

RERA-4：ゴム気球を用いた薄殻エアロシェル大気突入カプセルの自由飛行実験

高橋裕介¹、高澤秀人¹、宮下岳士¹、若林海人¹、吉雄忠行¹、玉井亮多²、平田耕志朗³、
山本春佳⁴、丹野茉莉枝⁵、永田靖典⁵、山田和彦⁵

1 北海道大学、2 東京大学、3 東京農工大学、4 東京理科大学、5 宇宙航空研究開発機構

RERA-4: Rubber balloon experiment for reentry capsule with thin-type aeroshell

Yusuke Takahashi¹, Hideto Takasawa¹, Takashi Miyashita¹, Kaito Wakabayashi¹, Tadayuki Yoshio¹,
Ryota Tamai², Koshiro Hirata³, Haruka Yamamoto⁴, Marie Tanno⁵, Yasunori Nagata⁵,
and Kazuhiko Yamada⁵

1 Hokkaido University, 2 The University of Tokyo,

3 Tokyo University of Agriculture and Technology, 4 Tokyo University of Science, 5 JAXA

1. はじめに

小惑星帯以遠の天体からサンプルリターンを実現するためには、はやぶさサンプルリターンカプセル以上の超高速大気突入の課題を解決する必要がある。軽量かつ大面積の薄殻エアロシェルは、高高度において予め空力減速を果たし空力加熱や終端速度を大きく減じることから、将来の大気突入技術として期待されている。薄殻エアロシェルを備えたカプセルを深宇宙サンプルリターンカプセル(DS-SRC)の候補として技術検討が進められている。

DS-SRCの実現に当たり、動的な空力姿勢不安定性が大きな課題の1つである。これは空力によってカプセルに姿勢運動が生じた際、運動減衰が機能せず、むしろ位相遅れによりその運動を促進し得る現象のことである。このときカプセル破損や空力減速性能の低下、それによる着地予測点の悪化など重大な問題が現れる。新しいサンプルリターンカプセルを開発する上で、動的空力不安定の理解の不足が大きな障壁となっている

そのため動的空力不安定性がどのような質量特性や機体形状で生じ、そのメカニズムがどのようなものかはまだ明確になっていない。現在、風洞試験や数値解析を用いて調べられているものの、実飛行環境の再現とその運用技術の蓄積、飛行データは必須である。薄殻エ

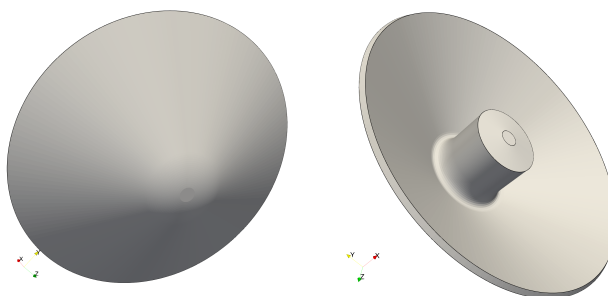


図1. 薄殻エアロシェルカプセルの外観（左：前面、右：背面）

アロシエルカプセルはパラシュートレスであることから、従来あまり注目されてこなかった低速領域の挙動も重要である。よって動的不安定の問題を実証的パラメータ研究として推進するプラットフォーム構築の需要がある。

2022 年度気球実験 BS22-07 においてゴム気球を用いた DS-SRC の自由飛行試験(RERA-1)を実施し、ゴム気球実験プラットフォームを構築した[1]。2023 年度では同コンセプトの BS23-07&-09 (RERA-2&-3)を連続実施し、高頻度飛行試験を実証した。これはゴム気球の低コスト性・迅速性・柔軟性を最大限活用したものである。このような活動を通してカプセル開発の貢献、人材育成の機会提供、そして動的姿勢不安定の再現を図った。しかし 3 機の RERA データはともに姿勢安定飛行を示しており、まだ動的姿勢不安定は見出だせていない。姿勢不安定の再現すなわちどのような条件で不安定に至るか明らかにする必要がある。

よって本実験の目的を、DS-SRC の動的不安定性挙動をゴム気球投下による自由飛行環境のもと再現することとする(RERA-4)。パラメータとしては重心位置や慣性モーメント、エアロシエルなどの機体形状の変更である。RERA-4 ではこれまでの RERA で構築した電子機器類などの共通基盤系を出来るだけ踏襲し、機体開発の負担を低減することも目指す。

2. 実験計画

RERA-4 もこれまでの気球実験 RERA-1, 2, 3 で用いた実験機とほぼ同じ形状である。その外形は上述の薄殻エアロシエルカプセルフルスケール形状であり、直径 80cm、質量 2.0 kg の円錐形である。重心位置はできるだけ後方に設置する、これは後方重心位置の方が動的姿勢不安定が見込まれるためである。発泡スチロール等の軽量素材でカプセル外殻を製作する。電池、データ収集基板、送信機、アンテナを含めた電子機器類を、直径 10 cm 程度の円筒形にまとめてエアロシエル背面に搭載する。電子機器は、発泡スチロール等で保温し、気球上昇～降下までの期間において動作温度範囲に保つ設計をする。実験機は背面側をロープでつるし、ゴム気球の HK ゴンドラに接続する。目標高度で、コマンドを送信によるロープカッター切断、実験機を自由落下させて実験を開始する。

