



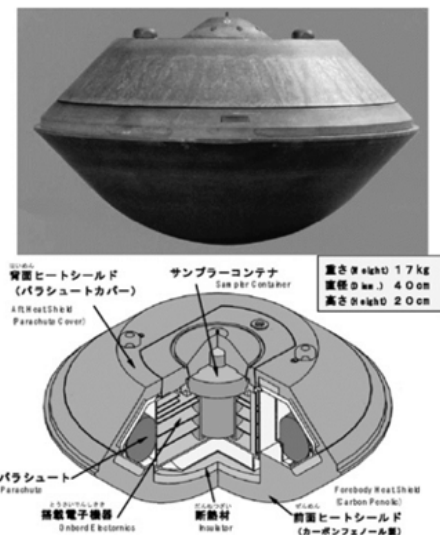
HOKKAIDO
UNIVERSITY

はやぶさ型再突入カ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（北海道大学）

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→MMX, OpensSRC
- 大気圏再突入において、カプセルの姿勢安定性は重要な問題である
- 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



姿勢安定

- 再突入機を始め飛翔体は空気力によってのみ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、姿勢運動が収束しなければいけない。

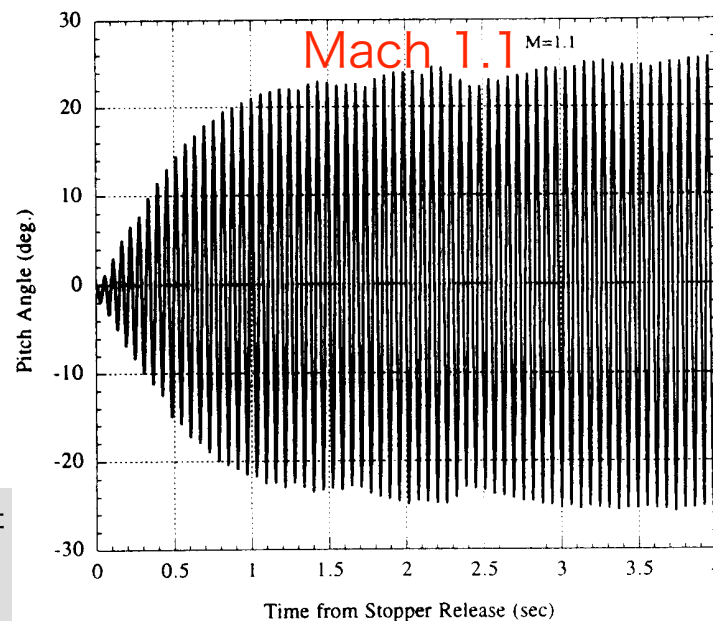
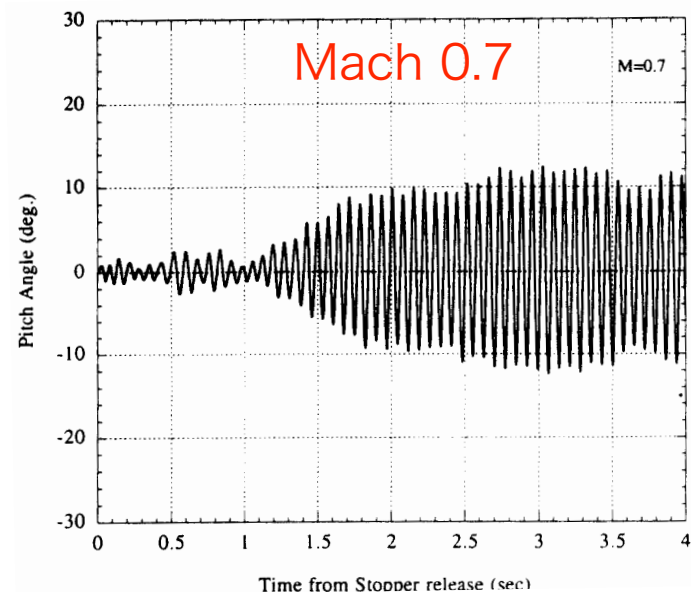
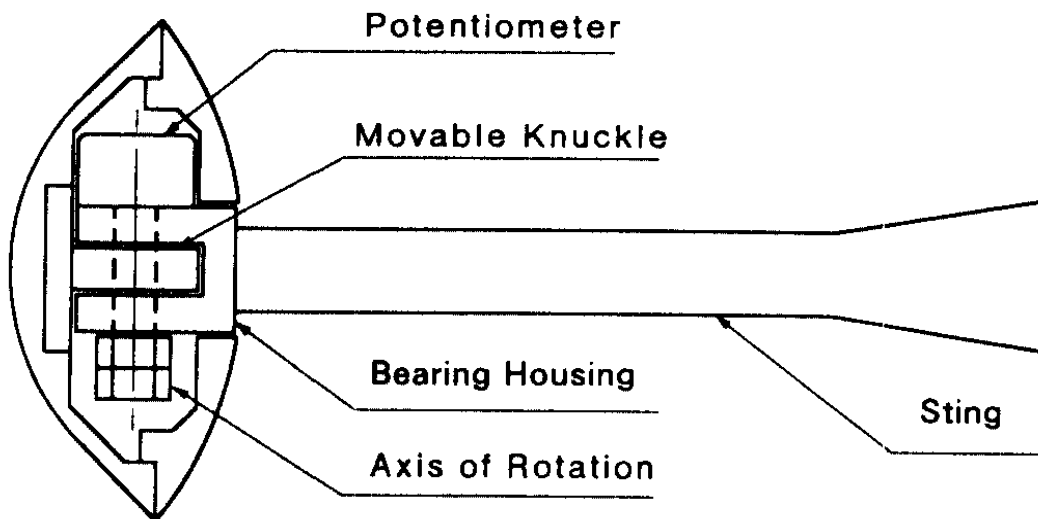
再突入機の動的不安定性

- 静的な姿勢安定を取るのには難しくない⇔動的な姿勢安定は？
- MUSEC-C（はやぶさ）サンプルリターンカプセル開発時に問題になった。



過去に行われた研究（風洞試験）

- 平木らによって遷音速風洞試験が行われ、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）

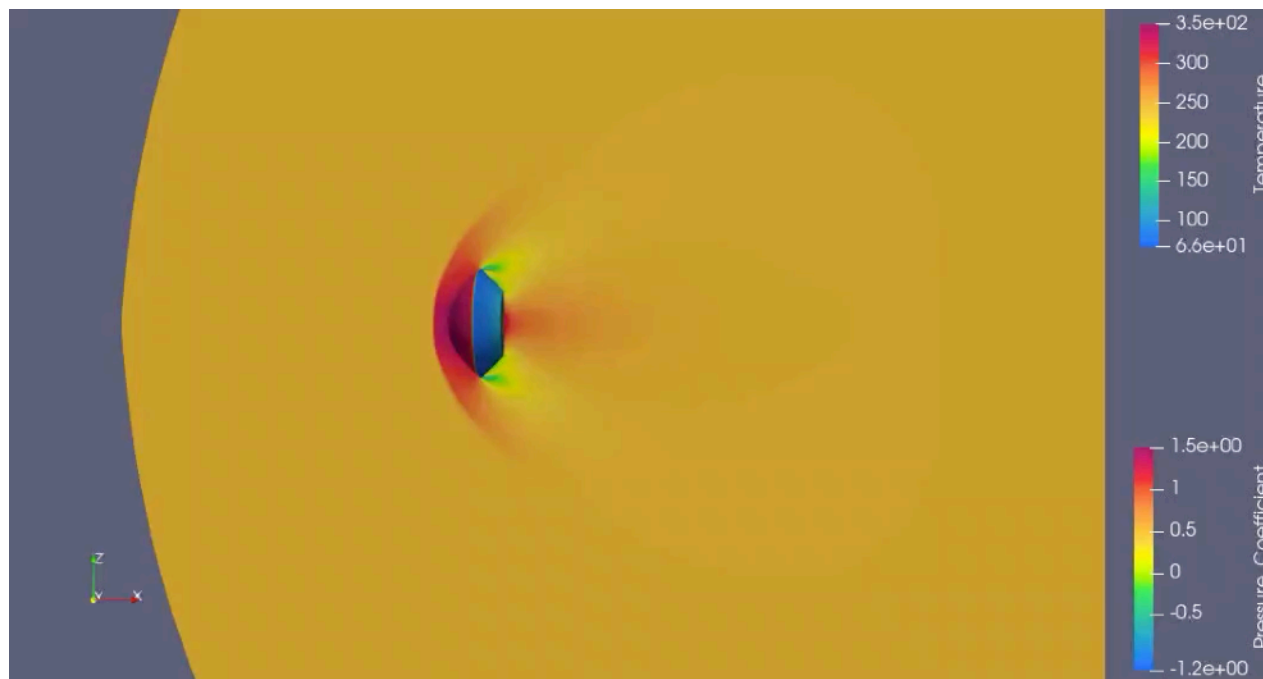
- Teramotoら(2001, 2002)
- 遷音速領域におけるBaldwin-Lomax乱流モデルを用いたはやぶさカプセルの数値解析
- カプセル後流とそれによる背面圧力の位相遅れが動的不安定性に対して大きなインパクトをもつことが示唆された。

