

極超音速境界層の数値シミュレーション

報告書番号：R24JEG60100

利用分野：研究開発

URL：https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2024/27079/

● 責任者

沖田耕一，宇宙戦略基金事業部

● 問い合わせ先

八柳秀門(yatrsuyanagi.shuto@jaxa.jp)

● メンバ

八柳 秀門

● 事業概要

鈍頭物体の境界層遷移は大気圏再突入カプセルの Thermal Protection System (TPS) 設計において極めて重要な現象である。乱流境界層の熱伝達率は層流境界層の数倍に達し、場合によっては、よどみ点熱流束を超える可能性がある。従来の TPS 設計は飛行経路全域で乱流境界層を仮定した極めて保守的なものであり、乱流熱流束の予測正確度が向上しない限り、過剰な TPS 重量を許容せざるを得ない状況にある。風洞試験や数値計算により乱流熱流束の予測手法が確立できれば、機体重量の多くを占める TPS 設計マージンを削減できる可能性がある。本事業の目的は、大気圏再突入機の乱流熱流束について定量予測が可能な数値計算手法を確立し、TPS 軽量化に資する知見を得ることである。

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

乱流遷移現象は気流擾乱の成長過程と深く関わっており、その数値計算には高い時空間解像度が求められる。高次精度計算スキームはもとより、JSS3 のような大規模計算リソースの利用が本事業には必要不可欠である。

● 今年度の成果

Apollo Command Module (CM) モデルを対象として孤立粗さ要素が誘起する乱流遷移の数値シミュレーションを実施した (図 1)。数値計算の妥当性を確認するため、密度変動に関する実験データとの比較を行った。

図 2 に孤立粗さの後流における 3 次元渦構造の瞬時値を示す。Q 値等値面 ($Q = 10^{-4}$) は温度で色付けされている。流れ場には多数のヘアピン渦構造が存在し、それらは孤立粗さの後流で急速に発達することが明らかとなった。

図 3 は Apollo CM モデル中流位置 $((x,y,z)=(0.001,0,0))$ で得られた密度変動スペクトルを示して

いる．各 Power Spectru Density (PSD) はそれぞれ 10kHz における PSD 値で正規化されている．異なる 3 つの計算格子において格子収束は得られなかったものの，格子解像度を上げていくにつれて実験値に漸近する傾向が確認された．

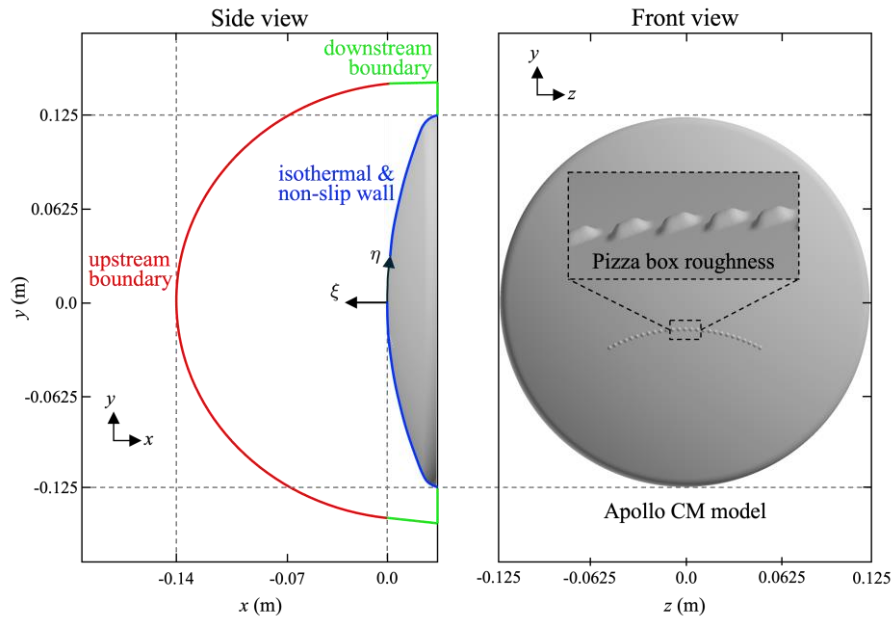


図 1: 計算領域の側面図と正面図.

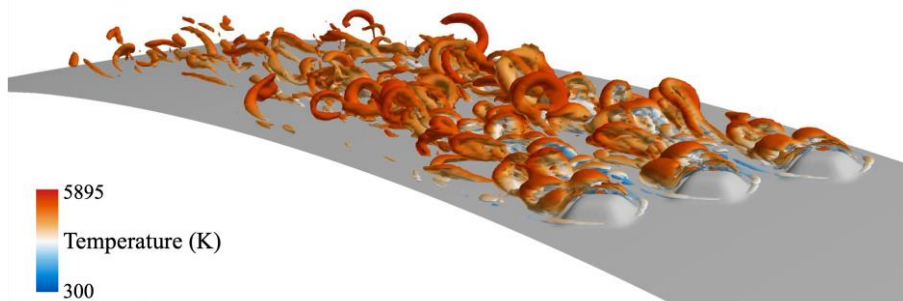


図 2: 9.2MJ/kg 条件における Q 値等温面 ($Q = 10^{-4}$) の瞬時値.

