

気球系姿勢運動計測：2023 年実験報告

莊司泰弘（金沢大学），飯嶋一征（宇宙航空研究開発機構）

Measurement and Analysis of Attitude Motion of Balloon Flight System: 2022 Experiment Report

Yasuhiro Shoji (Kanazawa University), Issei Iijima (JAXA)

Abstract

本発表では、2023 年度気球実験でピギーバックとして実施された気球系姿勢運動の計測について、実験結果を報告する。また、2022 年度の実施したものの回収ができていなかった実験データの回収作業を進めた。本発表では加えて、現在開発中の新型データロガーについても状況を報告する。

1. はじめに

成層圏気球ではミッションによってゴンドラの姿勢（指向）制御がしばしば必要とされる。その制御系設計では、長くゴンドラのみを制御対象としてきた。しかしゴンドラは剛体とは言え、気球フライトシステム全体から見れば、巨大な気球と長大な吊り紐の先端にある質点とみなせ、気球や吊り紐の運動の影響が非常に強い。実際に気球や吊り紐をダイナミクスモデルに組み込む場合、気球フライトシステムは腕がねじれる剛体振り子として記述できる。しかし、外乱力の数値的なデータの蓄積が不足しているため、ゴンドラに搭載する姿勢アクチュエータのサイジングや性能予想に必要な振動振幅の増減は経験則に頼ってきた。従来はある程度ゴンドラの姿勢運動が小さいことを前提に指向制御系を設計してきた。気球の高度が変化する間は、周囲の気流によるとされる外乱力が作用し、ゴンドラの姿勢運動が大きくなることが知られており、しばしば指向制御系の制御可能範囲を超える。フライトの制約から水平浮遊時間が短い場合や、同じ観測対象を時間等間隔に撮影したい場合、または高精度な指向制御を必要とする場合などは、ゴンドラの姿勢運動と静定に要する時間の見積もりが、ミッション成立性を左右する。力学的にも、このような外乱力の大きさを決める要因は興味深く、多数のデータに基づいて検討される必要がある。

著者らは、成層圏気球フライトシステム各部の姿勢運動を時間領域で明らかにし、従来の振動モード解析だけでなく運動の減衰特性や外力の推定を目指している。これまでに本研究で必要な、気球フ

ライトシステムの各部の姿勢運動の直接計測データを得るための手法を開発した[1, 2]。その後 2022 年までに 7 実験のデータを取得し、データ解析を勧めている[3-5]。本発表では、2023 年のキャンペーンで行った気球実験結果を報告する。また、来年以降の気球実験についての展望を述べる。

2. 2023 年度実験の概要

2023 年は B23-05[6]に対する 1 実験を行った。この実験は B100 型（満膨張体積 100,000 m³）の気球によるフライトであった。B100 型は JAXA が国内で運用する大型気球の中では、大型のものである。使用したロガーは 2022 年に使用し回収されたものを整備して再使用した。後述のように 1 セット 6 台中、1 台の整備ができなかったため、5 台で実験を実施した。図 1 に通常取り付ける 6 箇所を示す。B23-05 実験では(4)を除く 5 箇所に姿勢ロガーを搭載した。

B23-05 実験は、2023 年 7 月 26 日に JAXA 大気航空宇宙実験場より放球され、高度 36km に到達した後、太平洋上に降下し回収された。搭載された 5 台の姿勢ロガーは全て回収された。

回収後の外観検査の結果、図 1(1)に示す気球頭部に設置した個体に海水の浸入によるコネクタの軽微な損傷が認められた以外、大きな損傷、重大な浸水はなかった。(1)のコネクタ損傷も、電源投入と通信が可能な程度であり、ほぼ無傷で回収できた。2023 年 10 月現在、データの回収を進めている。

