

気球系姿勢運動計測：2021 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: 2021 Experiment Report

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

Abstract

本発表では、2021 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。本研究では 2022 年度もピギーバック実験を申請しており、今後の計画について述べる。

1. はじめに

一般に制御系の設計を行う際には、制御対象のダイナミクスと外乱を理解しなければならない。成層圏気球ではミッションによってゴンドラの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。しかしゴンドラは巨大な気球と長大な吊り紐の先端にある質点に近い剛体であり、これらの運動の影響が強い。実際に気球や吊り紐をダイナミクスモデル組み込む場合、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、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、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 2020

年までに 5 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、2021 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. 2021 年度実験の概要

2021 年は B21-06 に対する 1 実験を行った。この実験は、これまでの本研究で 2 例目となる B100 型（満膨張体積 $100,000 \text{ m}^3$ ）の気球によるフライトであった。B100 型のペイロード運搬能力は高度 30km においておよそ 800 kg（バラスト込み）とされており、成層圏における科学観測、実験において標準的なサイズに位置づけられる。また、B100 型の 1 例目は成層圏における大気を採取することが目的であった[6]ことから、採取サンプルに対するコンタミネーション低減のため、ゴンドラ（図 1-(6)）、ゴンドラ直上の放球リング（図 1-(5))を除いた 4 箇所のみで計測だった[5]。B21-06 ではそのような制約がなく、図 1 に示す全 6 箇所に姿勢ロガーを搭載できた。

B21-06 実験は、2021 年 8 月 5 日に JAXA 大気航空宇宙実験場より放球され、およそ 20 分間の水平浮遊の後、パラシュート降下、太平洋上で回収された。搭載された 6 台の姿勢ロガーは全て回収された。回収後の点検とデータ回収の 2021 年 10 月 25 日現在の状況を表 1 に示す。表の第 1 列の数時は図 1 の姿勢ロガー搭載位置に対応する。GPS、姿勢はそれぞれのデータ回収有無を表す。海水の浸入は、着水後に海水がロガー内部に浸入したことを示す。(5)放球リング直

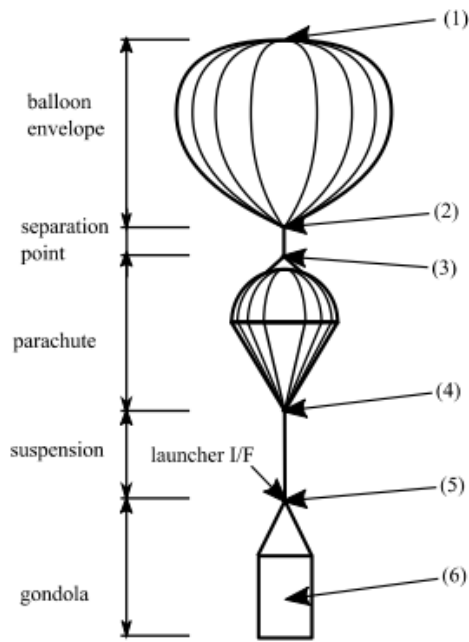


図 1：気球フライトシステムの模式図と通常の姿勢ロガー設置位置

表 1：B21-06 搭載ロガーの回収後点検の結果 (2021年10月25日現在)

| | GPS | 姿勢 | 海水の浸入 |
|-----|-----|-----|-----------|
| (1) | 有 | 有 | 無 |
| (2) | 有 | 有 | 有. 微量 |
| (3) | 中断 | 有 | 有. 微量 |
| (4) | 有 | 有 | 無 |
| (5) | 未確認 | 未確認 | 有. 基板ダメージ |
| (6) | 有 | 有 | 有. 微量 |

上に設置したロガーは、着水後に浸水し、コネクタ端子が腐食したほか、基板の辺縁部に近い部品の一部で電源コネクタに近い部分にも腐食が認められた。ロガーはケースを防水構造にしているほか、回路基板自体も表面をシリコンゴムでコーティングしており、電池、GPS レシーバ、外部 I/F コネクタ以外は、ケース内に浸水しても防御される構造としている。そのため、マイコン、フラッシュメモリ等電子回路の主要部は保護されており、腐食した部品を交換することで記録されたデータの回収には問題ないと思われる。部品交換とデータの回収作業を行う。また、(3)パラシュート頭部のロガーは起動後しばらく正常に記録をしたものの、放球前に GPS のみ記録できなくなった。放球準備中に GPS レ

