

# 気球投下実験におけるはやぶさ型カプセルの空力安定性評価およびパラシュート開傘荷重評価

高柳大樹, 中尾達郎, 小野稜介, 八木邑磨, 杉本諒 (JAXA), 久保田笙太 (東京理科大学), 小澤宇志, 山田和彦 (JAXA)

## Aerodynamic stability and parachute opening load evaluation of Hayabusa-type capsule in balloon drop test

Hiroki Takayanagi, Tatsuro Nakao, Ryosuke Ono, Yuma Yagi, Ryo Sugimoto (JAXA), Sota Kubota (Tokyo University of Science), Takashi Ozawa, and Kazuhiko Yamada (JAXA)

### 1. 研究背景と試験の概要

JAXA では「はやぶさ」「はやぶさ 2」に続き火星衛星探査機 (MMX) や彗星サンプルリターン計画 (CAESAR) などはやぶさ相似形状のサンプルリターンカプセルを用いたミッションが計画されている。これらの計画におけるサンプルリターンカプセル (SRC) は「はやぶさ」のヘリテージを最大限活用するために「はやぶさ」相似形状を選択し、はやぶさ開発時に各種風洞試験結果を元に作成された空力データベースを用いたシミュレーションによって空力安定性の評価を行っている。しかしながら空力安定性のサイズ依存性および大型化したパラシュートの開傘挙動は未評価である。そこで 2023 年 5 月 11 日に大気球を利用し、直径 60cm の「はやぶさ」カプセル相似形状の実験機の高度 40km 程度からの投下実験を行った。本報告では本実験で搭載した Air Data System の概要と事前試験結果を共有するとともに、本実験で評価されたカプセルの姿勢運動およびパラシュートの開傘過程について共有する。

### 2. Air Data System の概要

飛行中のカプセル姿勢およびマッハ数を推算するため、Air Data System の開発を進めている。ADS の絶対圧計で激み点圧を、周囲 4 箇所空けた圧力孔を相対圧計に接続することで飛行中のカプセル姿勢を計測する。加えて、激み点圧 ( $P_0$ ) 及びカプセル背圧 ( $P_5$ ) を用いて、等エントロピー圧縮の関係式及び垂直衝撃波前後の関係式を用いて飛行マッハ数を推算する。

$M < 1.0$  のとき

$$\frac{P_0}{P_5} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

$M \geq 1.0$  のとき

$$\frac{P_0}{P_5} = \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} (M^2 - 1)\right]^{\frac{-1}{\gamma - 1}} \left(\frac{\gamma + 1}{2} M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

カプセルの姿勢角についてはカプセル鈍頭部激

み点圧に対して周囲 4 方向に開けられた穴における差圧を計測することでフライト中の姿勢角を推定する。ADS のシステムブロック図を図 1 に、試作した ADS の写真を図 2 に示す。

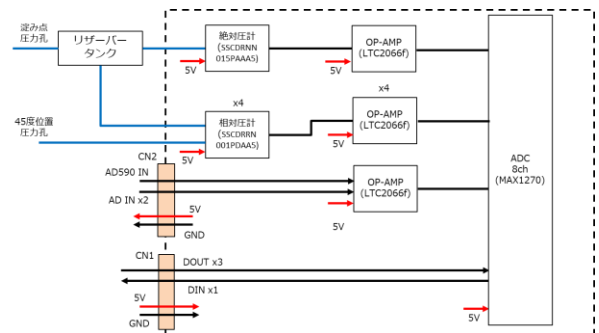


図 1 Air Data System ブロック図

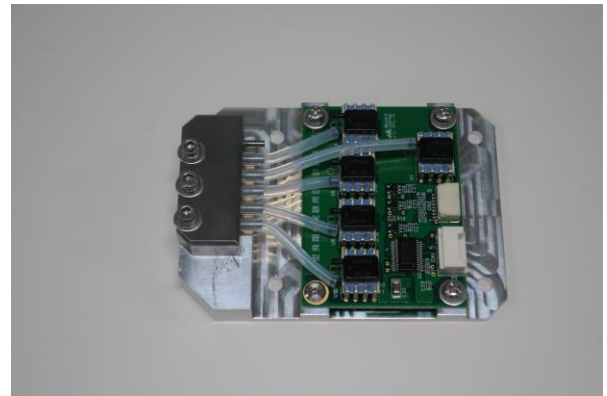


図 2 試作した Air Data System

### 3. ADS ボード搭載圧力計の校正

ADS ボードに搭載された絶対圧計 (SSCDRNN015PAAA5) の校正は、気球実験用 SRC 供試体に別途搭載された絶対圧計 (4525) の校正とともに宇宙科学研究所先端宇宙科学実験棟自由飛行実験室 5107 室設置の真空チェンバーにおいて実施した。結果として、絶対圧計の校正式は以下のように求められた。

