



HOKKAIDO  
UNIVERSITY

# はやぶさ型再突入カプセルの非定常空 力挙動

高橋裕介（北海道大学）

鶴本徹（北海道大学）

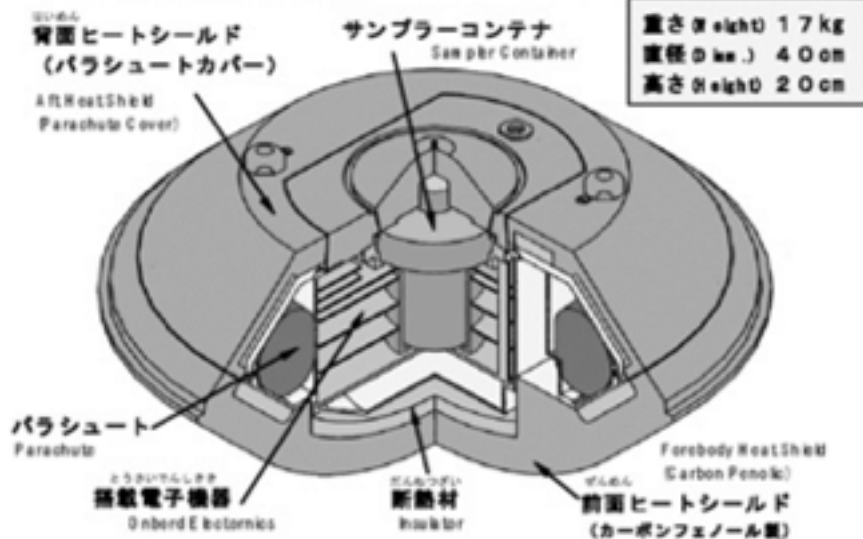
大橋達志（北海道大学）

先駆的科学計算に関するフォーラム2019  
九州大学伊都キャンパス, 福岡

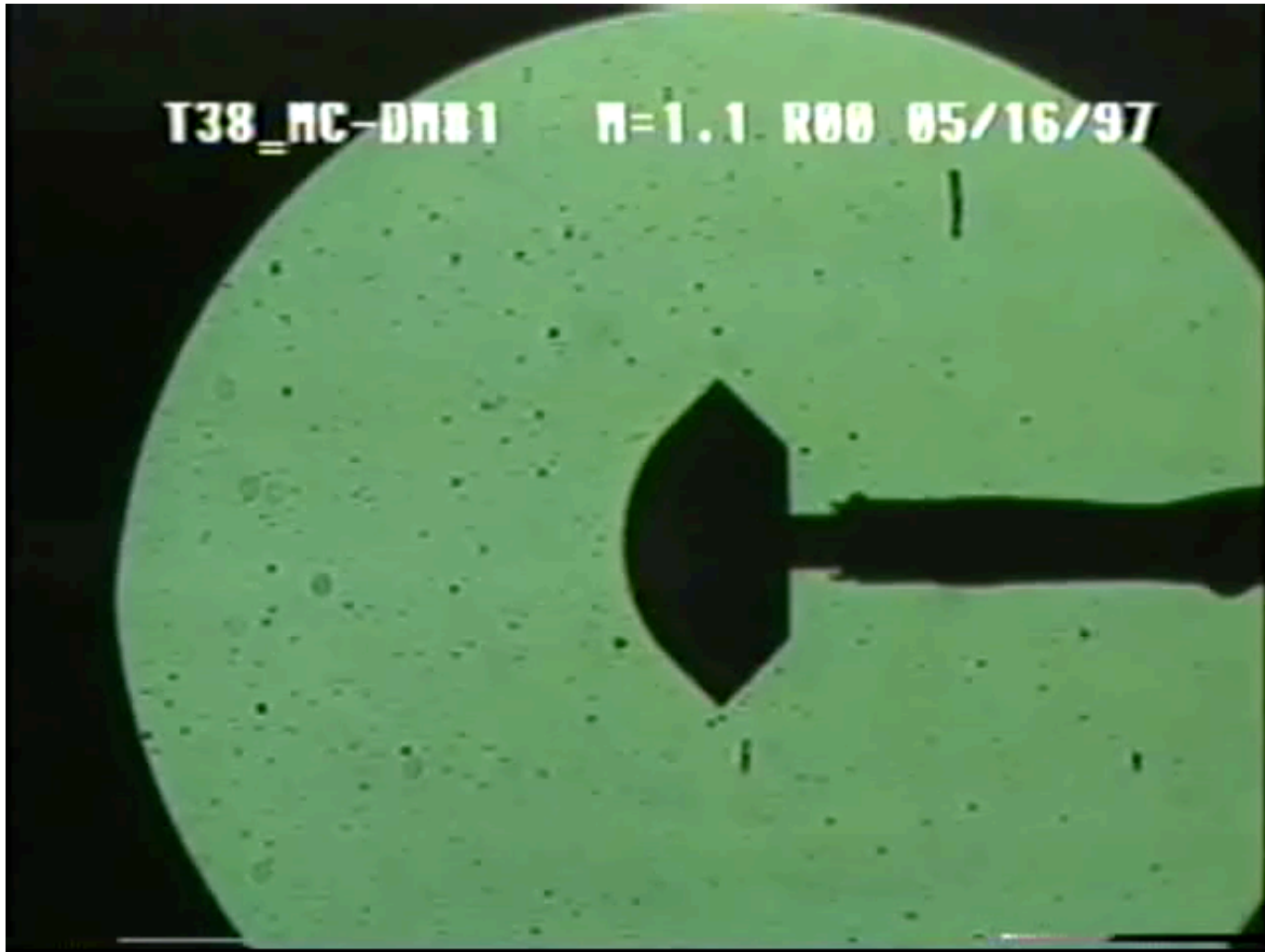
April 26, 2019

# 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, CAESAR
- 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
- 姿勢不安定性は特に遷音速域で観測された