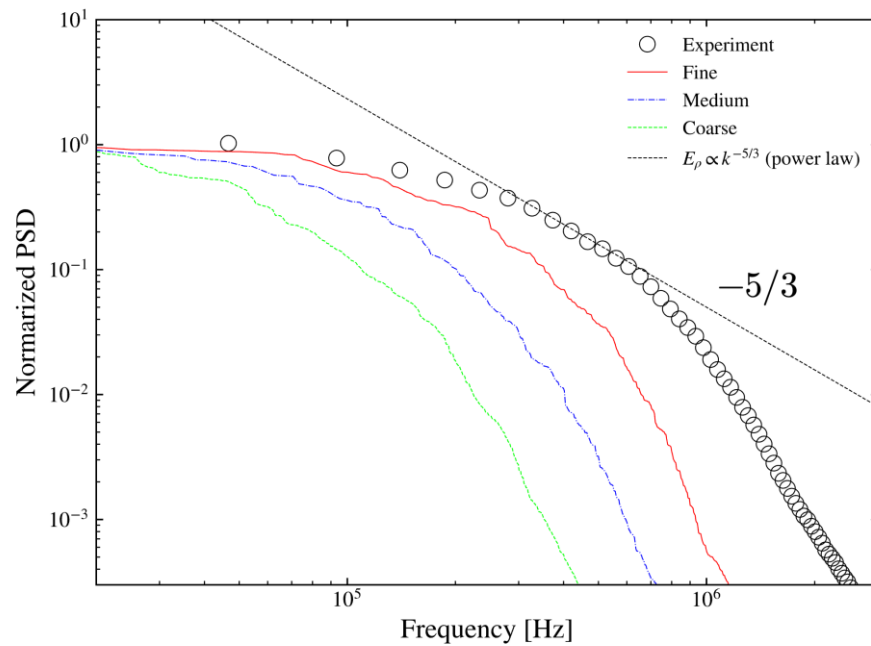


図 3: 粗さ要素後流における密度変動のパワースペクトル密度.

● 成果の公表

-査読付き論文

Yatsuyanagi, S. et al., “Direct Numerical Simulation and Optical Measurement of Disturbance Growth over a Blunt Body,” AIAA paper 2025-1113, 2025.

-口頭発表

1) 八柳秀門, 丹野英幸, 「高温極超音速流中における鈍頭物体上の擾乱成長に関する直接数値計算」, 第 56 回流体力学講演会／第 42 回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム, 鹿児島, (2024).

2) S. Yatsuyanagi and H. Tanno, “Numerical Investigation of Disturbance Growth on a Blunt Body in High Enthalpy Hypersonic Flow,” Twelfth International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICCFD12-2024-A00170, Kobe, (2024).

3) S. Yatsuyanagi and H. Tanno, “Direct Numerical Simulations on Disturbance Growth in High-Enthalpy Hypersonic Flows with Freestream Disturbances,” IUTAM Symposium on Laminar-Turbulent Transition, Nagano, (2024).

4) 八柳秀門, 丹野英幸, 「高温衝撃風洞を用いた境界層遷移の研究 その(2)」, 日本流体力学会年会 2024, 仙台, (2024).

5) 八柳秀門, 丹野英幸, 「高温極超音速流れの境界層遷移 その(2)」, 第 62 回 飛行機シンポジウム, 福井, (2024).

6) 八柳秀門, 丹野英幸, 「大気圏再突入カプセルの乱流熱流束取得に向けた高温衝撃風洞 HIEST における最近の取り組み」, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 姫路, (2024).

7) 八柳秀門, 丹野英幸, 「大気圏再突入カプセルの境界層遷移に関する数値シミュレーション」, 第 38 回数値流体力学シンポジウム, 東京, (2024).

8) 八柳秀門, 丹野英幸, 「鈍頭物体上の孤立粗度による境界層遷移の直接数値計算: 適切な空間解像度の検討」, 2024 年度衝撃波シンポジウム, 仙台, (2024).

● JSS 利用状況

● 計算情報

プロセス並列手法	MPI
スレッド並列手法	非該当
プロセス並列数	912 - 3264
1 ケースあたりの経過時間	72 時間

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 2.36

内訳

計算資源		
計算システム名	CPU 利用量(コア・時)	資源の利用割合※2 (%)
TOKI-SORA	64,563,821.83	2.95
TOKI-ST	30.42	0.00
TOKI-GP	0.00	0.00
TOKI-XM	0.00	0.00
TOKI-LM	22.42	0.00
TOKI-TST	0.00	0.00
TOKI-TGP	0.00	0.00
TOKI-TLM	0.00	0.00

ファイルシステム資源		
ファイルシステム名	ストレージ割当量(GiB)	資源の利用割合※2 (%)
/home	0.00	0.00
/data 及び/data2	15,310.50	0.07
/ssd	0.00	0.00

アーカイバ資源		
アーカイバシステム名	利用量(TiB)	資源の利用割合※2 (%)
J-SPACE	0.00	0.00

※1 総資源に占める利用割合：3つの資源(計算,ファイルシステム,アーカイバ)の利用割合の加重平均

※2 資源の利用割合：対象資源一年間の総利用量に対する利用割合

● ISV 利用量

ISV ソフトウェア資源		
	利用量(時)	資源の利用割合※2 (%)
ISV ソフトウェア(合計)	0.00	0.00

※2 資源の利用割合：対象資源一年間の総利用量に対する利用割合