

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料

〔令和4（2022）年度 中間評価用〕

令和4年3月31日現在

研究期間	：2020年度～2024年度
課題番号	：20H05654
研究課題名	：観測ロケットを用いた極超音速フライトテストベッドの構築と機体推進統合制御の実証
研究代表者氏名（ローマ字）	：佐藤 哲也（SATO Tetsuya）
所属研究機関・部局・職	：早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号	：80249937

研究の概要：

本研究では、極超音速統合制御実験(HIMICO: High Mach Integrated Control Experiment) 機の開発により、マッハ5以上での極超音速飛行を可能とする機体と推進技術を獲得し、更に機体／推進統合制御技術の構築を図る。そして、国産S-520観測ロケットを用いてその実証実験を行うことで、国産技術によるフライトテストベッド（FTB）の確立を目指す。

研究分野：航空宇宙工学

キーワード：極超音速機、飛行試験、フライトテストベッド、機体推進統合制御

1. 研究開始当初の背景

宇宙開発の商業化を考えた場合、輸送機の高い安全性と低コスト化が要求される。現行のロケットのような「弾道軌道輸送」では、全重量の80%以上を推進剤が占め、構造やペイロードに割り振られる重量はわずかである。そこで、有翼機と空気吸い込みエンジンを用いた「空力軌道輸送」にすることで大気の流れと酸素を有効利用し、燃費を約1/10に低減し、安全性を向上させる。申請者らは、液体水素を燃料とする極超音速予冷ターボジェットの研究開発を進め、システム実証試験での成果は世界的にも注目を集めている。一方で、極超音速飛行実証による機体/推進統合データが未取得であることが課題である。

2014年度より官学連携でコンソーシアムを作り、低コストで信頼性の高い極超音速統合制御実験(HIMICO)を提案し、継続した研究活動を行い、本研究に辿り着いた。

2. 研究の目的

第一に、「機体／推進の強い相互干渉を伴う統合制御」を実飛行環境において実証することを目的とする。極超音速飛行時には、飛行速度や機体の姿勢のわずかな変化によって、機体周りの衝撃波や境界層の状態が大きく変化するため、それに応じて、エンジンが最大性能を発揮するように制御する。一方、エンジン推力や排気流の状態を鑑みた機体の飛行制御を行う。

第二に、大型複雑システムの複合領域最適化制御技術の構築と実証である。極超音速機は、空力、軌道、推進、熱構造、制御等、広い学術領域に跨る。また、地上から極超音速まで連続的な飛行領域を持ち設計点を設定しにくい上、性能のみならず環境への影響を配慮する必要がある。このような大型複雑システムに対するロバスト性の高い複合領域最適化が、研究目標となる。

第三に、極超音速飛行時における熱流体现象の解明である。従来の宇宙往還機で主因となる気流の断熱圧縮に加え、極超音速機では、気流・機体間の粘性による加熱も考慮する必要がある。さらに、極超音速機の地球環境への影響を配慮し、排気ジェット中の窒素酸化物(NOx)が成層圏大気へ及ぼす影響を大気モデルと光化学反応モデルを組み合わせた数値解析によって燃焼工学的に解明する。

以上、極超音速機に必要な鍵技術を構築し、最終的に極超音速飛行実験で実証すること、さらに、希少な極超音速フライトデータを取得することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

(a) 推進風洞実験による機体／推進干渉の調査と飛行実験に向けた機能確認

JAXA 角田のラムジェットエンジン試験設備(RJTF)を用いて、HIMICO 実験機の Mach 5 推進風洞実験を行う。機体側では操舵翼、エンジン側では可変インテーク、ノズルの形状と燃料流量を同時制御する。機体／推進相互干渉に関するデータの取得と飛行実験に先立ち主要機器の動作確認を行う。

(b) 飛行実験による極超音速統合制御技術の確立

地上での実験、解析によって構築した空力、推進技術、ロバスト誘導制御則の検証として、HIMICO 実験機(1.7m)を観測ロケットに搭載し、実飛行環境で機体／推進統合制御実験を行う。推進風洞実験との相違点は、飛行マッハ数、動圧、迎角が非定常的に変化する点である。実験機を分離した後、空力操舵で機体の引き起こし制御、ロール制御を行った後、エンジンを作動させ、統合制御を行う。

(c) 学術的基盤技術研究

上記のシステム実証の実現のために、基盤技術を構築する。第一に、ロバスト性を持つ複合領域最適化手法を構築し、機体設計、軌道設計に適用する。本研究では、少ない実験データを用いて簡易解析結果を修正する手法などの適用を試みる。第二に、空力加熱に対する研究として、熱分解反応モデルに、三次元の流体および熱伝導解析を組み合わせ、翼、胴体の干渉など、実際の飛行軌道に合わせた排気流の熱流束評価を行う。第三に、安定した点火、保炎が実現されるロバスト性の高い燃焼器開発に資する基礎的知見の獲得を目指し、ラムジェット燃焼器内で生じる燃焼不安定性をモード分析手法 (POD, DMD など) も含めて解析する。また、NO_x が環境に及ぼす影響についても検討する。