# 動的不安定性？



3

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



HOKKAIDO UNIVERSITY

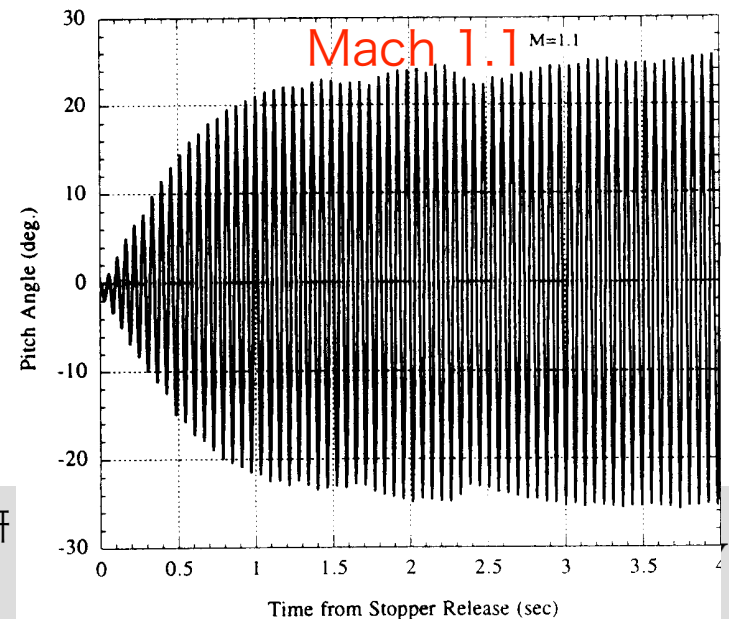
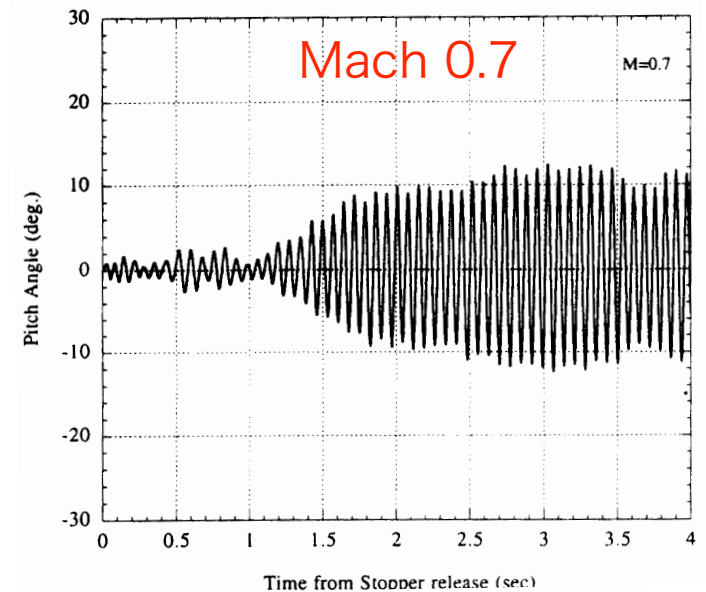
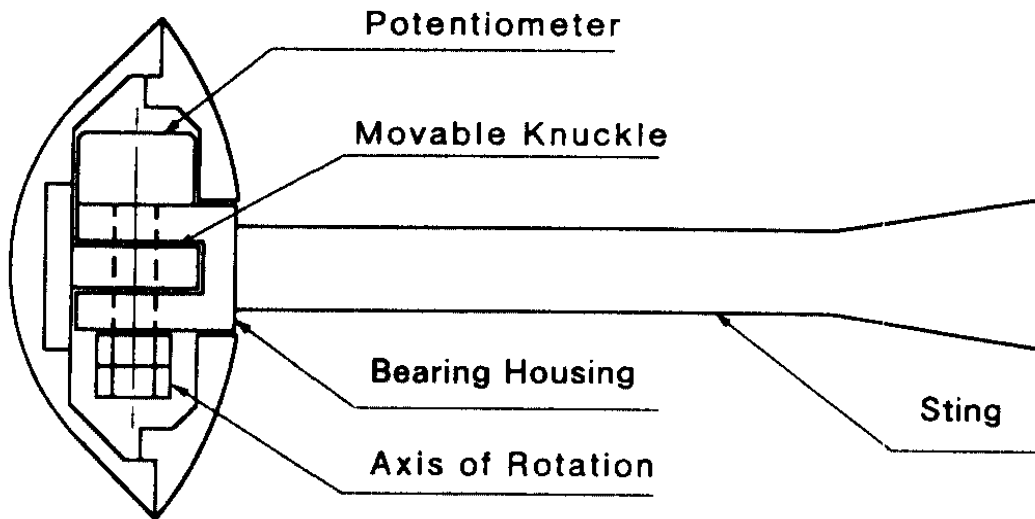
# 再突入機の動的不安定性

- 再突入機は空気力によってその姿勢を維持する
- 静的な姿勢安定を取るのとは難しくない⇔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
- 姿勢不安定性は一樣流マッハ数の影響を受ける。



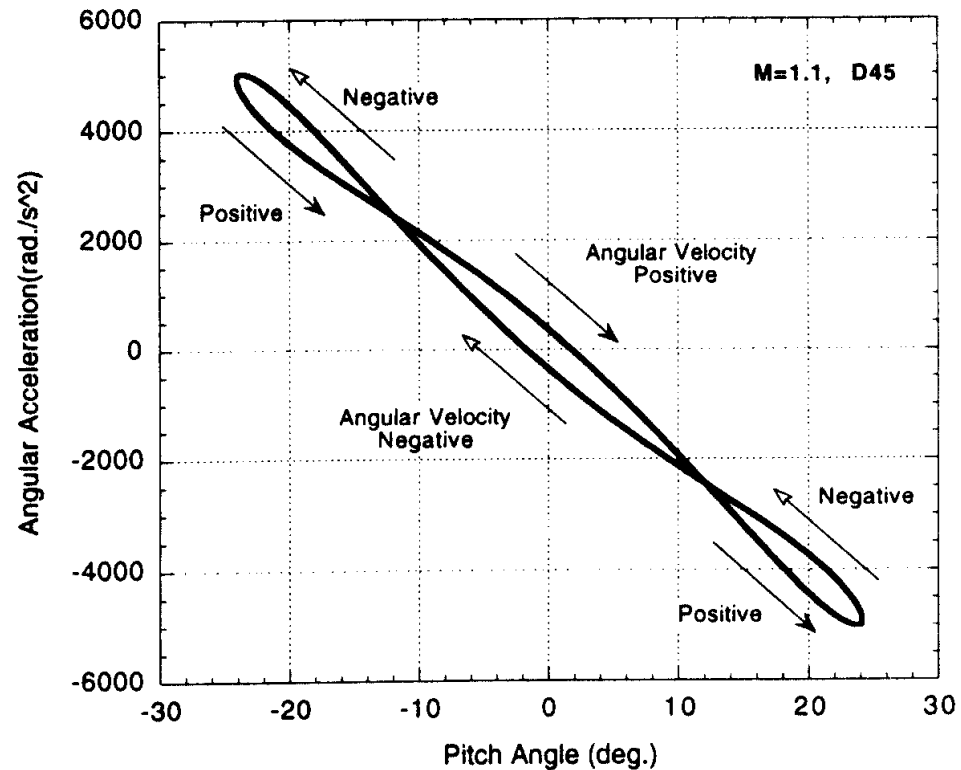
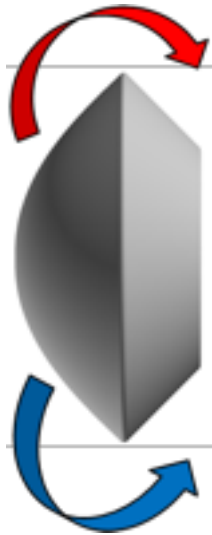
# 過去に行われた研究（数値解析）

- 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



# 動的安定：ピッチングモーメントのヒステリシス

- サイクルが反時計回り：振動は収束方向
- サイクルが時計周り：振動は発散方向

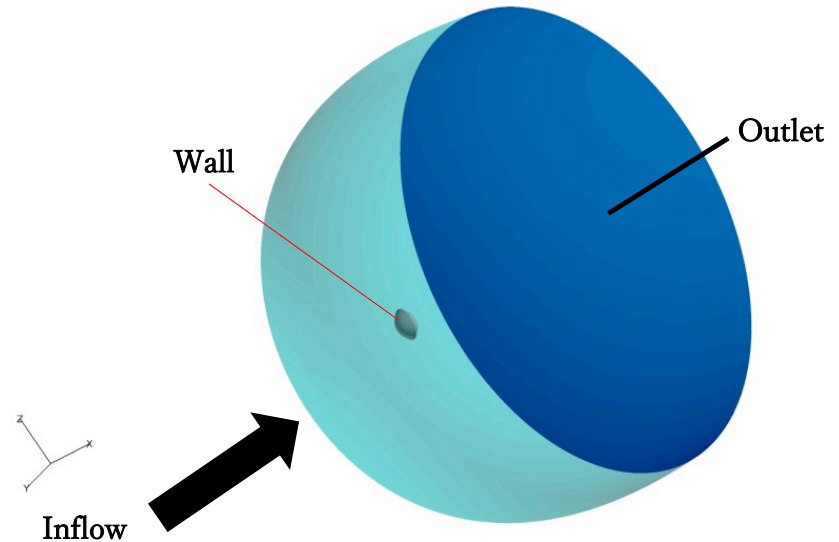


# 研究の目的

- はやぶさ型再突入カプセルを対象にLarge-eddy simulation (LES)と強制振動法を用いた数値解析を行い、流れ場を可視化するとともに姿勢不安定性のメカニズムを調査。
- 遷音速域 (M1.1) の流れ場と亜音速域 (M0.7) の流れ場を対象とし安定性に対する傾向をつかみ、姿勢不安定性のメカニズム解明と低減化につなげる。

