

大気圏突入カプセルの熱流体解析

報告書番号：R24JDU10300

利用分野：宇宙科学

URL：https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2024/27116/

● 責任者

澤井秀次郎, 宇宙科学研究所宇宙飛翔工学研究系

● 問い合わせ先

永田 靖典(nagata.yasunori@jaxa.jp)

● メンバ

永田 靖典, 竜田 響, 佐藤 立樹, 森本 智仁, 飯田 怜央, 高澤 秀人

● 事業概要

はやぶさサンプルリターンカプセルのような大気圏突入カプセルでは、高速度で大気圏に突入する際に、空力加熱をはじめとしたさまざまな流体現象が発生し、これを適切に予測することがカプセルの設計上重要である。本研究では、大気圏突入カプセルの熱流体解析を実施し、さまざまな現象把握を進めている。具体的には、(1)展開型柔軟エアロシエルのフライト実験機の熱空力環境予測、(2)膨張波管実験におけるカプセル型模型の熱空力環境の推定、(3)MHD 相互作用効果に関する流体現象の把握、を進めている。

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

極超音速で飛行する大気圏突入カプセル周りの流体解析を適切に実施するためには、物体適合構造格子を用いて、高品質の計算格子を用いる必要がある。ISV ソフトウェアとして提供されている Pointwise は、物体に沿った計算格子を生成できるだけでなく、計算格子の調整も柔軟に行うことが可能であり、格子生成に要する時間を大幅に短縮することができる。特に、比較的複雑な形状の展開型柔軟エアロシエルのカプセルに対しても、Pointwise の強力なスムージング機能により高品質の計算格子を生成することができる。

よって、ISV ソフトウェアを利用することとした。なお、流体解析は内製コードを使用し、自前のワークステーションで計算を行った。

● 今年度の成果

(1)について、展開型柔軟エアロシエルの大気圏突入時の熱空力環境の評価のため、調布航空宇宙センターの直径 1.27m 極超音速風洞にて熱流束計測実験を実施し、その比較のための数値流体解析を実施した。数値解析結果は、風洞実験模型前面に形成される衝撃波の様子を再現することができ(図 1)。

模型前面の熱流束分布についても実験とよく一致した。一方、模型背面の熱流束については、分布に関して実験と差異があるものの、その最大値はよく一致しており、前面よどみ点熱流束の 3%程度であることが明らかとなった。今後は、3 次元流体解析を実施し、迎え角がついた場合の流れ場についても実験との比較を通して評価を進めていく。

(2)について、膨張波管は高速・高エンタルピー気流を生成可能な実験装置であり、特に、解離反応などを伴う実在気体効果を含む大気圏突入飛行環境を模擬することができる。展開型柔軟エアロシェルを用いたカプセルにおいても、地球低軌道からの大気圏突入飛行など実際のフライトでは、実在気体効果の影響を考慮した熱空力環境を予測する必要がある。膨張波管にてサブスケールモデルの実験を通して検証を進めており、その比較として実在気体効果を考慮した 2 次元軸対称熱流体解析を実施した。柔軟エアロシェルの形状によって、形成される衝撃波形状および衝撃波離脱距離は変化するが、先のとがった円錐に近い形状では衝撃層が薄くなると同時に、エアロシェル表面近くで衝撃波干渉が発生する傾向にある（図 2）。この傾向は、膨張波管を用いた可視化実験でも確認された。今後は、実験計測を進めていき、数値解析との比較を通して検証を進めていく。

(3)について、2 次元くさび形状を対象とした電磁力による気流制御技術では、高エンタルピー気流の電離反応に伴う気流の導電性が重要であり、より正確な導電率の分布を模擬し、流れ場に与える影響を評価するため、実在気体効果を考慮した電磁流体解析を実施した。理想気体の仮定と簡易的な導電率モデルを組み合わせた従来の解析と定性的に同様の結果が得られ、電磁力が作用することで衝撃波形状が変化し、電磁力の与え方による変化についても確認することができた（図 3）。一方で、解離・電離反応に伴う組成や物性の変化の影響は大きく、衝撃波角や衝撃層厚さが異なることで、流れ場に与える影響は定量的に異なる結果となることが明らかとなった。実在気体効果が衝撃波角に与える影響については、膨張波管実験でも確認されている。今後は、これらを考慮した実験条件設定を検討した上で、実証実験を実施し、現象理解を進めていく。