- 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



高速流体シミュレーション

- 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

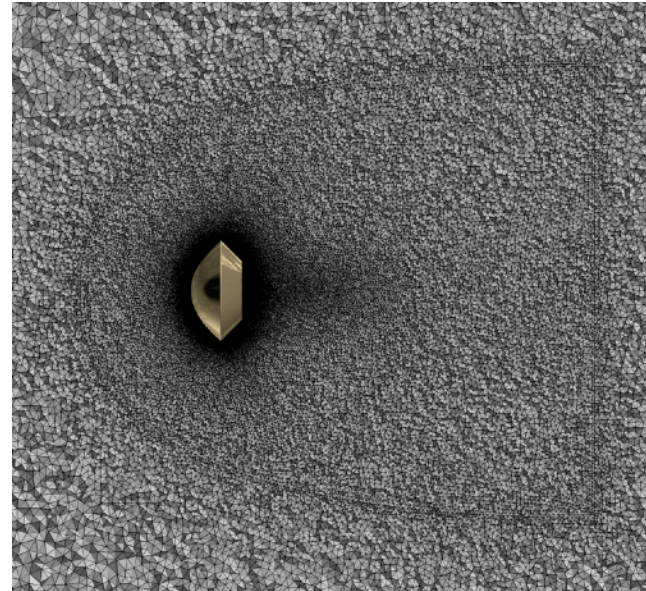
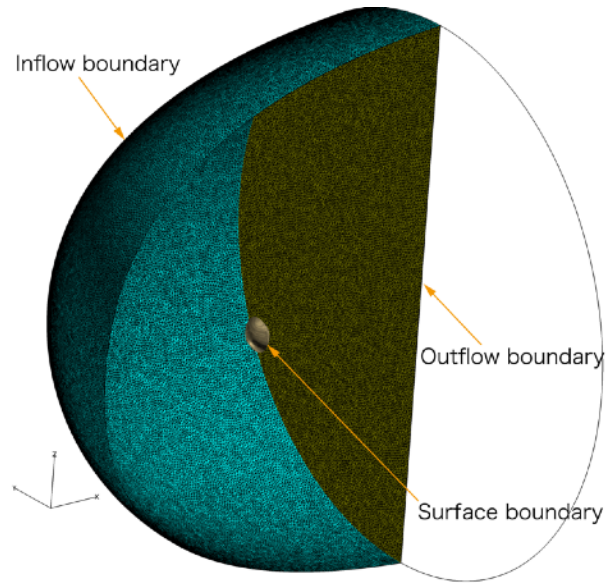
- はやぶさSRCを対象に空力不安定性のメカニズム調査を行う。さらにモード分解解析によって流れ場中の特徴的な振動構造を明らかにし、将来の設計開発につなげる。
- 空力不安定性（動的不安定性）を捉えるために流体シミュレーションはどの程度の大変さを有するか？
- 巨大な非定常データをどのように取り扱うか？

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)

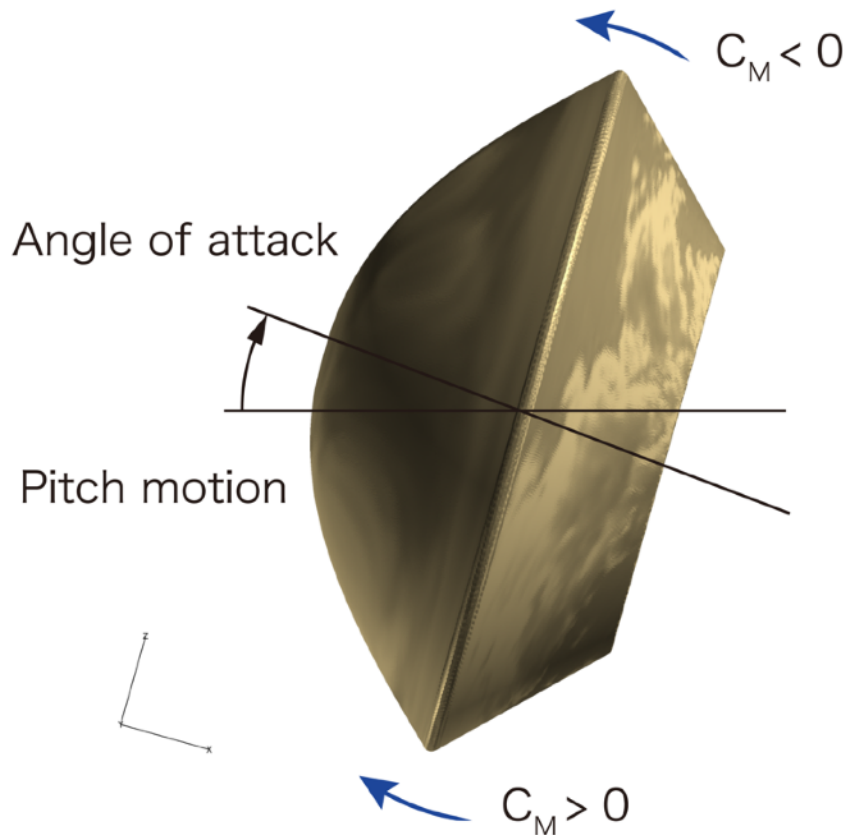
Software package	RG-FaSTAR-v2.1.7
Gas model	Ideal gas
Transport properties	Sutherland
Discretization	Cell-centered finite volume method
Gradient calculation	Green-Gauss method
Numerical fluxes	Advection term: HLLEW
Time-marching method	Dual time stepping
Turbulence model	LES (Standard Smagorinsky model)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