# 解析領域・計算格子

- JAXA遷音速風洞を用いた試験環境気流を再現する
- Software: RG-FaSTAR
- 乱流モデル：LES(Standard Smagorinsky model)
- 総格子数：3100万格子点数
- カプセル表面の境界条件：滑りなし、等温壁条件



# 計算条件

- 一様流条件

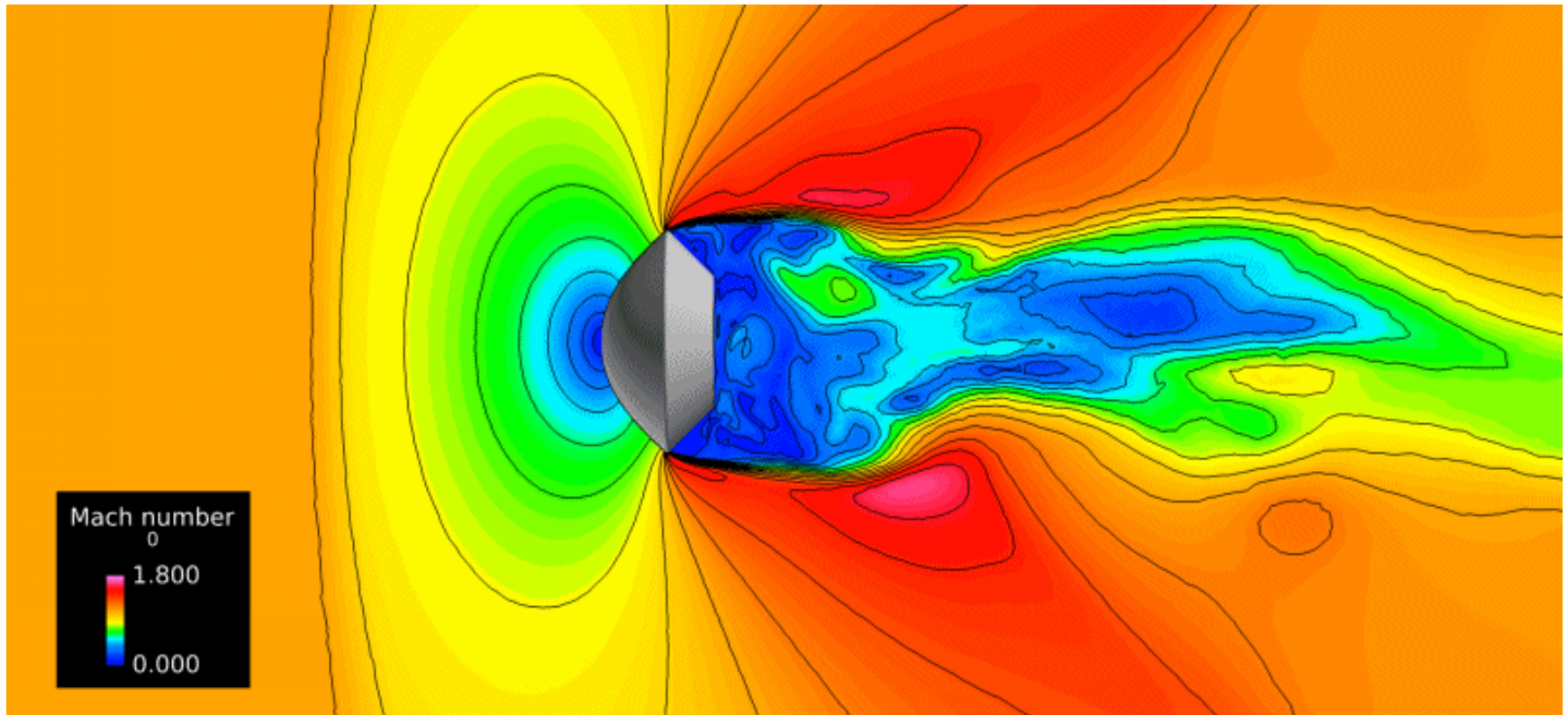
Mach number	1.1	0.7
Temperature, K	243.1	273.1
Pressure, Pa	7.02E+04	1.8081E+05
Density, kg/m <sup>3</sup>	1.013	1.379
Reynolds number	1.3E+06	1.6E+06

- 振動条件

Mach number	1.1	0.7
Frequency, Hz	16	13
Amplitude, degree	20	10
Reduced frequency	0.030	0.035

