STCP-2022-018

高速軌道を用いた着陸実験システムの構築

Development of Landing Experiment System using Rocket Sled

○江口　光，岡野　裕，柴田　拓馬，中田　大将（室蘭工業大学）
Hikaru Eguchi, Hiro Okano, Takuma Shibata and Daisuke Nakata

Key Words: Rocket Sled, Reusable Rocket, Landing

Abstract

The flight demonstration of reusable rockets requires landing technologies such as deceleration and descent by engine throttling and shock absorption by landing legs. To achieve these landing technologies, this study aims to create a landing and descent environment using a rocket sled for reusable rockets. In this paper, we describe the landing and descent environment that can be achieved with the proposed experimental system, and also describe its current development status.

1.　背景

宇宙輸送の高頻度化，輸送コストの低減化のために，国内外で再使用型ロケットの研究開発が実施されている．国内では 2003 年に ISAS/JAXA で開発された再使用ロケット実験機 RV-T が高度 42m の垂直離着陸飛行実証に成功しており，現在は，再使用ロケット実験機 RV-X[1)]や空気吸込み式エンジンを搭載した再使用観測ロケットの開発[2)]がおこなわれている．

再使用型ロケットの垂直離着陸飛行実証のためには，飛行から着陸に至る際に，機体搭載センサからの機体状態のデータ取得，エンジンスロットリングによる機体の減速，着陸脚による衝撃吸収といった一連の技術を確実に実施できることが求められる．

本研究では，エンジンスロットリングによる機体の減速降下，着陸脚による衝撃吸収といった再使用型ロケットの着陸技術獲得のために，高速軌道を用いた着陸実験システムを提案する．

2.　高速軌道を用いた着陸実験システム

2.1.　高速軌道

高速軌道とは，線路上を台車が高速で走行する実験設備である（図 1）．台車に搭載したロケットエンジンもしくはジェットエンジンの推力で台車を水平方向に走行させることで高速度・高加速度環境下で実験が可能となる．



図 1　300m 高速軌道

This document is provided by JAXA.

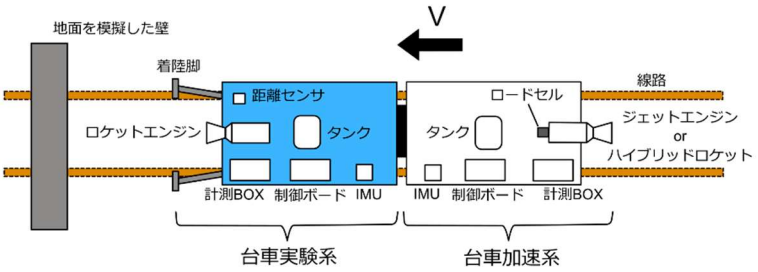


図 2　300m 高速軌道を用いた着陸実験システムの概要図

2.2.　提案する実験システムの概要

筆者らが提案する高速軌道を用いた着陸実験システムの概要図を図 2 に示す．本実験システムは，再使用型ロケットの垂直着陸運動を線路上を走行する台車の水平方向運動に置換したものであり，台車加速系と台車実験系で構成される．台車実験系に再使用型ロケットのエンジンと着陸脚を搭載し，再使用型ロケットの機体を模擬する．実験は，以下の流れでおこなう．

(1). 線路端に設置した模擬地面に向かって台車を走行させる．この時，台車加速系に搭載されたエンジンを用いて力を入力させる．

(2). 台車走行中に台車実験系に搭載された再使用型ロケットエンジンを着火させ，エンジン推力により台車を減速させる．

(3). 着陸脚により地面を模擬した壁に着陸する．

2.2.1.　台車加速系

台車加速系は着陸降下時に作用する惑星の加速度環境を模擬するために用いる．推進系はジェットエンジンもしくはハイブリッドロケットの使用を想定している．台車に取り付けた慣性計測センサ（IMU）により台車の加速度を計測し，またロードセルによりエンジン推力を計測する．台車加速度とエンジン推力の情報をもとにタンクからエンジンへの燃料流量を制御することで台車の加速度を制御する．

2.2.2.　台車実験系

台車実験系は，再使用型ロケットの機体を模擬したものであり，ロケットエンジン，着陸脚，距離センサ，IMU，制御ボードを有する．台車の速度と加速度を IMU で計測し，また地面を模した壁までの距離を距離センサにより計測する．これら情報をもとにロケットエンジンの推力を制御することで台車を減速させ，着陸脚で壁面に着陸する．

