

## ゴム気球を用いた低速域における薄殻エアロシェル型大気圏突入カプセルの 自由飛行試験

高澤秀人<sup>1</sup>、末永陽一<sup>2</sup>、宮下岳士<sup>1</sup>、平田耕志郎<sup>3</sup>、若林海人<sup>1</sup>、高橋裕介<sup>1</sup>、永田靖典<sup>4</sup>、山田和彦<sup>4</sup>

1 北海道大学、2 東京大学、3 東京農工大学、4 宇宙航空研究開発機構

### Low-speed free flight experiment for thin-shell type reentry capsule using rubber balloon

Hideto Takasawa<sup>1</sup>, Yoichi Suenaga<sup>2</sup>, Takashi Miyashita<sup>1</sup>, Koshiro Hirata<sup>3</sup>, Kaito Wakabayashi<sup>1</sup>,

Yusuke Takahashi<sup>1</sup>, Yasunori Nagata<sup>4</sup>, and Kazuhiko Yamada<sup>4</sup>

1 Hokkaido University, 2 The University of Tokyo, 3 Tokyo University of Agriculture and Technology, 4 JAXA

#### 1. はじめに

木星圏や土星圏のような深宇宙を対象とした新しいサンプルリターンミッションが提案されている[1]. サンプルリターンの実績があるはやぶさカプセルは地球大気圏再突入時の速度が12 km/sであった. 一方, 深宇宙からの帰還では地球大気圏再突入速度は15 km/sにも及ぶ. そのためカプセルには極めて厳しい空力加熱が生じる. そこで, 図1に示す軽量かつ大面積エアロシェルにより弾道係数を下げ, 高高度から効率的に空力減速を行い, 加熱を避ける新しいコンセプトの薄殻エアロシェル型カプセルが提案されている.

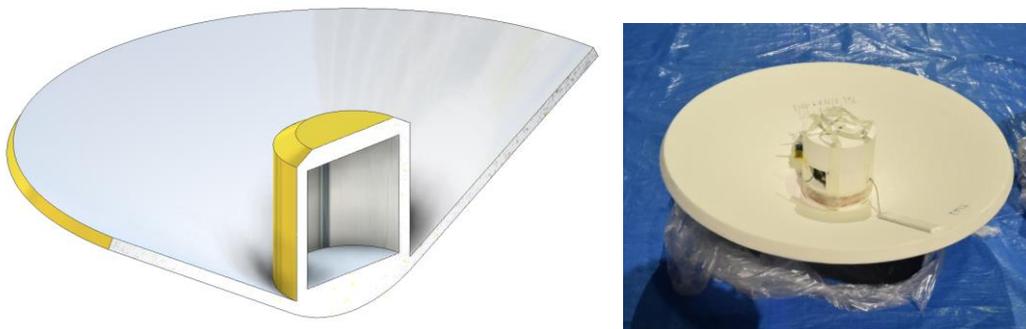


図1 薄殻エアロシェル型カプセル (左) と RERA カプセル (右)

空力不安定性[2]とは, 飛行時にカプセルが流体から力を受けて姿勢運動が発散 (回転) してしまう現象のことである. この回転により, 十分な空力減速性能を発揮できなくなることや落下予測地点から外れた地点に落ちてしまう可能性が挙げられる. 本カプセルはパラシュートレスのため影響しないが, 一般的なカプセルではパラシュートを適切に展開できない問題も考えられる. したがってサンプルリターンの安全性・成功率向上のため, 空力不安定性の低減化手法が求められている.

フライト試験は, 試験機会が少なく試験準備に時間がかかるものの, 自由飛行であるため実飛行時の現象を再現できる. そのため飛行データを参考に風洞試験結果と実フライトの関連性を評価し風洞試験への理解を深めることができ, 加えて飛行データを検証データとして数値解析の信頼性向上に繋ぐことができる. そしてアップデートされた風洞試験や数値解析結果に対しフライト試験を実施, その結果を風洞試験や数値解析にさらにフィードバックを繰り返す事で現象の理解を深めることができる.