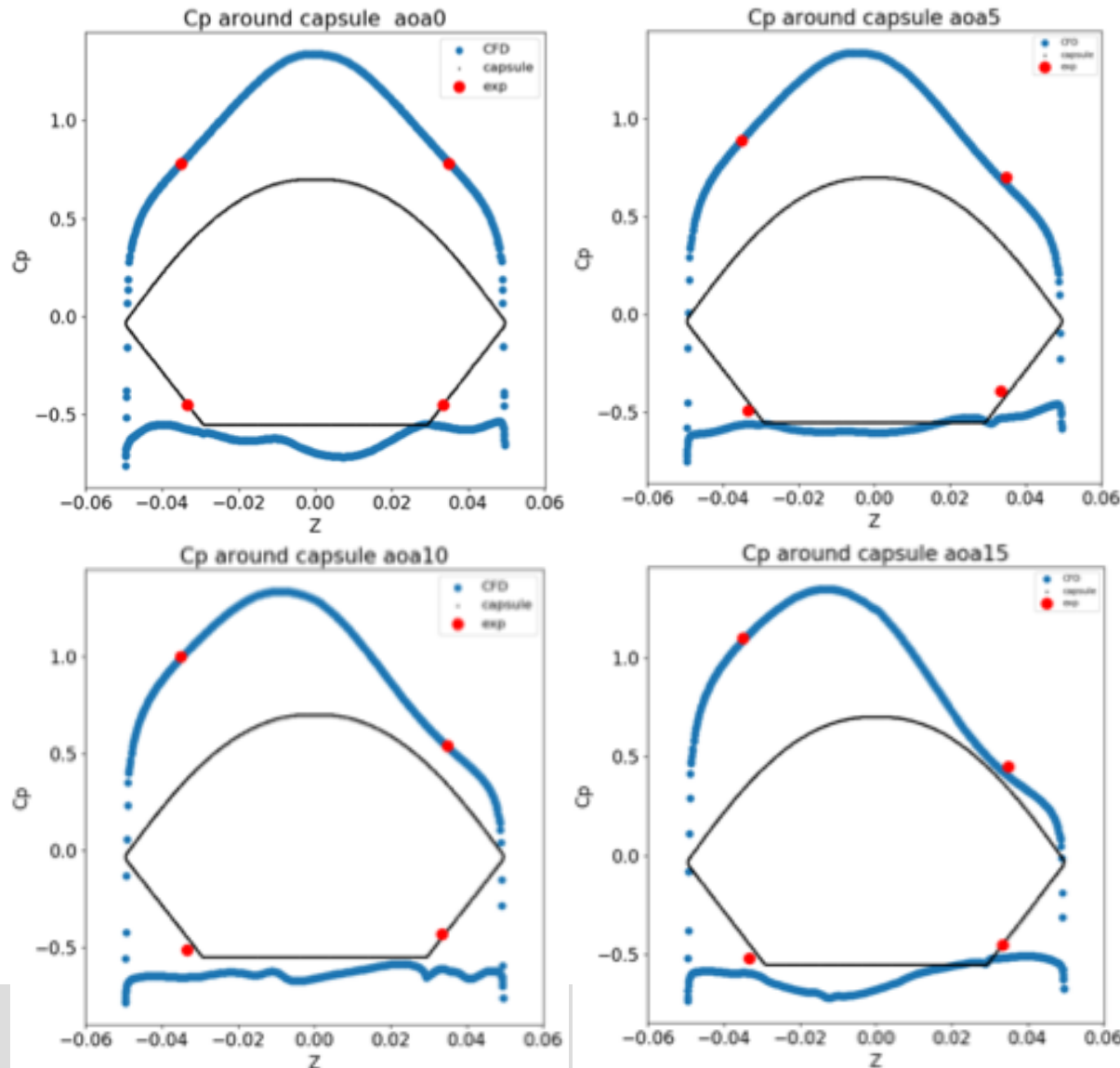
# 静的解析：マッハ数分布

- 遷音速域のはやぶさ型再突入カプセルに対して乱流モデルLarge eddy simulationを用いた非定常乱流予測研究



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

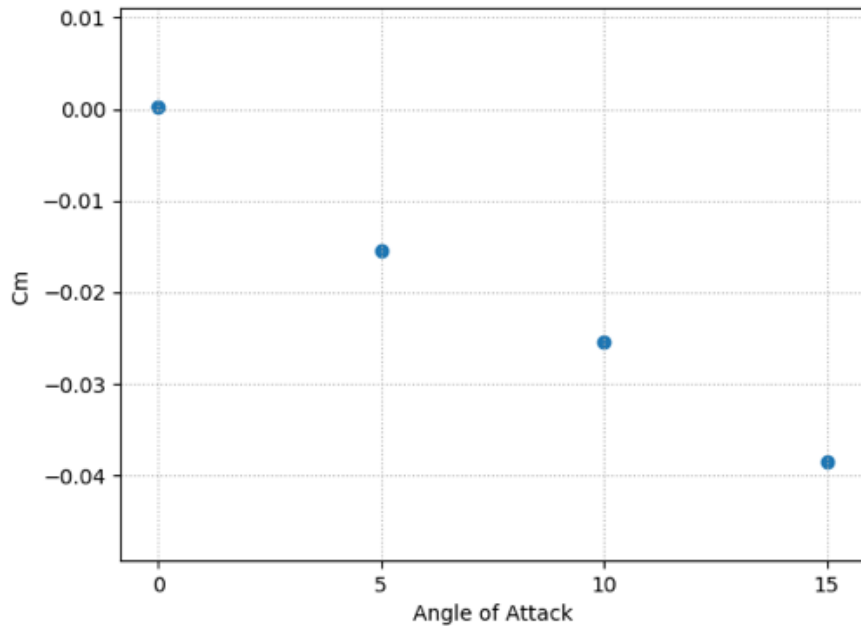
# 静的解析：実験結果との比較（圧力分布）



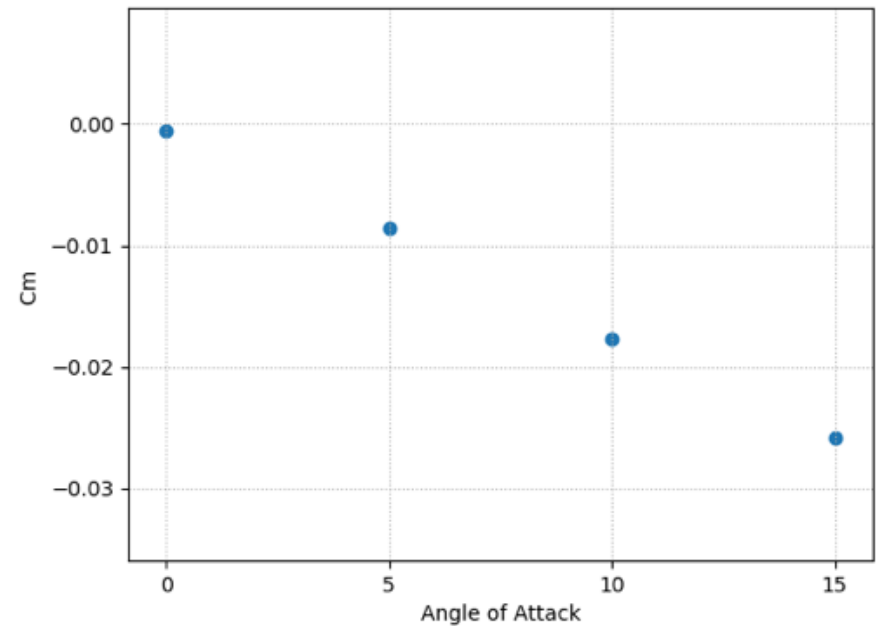
- 各迎角における表面圧力係数の実験と計算結果の比較( $M=1.1$ )
- 本解析モデルは圧力分布をよく再現する



# 静的解析：ピッチングモーメント



マッハ数1.1

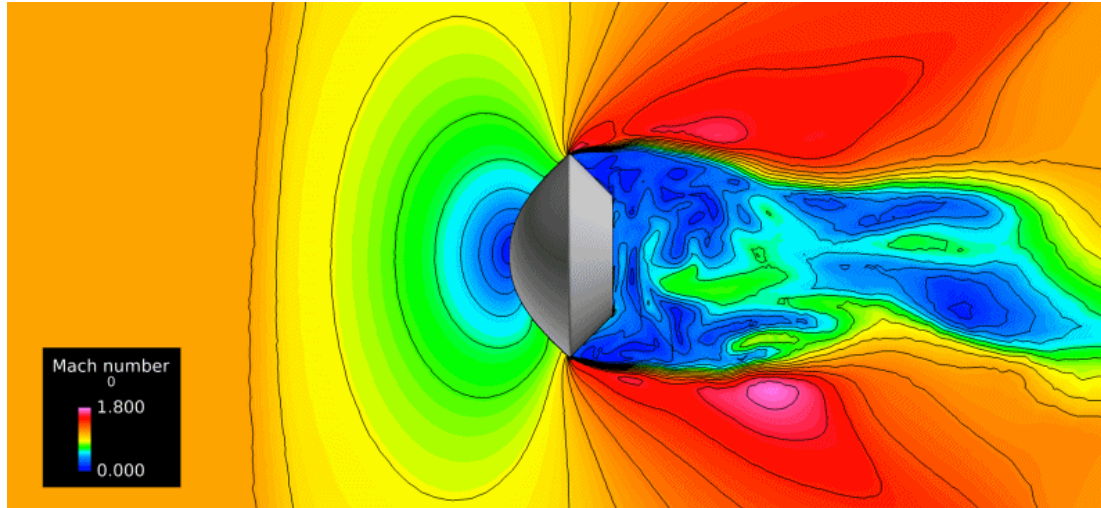


マッハ数0.7

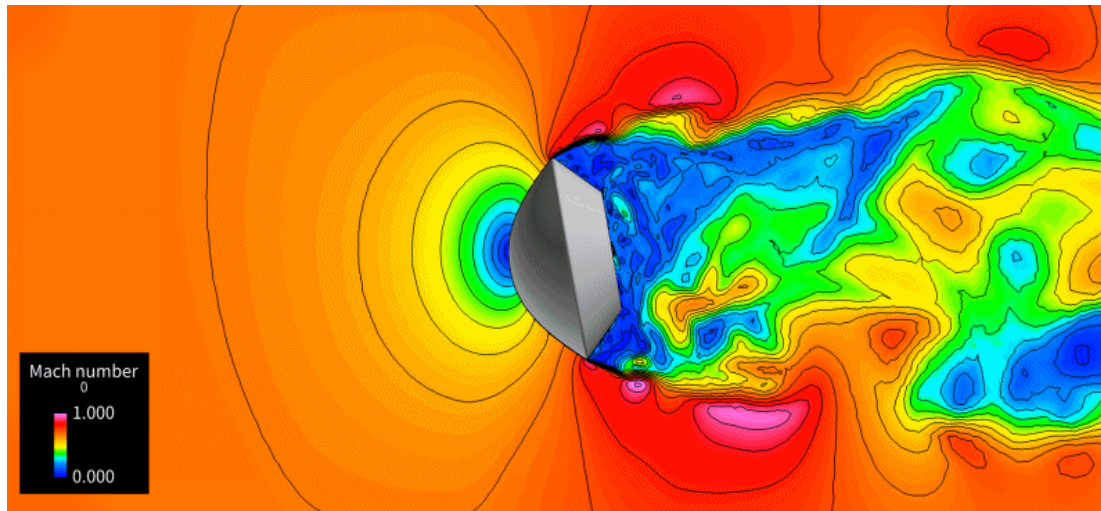
- 一様流マッハ数0.7, 1.1の各迎角におけるピッチングモーメント→静的に姿勢安定であることを示す

