

極超音速飛行に向けた流体・燃焼の基礎研究

報告書番号：R20JCMP18

利用分野：競争的資金

URL：https://www.jss.jaxa.jp/ar/j2020/14520/

● 責任者

沖田耕一，研究開発部門第四研究ユニット

● 問い合わせ先

高橋 政浩(takahashi.masahiro@jaxa.jp)

● メンバ

高橋 政浩，小寺 正敏，宗像 利彦，福井 正明，高橋 正晴，長谷川 進，富岡 定毅，高橋 俊，井上 拓，小林 完，山田 剛治，水野 裕介，山下 璃良威

● 事業概要

本研究は，地上風洞設備で超音速燃焼試験を行う際に問題となる，風洞気流加熱用燃焼ガスの混入や気流の乱れが燃焼過程に及ぼす影響について，風洞試験と CFD の両面から現象解明し，こうした風洞依存性の影響を再現できる数値モデルを提案し，それらを組み込んだ CFD ベースのツールを構築することで，風洞試験データから実飛行データを推定可能にすることを目標としている．最終的には，飛行試験を実施して実飛行データを取得し，実飛行データと対応する風洞試験データを用いてツール検証を行う計画である．

● JAXA スーパーコンピュータを使用する理由と利点

近年，燃料として超音速燃焼器でも炭化水素系燃料が注目されていることから，本飛行試験でも燃料にエチレンを用いる計画である．エチレンの燃焼反応過程は多くの化学種が関与する複雑なものであり，風洞気流組成の違いを評価可能な反応機構を用いた燃焼 CFD は計算負荷が高い．さらに，試験機供試体形状やそれに搭載する燃焼器供試体の内部流路形状の設計では，数多くのパラメトリック計算を限られた期間内に実施しなければならない．よって，高い計算能力を持つ JAXA スーパーコンピュータの利用が必要不可欠である．

● 今年度の成果

(1) 超音速燃焼に対する設備依存性を予測するツールの構築

水素燃料スクラムジェットエンジン E1 のマッハ 6 燃焼試験に対応した 3 次元 CFD 解析を実施し，燃料当量比 0.3 の条件で，燃焼器壁面温度，着火器及び気流中の水蒸気の有無，初期解の違いにより，様々な燃焼形態を観察した．それらを保炎点の観点から，部分保炎(Partially-anchored: PA)，完全保炎

(Fully-anchored: FA), 部分吹き飛び(Partially-blow-off: PB), 吹き飛び(Blow-off: BO)の 4 つのモードに分類し, 考察を行った. さらに, 燃焼試験で観察された現象と各燃焼形態との対応付けを行った.

(2) 飛行試験用超音速燃焼器の燃焼流解析

ラムジェットエンジン試験設備(RJTF)を用いて, 燃焼加熱式マッハ 6 条件(M6V)における飛行試験用超音速燃焼器の燃焼試験を実施し, 燃焼特性データを取得した. 昨年度までに実施した直結式燃焼器試験, および, 蓄熱体加熱式マッハ 6 条件(M6S)における RJTF 燃焼試験を加えた各気流条件において, 同燃焼器の RANS 燃焼解析を実施し, 試験データとの比較による予測精度評価に着手した. また, RANS 解析の予測精度向上のための検討を進めた. この他, 飛行試験で想定される, 飛行試験機の迎角や横滑り角, 飛行動圧が燃焼器流れに及ぼす影響についても検討を進めている.

(3) 飛行試験機の空力特性評価

JAXA が計画している超音速燃焼に関する飛行試験のため, 飛行試験機の空力特性データベースを CFD により構築している. 今年度は, 飛行試験機の 1/8 スケール模型を用いた風洞試験データとの比較により, CFD の妥当性を検証した. 気流条件は, 境界層が乱流となるマッハ 7 条件とした. 風洞試験で撮影されたシュリーレン写真と CFD のマッハ数分布の比較より, CFD は衝撃波や膨張波など流れ場の構造をよく再現している. また, 各空力特性についても風洞データと CFD はよく一致しており, CFD を飛行試験機の空力特性予測に適用可能であることを確認した. また, CFD を用いて, 飛行試験機の熱空力に関する技術課題についても検討を進めた.

(4) 空力加熱量に対する設備依存性を予測するツールの構築

今年度は, 地上試験設備が生み出す設備依存性をパラメータとして CFD 解析を実施し, 空力加熱へ及ぼす影響について調査した. 本解析では, 設備依存性として, 熱化学非平衡, 燃焼ガス混入(水蒸気混入), 気流の乱れ(一様流の乱れ強さをパラメータとし, 乱流モデルを適用), 流れと熱伝導の連成を考慮した. マッハ 6.7 の極超音速流中の球頭円柱周りの熱流束分布を計算で求めて, 設備依存性により熱流束が大きく異なることが明らかになった. また風洞実験で計測した熱流束値との比較して計算結果を検証した.

