

大気球を利用したスペースプレーン技術の高速飛行実験システムの開発研究

丸 祐介, 澤井 秀次郎 (ISAS/JAXA), 小林 弘明 (IAT/JAXA),
坂東 信尚, 坂井 真一郎, 後藤 健 (ISAS/JAXA), 永田 晴紀 (北大),
スペースプレーン技術実証機 WG

1. はじめに

スペースプレーン技術実証機ワーキンググループでは、スペースプレーン関連技術を研究し、それらを実証する活動を行っている。その中で、研究成果を飛行実証する方法として気球を用いるシステムを検討しており、その実証システムの段階的な開発を進めている。飛行実証システム開発にあたっては、

- (1) 高高度からの落下によるマッハ数2程度までの飛行実証システムの開発,
- (2) (1)の実験機に、ロケットブースターによる加速を加えた、マッハ数5程度までの飛行実証システムの開発,
- (3) (2)のシステムを用いた、スペースプレーン技術の研究成果の飛行実証の継続的な実施,

のステップを踏むことを考えている。本開発研究は科学研究費補助金を受けて進めており、平成29年度までに(2)のシステム実証を完了させたいと考えている。本稿では、本開発研究における段階的な実験計画の概要と平成27年度気球実験として提案する(1)の実験の概要を述べる。

2. 開発研究の背景と目的

空気吸込式エンジンを用いた二段式スペースプレーンの実現に向けては、地上静止状態から極超音速に至る速度範囲を、安定に揚力飛行できる技術が必要である。必要な技術は多岐の分野にわたる。スペースプレーン実現への道筋を考えたとき、まず経験や知見の少ない高速揚力飛行に関わる技術について、技術的な見通しを得ることが必要である。そのためには、相関の強い複数の要素技術を実験機にインテグレートして、高速環境の飛行実験を行うことが効果的であると考えている。そこで我々は、以下の2つを目的として研究活動を行っている(図1)。

- A. スペースプレーンの実現に必要な技術を識別した上で、その研究を遂行し、技術を獲得すること。
- B. 具体的な形で技術を獲得するため、技術課題の研究成果を極超音速環境で飛行実証すること。そのための飛行実験システムを段階的に開発すること。

後者の目的に対して、効率的なフライト実証の方法として気球を利用することを考えている。気球を利用した場合には民生コンポーネントを使用しやすく、また規定の超音速状態を創り出すことが相対的に簡単であるため、効率的に超音速や極超音速の実験が実施可能であると考えることがその理由である。

我々は、全長4.6m、主翼スパン2m、全備重量650kgの実験機を開発し、平成22年度の大気球実験において、マッハ2程度までのシステム飛行実証実験を実施した(BOV#3飛行実験)。この実験において、高高度に飛揚した気球からの分離・落下によって、マッハ1.9程度までの加速が得られ、気球を利用した超音速飛行実験の有効性を示すことができた。しかしながら、(1)メインシュートの非開傘、(2)一部テレメトリデータの非更新、(3)飛行姿勢異常、の不具合が生じた。この結果を受け、得られたテレメトリデータを解析するなどして、これら不具合事象の原因究明を進めてきた。

「スペースプレーン技術の研究とその実飛行実証」という研究の目標を達成する飛行実験機の規模を再検討した結果、飛行実証する技術を絞り込むことで小型化が可能であると考えた。実験機規模の小型化は、実験実施に必要なリソースの低減のみならず、前述した、超音速飛行実験の次のステップであるマッハ5程度までの極超音速飛行実験の早期の実現にも寄与する(必要なブースター規模を小さくできる、などの理由による)。見直した規模の飛行実験機を用いた極超音速飛行実験システムを早期に構築し、技術の飛行実証を重ねていくことを目指す。その一方で、BOV#3の飛行姿勢異常の原因究明結果の実証の必要性と、極超音速飛行実験シ