# 動的解析：マッハ数分布

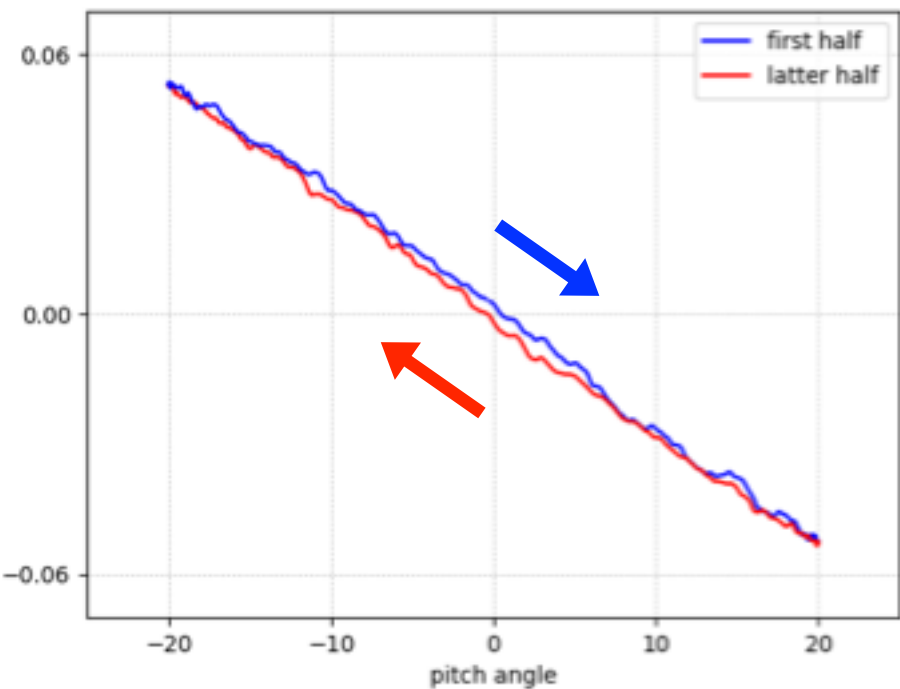
マッハ数1.1



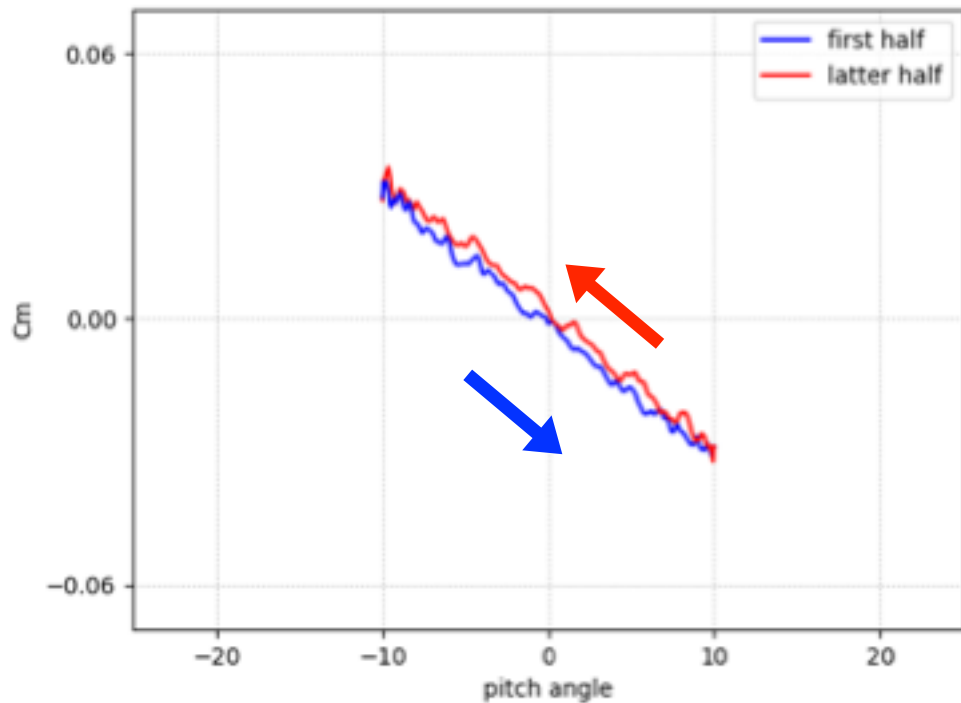
マッハ数0.7



# 動的解析：ピッチングモーメント曲線



マッハ数1.1

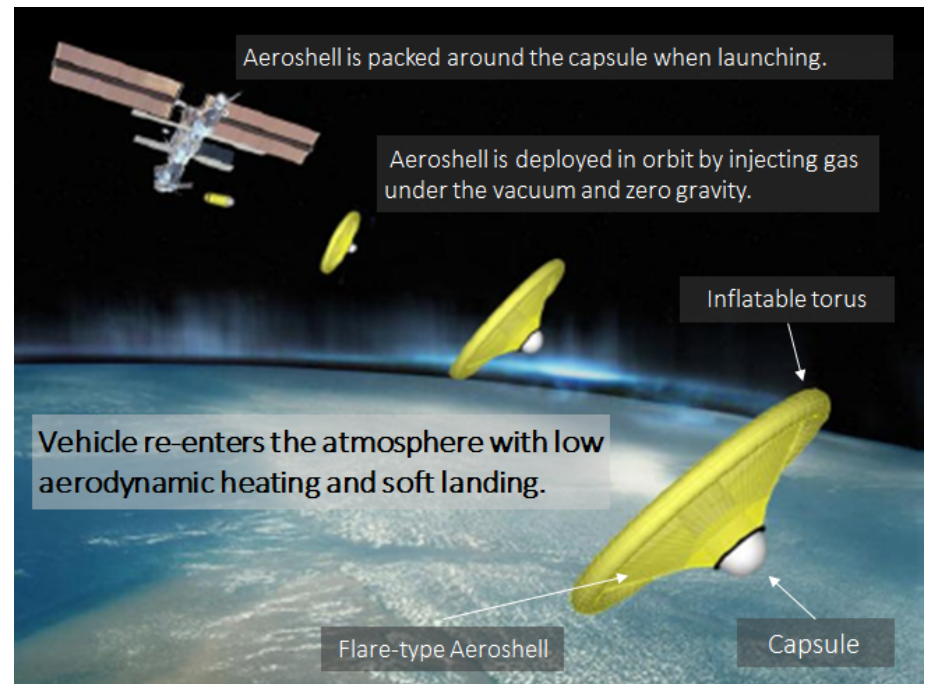
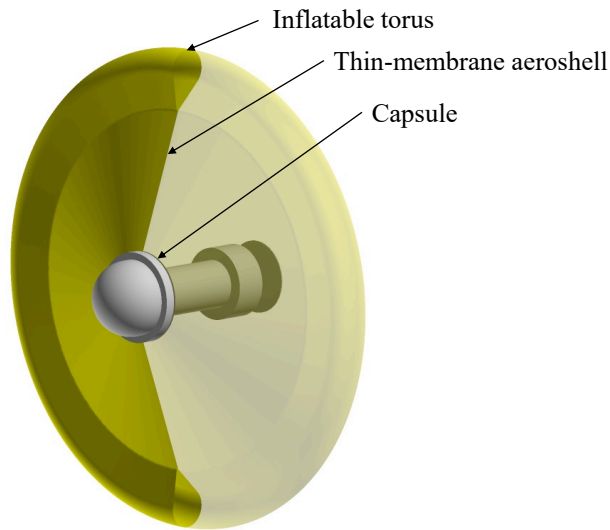