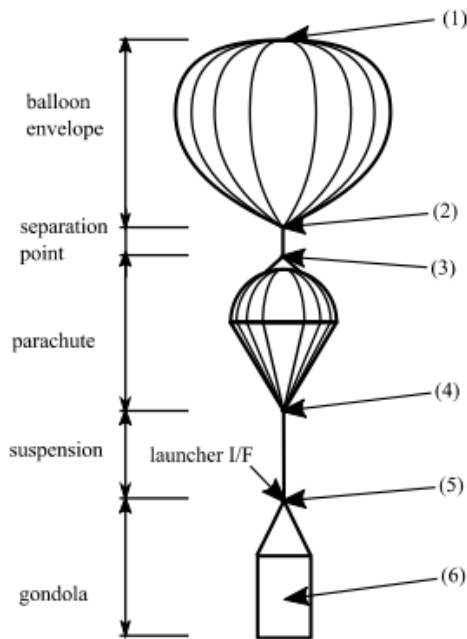


図 1：気球フライトシステムの模式図と通常の姿勢ロガー設置位置

3. 2022 年度実験データの回収

2022 年度に行った実験 (B22-07) で回収したすべてのロガーからデータを回収できない現象が生じた[7]。これに対する調査およびデータ回収作業を進めた。作業は、フラッシュメモリに保存されているとみられたデータが失われないうようにハードウェアライトプロテクトをかけた状態で、マイコンのソフトウェアの改修と更新により行った。その結果、図 1 に示す(1), (2), (3), (5), (6)からデータの回収に成功した。(4)は海水がケース内に浸水し、コネクタが損傷したこと、さらにコネクタ部品の入手性悪化のため交換修理が 2023 年 10 月現在できておらず、データ回収作業を行えていない。顕微鏡による外観検査ではコネクタ以外の基板主要部に損傷は見られないことから、コネクタを交換しソフトウェアを書き換えれば、他と同様にデータを回収できると考える。

2022 年にデータ回収ができなかった理由は、マイコンから PC にデータを転送する際、データ長チェックと CRC によるエラー判定を行っており、このどちらかまたは両方が高頻度でエ

ラー判定を下したため、データ回収が進まなかったためであった。対策として、通信レートを 57.6kbps から 19.2kbps へ落とし、より信頼性の高い汎用シリアル通信ソフトに変更することで、フラッシュメモリのデータダンプを行った。

4. 2024 年度以降の計画

新型基板の設計を行い、評価基板を作成してソフトウェアの開発と評価を進めている。新型基板と従来基板の比較図を図 2 に、ハードウェアの性能比較を表 1 に示す。図 2 の新型機(右側)の基盤は評価作業のため部品実装用捨て基板(左右)が切り離されていない。捨て基板が切り離されると、従来基板と同形状となる。

新型基板では、従来基板の運用で得られた Lessons Learned を適用し、GPS 受信器、電源 SW と接続用の FFC コネクタのロック機構を、FFC ケーブルが抜けにくいものに変更し、FFC ケーブルに不適切な曲げ力がかからないよう、基板内側にコネクタ位置を変更した。また、デバッグポートも FFC コネクタ、FFC ケーブルで接続するものとした。電源 SW コネクタ内には、外部との通信用 UART ラインを含めた。これと適切なソフトウェアを開発することで、データ回収時にプログラムの書き込み作業を不要にし、FFC コネクタとケーブルをシリコンポッティングで海水から保護しやすくする。

新型基板を設計製造するにあたり、主要な部品も変更した。部品製造中止などに対応し、マイコン (MCU) を Renesas 社 RL78/G14 とした。記憶装置である Flash NAND メモリは Skyhigh 社の SPI 接続 4Gbit メモリを 2 つ搭載し、計 8Gbit と従来機と比べて 2 倍に記憶容量を増やす。これによってサンプリングレートの改善を行う。姿勢センサは 9 自由度 MEMS センサを用いる点で共通である。しかし ST Micro 社のセンサが製造中止となったことから、代替品として TDK 社の ICM-20948 を採用した。GPS 受信機は変わらずポジション(株)の GPS-123-083 を用いる。これをメーカーカスタマイズし、気象ゾンデ用ファームウェアを適用した。さらに起動時の通信速度や出力センテンスを通常品から変更し、ロガー起動時の処理負担を減らした。電池は実績品を継続して使用する。

ソフトウェアによる計測項目は従来型と同様に GPS 時刻、緯度、経度、高度、3 軸加速度、3 軸磁場ベクトル、3 軸角速度、基板温度、センサ温度、

電池電圧とする。計測頻度は、ソフトウェアの工夫により 20Hz 以上を確保することを目指す。従来機の計測頻度は 10Hz であった。一方、気球フライトシステムの振動モード周波数の高いものは数 Hz のことがある。そのため、計測頻度を 20Hz 以上にすることで周波数の高い振動にも対応できるようにする。現在、ソフトウェアの開発を進めている。2024 年度中に環境試験を行い、2025 年度からの実験適用を目指す。

