

1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：極超音速飛行に向けた、流体・燃焼の基盤的研究
- (2) 研究代表者：宇宙航空研究開発機構 谷 香一郎
- (3) 研究期間：平成29年度～令和4年度

2. 終了評価の実施概要

日時：令和5年10月12日

場所：TKP 秋葉原カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所 理事長、上席研究員／東京大学 名誉教授

平澤 洽 (委員長)

横浜国立大学 名誉教授

上野 誠也

東京工業大学 教授

佐藤 千明

宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 特任担当役

嶋 英志

大阪大学 大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻 教授

中野 貴由

公共投資ジャーナル社 論説主幹

吉葉 正行

(委員長以外は五十音順・敬称略)

3. 研究と成果の概要

研究の概要

本研究は、空気吸い込みエンジンを搭載する極超音速飛翔体の実現に向けて、極超音速風洞で得られるデータから実際の極超音速飛行時のデータを予測するツールを構築することを目標とする。そのために、エンジン燃焼及び空力加熱の二つの現象に対し、風洞の気流の乱れ及び風洞気流の加熱用燃焼ガス等の混入の影響を解明し、その影響を数値モデル化して数値流体力学 (CFD) 解析に組み込み、影響を再現・評価するツールを構築する。

さらに、実際の飛行データを用いて検証し、実飛行状態と合致するよう解析ツールを調整する。

成果の概要

極超音速エンジン用風洞は飛行状態と同じ高いエンタルピ^o (高温) の流れを用い

る必要があり、そのために気流内に燃料と酸素を導入し燃焼加熱を行う。このため実際の飛行時の気流には存在しない燃焼生成ガス（水など）が混入し、風洞で実施する超音速燃焼や空力加熱に影響を与える。

本研究では、燃焼ガス混入による効果を数値モデル化して計算コード（以下ツール）に導入し、燃焼ガスの影響がある状態で得られたデータを CFD で正しく再現できることを確認した後、燃焼ガスを含まない、実際の飛行状態のデータを推定するツールを作成した。

本ツールの検証データ取得のため、小型観測ロケットを用いて、我が国初となる極超音速での実飛行超音速燃焼試験を実施した。平均マッハ数 5.7 で約 8 秒にわたり、超音速燃焼を確認し、圧力、温度データを取得した。同時に飛行中の機体に加わる熱流束の取得にも成功した。飛行試験後、飛行試験条件に合わせた風洞における地上対比試験を実施し、圧力、温度、熱流束のデータを取得した。

空力加熱推定ツールについては、層流境界層条件で目標の 5%誤差に近い水準の推定が出来たが、境界層遷移やその後の乱流境界層条件においては目標値を達成できなかった。一方、地上対比試験データをベースとして作成したツールにより、飛行試験における燃焼による圧力上昇を推定した結果、積分推力として目標を超える 3%未満の誤差で推定可能であることを示した。

4. 終了評価の評点

S 特筆すべき成果をあげた。

5. 総合コメント

大型予算の枠を生かして、挑戦的な成果を挙げた。当該分野の極超音速エンジンへの要素技術面での展望を拓く画期的な成果として評価できる。

世界的に評価されるべき高難度の実験を成功させ、複数の重要なデータを取得している。中間評価時点で危ぶまれた飛行実験が成功裏に終わり、風洞実験等の地上での実験・解析方法の確立は非常に高く評価できる。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

本研究では、内容を 4 つの実施項目に分け、それぞれ目標を設定して、研究を進めた。

(1) エンジン燃焼に対する影響を予測するツールの構築

超音速燃焼データを補正するツールの構築である。超音速エンジン用風洞である JAXA のラムジェットエンジン試験設備における気流内に含まれる燃焼ガス（水）の混入影響を再現する反応モデルを構築しツールに組み込んだ。風洞試験結果を正しく再現できるよう、数値パラメータを調整し、パラメータを固定した状態で、

水を含まない流れに対応した反応モデルに切り替えることで、飛行試験結果を再現できることを確認できたことにより、当初の目標を達成できた。本ツールは世界的に見ても例がないものである。