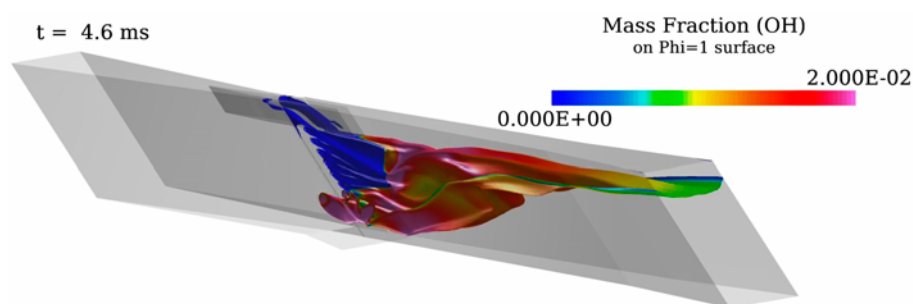


図 1: 水素燃料 E1 スクラムジェットエンジン: 燃焼前を仮定した当量比 1 面上における OH 質量分率分布の時間変化(部分吹き飛びモード) (ビデオ。ビデオは Web でご覧頂けます。)

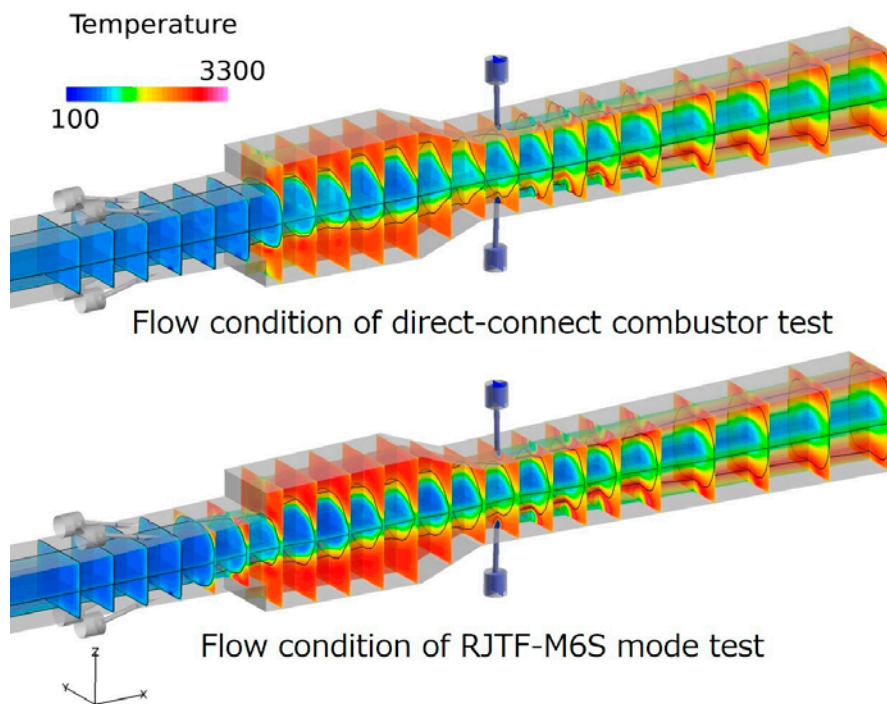


図 2: エチレン燃料-飛行試験用超音速燃焼器: 各燃焼試験に対応した気流条件における温度分布の比較, 上図:直結式燃焼器試験, 下図:RJTF-M6S 燃焼試験, エチレン燃料の総当量比 0.44

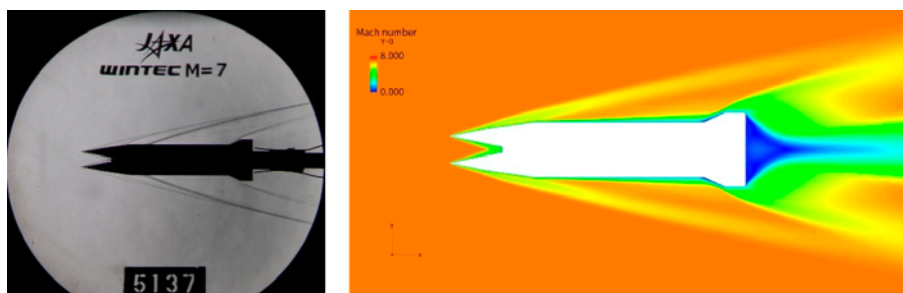


図 3: JAXA 飛行試験機の 1/8 スケール模型周りの流れ場の比較(マッハ 7 乱流条件); 左図: 風洞試験時に撮影したシュリーレン写真, 右図: CFD で予測したマッハ数分布