マッハ数0.7

- 遷音速領域において動的に不安定
- 亜音速領域において動的に安定であることが確認される

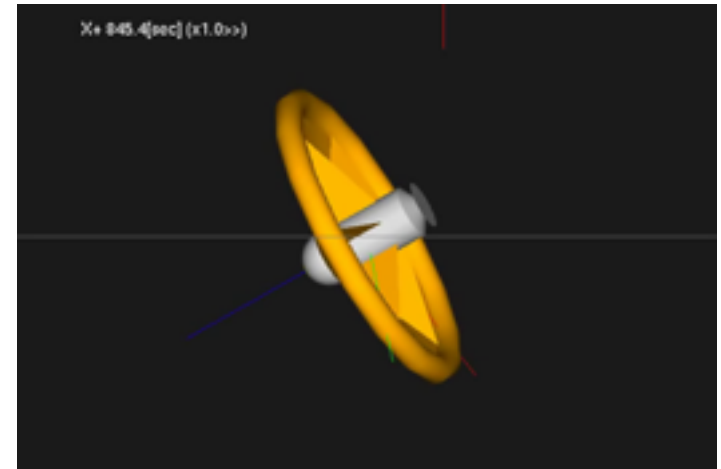
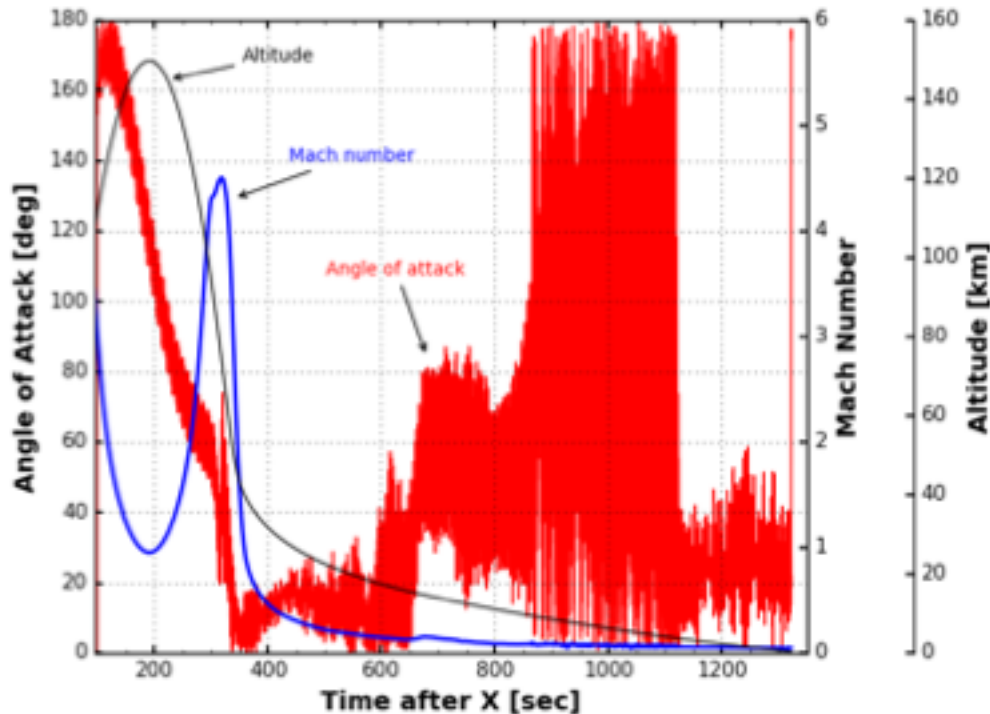
# 異なる再突入機ではどうなるか？

- 柔軟構造再突入機
- 大面積と軽量であり、一般的な剛体再突入カプセルに比べて、高高度での効率的な空力減速が可能
- 空力加熱の低減・回避，通信ブラックアウトの低減，パラシュートやフロートが不要



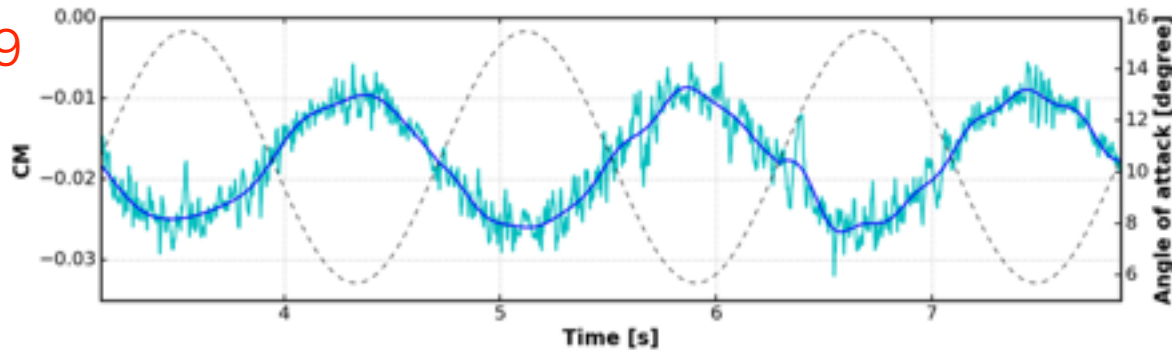
# フライト試験によって確認された不安定性

- 2012年にJAXAの観測ロケットS-310を使用した柔軟構造再突入機 SMAACの再突入飛行実験が行われた
- 亜音速領域において動的不安定現象が確認された

