

宇宙輸送機用エアブリージングエンジンの開発研究

Development Status of Air-Breathing Engines for Space Transport

佐藤哲也*1、田口秀之*2、小林弘明*2

*1 早稲田大学、*2 宇宙航空研究開発機構

1. はじめに

現在、ロケットは使い切りから再使用へと転換期を迎えており、米国のSpace X社、Blue origin社が先駆けとして技術実証を進めている。我が国でも、JAXAがフロントローディング研究として、再使用型小型実験機(RV-X)の飛行実証に向けた活動を進めている。一方で、エアブリージングエンジン(ABE)は、ロケットに比べてIspが1桁高いという利点があるものの、飛行実証の難しさから実用化に時間がかかっている。宇宙機用ABEとしては、ターボのないスクラム系とターボを有するターボ系があるが、米国ではジェット燃料を用いたスクラム系、英国ではターボ系であるSABREに注力し、我が国では、双方開発を進めている。本研究グループでは、予冷ターボジェット(PCTJ: Precooled Turbo Jet)の開発において、地上静止およびMach 4システム燃焼実験に成功しており、エンジンについては国際的優位性を確保している^[1]。一方で、飛行実験の経験が欧米と比較して少なく、実飛行環境での技術実証が喫緊の課題となっている。

今回、宇宙輸送シンポジウムの特別セッションとして、「宇宙輸送系におけるエアブリージングエンジンの新展開」というテーマで、現在、飛行実験に向けて研究開発を進めている2つのプロジェクトHIMICO, ATRIUMについて計10件の発表を行なわせていただいた。本講演では、これらの発表の導入という位置付けで、プロジェクト概要を紹介する。

2. HIMICO計画^{[2][3]}

HIMICOとは、High Mach Integrated Control Experiment(和名:極超音速統合制御実験)の略である。PCTJの一部の要素(インテーク、ラム燃焼器、ノズル)のサブスケールエンジンを用いて、極超音速飛行環境下で機体/エンジンの統合制御技術を実証することを目的としている。PCTJは、2003年のJAXA統合時に、当時の宇宙科学研究所で開発されていたエア・ターボ・ラムジェットエンジン(ATREX)と航空宇宙技術研究所で開発されていた予冷ターボジェットの技術を融合したものである。ATREXは、液体水素を燃料および冷媒として用いたエンジンで、ファン直径30cm、推力260kgf、比推力1500secのATREX-500エンジンを製作し計67回、3670秒間の地上システム燃焼実験を行なった(Fig.1)^[4]。PCTJにおいては、ATREXを継承しつつ、下記の点について改変を行なった。第一に、ATREX-500は地上実験に特化していたが、PCTJのサブスケールエンジン(Sエンジン)は飛行実証を見据え、軽量化設計を実施し、可変インテーク・ノズルを装着した。第二に、低速域での推力、比推力の向上のため、エンジンサイクルをエキスパンダから予冷ターボサイクルに変更した。第三に、圧縮機の直径を0.3mから0.1mに小さくした。これにより、安価に飛行実証ができるということと、JAXA角田RJTF設備を用いた高マッハ数推進風洞実験が可能となる。PCTJは、地上静止実験、Mach 2飛行実験、Mach 4環境実験、Mach 4推進風洞実験と段階的に進められ、残された課題はMach 5推進性能実証と機体搭載性実証となった(Fig.2)。

ム燃焼実験を行なった(Fig.1)^[4]。PCTJにおいては、ATREXを継承しつつ、下記の点について改変を行なった。第一に、ATREX-500は地上実験に特化していたが、PCTJのサブスケールエンジン(Sエンジン)は飛行実証を見据え、軽量化設計を実施し、可変インテーク・ノズルを装着した。第二に、低速域での推力、比推力の向上のため、エンジンサイクルをエキスパンダから予冷ターボサイクルに変更した。第三に、圧縮機の直径を0.3mから0.1mに小さくした。これにより、安価に飛行実証ができるということと、JAXA角田RJTF設備を用いた高マッハ数推進風洞実験が可能となる。PCTJは、地上静止実験、Mach 2飛行実験、Mach 4環境実験、Mach 4推進風洞実験と段階的に進められ、残された課題はMach 5推進性能実証と機体搭載性実証となった(Fig.2)。

- 67回、合計3670秒の運転時間
- 推力 500 kgf, Isp 1500 sec

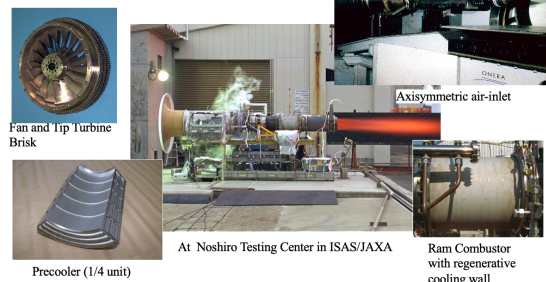


Fig. 1 ATREX (Air Turbo Ramjet with Expander Cycle)

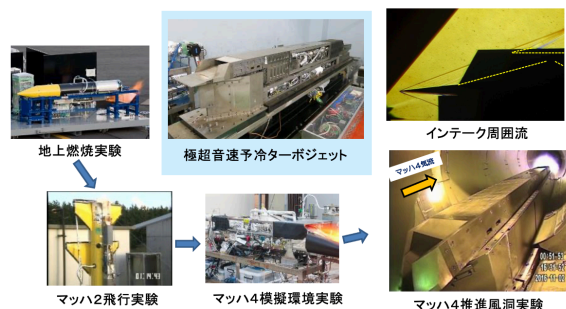


Fig. 2 PCTJ (Pre-cooled Turbojet)