計算領域・計算格子



- カプセル直径：100 mm
- 回転中心: (25, 0, 0) mm
- 非構造格子にて作成、計算格子数は4026万セル数

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[Ref]
- y軸回りの振動を正弦波プロファイルの迎角を与えて表現

$$\alpha = \alpha_1 \sin(2\pi f t)$$

計算条件

- JAXA遷音速風洞の実験環境を再現する



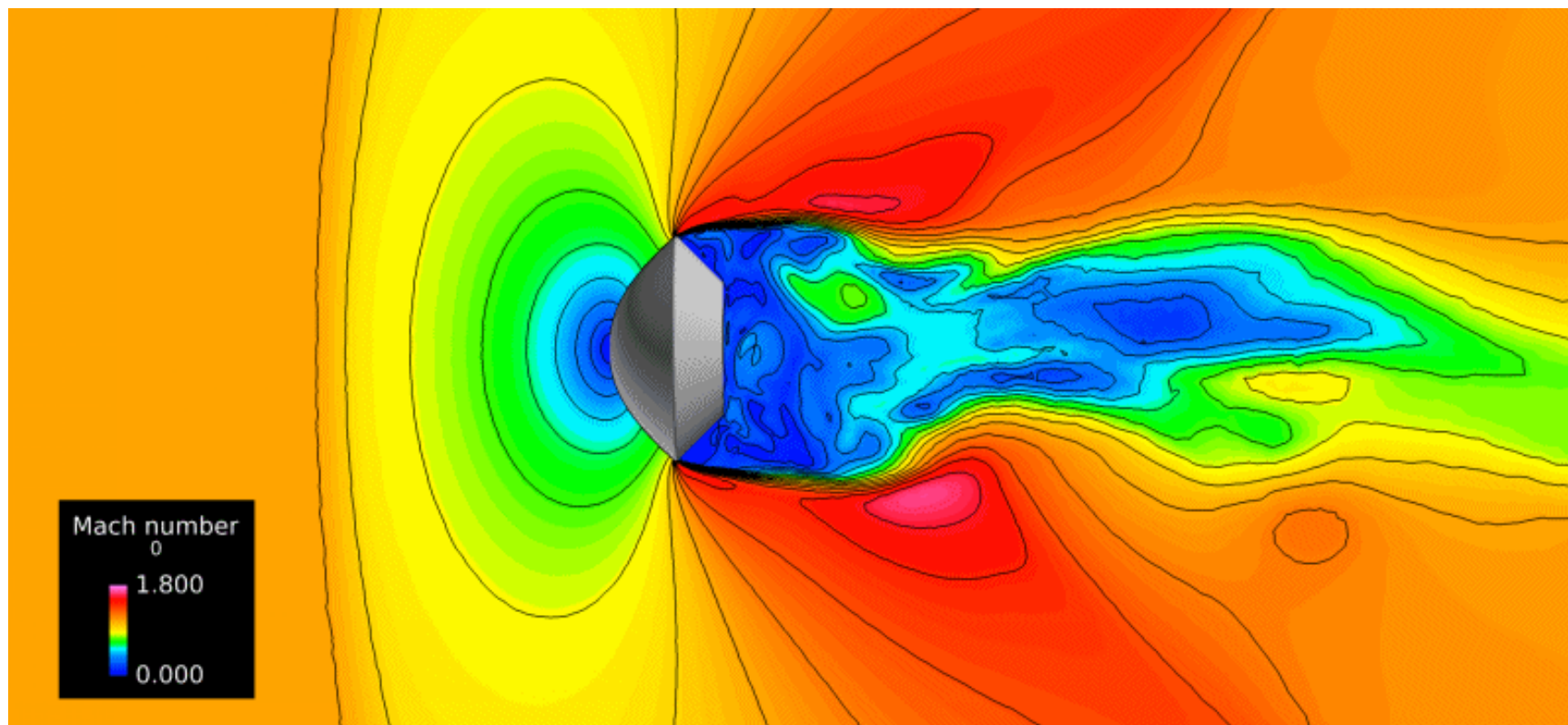
JAXA遷音速風洞

マッハ数	1.1
一様流速, m/s	342.8
一様流温度, K	243.1
一様流密度, kg/m ³	1.013
一様流圧力, Pa	7.02E+04
レイノルズ数	2.24E+06
振動周波数, Hz	16
振幅, degree	20
無次元周波数	0.029