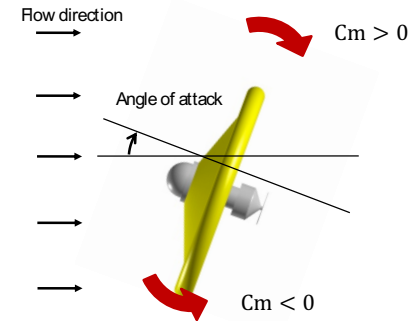


# ピッチングモーメントの時間履歴

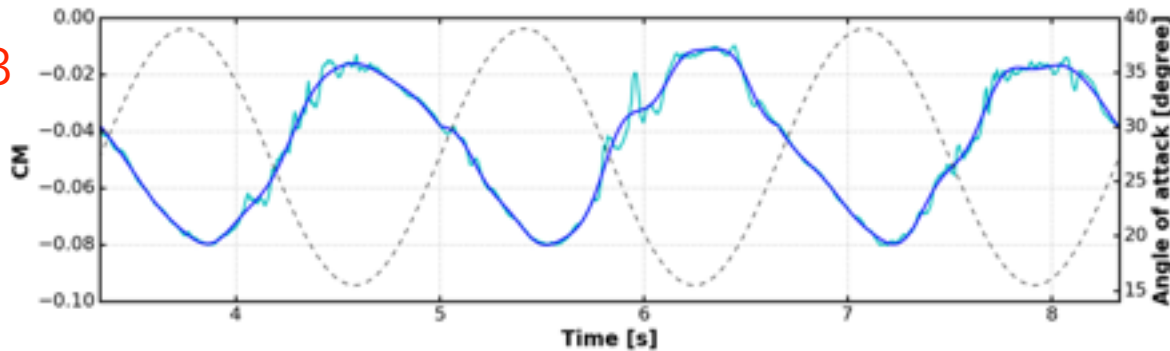
M0.9



$$C_M = \frac{M}{0.5\rho_{\infty}U_{\infty}^2Sl}$$



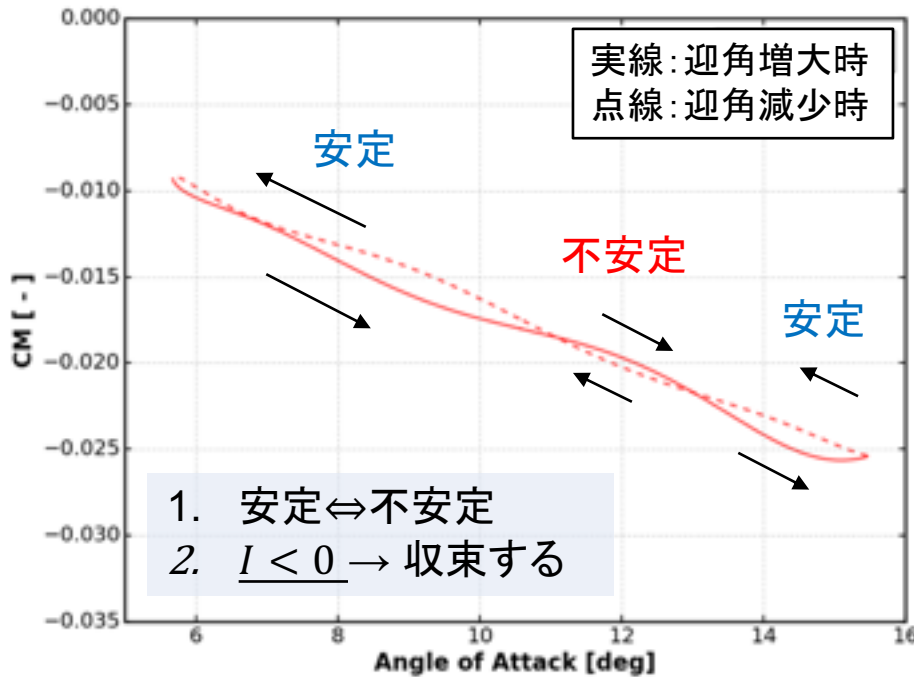
M0.13



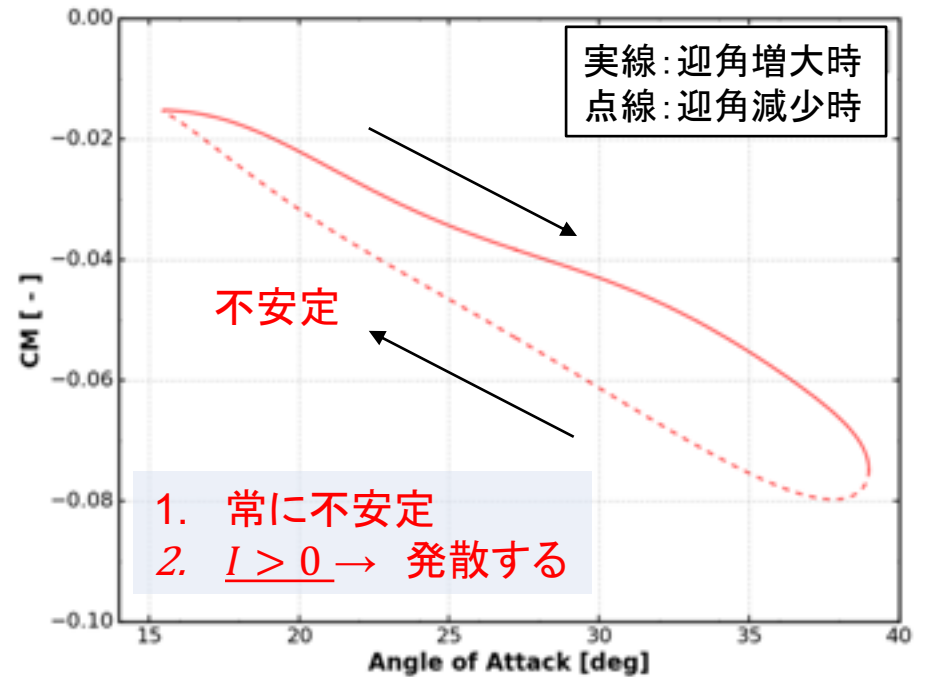
- M0.9 : 迎角変化に対して即座にモーメントが追従している
- M0.13 : CMにわずかな位相遅れが見られる → 不安定な状態？

# ピッチングモーメント曲線

- 左回り：正のダンピング = 安定
- 右回り：負のダンピング = 不安定

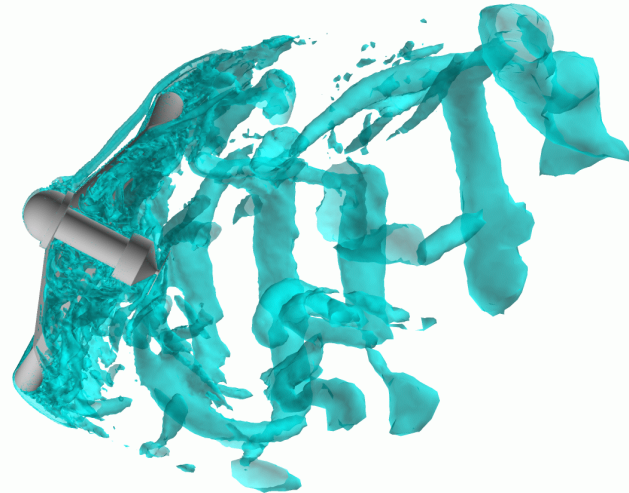
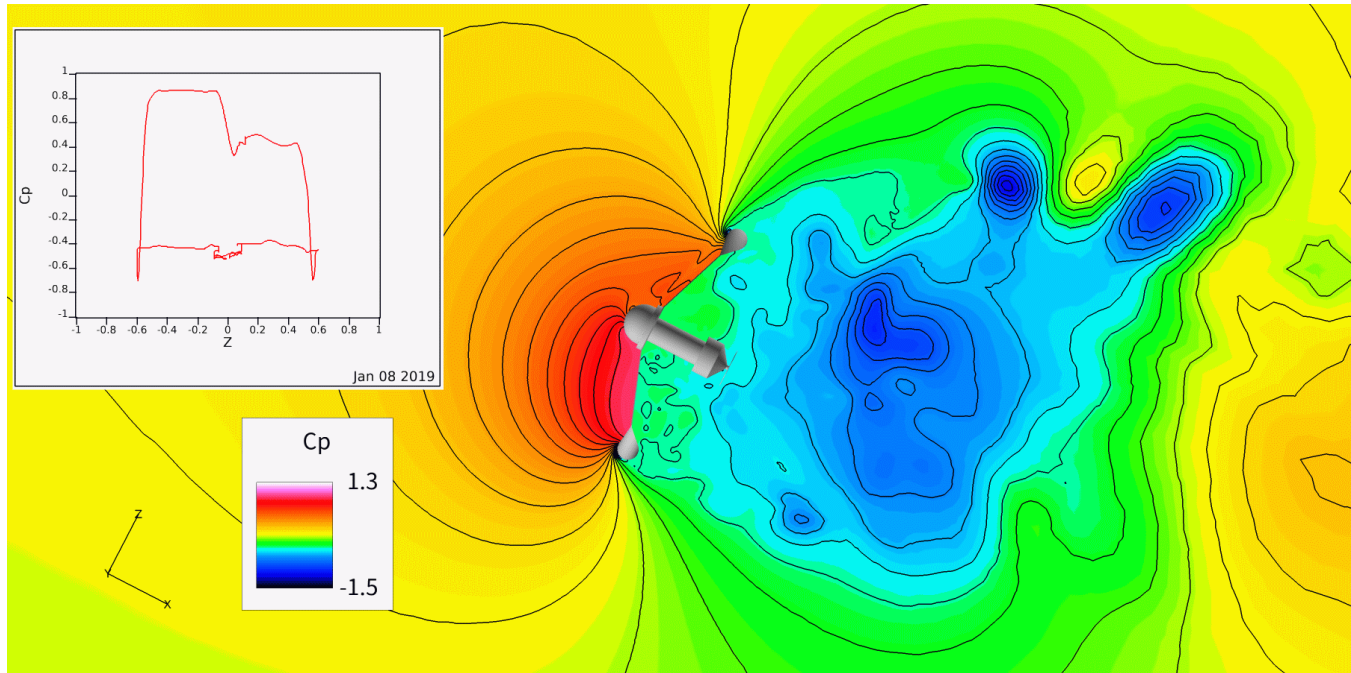