テム構築に向けたステップとしての観点から、まず、ブースター加速を伴わない、超音速飛行実験システムの開発とその実証を行いたい。これを目的とする実験を kBOV#1 飛行実験と呼称し、平成 27 年度の気球実験に提案するものである。

kBOV#1 飛行実験を成功させることができた後は、kBOV#1 の実験機にブースターを取り付けた形態で、マッハ 5 程度までの加速を行う飛行実験、さらには、空力形状など飛行実証すべきスペースプレーン技術を実験機に取り入れた形態での飛行実験につなげていきたい。

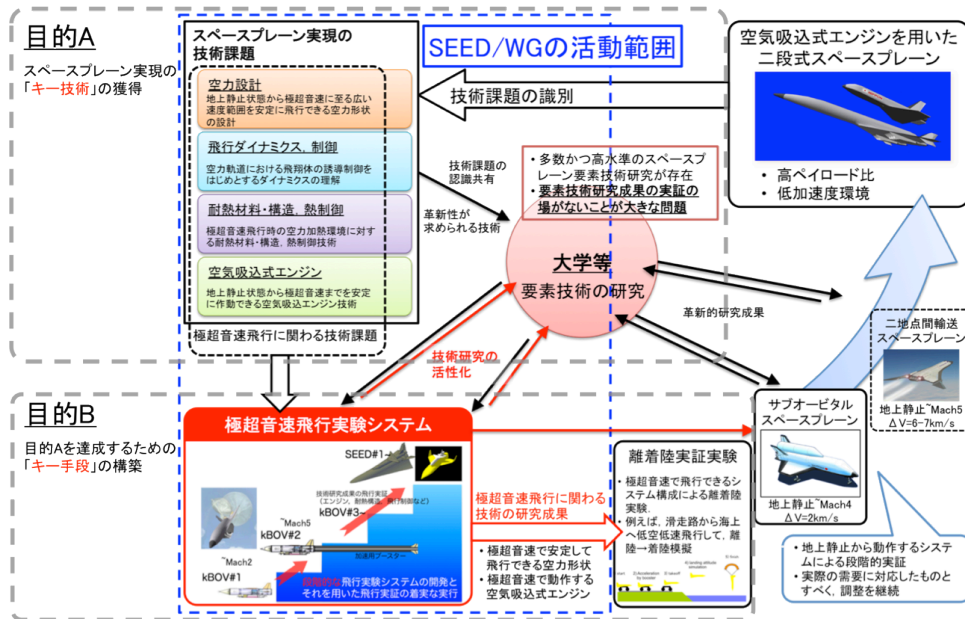


図1 研究活動の概要。

3. kBOV#1 飛行実験の計画概要

我々は kBOV#1 飛行実験を、気球を利用した高速飛行実験システム開発を段階的に進める上での第一段階と位置づけており、実験機部の機能確認と BOV#3 実験の反省を反映した飛行制御設計の実証が目的である。

飛行実験は、基本的に、BOV#3 実験と同様の実験シーケンスを踏襲する。図2に実験シーケンスを示す。気球により飛行実験機を 35km 以上の高高度まで飛揚させた後、実験機を気球から分離、落下させる。実験機は、落下により加速し、マッハ 2 程度の超音速飛行を達成する。同時に、空力的な引き起こし操作を行う。典型的な飛行軌道の例を図3に示す。高度 5km 程度 (TBD) でパラシュートを開傘して緩降下し、海上に着水する。海上に浮揚した実験機を船およびヘリコプターで回収する。

実験機体は、BOV#3 から相似形状のままスケールダウンする。kBOV#1 と BOV#3 の実験機諸元の比較を表1に、実験機のシステム概要図を図4に示す。実験機外形形状は、BOV#3 と相似としているので、空力データは基本的にそのまま用いることができる。BOV#3 では、供試ジェットエンジンとして予冷ターボジェットエンジンを搭載していたが、今回の実験では、特に飛行実験によって実証すべきエンジン技術項目 (外界との境界をなすインテーク・ノズル) を絞り込み、これら以外の部分を簡略化したラムジェットエンジンを搭載する。本実験では、エンジンの燃焼実験は行わず、インテーク・ラム燃焼器・ノズルの空気力学的データの取得に注力する。ただし、平成 28 年度以降に計画する実験に向けては、エンジン飛行実証技術としての燃焼実験手段を獲得したいため、燃焼実験実行方法の検討を進めていく。この場合、エンジンの燃料は、ガス水素を予定している。ガス水素の気球実験での運用は、BOV#3 での方法をベースに検討する。