無次元周波数 $\bar{f} = \frac{2\pi f D}{U_\infty}$

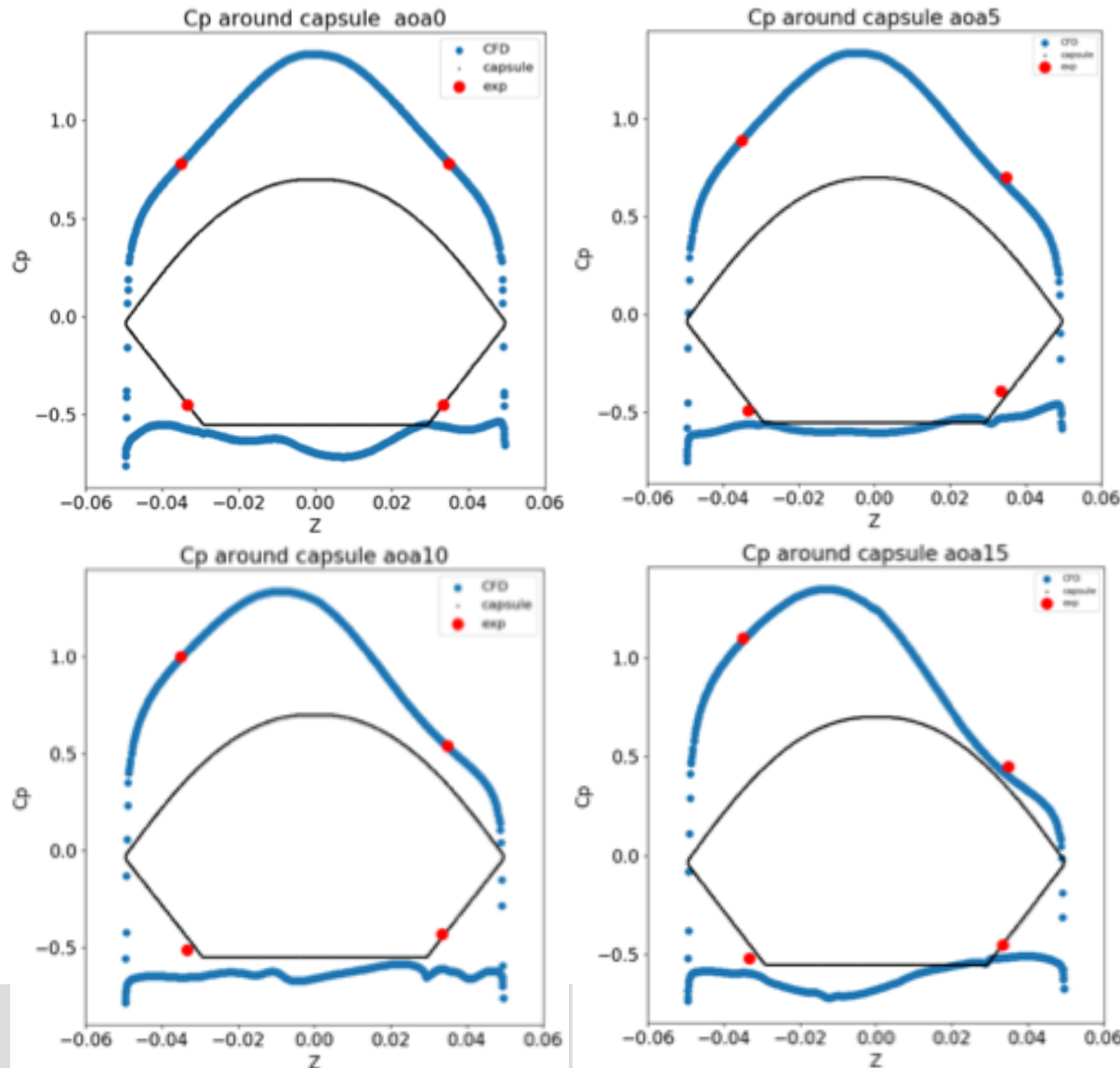
静的解析：マッハ数分布

- 遷音速域のはやぶさ型再突入カプセルに対してLESを用いた非定常乱流



一様流マッハ数1.1におけるはやぶさ型カプセル近傍のマッハ数分布

静的解析：実験結果との比較（圧力分布）

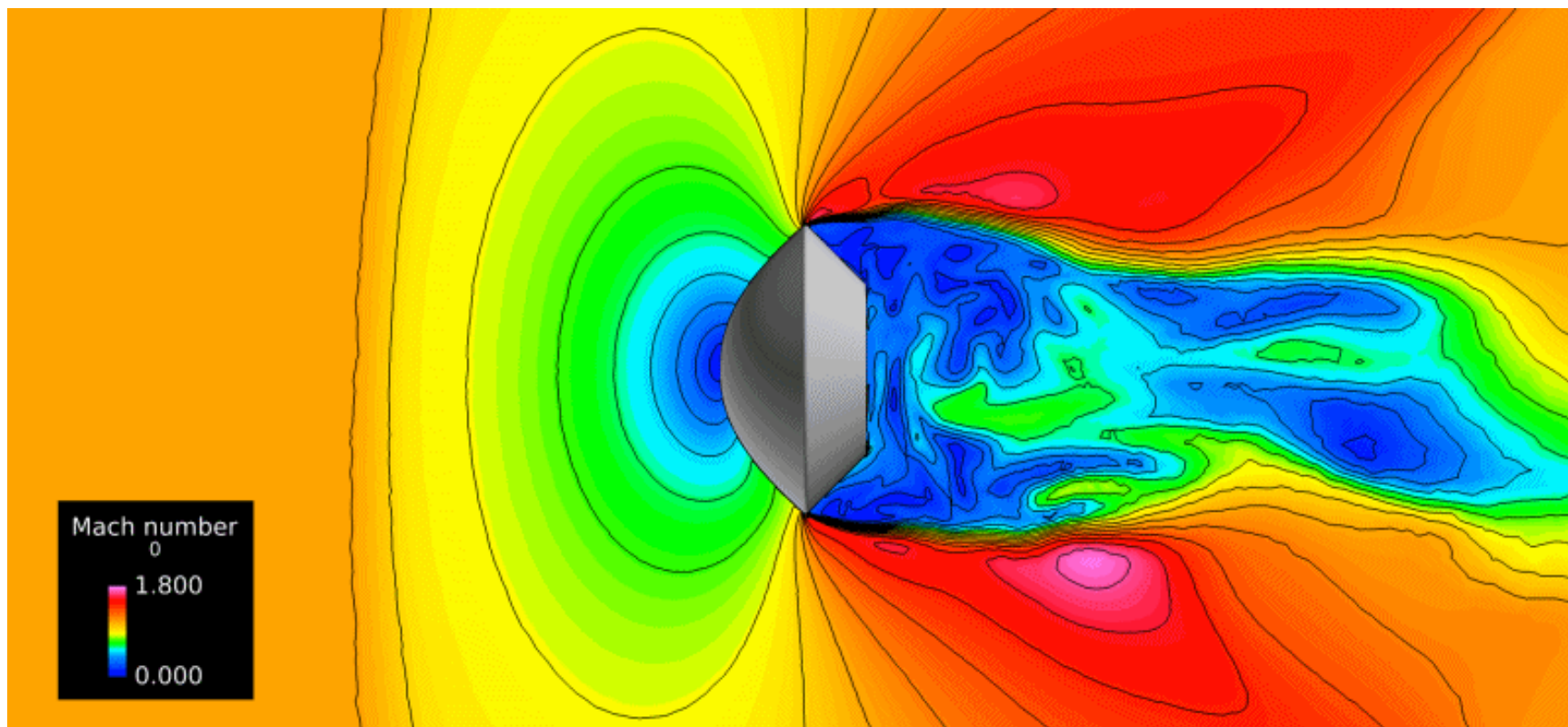


- 各迎角における表面圧力係数の実験と計算結果の比較($M=1.1$)