$$P_{SSCDRNN015PAAA5} = 3.86754698 \times 10^{-2} \times P + 5.04994385 \times 10^{-1}$$

一方で、差圧計 (SSCDRRN001PDAA5) の校正は Keller 製のハンドポンプと絶対圧計を用いて実施した。差圧計の一方は常に大気圧とし、もう一方をバッファータンクに接続することによって差圧計の出力を計測した。4つの相対圧計において個体差はなく、すべて同じ以下、校正式で校正できることが確認された。

$$P_{SSCDRRN001PDAA5} = 2.90506706 \times 10^{-1} \times P + 2.49951743$$

#### 4. 豪州気球実験における SRC 姿勢角の評価

2023年5月11日に豪州アリススプリングスにおいて、はやぶさ型カプセルの遷音速・低速域における空力安定性評価を目的として、高度40km程度からの投下実験が行われた。本実験用供試体の前面ヒートシールドダミーに設置されたADSの様子を図3に、加速度センサによって評価された角速度履歴を図4に示す。横軸は供試体をゴンドラから分離してからの時間を示している。本供試体の諸元とはやぶさ開発時に整備された空力データベースを用いて実施した姿勢運動解析結果を図5に示す。気球実験で得られた角速度履歴と比較すると、はやぶさ開発時に整備された空力データベースはカプセルの振動を過小評価していることが示唆された。そこで本実験で得られた角速度の最大値と一致するように空力データベース改良した場合の姿勢運動解析の結果を図6に示す。空力データベースの動粘性係数を改良することによって、比較的良好に SRC の姿勢角履歴を評価できていることがわかる。今後は本空力データベースを用いて、MMX の再突入軌道におけるカプセルの姿勢を詳細に検討していく。また、事前に取得された絶対圧校正係数を用いて澱み点圧力  $P_0$  およびインストルメントモジュール内部圧力  $P_0$  を評価した結果を図7に示す。また実験後に評価された軌道解析結果によって求められたマッハ数及び全圧履歴を併せて示す。70s以降の澱み点圧力  $P_0$  と後解析によって評価された全圧  $P_{total}$  はよく一致しているものの、それ以前のデータはズレが見られるため、今後温度ドリフトの影響など評価が必要である。事前に評価された相対圧校正試験の結果を用いて評価した相対圧時間履歴を図8に示す。また相対圧時間履歴を10sごとに時間分割してFFT解析の結果評価した振動周波数の変化を評価した結果を図9に示す。