(2) 空力加熱量に対する影響を予測するツールの構築

極超音速飛行での熱流束推定ツールの構築である。オイラー方程式解法と参照エンタルピ法 (REM) を組み合わせたツールを構築し、水分混入をモデル化して風洞と飛行状態の推定を行った。実際の飛行試験では、試験中に境界層が層流から乱流に変化する現象が確認された。今回のツールは層流もしくは乱流の何れかに対して適用が可能だが、遷移状態に対してはツールの適用が出来なかった。層流境界層については、当初目標の誤差を概ね達成できたが、乱流については、計算手法に課題が残り、目標を達成できなかった。

(3) 飛行試験データを取得する手段の整備

極超音速にて超音速燃焼試験を行う手段の構築である。小型観測ロケット S-520 の先端に飛行試験供試体と、試験前に飛行試験供試体の姿勢を変更するためのラムライン制御装置を搭載した。試験中は動的な制御を行わず、飛行試験供試体の空力形状と重量配分のみで静的安定性を維持する方式とした。また飛行試験供試体に搭載した超音速燃焼器は CFD、風洞試験により着火・保炎性能を確認した。搭載品単体試験、全機システム試験を打上前までに完了し打上に供することができたことにより目標を達成した。

(4) 評価用データの取得（飛行試験と地上対比試験の実施）及び予測ツールの評価

飛行試験は 2022 年 7 月 24 日に実施し、ラムライン制御により正確に姿勢制御後、制御装置を切り離し飛行試験供試体単独で降下させた。搭載したエアデータシステムにより想定通り動圧 12 kPa を検知して試験を開始、迎角 ±2 度程度の安定した迎角にて最大マッハ数 5.8 の条件で超音速燃焼を達成した。通算の燃焼時間は 8 秒を超え、多様な条件でのデータを取得できた。また飛行中は熱流束についても連続してデータを取得し、前記のとおり、境界層遷移現象を含む貴重なデータを取得した。飛行試験後実施した風洞における地上対比試験では、飛行試験条件と合致するよう、供試体形状を調整し、飛行試験と同様の圧力分布を再現したうえで、差異を検証した。また飛行試験、地上対比試験の結果を用いてツールの検証を完了できたことにより目標を達成した。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

- ・飛行試験を行うという大規模実験を実施し、有益なデータを取得できている。
- ・困難を乗り越えて優れた結果が得られている。成果も十分であり、全体的に高く評価できる。
- ・当初の目的を、時間はかかったが十分に達成している。
- ・スクラムジェット燃焼器の設計制御の基盤となるデータを実地試験により実施し、

関係した貴重なデータが取得できている。

- ・主眼目の飛行実験の成功により、大変貴重な情報が得られ、風洞実験での地上解析への有益な成果が得られた。

6-2. 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

飛行試験供試体に搭載した燃焼器は事前の CFD 解析や実験により、着火、保炎性能を確認していたが、飛行試験では着火剤停止後、失火する現象が確認された。その後空気流量上昇とともに再着火し、燃焼を継続した。風洞では再現できない気流条件の変化による失火や再着火のデータが取得できたことにより、今後のエンジン設計技術向上が図れる成果である。また国内ではデータ蓄積が少ない極超音速飛行中の境界層遷移をともなう熱流束データが取得できたことにより、今後広くデータを公開して CFD による熱流束予測技術向上に寄与できる成果を得た。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・飛行試験で新たな現象が確認できたなどの想定外の成果を取得している。
- ・エチレン燃焼の失火・再着火という、実験的には想定外であるが、現象的には新しい事象の今後の再現を目指した研究が期待される。
- ・層流/乱流の境界層に関するデータが新たに得られており、新規性に富む知見が得られている。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