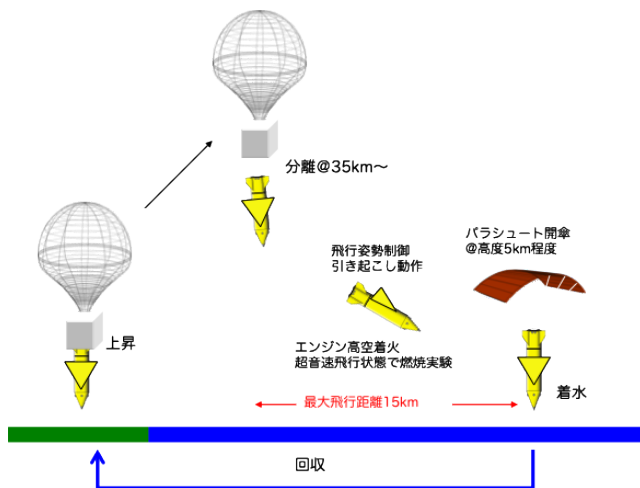


図2 実験シーケンス案.

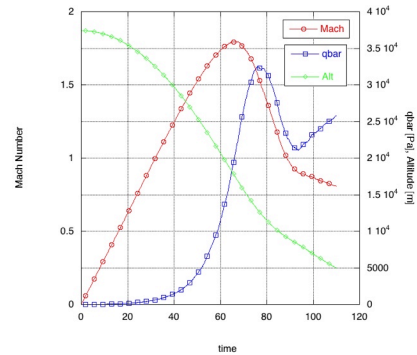


図3 典型的な飛行軌道の例.

表1 kBOV#1 と BOV#3 の主な実験機諸元の比較.

	kBOV#1	BOV#3
全長 [m]	2.1	4.6
胴体径 [m]	0.25	0.556
主翼スパン [m]	0.9	2.0
全備重量 [kg]	120 (計画値)	650
供試ジェットエンジン	ラムジェット*)	予冷ターボジェット

*) kBOV#1 のノミナル計画では、燃焼実験はしない。

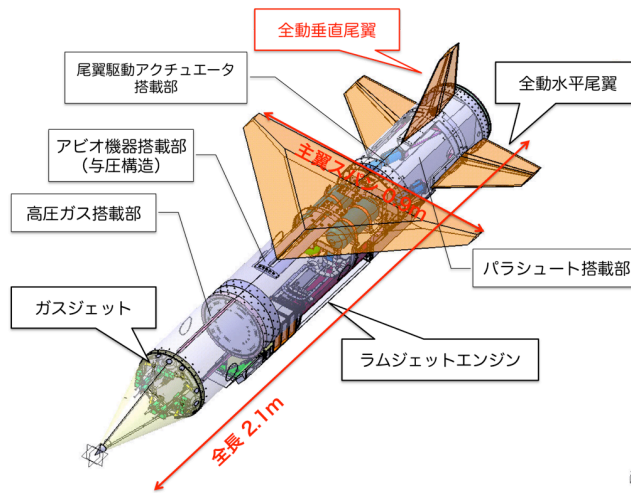


図4 kBOV#1 のシステム概要図.