2.3.　本実験システムの利点

本実験システムの利点として，以下が挙げられる．

- 線路上に拘束された 1 次元運動であるため安全に実験が可能
- 台車加速系による着陸降下環境の模擬
- 着陸降下環境下でのエンジンスロットリング技術の獲得
- エンジン燃焼時における距離センサの機能確認
- エンジン燃焼を伴う着陸降下での着陸脚の性能確認

本実験システムを用いることでセンサ，エンジン，着陸脚を統合した試験が可能となる．このため，着陸機の制御系の動作確認，またエンジンと着陸脚を含めた着陸系の妥当性を確認できるという点において利点があると考える．

3.　本実験システムで実現可能な着陸降下環境

本実験システムで実現可能な着陸降下時の加速度・速度環境について検討をおこなった．図 3 に示すように，台車を 150m 加速走行させ，目標加速度を維持するための必要推力を計算する．

This document is provided by JAXA.

計算された必要推力が台車加速系の推進系であるジェットエンジンもしくはハイブリッドロケットで実現可能かを判定する．計算では，車輪の摩擦抵抗，速度に応じた空気抵抗，推薬消費による台車質量変化を加味した．

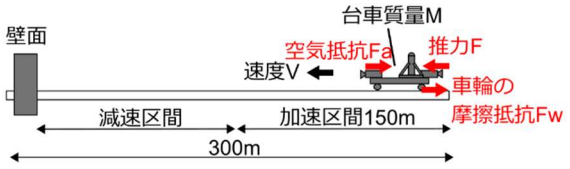


図 3　300m 高速軌道の台車加速走行

3.1.　計算条件

表 1 に計算条件を示す．目標加速度は，地上重力 1G を基準とした 5 ケースについて検討を行う．1/6G は月重力環境，1/3G は火星重力環境であるが，これは将来的に再使用型ロケットを惑星探査に利用する計画もあることを考慮した．台車質量 50kg は推進系にジェットエンジンを搭載した場合であり，台車重量 400kg はハイブリッドロケットを搭載した場合である．ジェットエンジンは模型航空機で用いられる市販品を使用することを想定しており，搭載性と運用性の容易な点が利点である．一方，ハイブリッドロケットは室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センターで実際に運用されており，推力規模も運用実績値を設定した．台車車輪の摩擦係数と空力の抗力係数も過去の高速軌道実験の運用実績から設定している．

表 1　計算条件

項目	単位	値
目標加速度	G	1/6, 1/3, 1, 2, 3
台車質量	kg	50, 400
エンジン推力	N	500, 8000
台車車輪摩擦係数		0.4
抗力係数		0.7

3.2.　計算結果

必要推力の計算結果を図 4，図 5 に示す．各図の縦軸が必要推力であり，表 1 のエンジン推力以下の範囲にあるプロット線が達成可能な加速度環境である．図中で各プロット線の必要推力が時間が経つにつれて大きくなるのは台車の速度上昇に伴い空気抵抗が増加し，その分，加速度維持のために推力が必要となるためである．

図 4 はジェットエンジンを使用した場合の結果である．ジェットエンジン推力は 500N であるため，500N 以下の範囲が達成可能な加速度環境となる．図 4 の結果より，ジェットエンジンを搭載した台車では，1/6G，また 1/3G ならば 6 秒までは加速度を維持可能であることが計算結果からわかる．

図 5 はハイブリッドロケットを使用した場合の結果である．ハイブリッドロケット推力 8kN 以下の範囲が実現可能な加速度範囲ということになる．図 5 の結果より，ハイブリッドロケットを搭載した台車では，1/6G, 1/3G, 1G の加速度環境が実現可能となる．

次に本実験システムで得られる速度環境について考える．図 6 に目標加速度を維持した状態で走行した場合の 150m 地点での到達速度を示す．図 6 より，1G の加速度環境ならば 150m 走行時の到達速度は 55m/s となる．過去の ISAS/JAXA でおこなわれた再使用ロケット RV-T の高度 100m 上昇降下飛行解析では最高降下速度は 23m/s 程度である．また仮に高度 100m から再使用型ロケットを減速せずに自由落下させた場合でも地面到達時の速度は$V = \sqrt{2gh}$より，V =44.3m/s となる．

以上より，ジェットエンジンまたはハイブリッドロケットを使用することで地球・火星・月の重力環境の模擬が可能であり，さらに垂直離着陸飛行実証の着陸降下速度も本実験システムで達成可能である．

This document is provided by JAXA.