- 本解析モデルは圧力分布をよく再現する



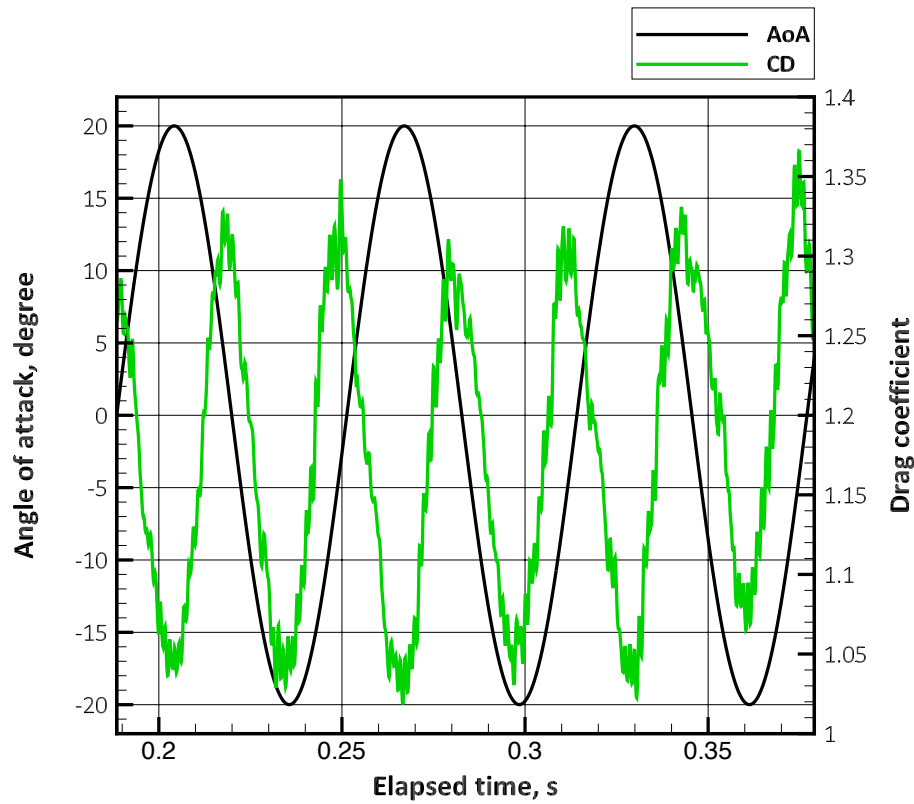
動的解析：マッハ数分布

- 遷音速域のはやぶさ型再突入カプセルに対してLES+強制振動を用いた非定常乱流

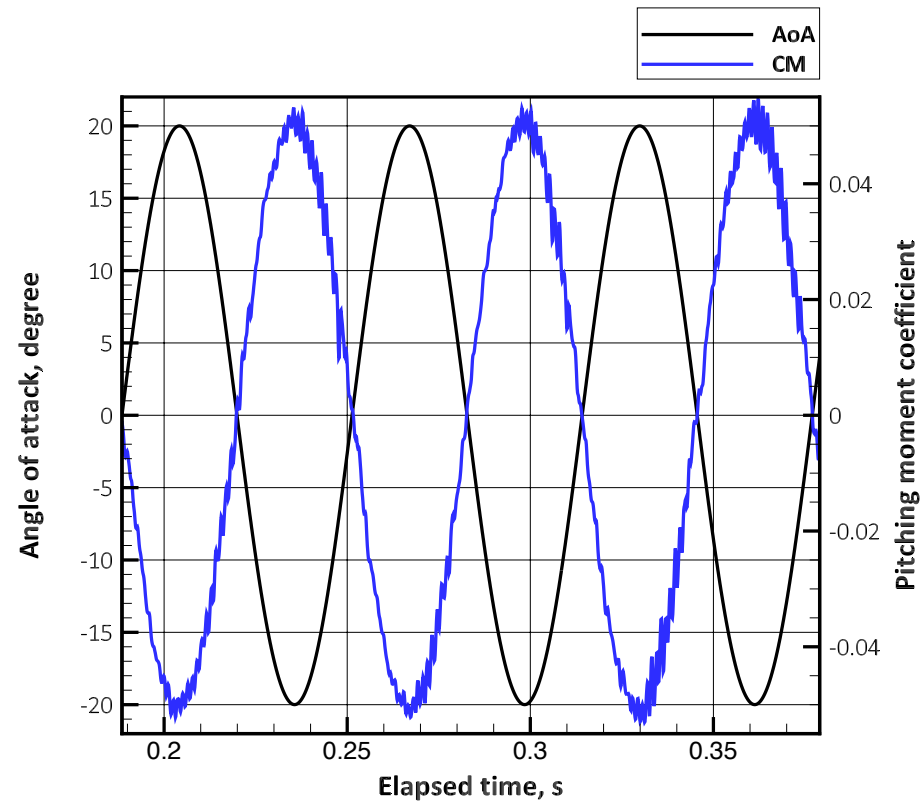


一様流マッハ数1.1におけるはやぶさ型カプセル近傍のマッハ数分布

空力係数



抗力係数

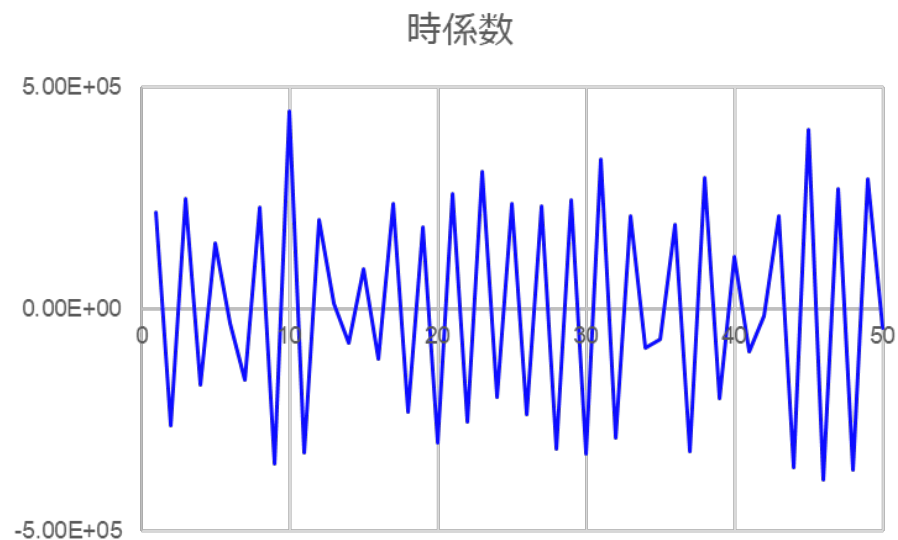
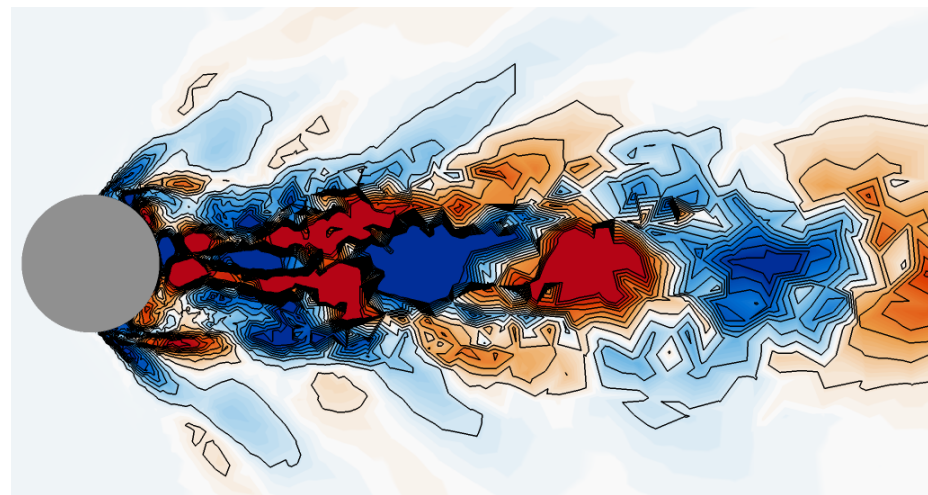