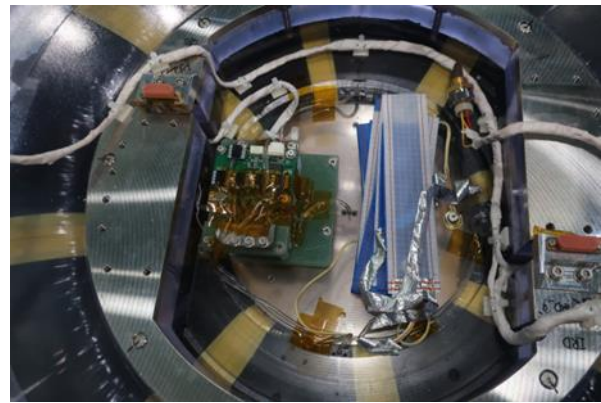


図3 気球実験用供試体の前面ヒートシールドダミーに設置された ADS

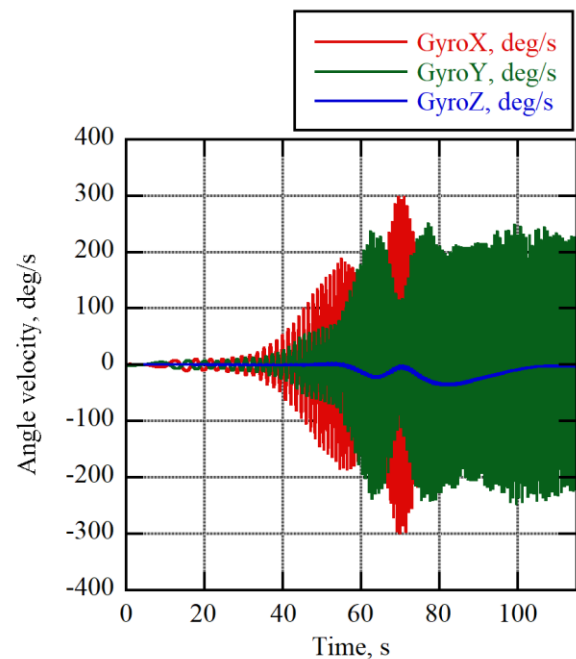


図4 気球実験における角速度時間履歴

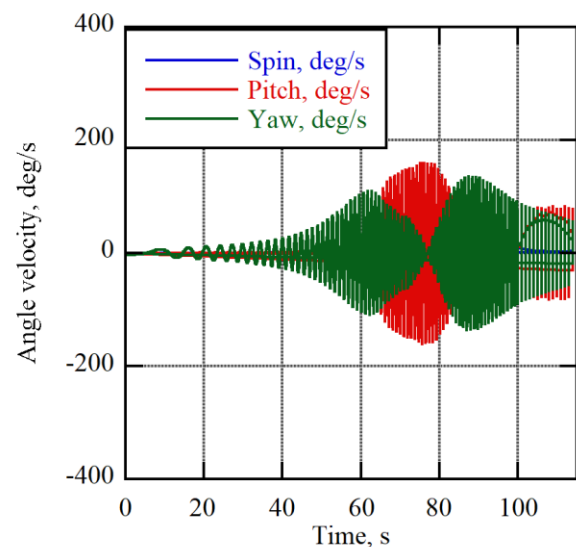


図5 はやぶさ開発時に整備された空力データベースにより評価された姿勢運動解析

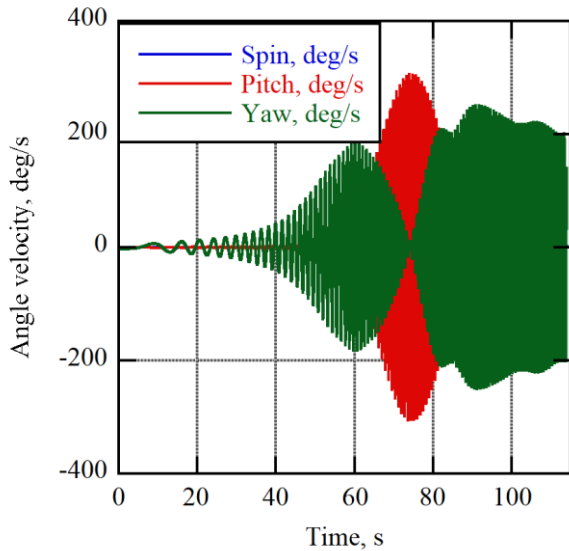


図6 本気球実験結果と一致するよう改良した空力データベースにより評価された姿勢運動解析

ADS によってはやぶさ型 SRC 供試体における姿勢運動が正しく評価されているとともに、降下するにしたがって徐々に振動が大きくなっていき、最大角度は  $40^\circ$  程度まで達しているものの、ひっくり返ることなくリミットサイクルになり、パラシュート開傘高度に達していることが確認された。別途加速度計によって評価された振動周波数と比較すると、相対圧履歴から評価された振動周波数とよく一致しており、本 ADS によって機体の振動をよく評価できていることが確認された。

### 5. 豪州気球実験におけるパラシュート開傘荷重の評価

気球実験において衝撃ロガー (MSR165, MSR Electronics GmbH 製) によって取得されたパラシュート開傘時の加速度履歴を図 10 に示す。本グラフではパラシュート放出機構作動時に計測された衝撃荷重のタイミングを 0s として表記した。結果としてパラシュートはパラシュート放出機構作動後、1s 程度経過後に開傘していることが確認された。パラシュートの開傘衝撃係数は次式で評価される。<sup>2)</sup>

$$C_x = \frac{F_x}{(C_D S)_p q}$$

ここで、 $(C_D S)_p$  はパラシュートの開傘後の抵抗面積であり、パラシュート開傘後の高度履歴より、 $7.57\text{m}^2$  と評価された。 $q$  はパラシュート開傘時の動圧であり、軌道後解析から  $2.14\text{kPa}$  と評価された、 $F_x$  はパラシュート開傘時の衝撃荷重