そこで、我々は、2014年より国産観測ロケットS-520を活用して、比較的lowコストに実現できる極超音速飛行実験(HIMICO)を提案している(Fig.3)。S-520のノーズコーン内部に全長1.5m程度の小型実験機を搭載する。発射後、ロケットの回転を減速させた後、

ノーズコーンを開頭し、ロケットに HIMICO 実験機が着いた状態で RCS で姿勢制御を行う。その後、実験機は分離され、自由落下中に加速し、大気圏再突入後に空力操舵によって引き起こされ、マッハ数4~5、動圧50 kPa の軌道に投入される。ここでラムジェットエンジンを点火し、極超音速統合制御実験を実施する。HIMICO は、2018 年に観測ロケット委員会により仮採択され、現在、2024 年の打ち上げに向け、研究開発が進められている。

3. 新観測ロケット計画 (ATRIUM エンジン) ^[9]

これまで、JAXA 宇宙科学研究所では、垂直離着陸型の再使用観測ロケット (RSR) の研究開発が進められ、RV-T, RV-X などの実験機が開発されている。RSR の性能、安全性、自在性の向上に向け、ABE の導入を検討している。本計画は、2018 年度に開始され、2019 年度より宇宙科学研究所に WG が設置された。システム解析により、大気アシストにより観測ロケットの飛行高度を 50 km 拡大し、また、使い切り上段と組み合わせることで小型宇宙ミッションへ適用できることを示した。推進系としては、GG サイクルのエアターボエンジンとロケットエンジンを複合した ATRIUM (Air-Turbo Rocket-Integrated Utility Mission) エンジン (Fig.4) を採用している。エンジン開発には、ISAS がこれまでに獲得した RV-T, RV-X と ATREX の知見や技術を活用する。ABE/ロケット複合作動により、飛行動圧環境によらず定格推力を維持できる。新観測ロケット用 ATRIUM のエンジン推力は、ATREX (飛行試験用) と同じ 40 kN であるが、エンジン重量はおおよそ 1/3 と大幅に軽減されている (Table 1)。これは、エアターボの作動範囲を最大マッハ数 2 程度まで下げることにより、インテーク、プリクーラ、内部熱交換器、ノズルなどの重量要素を省略または簡略化できるためである。ABE の軽量化 (目標推重比 12)、ロケットとのマッチング、着陸時における逆行流吸い込み、電動ポンプの開発などが主要技術課題としてあげられている。現在、10 kN 級 ATRIUM エンジンの試作が完了し、2021 年度に総合燃焼実験を実施する予定である。また、本エンジンを用いた高度 100 m 程度の垂直離着陸小型 FTB 試験が 2024 年度を目標に計画されており、それに向けた機体/エンジンの統合設計、風洞実験と CFD による実証研究が行われている。

4. まとめ

本シンポジウムにて、JAXA/大学連携で開発中の 2 つの ABE についての特別セッションを開催させていただいた。ABE の宇宙用推進機としての実用化に向け、今、飛行実験が重要であると考えている。また、我が

国の将来輸送系において、ロケット、ABE (スクラム、ターボ) などの形態をどのように整理していくかも今後の課題となる。多分野に跨る基盤研究、応用研究が数多くあり、宇宙輸送系の学生の教育の場でもあるため、ご興味のある方は是非参加していただきたい。

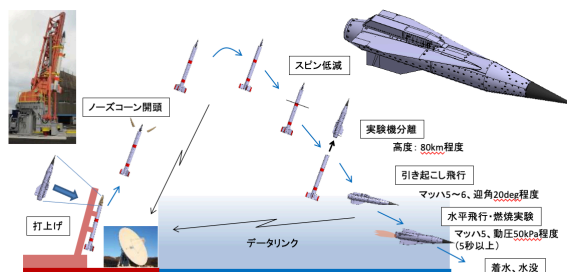


Fig. 3 HIMICO

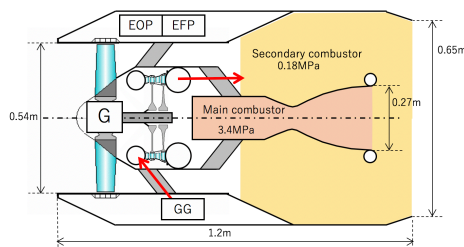


Fig. 4 ATRIUM

Table 1 Comparison of ATRIUM and ATREX

	ATRIUM (Air turbo mode)	ATREX
Thrust, kN	40	40
Averaged Isp, sec	2000	3000
Range of Mach number	0 - 2	0 - 6
Weight, ton	0.322	1.193

HIMICO の研究開発は、科研費基盤 A (15H02323) 及び基盤 S (20H05654) を受けて行われている。

参考文献

- [1] Taguchi, H., et. al., " Mach 4 Experiment of Hypersonic Pre-Cooled Turbojet Engine", 23rd International Symposium on Air Breathing Engines, ISABE-2017-22532 (2017).
- [2] 佐藤哲也、田口秀之他：極超音速統合制御実験 (HIMICO) の進捗状況、令和元年度宇宙輸送シンポジウム、STCP-2019-018 (2020).
- [3] 佐藤哲也、田口秀之他：極超音速統合制御実験機 (HIMICO) 1号機的设计検討、令和元年度宇宙輸送シンポジウム、STCP-2019-019 (2020).
- [4] 棚次亘弘、佐藤哲也、小林弘明他：ATREX エンジンの研究開発、宇宙科学研究所報告、特集 第 46 号、pp.1-248 (2003) .
- [5] 佐藤哲也他：エアターボロケット開発における大学での取り組み、第 64 回宇宙科学技術連合講演会、2H11(2020).