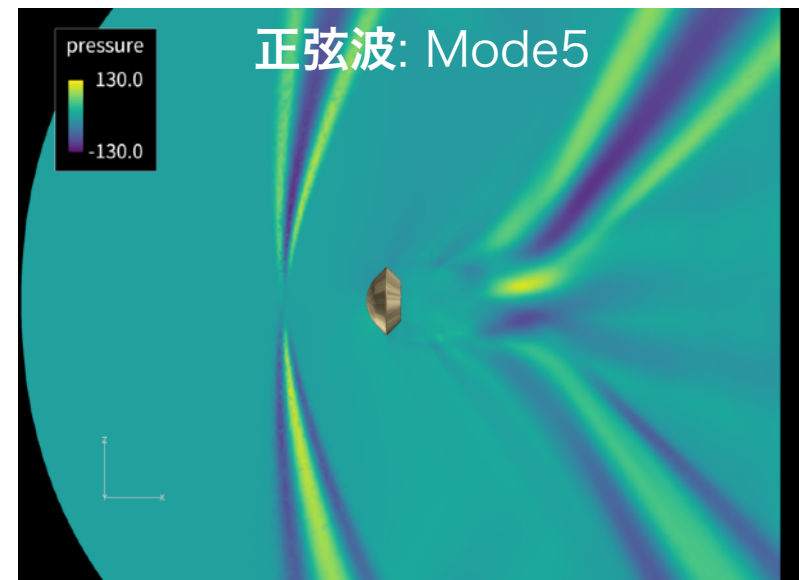
正弦波: Mode2



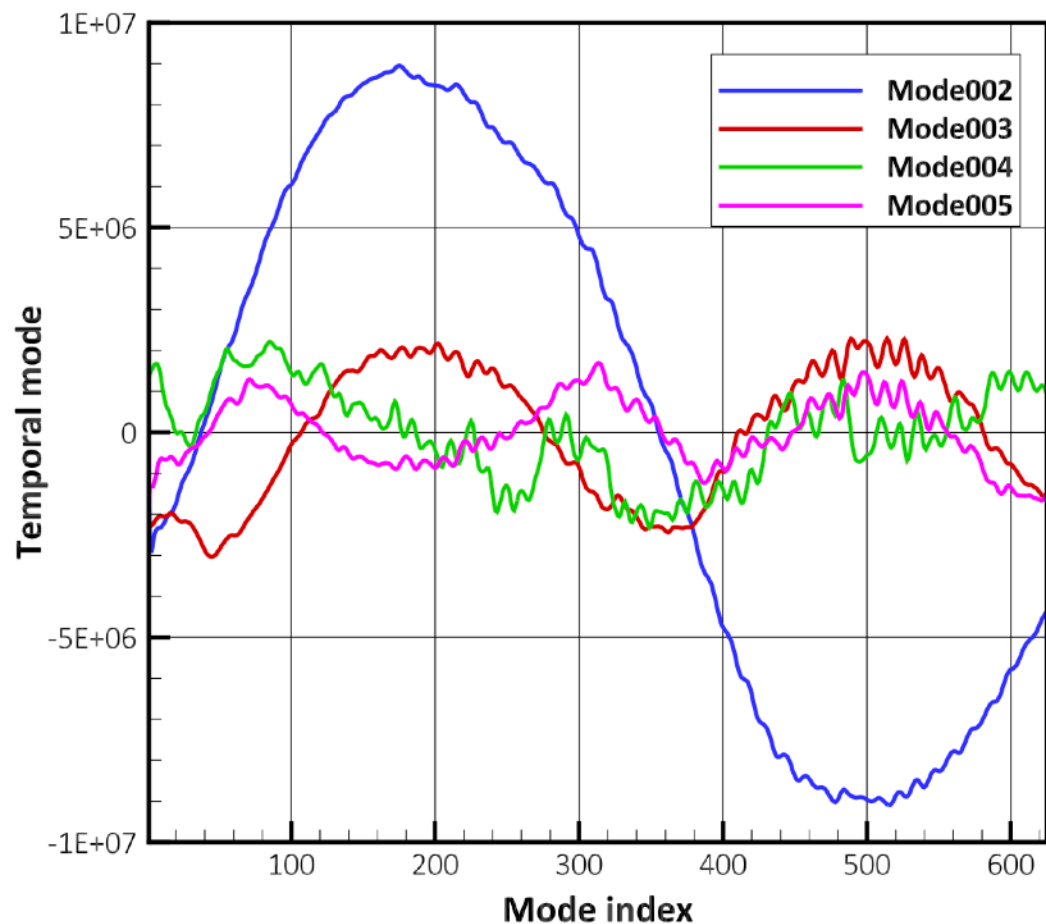
正弦波: Mode3



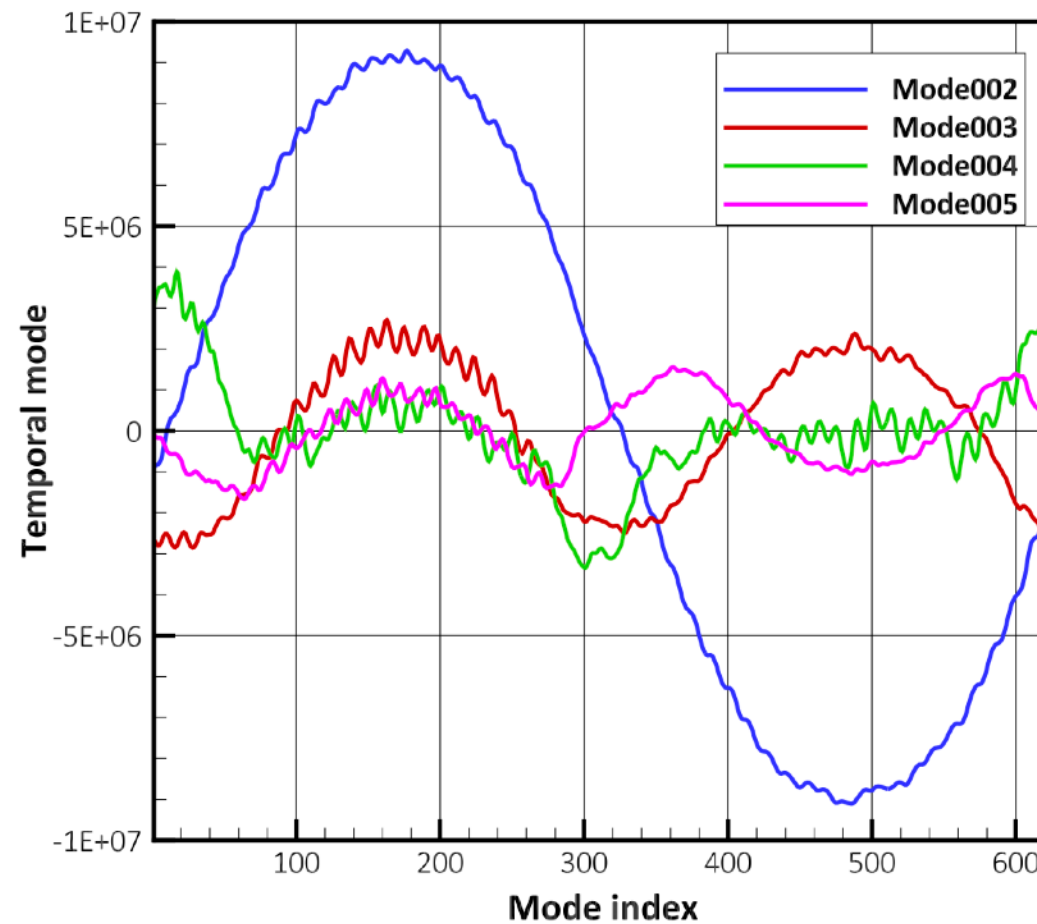
正弦波: Mode5



時係数(mode2-5) (VDPvs正弦波)



VDP振動, Mach number 1.1



正弦波振動, Mach number 1.1

まとめ

- 遷音速域におけるはやぶさカプセルの非定常空気力による動的不安定性を対象とし、強制振動とLESを用いた数値解析を行った。
- 得られた計算結果に対して固有直交分解(POD)解析を行うことで、空気力に関連するモードを抽出した。
- 機体を回転させる空気力として、カプセル前面の圧力変動の寄与が大きいことがわかった。さらに姿勢不安定性に強い影響を及ぼす背面寄与は、再圧縮衝撃波と逆流領域に起因する機体後流の特徴的な構造によって生じることを示した。