であり、図 10 における加速度履歴から  $42.4\text{G} = 9.1\text{kN}$  と評価された。結果として本実験におけるパラシュート開傘衝撃係数は  $0.56$  となった。文献で提示されている質量比  $R_m = \rho (C_D S)_p^{1.5} / M_t$  に対する開傘衝撃係数のグラフと比較すると図 11 のようになった。本グラフでは先に実施したヘリコプターからの投下実験における開傘衝撃係数も併せて表示した。本実験によって、実フライト環境と同程度の質量比における開傘衝撃係数の評価が完了し、文献値の平均値と同程度であること、また設計値に対して十分余裕があることが確認された。

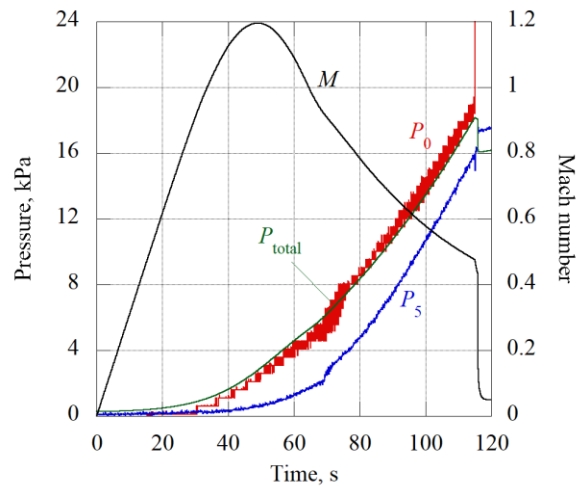


図7 気球実験における激み点圧力  $P_0$  とインストゥルメントモジュール内圧力  $P_5$ 、および軌道後解析結果から評価されたマッハ数及び全圧履歴

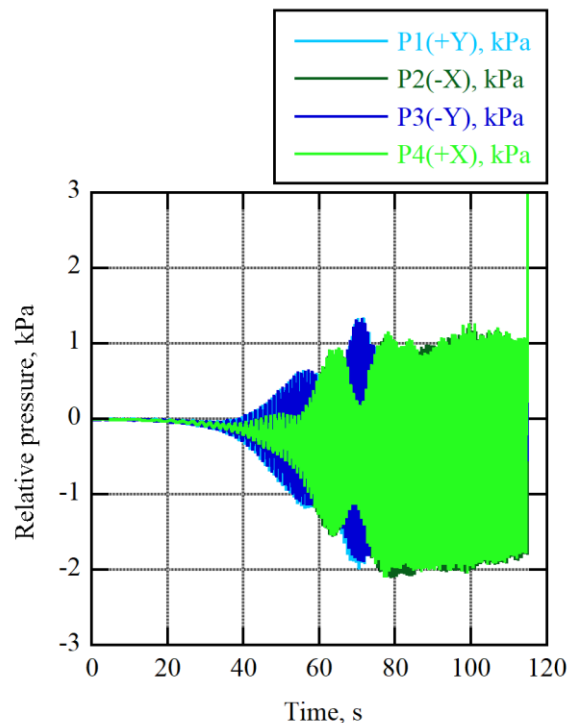


図8 気球実験における相対圧時間履歴

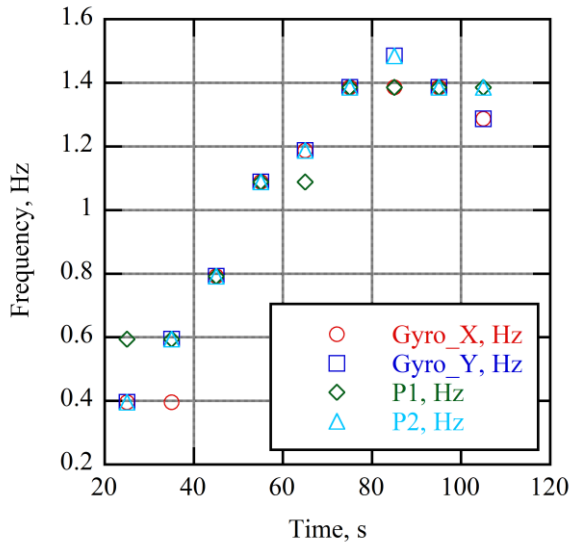


図 9 相対圧および角速度時間履歴から評価された機体の振動周波数

## 6. まとめ

2023年5月11日に大気球を利用し、直径60cmの「はやぶさ」カプセル相似形状の実験機の高度40km程度からの投下実験を行った。気球実験で得られた角速度履歴と比較すると、はやぶさ開発時に整備された空力データベースはカプセルの振動を過小評価していることが示唆された。そこで本実験で得られた角速度の最大値と一致するように空力データベースの動粘性係数を改良することによって、比較的良好にSRCの姿勢角履歴を評価できていることがわかる。今後は本空力データベースを用いて、MMXの再突入軌道におけるカプセルの姿勢を詳細に検討していく。