ピッチングモーメント係数

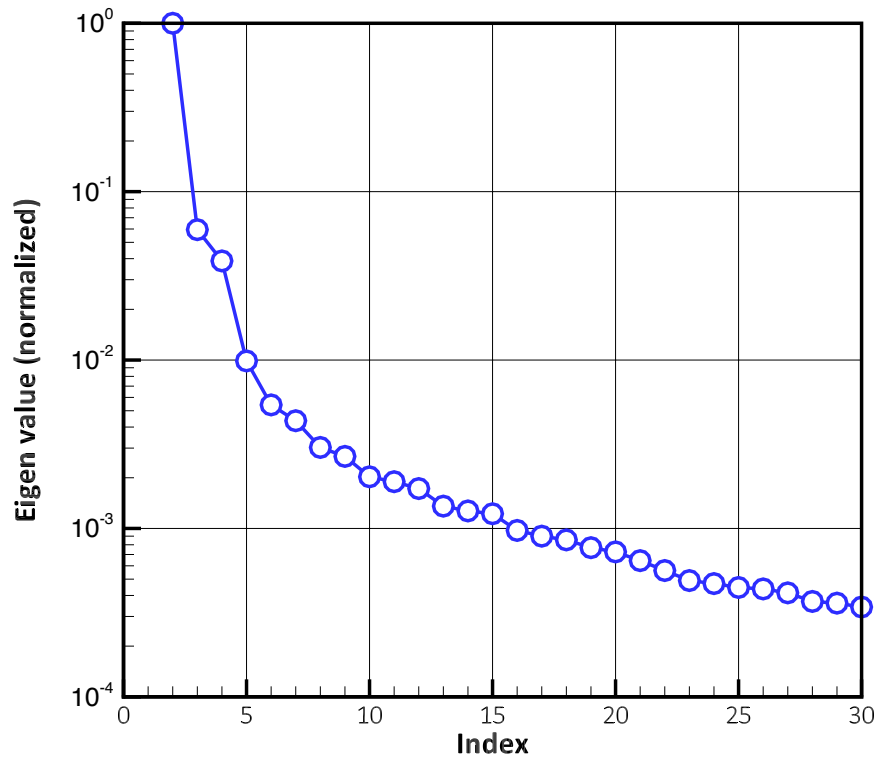
固有直行分解

- 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。

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

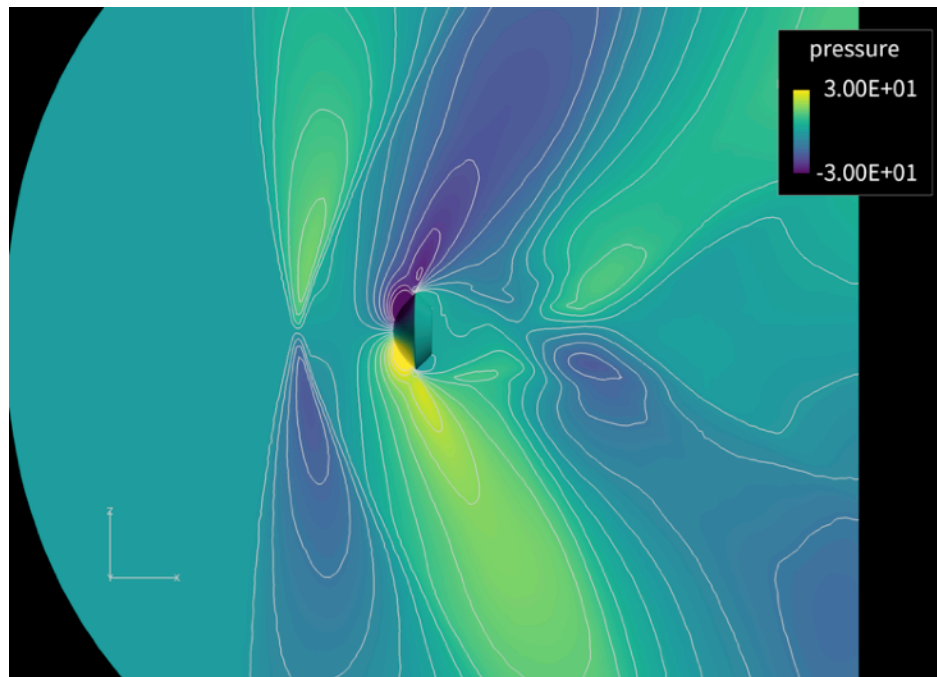


固有値分布

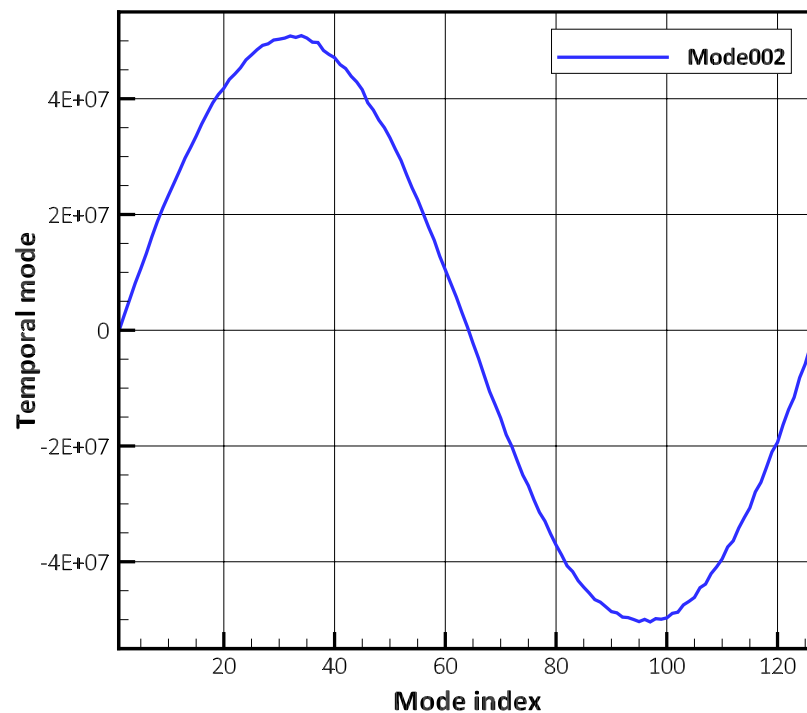


- 全体の流れ場構造としてモード2の寄与がかなりを占める
- モード3,4以降のモードの寄与は小さい。

再構築圧力：モード2



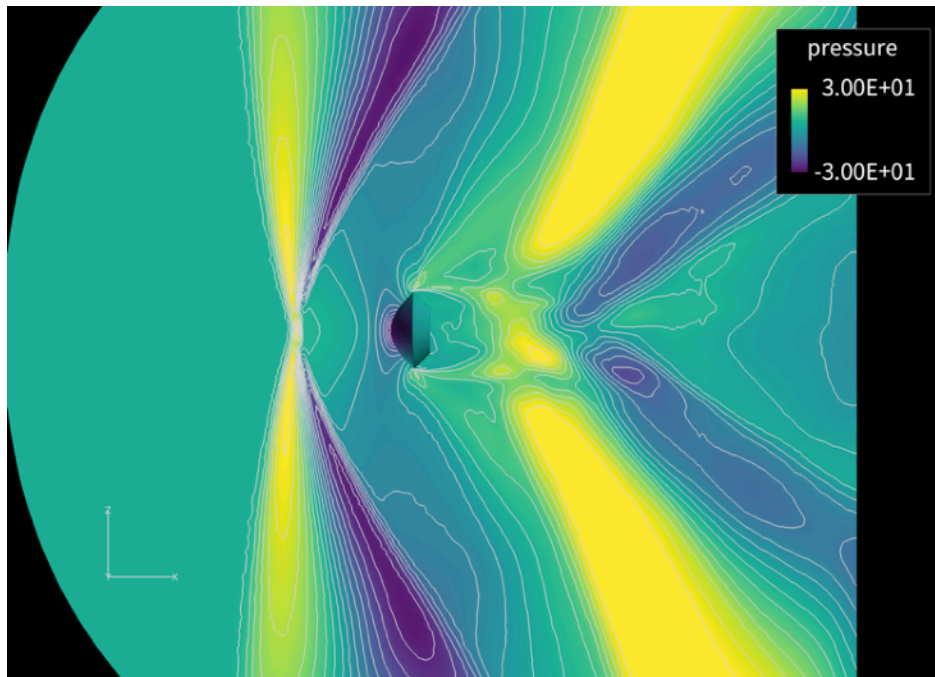
モード基底



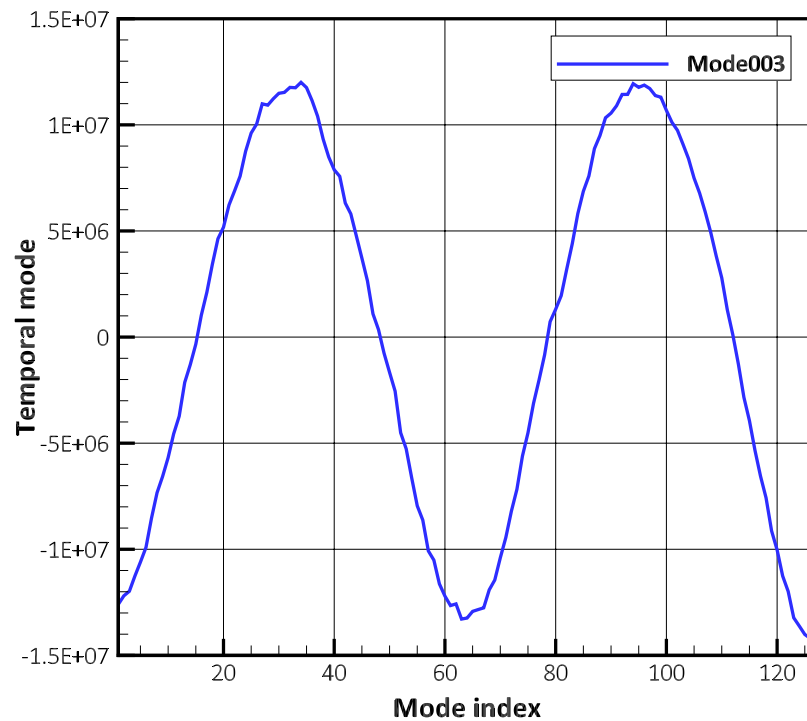
時係数

- ピッチモーメントの前面寄与分

再構築圧力：モード3



