

## 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

高橋裕介<sup>1</sup>、高澤秀人<sup>1</sup>、宮下岳士<sup>1</sup>、永田靖典<sup>2</sup>、山田和彦<sup>2</sup>

1 北海道大学、2 宇宙航空研究開発機構

### RERA-2: Rubber balloon experiment for reentry capsule with thin-type aeroshell (2023)

Yusuke Takahashi<sup>1</sup>, Hideto Takasawa<sup>1</sup>, Takashi Miyashita<sup>1</sup>,

Yasunori Nagata<sup>2</sup>, and Kazuhiko Yamada<sup>2</sup>

1 Hokkaido University, 2 JAXA

#### 1. はじめに

木星・土星圏などの遠方天体からサンプルリターンを実現するために薄殻エアロシェル大気突入カプセルが提案されている。図1にこのカプセルの外形状を示している、この形状は直径0.8 mの背面をくり抜いた鈍頭円錐である。最大の特徴は軽量かつ大面積の薄殻エアロシェルである。これがEDL (Entry, Decent, and Landing) 過程において効率的に空力減速を果たす役割を担い、併せて空力加熱を大きく低減する。終端速度も減じることからパラシュートを不要とすることも利点となる。この新しいエアロシェルは「はやぶさ」カプセルを超えるような超高速大気突入を克服する手段の1つとなる。

新しい大気突入技術の実現にあたり、動的な空力姿勢不安定性が大きな課題となっている。動的な空力姿勢不安定は空気力に由来する姿勢運動が生じた際に、復元力による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。空力姿勢不安定性が生じた場合、カプセル破壊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。新しい大気突入カプセルを開発する際において、動的な空力安定性の理解の不足が大きな障壁となっている。

薄殻エアロシェルカプセルにおいても動的な空力不安定性がどのようなメカニズムで生じるのか明確になっていない。質量特性や初期迎角の影響も不明である。現在、風洞試験や数

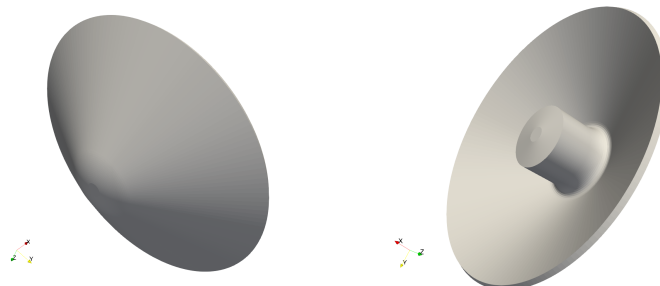


図1. 薄殻エアロシェル大気突入カプセル外観 (左: 前面、右: 背面)

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。薄殻エアロシェ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新型大気突入カプセルの自由飛行試験(RERA-1)が実施された。その過程でゴム気球実験プラットフォームの雛形を構築されている。ゴム気球はその低コスト性・迅速性から高頻度実験の可能性を有する。この特性を利用して著者らは自由飛行試験による実証的パラメータ研究に着目した。

以上より本実験の目的を、低速領域における新型大気突入カプセル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明らかにすること、さらにはその高頻度実験プラットフォームを構築すること、とした。本稿ではその実験計画について述べる。

## 2. 自由飛行軌道

気球実験機形状は実際の地球大気突入を想定する薄殻エアロシェルカプセルのフルスケール形状である。すなわち、図1にも示しているような直径0.8 mの背面をくり抜いた鈍頭円錐形状である。実験機の質量はゴム気球実験の制約より最大で2.0 kgを想定する。

自由飛行中の流れ場環境や飛行速度を見積もるために軌道解析を実施する。ここでは地球中心・地球固定(ECEF)の非慣性座標系における3自由度質点系運動方程式を解く。質点に働く外力は重力、コリオリ力、遠心力である。重力は重力ポテンシャル $J_{20}, J_{22}, J_{30}, J_{40}$ を考慮している。大気データとして NRLMSISE-00 大気モデル (January 1st, 2015) [2]を用いている。質量2.0 kg, 機体直径0.8 m, 抵抗係数1.0として、高度20, 25, 30 kmから自由落下を開始したときの自由飛行軌道(RERA)を対象とする。比較のために大気突入条件(Ref)での解析も行う。これは質量10 kg, 直径0.8 m, 抵抗係数1.0として高度200 kmにおいて初期軌道速度15 km/sとし突入経路角 $-11$ 度を与えるものである。