また本実験で搭載したAir Data Systemと加速度計によって評価された振動周波数と比較し、相対圧履歴から評価された振動周波数とよく一致しており、ADSによって機体の振動をよく評価できていることが確認された。最後に、本気球実験において衝撃ロガーによって取得されたパラシュート開傘時の加速度履歴からパラシュート開傘衝撃係数は0.56となった。本実験によって、実フライト環境と同程度の質量比における開傘衝撃係数の評価が完了し、文献値の平均値と同程度であること、また設計値に対して十分余裕があることが確認された。

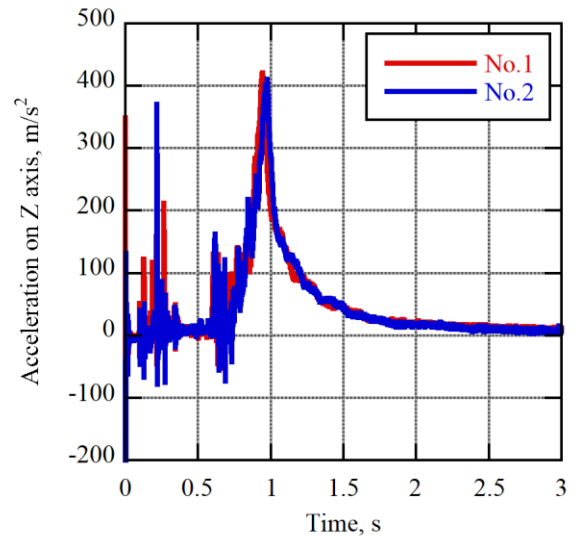


図 10 パラシュート開傘時の衝撃ロガーによる加速度履歴

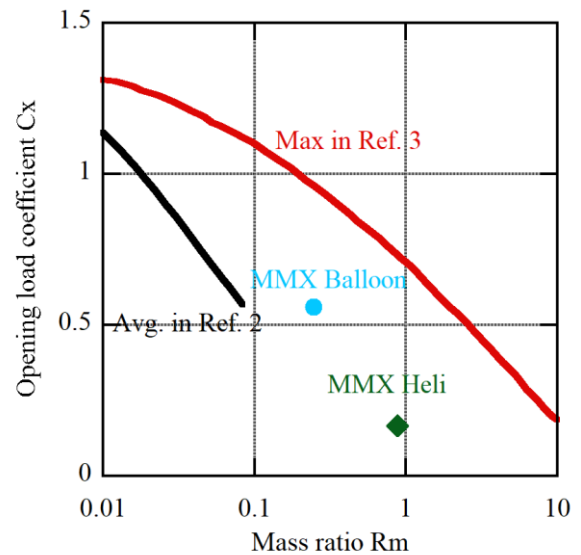


図 11 ヘリコプター投下実験および気球投下実験におけるパラシュート開傘衝撃係数

## 謝辞

本試験は、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を利用させていただきました。

## 参考文献

- 1) Hiraki, K., and Inatani, Y., “The Aerodynamic Data Base for Asteroid Sample Return Capsule,” ISAS Report SP No. 17, pp. 345 – 363, 2003.
- 2) T. W. Knacke, “Parachute Recovery Systems Design Manual,” ADA247666, 1991.
- 3) E. G. Ewing, H. W. Bixby, T. W. Knacke, “Recovery Systems Design Guide,” AFFDL-TR-78-151, 1978.