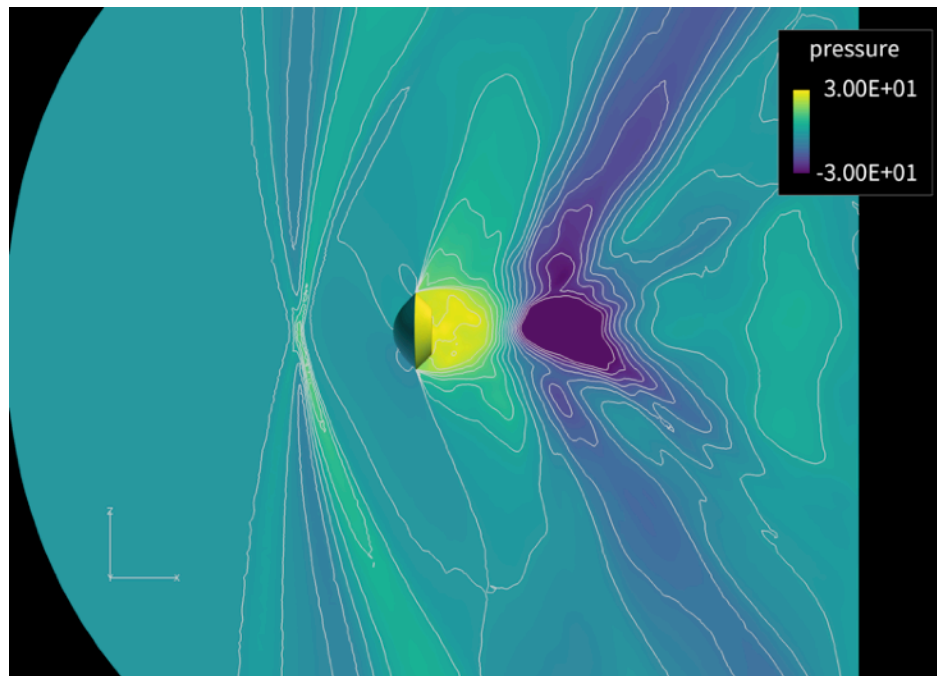
モード基底



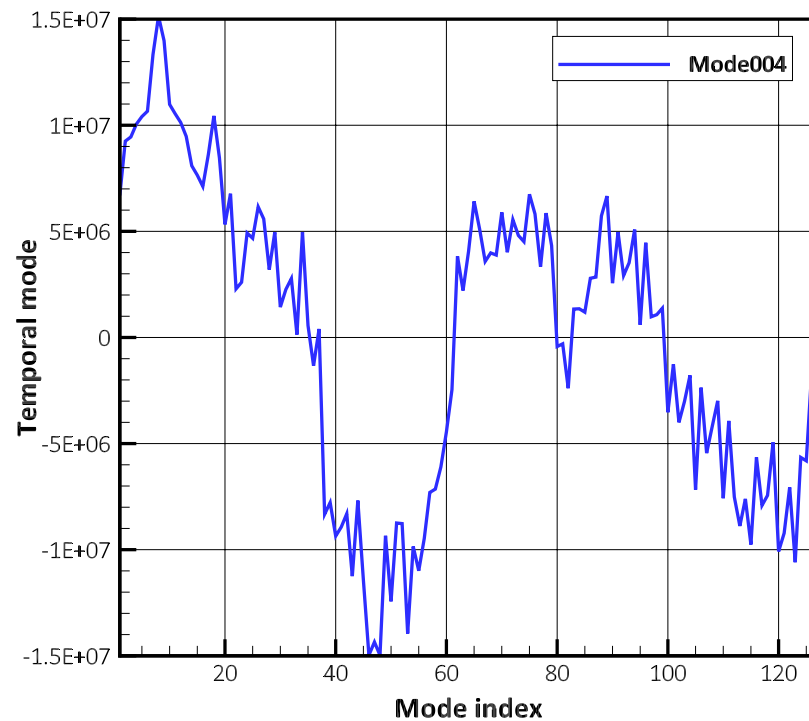
時係数

- 抗力寄与分

再構築圧力：モード4



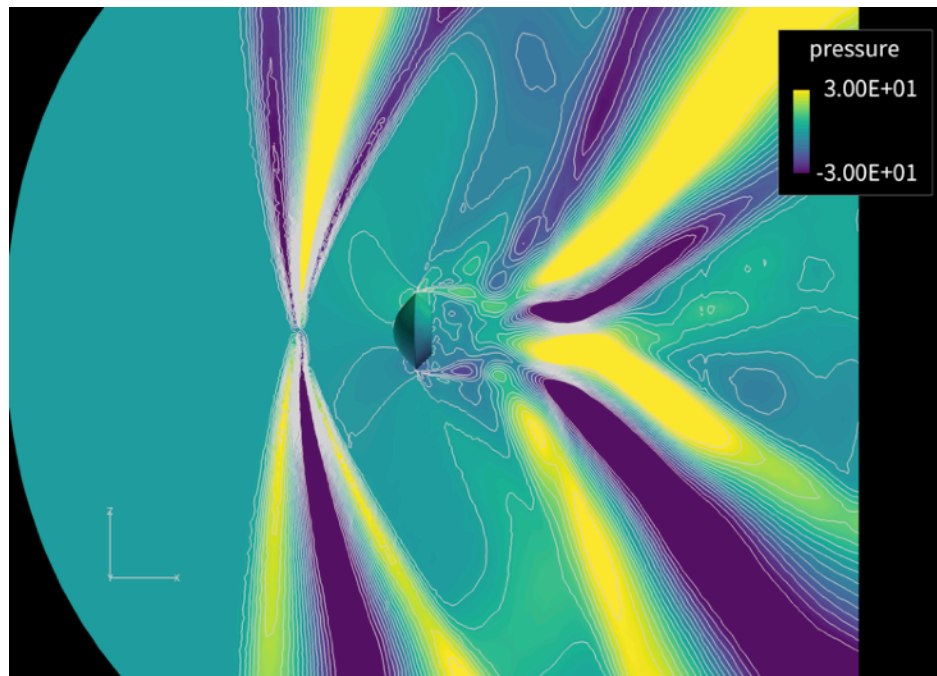
モード基底



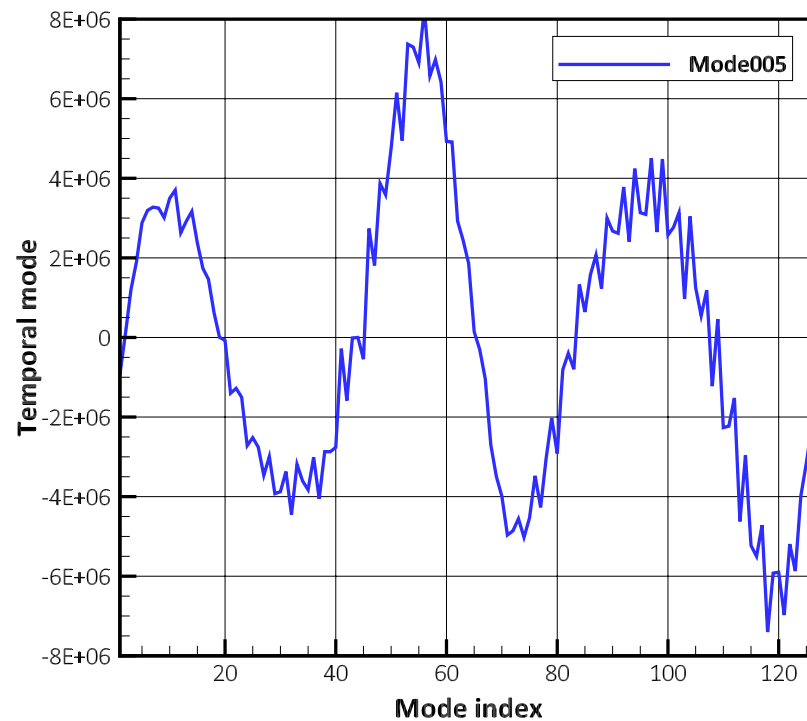
時係数

- 抗力寄与分

再構築圧力：モード5



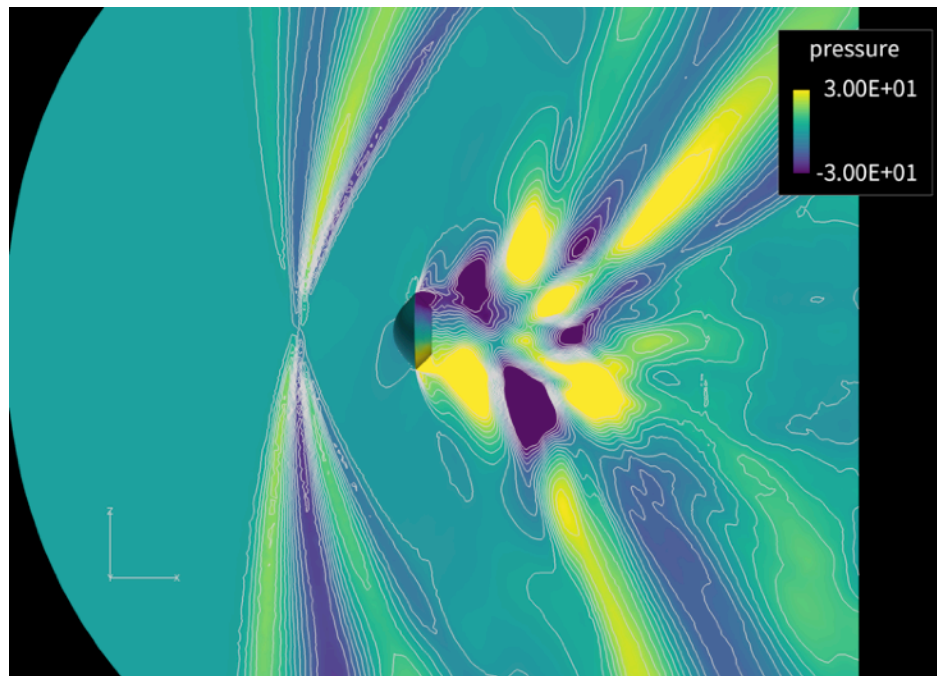
モード基底



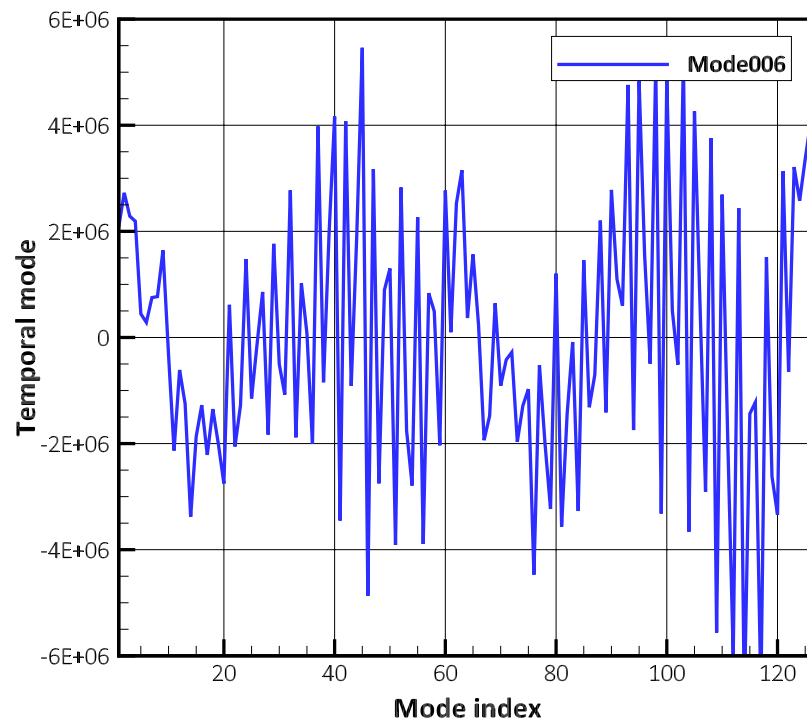
時係数

- ピッチングモーメントの背面寄与分

再構築圧力：モード6



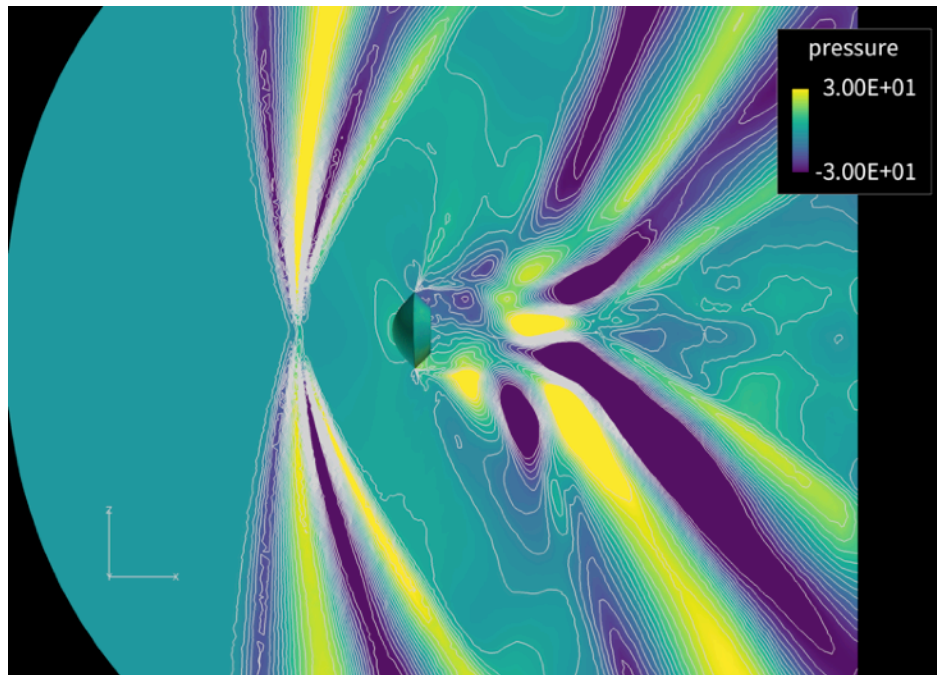
モード基底



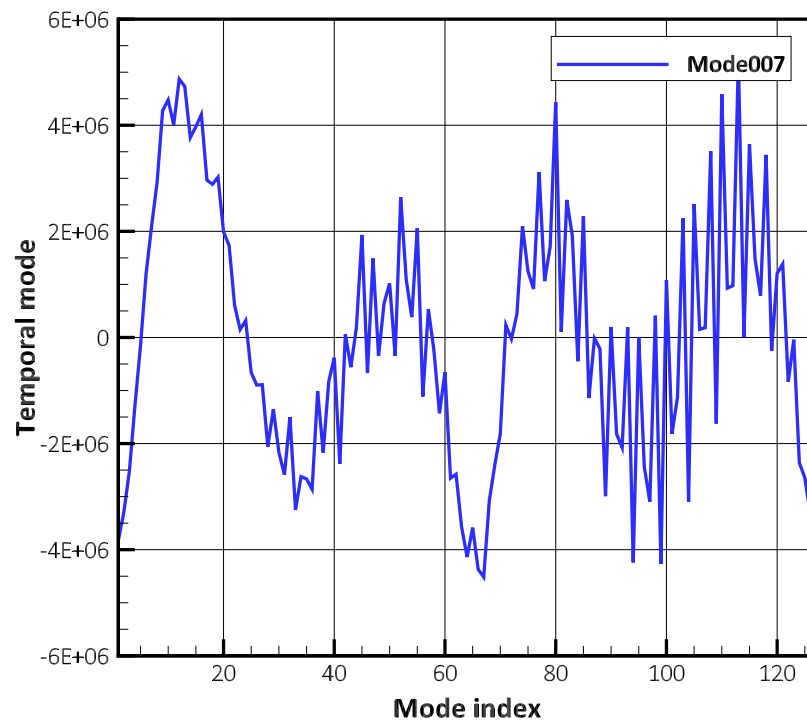
時係数

- ピッチングモーメントの背面寄与分

再構築圧力：モード7



モード基底



時係数

- ピッチングモーメントの背面寄与分

まとめ

- 遷音速域におけるはやぶさ型再突入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。
- ピッチングモーメントはカプセル前面の圧力変動の役割が非常に大きい。姿勢不安定性に大きな影響を及ぼすピッチングモーメント背面寄与分は、機体後流におけるはく離せん断層，膨張波，再圧縮性衝撃波に強く干渉されることが示された。

謝辞

- 本研究は九州大学情報基盤研究開発センターの2020年度(前期) 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。

成果(2020年4月-10月)

- 国内会議発表
- 高橋裕介, "再突入機の空力不安定性シミュレーションについて", 第64回宇宙科学技術講演会, 4F06, 10/27-30, 2020.