以上より本研究の目的は、ゴム気球による自由飛行試験を用いて低速域における薄殻エアロシェル型カプセルの動的安定性を評価し不安定性現象の解明につなげることである。これまでのカプセルではパラシュートがあるために低速域での実飛行挙動に注目されてこなかった。しかし、ここで想定している薄殻エアロシェル型カプセルはパラシュートレスであるため、低速域での挙動理解が実用化には不可欠である。

このような背景に基づき気球実験RERA (Rubber balloon Experiment for Reentry capsule with thin Aeroshell) を2022年7月1日に大樹航空宇宙実験場で実施した。

## 2. 気球実験 RERA の概要

本実験は、自由飛行における薄殻エアロシェル型カプセルの挙動を取得・評価、不安定化現象解明の足掛かりを得ることが目的である。計測値の測定頻度を表1に、実験シーケンスの概念図を図2に示す。機体質量の実験制約から本実験では、直径 0.8 m、高さ 0.235 m、総質量 1.56 kg、機軸周りの慣性モーメント 0.033 kg m<sup>2</sup>、機軸垂直周りの慣性モーメント 0.020 kg m<sup>2</sup>、フレア部先端から高さ方向に 0.128 m の位置に重心がある RERA カプセルを使用した。軸対称形状であるため、x 軸周りの慣性モーメントと y 軸周りの慣性モーメントは等しいと仮定し、慣性モーメントを測定した。重心位置は模型機軸上にあると仮定し計測した。慣性モーメントが実機より 1 オーダー程度小さいため、振動の振幅に影響があると考えられる。また、より高い高度から自由飛行ができると飛行速度域が広がるため、ゴム気球が割れないと考えられる最高高度 25 km を RERA カプセル切り離し高度とした。

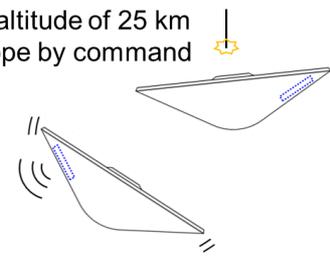
表 1 計測値と測定頻度

	Frequency
加速度,m/s <sup>2</sup>	100 Hz
角速度,rad/s	100 Hz
磁場	100 Hz
クォータニオン	10 Hz
HK データ(温度, 圧力, 電圧, 電流)	10 Hz
GPS データ	10 Hz
写真	0.1 Hz

### <Experimental sequence>

- ① Turning on the power
- ② Confirming system operation
- ③ Launch of balloon
- ④ Ascent to an altitude of 25 km
- ⑤ Cutting the rope by command

### ⑥ Flight



### ⑦ Landing on the sea

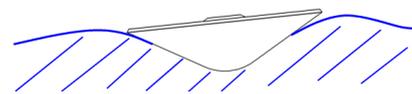


図 2 実験シーケンス

本実験では、カプセルの姿勢を評価するため、9 軸姿勢センサ (MTi-620, Xsens) を用いて加速度、角速度、磁場を測定する。また小規模フライト試験用に開発されたテレコマ基板 (U-TeCS ボード, サイズ 60 mm×90 mm) を用いた。IC 型の温度センサ (型番 AD590, Analog Devices) により前面フレア部と背面円筒部の接合部付近における発泡スチロールの表面、送信機、電池近傍の温度を計測する。加えて、姿勢センサと U-TeCS ボードの温度を計測している。GPS (受信機: MIKROE-3922, MIKROE、アンテナ: TW1421, Tallysman) を用いて 10 Hz で位置情報を取得する。カメラ (OpenMV Cam H7, OpenMV) は背面円柱部に

取り付けられており、カプセルの背面方向の画像が取得できる。送信機とデータ送信用アンテナは JAXA 大気球 G によって用意されたものである。過去の大気球実験において利用実績のある電池を選択した。電池（型番 3B75, Greatbatch）は 2 本を直列に接続し使用した。