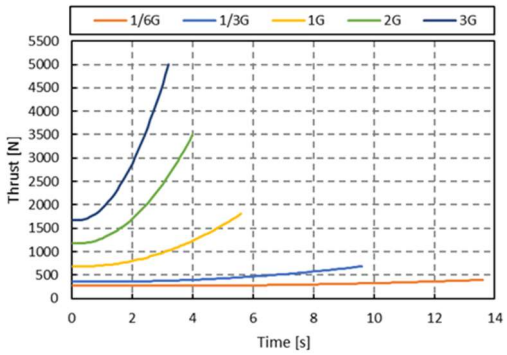


図 4　ジェットエンジン台車での必要推力

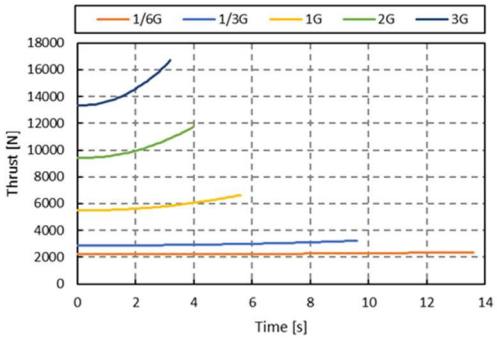


図 5　ハイブリッドロケット台車での必要推力

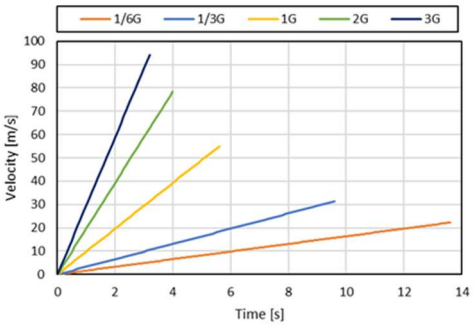


図 7　150m 走行時の到達速度

4.　現在の実験システム構築状況

現在は 100m 高速軌道を用いて本実験システムの制御系構築に取り組んでいる（図 8）．図 9 に 100m 高速軌道着陸実験システムの概要図を示す．台車の推進系には模型飛行機用の電動ファンやジェットエンジンを用いている．台車に搭載する慣性計測センサ, 距離センサは 300m 高速軌道着陸実験システムの搭載品と同じものを使用している．取り回しの良い 100m 高速軌道設備を用いることで，センサデータ取得から台車の加速度制御までの一連の制御の実機実証をおこなっている．

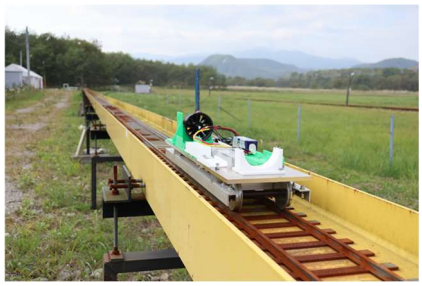


図 8　100m 高速軌道着陸実験の様子

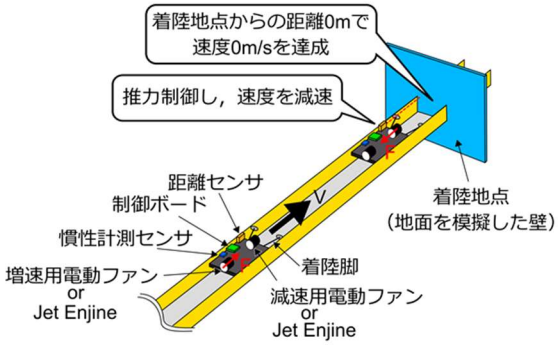


図 9　100m 高速軌道着陸実験の概要図

5.　まとめ

本稿では，再使用型ロケットの着陸技術獲得のため，高速軌道を用いた着陸実験システムの提案と検討状況について報告した．本実験システムの性能として，再使用型ロケット飛行実証の着陸降下環境を模擬できることを示した．今後，着陸降下時のセンサデータ取得，エンジンスロットリングによる減速，着陸脚による着陸衝撃吸収といった，一連の着陸実験の実現性について本実験システムの構築に取り組んでいく．

参考文献

1)　野中聡，伊藤隆，紙田徹：再使用ロケット実験機 RV-X の飛行実証研究について，第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 1I01, 2022.

2)　坂本勇樹，et.al.：ATRIUM エンジンを適用する小規模飛行実証試験の検討状況，第 66 回宇宙科学技術連合講演会講演集，1G12, 2022.

This document is provided by JAXA.