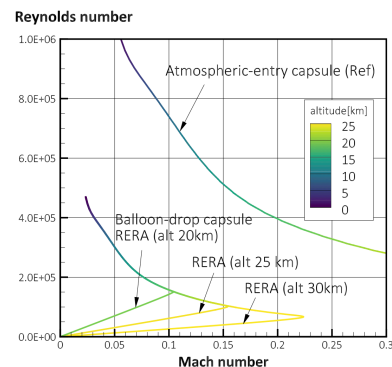


図2. 自由飛行軌道

図2は上記諸元の RERA 軌道予測結果である。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。実際の地球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。

### 3. 実験計画

本提案ではゴム気球実験の高頻度化に注目している。1度の実験キャンペーン期間で2回の気球実験(RERA-2, RERA-3)を行うことにより、本来相反する性質のパラメータ研究と実証研究を同一枠内で行う。この高頻度実験プラットフォームの実証が今回の核心となる。

BS22-07 実験機(RERA-1、図3)では、機体設計開発、事前試験、実験実施、データ回収など多くの面で期待通りの成果を得た[1]。本提案では RERA-1 の設計を踏襲する。したがってすでに飛行実績があるため技術的成熟度は十分なものと判断している。ただしパラメータ研究として実験機の重心や慣性モーメント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。あるいはそれが予想される場合は前回行った内容に基づき事前試験を行う。

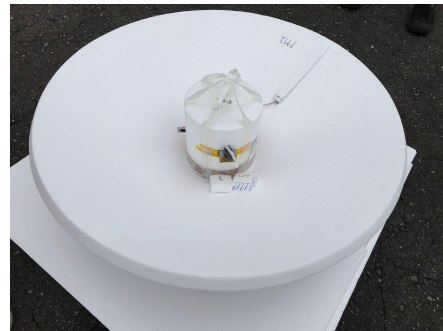


図3. BS22-07 実験機 (RERA-1)

BS22-07 ではフライトモデルが2機制作されていた。このうち1機は RERA-1 として放球し、予備機であったもう1機は現在まで保管されている。この予備機を RERA-2 として改修して使用、およびもう1機新規製作して RERA-3 とする。実験機改修・製作期間は、機材の調達期間も含めて2, 3ヶ月を想定し、各種試験(動作確認、熱環境試験、電波干渉試験)は2ヶ月を想定する。約4ヶ月の開発期間と考えている。2023年6月からの気球実験キャンペーンに間に合わせるためには、年明けに実験機改修・製作を始めるスケジュールを想定している。キャンペーン早期に RERA-2、晩期に RERA-3 放球を想定する。なお、今後にむけて、より開発期間を短縮するために、データ計測系の基板集約化を検討している。その検討作業はすでに開始しており、2022年度内に完成させて新規製作機体への実装を想定している。

実験に必要な機器は下記の通りである：

- (ア) 発泡スチロール等の軽量素材で作成したエアロシェル
- (イ) 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)
- (ウ) 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)
- (エ) 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)
- (オ) 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)
- (カ) 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)

実験システムを図4に、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。

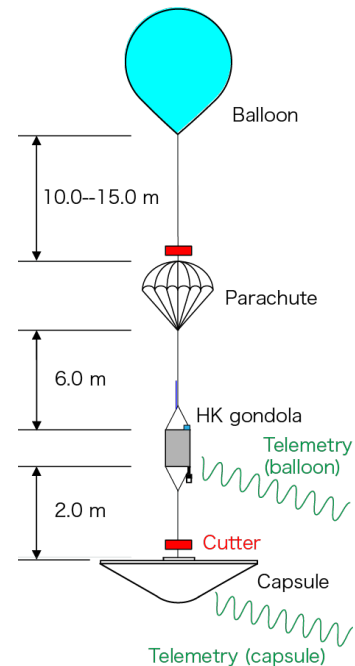


図4. 気球実験システム

#### 4. まとめ

2022 年度気球実験 BS22-7 である RERA-1 をベースとして、新しい大気突入カプセルのパラメータ研究を目的とした実験の実施、さらにはそれを通じた高頻度プラットフォームの実証を提案した。実験機はゴム気球の特性に合うようあえて機能を制限し、コンパクトな開発とすることで低コスト性・迅速化を実現するものである。本来相反する性質のパラメータ研究と実証研究が同一フレームワークにおいて両立することを期待する。本実験によって、深宇宙サンプルリターン向けカプセルの低速領域における動的空力不安定性の理解が研究上の成果、カプセルの姿勢安定・不安定飛行する境界の探索が開発上の成果、さらには大学院生などの若手研究者を対象とした実飛行試験参加を通じ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] 高澤ら「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試験」, ASTRO-2022-B022, 第 32 回アストロダイナミクスシンポジウム, 7/25-26, 2022.
- [2] NRLMSISE-00 Atmosphere Model.  
<https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/nrlmsise00.php>