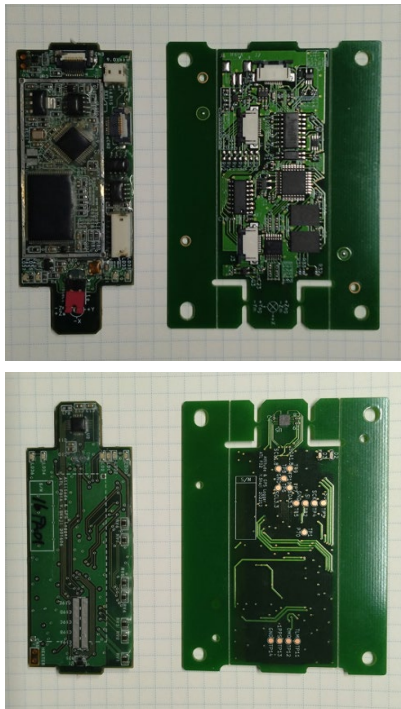


図 2: 開発中の新型基板(右)と従来基板(左)。方眼は 5mm。

表 1: 従来機と新型機の構成

| | 従来機 | 新型機 |
|----------|--|---------------------------------|
| マイコン | Renesas R8C/23 | Renesas RL78/G14 |
| フラッシュメモリ | Toshiba 4Gbit Flash Parallel 接続×1 | Skyhigh 4Gbit Flash SPI 接続×2 |
| センサー | STMicro LSM9DS0 | TDK ICM-20948 |
| GPS 受信器 | Position GPS123-083 | |
| 計測項目 | GPS 時刻, 緯度, 経度, 高度, 加速度(3軸), 磁場(3軸), 角速度(3軸), 温度, 電池電圧 | |
| 電池 | Saft LS14500 (2s1p) | |

本研究では、2023 年度実験で 1 実験を行ったことで、2017 年の 1 回目実験以降 7 例のデータを収集し、順調に計測例を増やすことができた。しかしゴンドラの指向制御を行う実験で用いられるラダー

形吊り紐を有する気球フライトシステムに対する実験ができておらず、ラダー形吊り紐を用いる気球の飛行中データを取得するためには、ミッションの都合とは別にラダー形の吊り紐を用意して実験する必要性を指摘した[5]。

前述のように、現在新型ロガーの開発を進めており、2025 年の実験適用を目指している。一方、従来機も減損のため、十分に数を用意することが困難である。ラダー形吊り紐を作製するためには、パラシュートもラダー形に対応したものを用意しなければならないから、2024 年は 2025 年からの実験の準備を集中的に実施することとした。

5. おわりに

本発表では、2023 年に行われたピギーバック実験について実験結果を報告した。昨年に続き B100 型気球のフライトデータを得ることができた。ロガーの不具合によって一部収集できなかったデータがあり、今後詳細に解析する。

さらなるサンプル収集のため、2021 年国内気球実験においてピギーバックとして実験を実施することを希望する。また、近い将来予定される豪州実験を含む今後の実験において、より質の高いデータを取得するため、2022 年度に新型ロガーを投入する。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 19K04256 の助成を受けたものです。また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行機会を利用させていただきました。飛行実験準備、実施に際しては、B23-07 実験の研究代表者および大気球実験班から多くの支援を頂きました。この場を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 莊司 泰弘, Kwak SeungJo : 飛行中の気球系挙動測定システムの開発とピギーバック実験提案, 大気球シンポジウム: 平成 28 年度, isas16-sbs-031, 2016 年
- 2) 莊司 泰弘, 飯嶋 一征 : ピギーバックによる気球系各部の In-situ 姿勢計測結果と今後の展開, 大気球シンポジウム: 平成 29 年度, isas-17-sbs-007, 2017 年

- 3) Shoji, Y.: Study on Transient Deformation of a Balloon Flight System based on Distributed Attitude Measurements of the Components, Proc. 32nd ISTS, 2019-m-18, Fukui, Japan, June 2019.
- 4) 莊司 泰弘, 飯嶋 一征: 気球系姿勢運動の計測と過渡状態の解析, 大気球シンポジウム: 2019年度, isas19-sbs-011, 2019年
- 5) 莊司 泰弘, 飯嶋 一征: 気球系姿勢運動計測: 2022年実験報告, 大気球シンポジウム: 2022年度, isas22-sbs-002, 2022年
- 6) 大気球実験 B23-05 の実施終了について [火星探査用飛行機の高高度飛行試験 (MABE2)], JAXA 宇宙科学研究所ウェブサイト, <https://www.isas.jaxa.jp/topics/003468.html>, 2023年7月26日掲載, 2023年10月21日閲覧
- 7) 莊司 泰弘, 飯嶋 一征: 気球系姿勢運動計測: 2022年実験報告, 2022年度大気球シンポジウム:, isas20-sbs-026, 2022年