極超音速飛行中の熱流束データを公開して JAXA 内外の研究者による CFD 精度向上に向けた活動が始まった。今後、熱流束予測技術の向上が期待される。

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

我が国初の極超音速実飛行中の燃焼試験を達成できたことで、極超音速エンジン設計技術の検証としても有益なデータを取得できた。加えて小型観測ロケットを使って、極超音速エンジンの試験を行う手法を実証したことにより、今後スクラムジェットを含むエンジン飛行試験への応用が期待できる。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

- ・多くのパラメータが関与する予測しがたい現象に対し、貴重な実験データを得て、確認できたことは、大きな成果である。
- ・地上試験を行う時の補正に関して重要なデータを取得しており、科学技術の発展が見込まれる。
- ・極超音速飛行中の境界層遷移をともなう熱流束データを取得し、今後広く研究コミュニティにデータを公開して CFD による熱流束予測技術向上に寄与できる成

果が得られた。

6-5. 論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

学術論文 8件、学会発表 54件、展示・講演 1件、プレス発表 3件、
なお、本飛行試験は社会的な関心も高く、試験後、マスコミによる様々な紹介報道があった。

【個々の委員によるコメント】（論文（投稿中のものも含む）、特許、学会発表等）
・学会発表、論文、プレスリリース等、広範に公表を行っており、十分であるのみならず、高く評価できる。

6-6. 特許（出願中のものも含む）

特になし。

6-7. 科学技術への波及効果

本研究を通して開発された風洞から得られた超音速燃焼データの補正ツールは、今後のスクラムジェットエンジン試験結果に直接適用し、実飛行時の性能をより正しく評価可能となることが期待できる。従来は、不確かなデータにより、大きな設計マージンを必要としていたが、本研究で得られた成果を活用することで、設計マージンを縮小でき、より軽量の機体、より多くの燃料を搭載できる極超音速機設計となることが期待される。

また、小型ロケットを使った極超音速エンジン試験の手法を確立できた。飛行試験では、風洞試験では実施できないような気流条件が変化する試験が可能となるため、複合サイクルエンジンのような飛行中に気流に合わせて制御を行うエンジンの試験への応用が期待できる。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

比較的短期間で飛行試験システムを構築するため、既存のロケットや姿勢制御装置を応用し、開発要素を少なくした。またシステム開発全体をプロジェクト的研究としてとらえ、設計、試験準備の要所において、JAXA の設計審査会、安全審査会の枠組みを活用して各方面の専門家の意見を入れて、技術的に瑕疵の無いことを確認し、手戻りが無いよう、設計・製造・準備を進めた。また JAXA 内外の飛行試験に関わる Lessons & Learned を参照し、同様の課題を残さぬよう準備を進めた。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

- ・プロジェクトの運営は高く評価できる。
- ・外部要因により計画が延長せざるをえなかったが、対応が十分にできている。

- ・効率的な研究実施体制をとり、複雑なスキームの研究を着実にマネジメントしている。
- ・JAXA 並びに分担研究機関の技術陣・研究者の努力に対し、敬意を表したい。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

当初本研究は 2021 年度までの 5 年で終了する予定であった。2019 年には台風 19 号による研究設備への被害のため、飛行試験供試体設計用データの取得等に 4 カ月の遅延が生じ、資金繰越と打上時期見直しを実施した。

また、2020 年にはコロナ禍による事業所閉鎖等の影響により飛行試験供試体に搭載する機器の開発等に 2.5 カ月の遅延が発生し、再度予算繰越と打上時期の見直し（研究期間の見直しを含む）を行って対応した。

6-10. 経費の効率的な執行

研究期間延長とはなかったが、総コストは当初設定金額内に収めることができた。また、飛行試験システム構築に当たっては、既存技術をそのまま、あるいは小規模改良で使用することで新規開発を避けた。開発試験に当たっては JAXA の既存設備を活用することで、外部試験を極力避け、試験費用を圧縮してコスト削減を図った。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

- ・これまでに蓄積された観測ロケットの打ち上げ利用技術を活用することによって効率的に実験を行った。
- ・予算額に対して得られた成果が妥当である。
- ・有効に使用されたものと評価できる。