### 3. 飛行試験結果

2022 年 7 月 1 日（金）午前 3 時 32 分に薄殻エアロシェル型カプセルは北海道の大樹航空宇宙実験場より放球された。午前 4 時 44 分頃に高度 25 km に達したことを確認し、ゴム気球から切り離され、自由飛行を開始した。

気球実験と軌道解析[3]から得た対気速度と高度プロファイルを図 3 に、マッハ数とレイノルズ数プロファイルを図 4 に示す。各弾道係数における解析結果を記載する。大気突入条件として弾道係数 19.9、初期高度 200 km、初期速度 15 km/s、突入経路角-11 度の結果も併せて記載する。実験結果については、GPS から取得したデータを時間微分し対地速度を算出した。その後、気象データ NCEP[4]の同日午前 5 時の各高度における気流速度から線形補間を用いて対気速度、マッハ数、レイノルズ数を求めた。図 3 から軌道解析結果と実験結果が概ね一致していることが確認できる。前面フレア部を真下に向けた状態で落下していた場合は弾道係数が 3.12 になると計算されるが、着水時の速度を比較すると弾道係数 4 程度に相当する速度であった。風洞試験結果[5]から 50 m/s 以下の低速域において抗力係数は速度に依存しない。このことから、姿勢が振動することで実効的な抗力係数が小さくなったと考えられる。

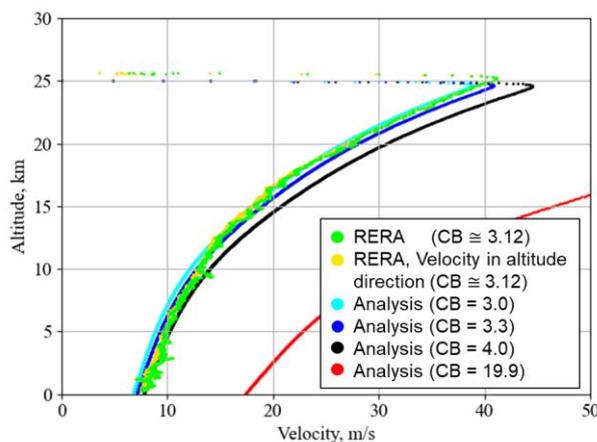


図 3 対気速度と高度プロファイル

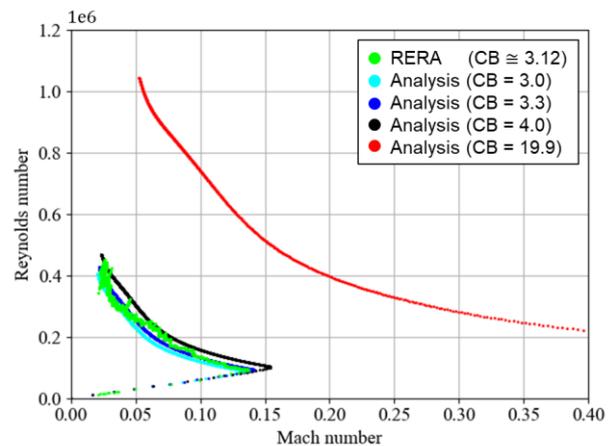


図 4 マッハ数とレイノルズ数プロファイル

RERA カプセルの加速度、角速度の時間履歴をそれぞれ図 5、図 6 に示す。時刻原点は切り離し時である。加速度の履歴から、自由飛行中の z 方向（機軸方向）の加速度がほぼ一定であることが確認できる。このことからカプセルは姿勢振動をしているものの、縦回転するような大きな姿勢運動をしていないことが示唆される。角速度の履歴から、自由飛行を開始すると同時にロール方向の運動が抑制されていることがわかる。