構造は、BOV#3 の経験は踏襲するものの、サイズが大きく異なることから、機器配置を含め新規設計となる。電気機器を搭載するための与圧構造部を設ける。BOV#3 の飛行姿勢異常を受け、kBOV#1 では水平尾翼に加え、垂直尾翼も可動とし、ミスアライメントなどに起因する大きなプラント誤差にも対応できるように、事前の数値シミュレーションにより設計する。

アビオ機器は、BOV での構成・設計方針を踏襲しつつ、機体サイズに適応するハードウェア構成を検討している。通信アンテナについても同様である。

回収のためのパラシュートは、BOV#3 と同様、機体後部から放出する計画である。やはり実験機サイズの変更により、パラシュート構成の再検討を行っており、BOV#3 で使用したパイロツ

トシュート（超音速対応）を、kBOV#1ではドローグシュートとして使用することを考え、検証を進めている。また、メインシュートにはフロート機能を持たせることで、着水後に浮揚するための浮力を確保する計画である。

飛行制御系については、BOV#3 飛行実験の結果を受け、可動とする垂直尾翼を用いた制御系を再構築する。図5は、BOV 3号機の再現シミュレーションの結果と、これにラダー制御を組み込んだ場合のシミュレーション結果の比較である。図5(a)は、ロール角速度の履歴である。再現シミュレーションでは、BOV 3号機の実験における挙動の特徴であった、ロール角速度の急上昇と極性反転が再現できている。一方、ラダー制御を組み込んだ場合、ロール角速度はほぼゼロに制御されている。図5(b)に、飛行軌道を天から見た図を示す。目標とする飛行方向は、Xe軸である。BOV 3号機では、ロール回転のため、引き起こし方向を定めることができず、引き起こせないまま落下してしまった。シミュレーションでもこれを再現できている。一方、ラダー制御を組み込んだ場合、引き起こしを行って、目標とする飛行方向に飛行できていることがわかる。

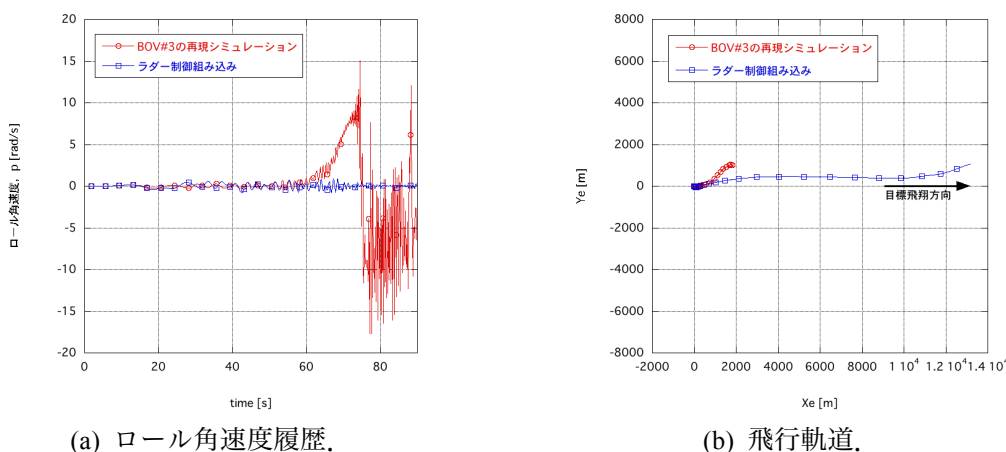


図5 ラダー制御の効果。

4. まとめ

スペースプレーン技術の高速飛行実験システムの開発構想について紹介した。早期に高速飛行実験システムを確立する観点から、BOV#3 より実験機サイズを小型化した実験システムの検討を進めている。気球を用いた飛行実験計画としては、実験機の機能確認と BOV#3 の不具合対応実証として、まずブースター加速を行わない飛行実験 (kBOV#1) を行った後、ロックオン方式の高速飛行実験システムの実証実験 (kBOV#2) へと移行したい。

kBOV#1 の飛行実験は、BOV#3 飛行実験の経験を踏襲するが、特に飛行制御系設計の面で BOV#3 飛行実験の反省を十二分に反映させる所存である。機械系・電気系ともハードウェアについては、BOV#3 実験機の考え方を踏襲するものの、基本的には新規設計である。現在、それぞれのハードウェアの製作を進めており、コンポーネント毎の検証・機能確認を行っているところである。来年度の気球実験実施に向けて、今後準備を加速し、全系の噛み合わせから環境試験を含む総合試験を進めていく。