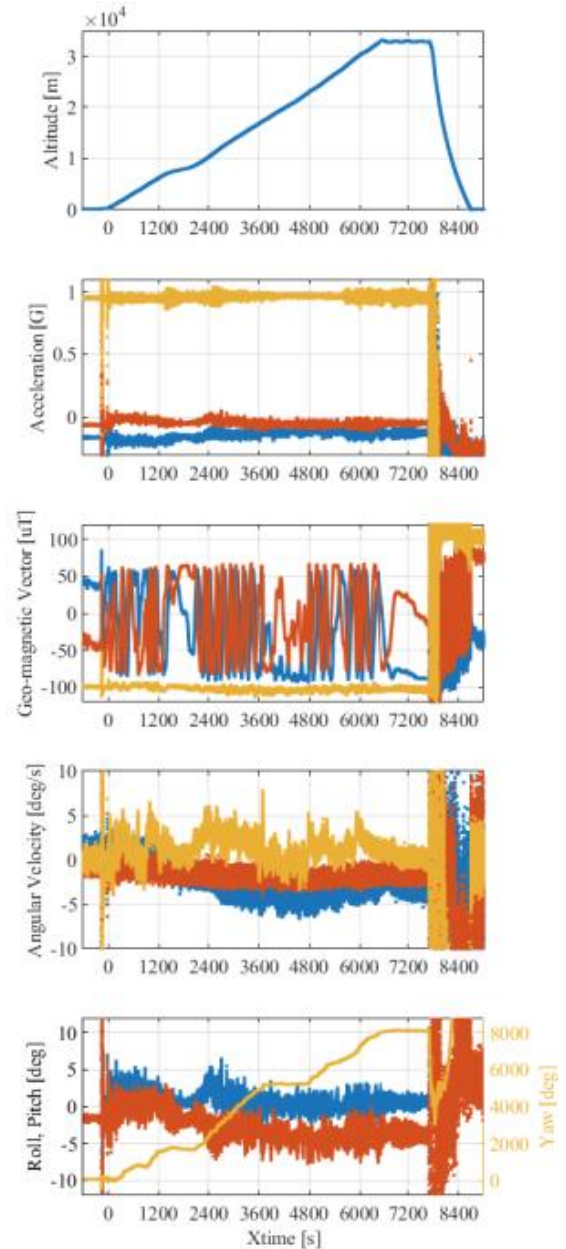


図 2：B21-06 の気球頭部における姿勢運動の様子
上から：ロガーの GPS 高度 [m]，加速度 [G]，地磁場 [μ T]，角速度 [deg/s]，姿勢ロガーの Roll, Pitch (青, 赤, 左縦軸, [deg]), Yaw (黄, 右縦軸, [deg]) 角度. 横軸は共通して放球後の経過時間 [s]

シーバと電子回路基板を接続するケーブルが外れたものと推定される。

回収されたデータロガーが収集したデータの一例として、気球頭部におけるデータと解析結果を図 2 に示す。上から順に、ロガーの GPS 高度 [m]，加速度 [G]，地磁場 [μ T]，角速度 [deg/s]，姿勢ロガーの Roll, Pitch (青, 赤, 左縦

軸, [deg]), Yaw (黄, 右縦軸, [deg]) 角度を示す. 横軸は共通して放球後の経過時間 [s]を示す. 加速度, 地磁場, 角速度は青, 赤, 黄, の順にセンサの X, Y, Z 軸を示す. センサの値はいずれも想定される範囲を示しており, 正しく計測されたとみられる. 姿勢ロガーの Roll, Pitch, Yaw 角は加速度と地磁場のデータからまず q-Method により姿勢クォータニオンを求め, 慣性系基準の回転クォータニオンに変換した後, Roll, Pitch, Yaw に変換した. また, Xtime = 0 [s]の姿勢を基準にとった. 気球頭部は上昇中から片側振幅 2 deg 程度の振子運動を行い, 水平浮遊に移行後切り直し直前に片側振幅が約 1 deg に減少した. 周期は上昇, 水平浮遊でおよそ一定で 14 s であった. 頭部の方位角は上昇中に上から見て反時計まわりに回転を続け, 放球後水平浮遊に至るまでに 22 回転した. 特に上昇中にはゆるやかな振動がみられ, その周期は約 160 s であった. 全体として, 上昇に伴う振動振幅のゆるやかな増減は見られたものの, 昨年の B20-03 実験のようなインパルス様の加速度や姿勢の急激な変化は見られなかった.

3. 今後の計画

本研究では, 2022 年度およびそれ以降の気球実験でもこれまでと同様にデータを収集する計画である. しかし, 使用しているロガーケースが, 製作後 4 年を経過し, 主に防水性能が劣化している印象がある. そのため, 防水機能の更新等処置する予定である. また, ロガー電子回路基板も海水によりダメージを受けた物が増えた. 電子部品の製造終了等を受けて回路基板を更新する必要がある. 昨年度より新基板の設計を進めており, 来年度は新しい姿勢ロガーによる実験を行う計画である.

4. おわりに

本発表では, 2021 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翔機会を利用させていただきました. 飛翔実験準備, 実施に際しては, B21-06 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: 飛翔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: 気球系姿勢運動の計測と解析, 大気球シンポジウム: 2020 年度, isas20-sbs-026, 2020 年
- 6) 菅原 敏, 青木 周司, 森本 真司 他, マルチクロックレーザーによる大気年代推定 (B20-04 結果速報), 大気球シンポジウム 2020 年度, isas20-sbs-015, 2020 年