M0.9



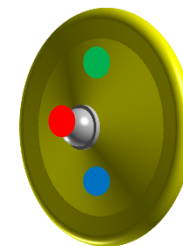
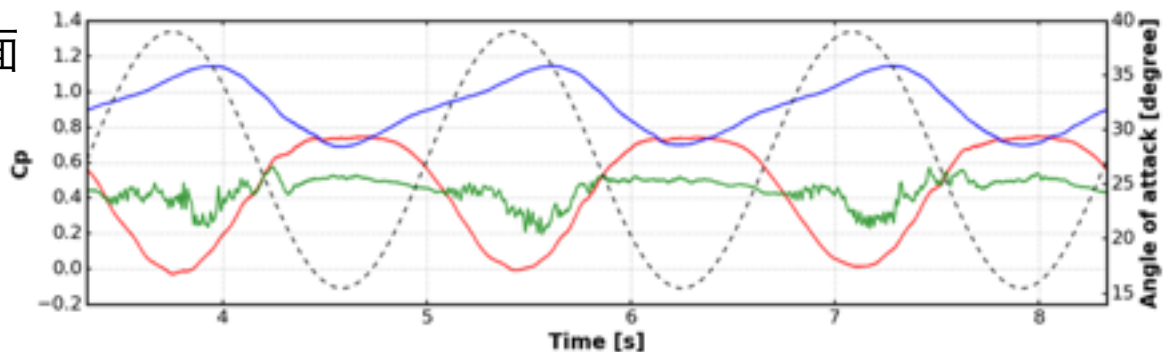
M0.13

# 流れ場の様子(MO.13)

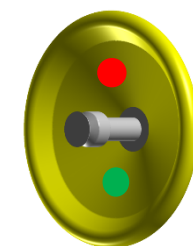
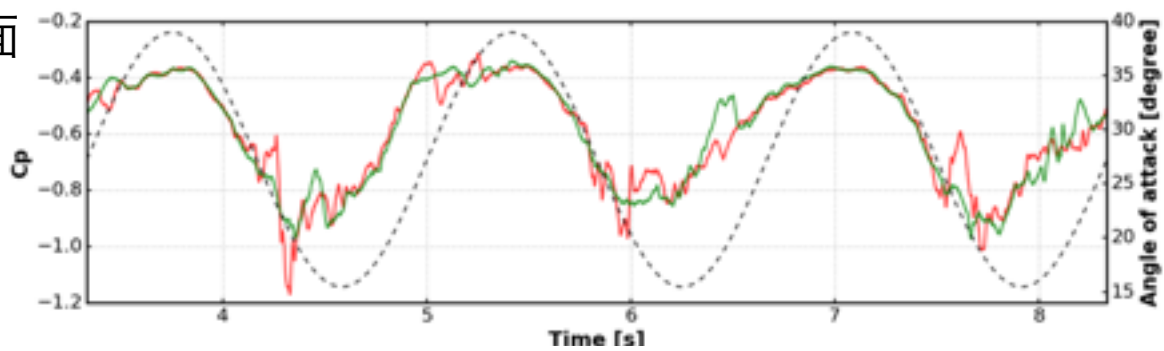


# 圧カプロファイル(MO.13)

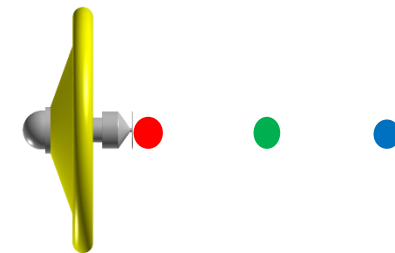
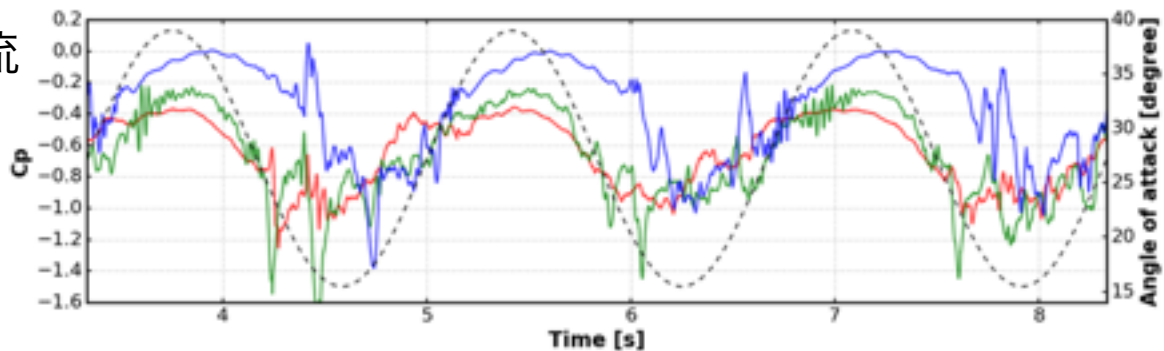
前面



背面



後流



# まとめ

- Large-eddy simulationと強制振動法を用いた数値解析によって、はやぶさ再突入カプセルと柔軟構造再突入機SMAACの動的不安定性を調べた。
- はやぶさ型再突入カプセルについては遷音速領域での不安定、亜音速領域での安定を再現した。これは過去の実験結果の傾向と同じである。
- 柔軟構造再突入機についてフライト環境を再現し、亜音速領域での不安定現象を詳細に再現、そのメカニズムの一部を明らかにした。
- 数値解析を通して得られた非定常データはサイズが大きいものでそのままでは分析が難しい。今後は不安定性を生み出す流体構造を適切なツールを用いて抽出を行い、メカニズムの解明、さらには不安定性低減化につなげる。

# 謝辞

- 本解析は九州大学情報基盤研究開発センターの平成29/30年度先端的計算科学研究プロジェクトの支援を受けて行われた。
- 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

- 査読付き論文
- Tatsushi Ohashi, Yusuke Takahashi, Hiroshi Terashima, and Nobuyuki Oshima, “Aerodynamic instability of flare-type membrane inflatable vehicle in suborbital reentry demonstration”, Journal of Fluid Science and Technology, The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 13, No. 3. 2018, JFST0020-JFST0020. DOI: 10.1299/jfst.2018jfst0020.
- 国際会議発表
- Toru Trusumoto, Yusuke Takahashi, Hiroshi Terashimam and Nobuyuki Oshima, “Numerical Analysis of Aerodynamic Instability for HAYABUSA Type Reentry Capsule”, 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences (EUCASS2019), Madrid, July 1-4, 2019(発表予定)

# 成果

- 国内会議発表
- 大橋達志, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行, ”観測ロケットを用いた再突入試験における柔軟構造体の空力安定性に関する研究”, 日本機械学会流体力学部門講演会, OS9-12, 室蘭, 11/29-30, 2018.
- 鶴本徹, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行, ”はやぶさ型再突入カプセルの空力安定性に関する数値解析”, 日本機械学会流体力学部門講演会, OS9-13, 室蘭, 11/29-30, 2018.
- 鶴本徹, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行, ”はやぶさ型再突入カプセルの空力安定性に関する数値解析”, 第62回宇宙科学連合講演会, 2L15, 久留米市, 平成30年10月24-26日.
- 鶴本徹, 高橋裕介, 寺島洋史, 大島伸行, ”遷音速域におけるはやぶさ型再突入カプセルの空力解析”, 第50回流体力学講演会／第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 3C04, 宮崎市, 平成30年6月4-5日.