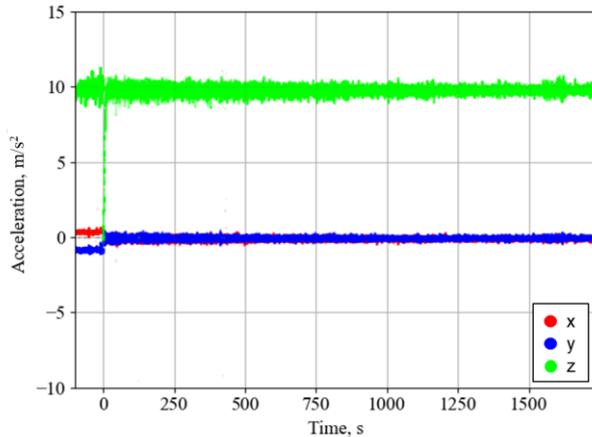


図 5 加速度の時間履歴

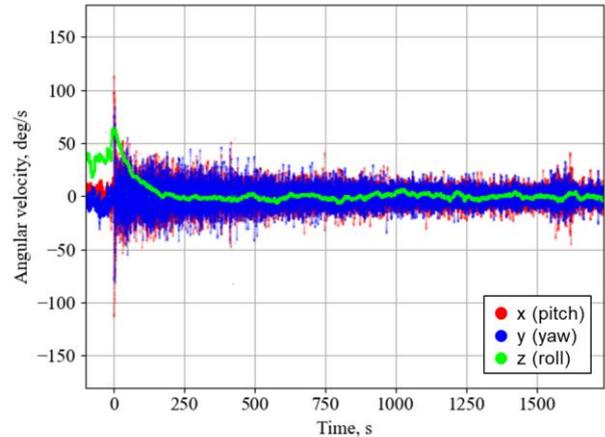


図 6 角速度の時間履歴

#### 4. 結言

薄殻エアロシェル型カプセルの動的安定性評価のため、ゴム気球による自由飛行実験 RERA (Rubber balloon Experiment for Reentry capsule with thin Aeroshell)を実施した。本実験では高度 25km においてカプセルはゴム気球から切り離され、自由飛行ののちに海上着水した。実験結果から自由飛行中にカプセルは姿勢振動していたものの、ピッチ・ヨー方向に一回転してしまうほどの大きな回転は見られなかった。このことから本カプセルは低速域においてピッチ・ヨー方向の角速度が発散しないことが示唆された。

本実験において実験時の飛行環境は再突入時のものと同程度の環境であったが、慣性モーメントに差異があるため回転運動は再突入時と同環境ではない。したがって、再突入時の運動を評価するためには慣性モーメントによる差異が運動に与える影響について評価する必要がある。

#### 謝辞

本実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が提供する大気球による飛翔機会によって実施されました。大気球実験 G メンバーの皆様のご協力誠に感謝致します。また本研究は JSPS 科研費 20H02360 と JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2119 の助成を受けて行われました。

#### 参考文献

- [1] 山田和彦, 将来の深宇宙惑星探査にむけたサンプルリターンカプセルの研究開発, 2019 年度衝撃波シンポジウム 講演論文集, 2C2-3, 2020.
- [2] K. Hiraki, Experimental Study on Dynamic Instability of Capsule-shaped Body, ISAS Rep. 103 (1999) 1–55.
- [3] Y. Takahashi, et al., Trajectory reconstruction for nanosatellite in very low Earth orbit using machine learning, Acta Astronautica. 194 (2022) 301–308. doi:10.1016/j.actaastro.2022.02.010.
- [4] National Centers for Environmental Information (NCEI) Global Forecast System, <http://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>. (accessed July 6, 2022)
- [5] Hideto Takasawa, et al., Experimental and Numerical Study on Aerodynamic Instability of Thin Shell Type Reentry Capsule at Subsonic Speed, 2022-e-31, 33rd International Symposium on Space Technology and Science, 10th Nano-Satellite Symposium & 14th IAA Low-Cost Planetary Missions Conference, Japan, 2022.