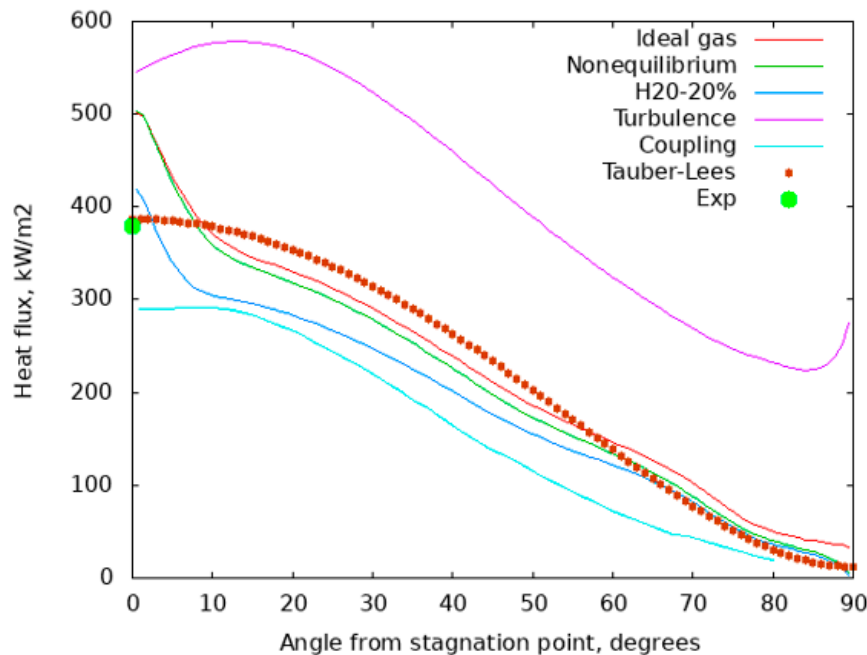


図 4: 球頭円柱模型表面の表面熱流束への設備依存性の影響

● 成果の公表

-査読付き論文

1) Takahashi, M., Tomioka, S., Kodera, M., Kobayashi, K., Hasegawa, S., Shimizu, T., Aono, J., and Munakata, T., "Numerical Study on Combustor Flow-Path Design for a Scramjet Flight Experiment," Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, ISTS Selected Papers, 2021 年 (7 月号掲載予定).

-査読なし論文

1) 小寺, 富岡, 宗像, 三谷, "CFD 模擬によるスクラムジェットエンジン内の諸燃焼形態について" 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020 オンライン論文集, JSASS-2020-2068-A, 2020 年.

2) 小寺, 富岡, 宗像, 三谷, "CFD 模擬によるスクラムジェットエンジン内の諸燃焼形態について" 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020 オンライン論文集, JAXA-SP-20-008, 2021 年, pp. 69-78.

3) 高橋, 小林, 富岡, "飛行試験用超音速燃焼器の地上燃焼試験結果について", 令和元年度宇宙輸送シンポジウム講演集録, レポート番号 STCP-2019-047, 2020 年.

4) Mizuno Y., Takahashi, S. and Yamada, G., "Investigation of Hypersonic Flow around a Half Circular Cylinder using Coupled Flow-thermal Analysis, AIAA2021-0246, 2021 年.

-口頭発表

1) 小寺, 富岡, 宗像, 三谷, "CFD 模擬によるスクラムジェットエンジン内の諸燃焼形態について" 流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2020 オンライン, 2020 年.

2) Takahashi, M., Kobayashi, K., and Tomioka, S., "Ground Test Evaluation of a Supersonic Combustor for a Flight Experiment," 10th Asian Joint Conference on Propulsion and Power AJCPP2021, Virtual Conference, 2021 年.

3) Hasegawa, S. and Tani, K., "Numerical Study of JAXA's Experimental Vehicle for Hypersonic Flight," IAC 2020, Cyberspace Edition, 2020 年.

4) Mizuno Y., Takahashi, S. and Yamada, G., "Investigation of Hypersonic Flow around a Half Circular Cylinder using Coupled Flow-thermal Analysis, AIAA Scitech Forum and Exposition, 2021 年.

-その他

1) 山田剛治, 高橋俊, "極超音速飛翔体の空力加熱率の高精度評価に向けた研究," 東海大学総合科学技術研究所研究報告会, 2021 年.

● 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	48 - 2880
1 ケースあたりの経過時間	400 時間

● JSS2 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%) : 3.86

内訳

計算資源		
計算システム名	コア時間(コア・h)	資源の利用割合※2 (%)
SORA-MA	22,888,486.35	4.33
SORA-PP	65,608.61	0.51
SORA-LM	1.20	0.00
SORA-TPP	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	216.70	0.20
/data	12,655.60	0.24
/ltmp	9,954.74	0.85

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	9.47	0.31

※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

● JSS3 利用量

総資源に占める利用割合※1 (%)： 1.92

内訳

計算資源		
計算システム名	コア時間(コア・h)	資源の利用割合※2 (%)
TOKI-SORA	10,316,104.52	2.22
TOKI-RURI	36,133.72	0.21
TOKI-TRURI	32.43	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	307.95	0.21
/data	21,833.66	0.37
/ssd	670.39	0.35

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	9.47	0.31

※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