4. これまでの成果

計画通り、極超音速統合制御実験機の推進風洞実験、飛行実験に向けた設計及び要素試験を進めた。空力、軌道、推進、安全等の要求を満たす様、機体形状・軌道の同時最適化解析を用いて機体システムを設計した。Mach 5 の機体空力特性試験 (図 1) により、飛行実験で想定される迎角と横滑り角に対応した六分力空力特性を取得した。搭載用エンジンの試作が完了し、超音速風洞実験と水素燃焼実験により、基本特性を取得し、耐久性を確認した (図 2)。熱・構造最適化解析により、打ち上げ荷重、引き起こし荷重、飛行中の加熱に耐える構造を設計し、搭載機器の艙装設計を完了した (図 3)。

ロバスト性を持つ複合領域最適化研究の成果として、極超音速 FTB の解析環境を構築した。また、空力加熱を含めた熱構造 CFD コードを開発し、実験データと比較して、解析の妥当性を得た。ラム燃焼器の研究としては、燃焼器内圧力および火炎中の水蒸気から放出される近赤外発光計測結果に基づき、噴射器後流における保炎挙動の観察と種々の機械学習手法を用いた燃焼不安定性に着目した解析を実施した。当量比条件により、渦振動モードから熱音響振動モードへの遷移が起こることなどを捉えた。



図 1. 実験機風洞実験 (Mach 5)

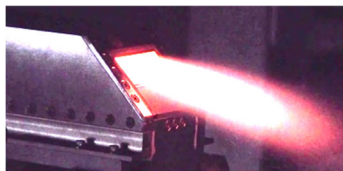


図 2. エンジン燃焼実験

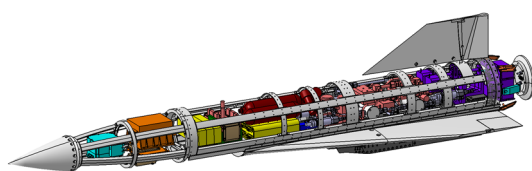


図 3. 機体構造、艙装検討図

5. 今後の計画

Mach 5 の推進風洞実験 (2022 年度) により、機体/推進統合形態での性能 (機体にかかる空力特性、操舵翼特性、エンジン性能、遮熱特性) 及び全システムの機能確認を行う。並行して、これまでの風洞実験で得られた結果から空力性能推算や飛行シミュレーションを高度化する。2023 年度に、ロケット搭載時の環境試験によって全システムの総合確認を行い、2024 年度に飛行実験を実施する。

基盤技術の研究に関しては、複合領域最適化解析により、極超音速 FTB としての実現性の高い飛行方式を確立し、それを実現するための航法・誘導・制御アルゴリズムを飛行実験用制御装置に組み込む。また、熱・構造解析研究としては、化学反応コードを作成し、熱流体と構造の連成解析を行う。ラム燃焼器の研究では、排出ガスの NO_x 濃度を FTIR で計測し、各パラメタの NO_x 排出特性に及ぼす影響及び不安定燃焼挙動との関連性を明らかにする。また、雲物理、放射、境界層、エアロゾル等の物理過程にかかわるパラメタの最適化等により大気モデルの高度化を試みる。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

査読あり論文

- (1) Experimental study of high-speed air intake performance by side clearance, Ogura, S., Fujii, M., Hoshiya, Y., Fujimori, Y., Sato, T., Taguchi, H., Kojima, T., Oki, J., Aerospace Science and Technology, Vol. 123, 2022.
- (2) Coupling Simulation of Thermal Response to Exhaust Gas at External Nozzle, Fujii, K., Matsuo, A., Oki, J., Taguchi, H., and Ikeda, Y., Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 59, No. 1, pp. 260-270, 2022.
- (3) Program of High Mach Integrated Control Experiment, "HIMICO" using S-520 Sounding Rocket, *Sato, T., Taguchi, H., Kojima, T., Tsuchiya, T., Tsue, M., Nakaya, S., Matsuo, A., Tezuka, A., Fujikawa, T. Miyaji, K., Transactions of JSASS, Aerospace Technology Japan, Vol. 19, No. 6, pp. 831-837, 2021.
- (4) Instability and mode transition analysis of a hydrogen-rich combustion in a model afterburner, Nakaya, S., Omi, K., Okamoto, T., Ikeda, Y., Zhao, C., Tsue, M., Taguchi, H., Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 38(4), 2021, pp. 5933-5942. (2021 年度日本燃焼学会論文賞受賞)

その他、国際学会発表 5 件、国内学会発表 13 件。

7. ホームページ等

<https://www.waseda.jp/sem-sato/himico/index.html>