2-1. 飛行中の機体近傍環境

ノミナル条件の流れ場環境や飛行速度を見積もるための軌道解析は実施済みである[2]。RERA カプセル近傍の流れ場は最大マッハ数0.10 – 0.20、レイノルズ数 10^5 となる。実際の大気突入カプセルと比べると、低速領域であるマッハ数0.05 – 0.20の領域においてレイノルズ数は5倍程度の差が認められる。しかし、このカプセル形状では流れのはく離箇所が明確であり、注目している現象再現において大きな差異は現れないと考えている。

2-2. 技術的成熟度

これまでの RERA 実験を通して、機体設計開発、事前試験、実験実施、データ回収において多数の知見を得ている。本提案では RERA-2&-3(図 2)の設計を基本的に踏襲する。すでに飛行実績のあることから技術的成熟度は十分なものと判断している。パラメータ研究の目的から実験機の重心や慣性モーメント、形状の変更を予定している。これは実験実施にクリティカルな影響を与える変更にならないと考えている。あるいはそれが予想される場合はこれまで行った試験に基づき健全性を確認する。



図 2. BS23-07&-09 実験機
(RERA-2&-3)

2-3. 開発体制

北海道大学や JAXA の関連研究室所属学生・若手研究者を主体としたチームを形成する。前回の実施メンバー参加に加えて、新規メンバー参加も予定している。近年ではシステム工学人材の教育も大学を中心に行われ始めている[3]。研究・開発成果に加えて、本提案には将来の宇宙工学人材の教育効果も RERA の重要な要素である。

2-4. 開発スケジュール

製作期間は、機材の調達期間も含めて二ヶ月とし、各種試験（動作確認、熱環境試験、電波干渉試験）は二ヶ月、合計で四ヶ月程度の開発期間を考えている。2024 年 5 月から気球実験期間が開始するとした場合、それに間に合わせるために、年明けに製作をスタートする。電子機器や計測装置、通信機器は RERA-2&-3 で利用したものをを用いる。

2-5. 実験機器

実験に必要な機器は下記の通りである：

- (1) 発泡スチロール等の軽量素材で作成したエアロシェル
- (2) 実験機の姿勢運動を計測するセンサと降下軌道を特定する GPS（フライト実績のあるセンサを利用する）
- (3) 測定データを集約し、気球の送信機へ送出するデータ集約器（すでに実績がある小規模フライト用のテレメータ基板（U-TeCS）を使用）
- (4) データ送信機とアンテナ（気球グループ標準のものを使用する）
- (5) 搭載機の電源（一次電池）（気球実験で標準的に使われているものを使用する）
- (6) 実験機をゴム気球から切り離すワイヤーカッター（気球実験で標準的に使われている

ものを使用する。切断コマンドは気球をコントロールするゴンドラがコマンドをうけて実行する)

2-6. 実験シーケンス

実験概要を図3、実験シーケンスを下記に示す：

- (1) 地上で実験機の電源 ON
- (2) 動作確認を実施（計測データは実験機搭載の送信機から地上局に送信）
- (3) ゴム気球放球
- (4) 高度 25 km 程度まで上昇（1-2 時間程度）
- (5) 所定の高度において気球制御側のコマンドでゴンドラと実験機をつなぐロープを切断
- (6) 実験機の自由飛行開始
- (7) 自由飛行時の姿勢運動データ、GPS データ、温度データ、カメラデータをテレメトリとして地上局へ送信
- (8) 海上着水、実験終了。回収は行わない。

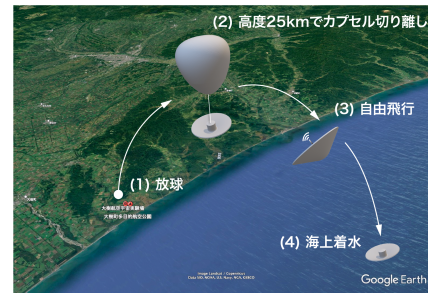


図 3. RERA 実験概要

4. まとめ

2022 年度に RERA-1, 2023 年度に RERA-2&-3 を継続して実施し、ゴム気球を用いた気突入カプセルの自由飛行実験プラットフォームを構築しつつある。ゴム気球の特性を利用した低コスト・高頻度実験の実現が大きな特徴であり、従来用いられてきた風洞実験や数値解析と緊密に連携しながら、新しい大気突入技術の確立とそれによる宇宙ミッションの創出に貢献していきたい。RERA-1, 2, 3 で培われた知見に基づいて本提案の RERA-4 では従来設計をできるだけ踏襲する。これにより開発の低コスト化を果たし、カプセルの空力動的姿勢不安定の再現を図る検討に注力する。本プラットフォームによって、深宇宙サンプルリターン向けカプセルの不安定の理解、カプセルの姿勢不安定境界の探索、大学院生などを対象としたシステム工学人材の育成が教育上の成果に結びつくことも期待する。

参考文献

- [1] 高澤秀人ら, 「ゴム気球を利用した新型大気圏突入カプセルの低速領域の自由飛行試験」, JAXA-RR-22-008, pp.37—50, 2023-02-17
- [2] 高橋裕介ら, 「RERA-2: ゴム気球を用いた新型大気突入カプセルの自由飛行実験」, II-9, 大気球シンポジウム, 相模原, 11/7-8, 2022
- [3] f3 工学教育研究センター, 「f³工学教育研究センター活動報告書」, 令和 5 年 3 月 30 日