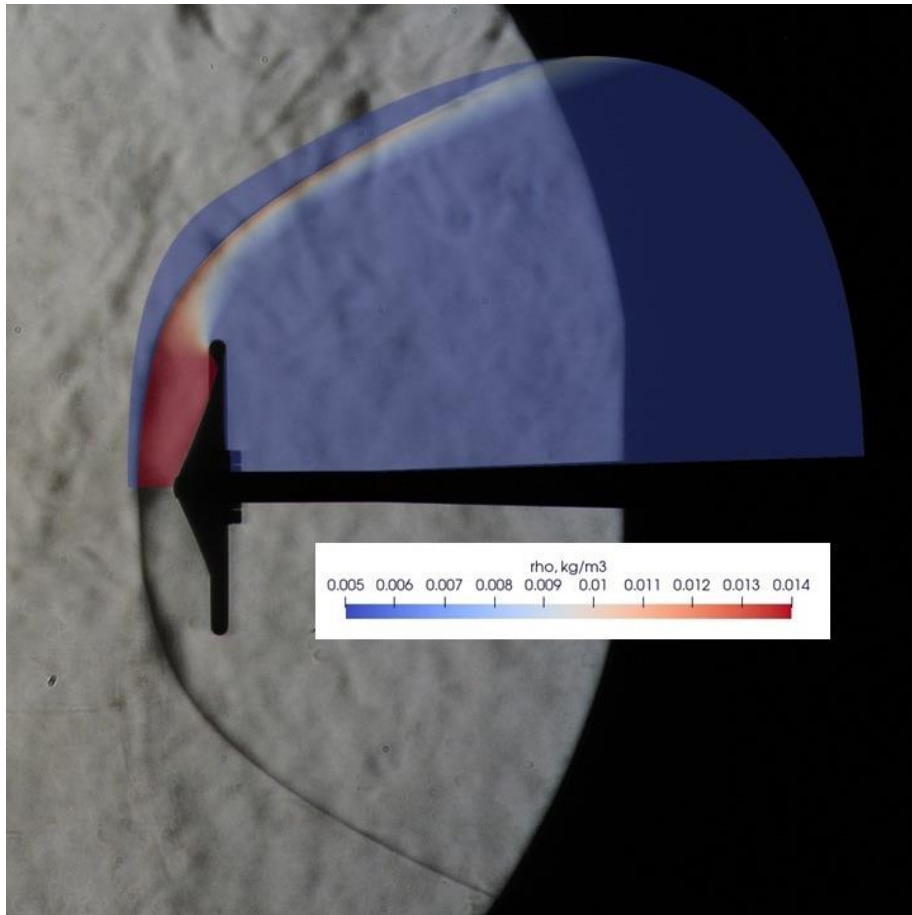


図 1: 極超音速風洞試験における展開型柔軟エアロシェル模型まわりの衝撃波形状の比較

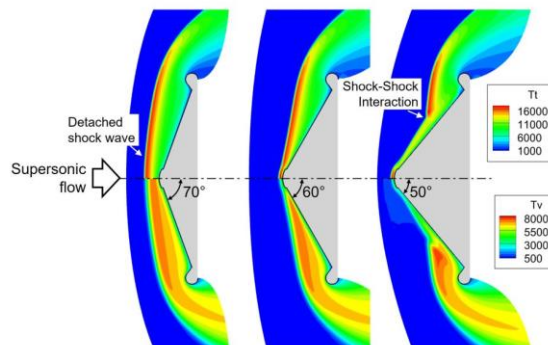


図 2: 展開型柔軟エアロシェル形状と流れ場および衝撃波形状の関係（上図：並進・回転温度分布, 下図：振動・電子励起温度分布）

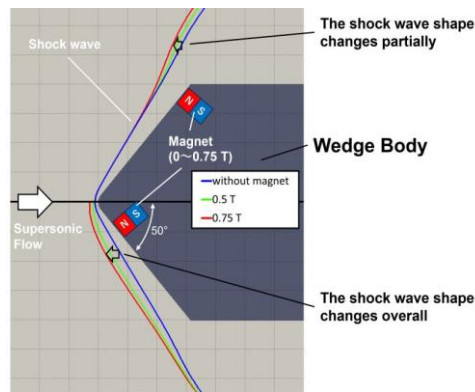


図 3: 2 次元くさび形状に対する実在気体効果を考慮した MHD 解析結果
(衝撃波形状比較, 上図: 肩部分付近磁場印加ケース, 下図: 先端付近磁場印加ケース)

● 成果の公表

- 口頭発表

- 1) 竜田響, 永田靖典, 山田和彦, 手塚亜聖, 極超音速風洞を用いた展開型柔軟エアロシェルを有する火星大気突入機の空力加熱解析, 第 68 回宇宙科学技術連合講演会, 1I19, 2024.
- 2) Hibiki Tatsuta, Yasunori Nagata, Kazuhiko Yamada, Asei Tezuka, Aerothermal Environment Prediction of Reentry Capsule with Deployable Aeroshell in Suborbital Reentry Flight Test, AIAA SciTech 2025 Forum, AIAA 2025-0644, 2025.
- 3) Ritsuki Sato, Yasunori Nagata, Kazuhiko Yamada, Osamu Imamura, Electrodynamic Flow Control Effect on Weakly Ionized Flow Around Wedge Configuration, AIAA SciTech 2025 Forum, AIAA 2025-2497, 2025.
- 4) 永田靖典, 佐藤立樹, 八柳秀門, 丹野英幸, くさび形状に対する電磁力エアロブレーキング効果の数値解析と検証実験, 2024 年度衝撃波シンポジウム, 3B1-5, 2025.

● JSS 利用状況

● 計算情報

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

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 0.00

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	668.80	0.00
TOKI-ST	18.79	0.00
TOKI-GP	0.00	0.00
TOKI-XM	0.00	0.00
TOKI-LM	0.00	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	0.00	0.00
/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)	191.81	0.13

※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