

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04256

研究課題名（和文）分散配置姿勢ロガーによる成層圏気球の過渡状態における姿勢運動の研究

研究課題名（英文）Study on the attitude motion of stratospheric balloon system during transient state by distributed attitude loggers

研究代表者

莊司 泰弘（Shoji, Yasuhiro）

金沢大学・先端宇宙理工学研究センター・准教授

研究者番号：70582774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：研究室で開発したGPS姿勢ロガーを用いて、飛行中の成層圏気球フライトシステム全体の姿勢挙動を測定した。4年間の研究期間において4件の実験を実施し、そのうち3件はデータが幹線であることを確認した。また残り1件はデータの回収を進めている。気球フライトシステムの姿勢運動の過渡状態を解析することを目的にデータ処理を進めていたところ、データに周囲の環境温度変化が強く影響していると示唆される振る舞いが見られた。そのため、過渡状態の解析に先だって、温度の影響を後処理で除去する方法の研究を進めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

成層圏気球は宇宙科学分野において、一つの観測手段であるばかりでなく、最先端のテクノロジーを宇宙に近い環境におけるミッションに適用し、人工衛星などの宇宙技術開発につなげるためにも重要なプラットフォームである。気球の利用目的には、機器を搭載するゴンドラを特定の方向に向ける制御が必要となるものもある。一方、方向制御システムを設計するためには、制御対象の特性をよく把握する必要がある。現在そのようなデータの蓄積は十分ではない。本研究はデータ収集、蓄積という点だけでも、気球実験を通じた宇宙技術開発に対して大きな貢献となると期待される。

研究成果の概要（英文）：This study conducted the data acquisition of the attitude motions of whole balloon flight systems with the GPS loggers we developed. In 4-year-research term, 4 flight experiment were conducted, experiment data were successfully recovered from 3 experiment. The data recovery of the remaining 1 data set is still being processed. This study first aimed to clarify the transient attitude behavior of the balloon flight system, However, during the process, we found that the ambient temperature around the logger seemed to affect strongly on the measurement data. Therefore, before studying the transient state, we studied the influence of the temperature on the attitude data, and efficient process to remove the influence in the post-process.

研究分野：宇宙機の動力学

キーワード：姿勢計測 成層圏気球 データ解析

## 1. 研究開始当初の背景

成層圏気球は高度 30km 程度の成層圏へ 1 トン程度のペイロードを静穏かつ安価に運搬するヘリウム気球である。我が国では宇宙航空研究開発機構 (JAXA) が国内外で運用する気球を用いて、大学等の研究者が提案した科学観測や工学実験が行われている。成層圏利用の利点の一つに静穏な環境が挙げられる。大気が希薄であり、気球が周囲の気流とともに移動するため、水平浮遊中の気球フライトシステムに作用する外力は非常に小さく、天体観測などが行われる。このようなミッションでは目標に向けて気球から懸架された観測器の指向制御をするため、気球フライトシステムの姿勢運動がミッションの成否を左右する。そのため西村らによって、成層圏で水平浮遊する気球フライトシステムの姿勢運動特性が調査された[1]。気球、ペイロード部 (ゴンドラ)、それらをつなぐ吊紐で構成される気球フライトシステムは、ゴンドラの姿勢運動のモード解析から、力学的には気球の浮力中心で支持され腕がねじれる多自由度振子とみなせ、気球自体の回転運動も示された、近年においても、Chaffee らが気球搭載装置設計の予備調査として気球とゴンドラの姿勢運動計測を行った。

西村らや Chaffee らはいずれも水平浮遊時の静穏な環境下の調査を行った。一方、気球が上昇、下降すると振子運動やねじれ振動によるゴンドラの姿勢擾乱が増大することが経験的に知られている。そのため、ゴンドラの指向制御を必要とする天体観測などのミッションでは、気球が水平浮遊に移行後、姿勢運動がある程度減衰してから指向制御を開始する。近年の国内気球実験では飛翔条件の変化などのため、かつて 20 時間程度とれた水平浮遊時間が長くて 1.5 時間程度と激減した。限られた時間内に指向制御を含むミッションを実現するためには、気球フライトシステムの姿勢運動の過渡状態を理解することが重要である。しかしフライトシステムの姿勢運動の過渡状態に着目した調査研究は行われていなかった。

過渡状態の気球フライトシステムの姿勢運動特性をミッション設計に組み込むためには、気球の高度変化と運動 (振動振幅) の初期状態、構造特性、減衰定数のオーダや支配要因、再現性などの定量的理解が必要である。しかし研究開始時点では、それらは全くの不明であった。定量的な議論のためには実際のフライトデータが複数必要である。しかし、相互に比較できる気球フライトシステム各部の姿勢運動のデータはこれまでに世界的にも蓄積されておらず、過渡状態の姿勢運動の一般的な姿は不明のままであった。

## 2. 研究の目的

本研究では、成層圏を飛翔する大型気球が上昇から水平状態へ移行する過渡状態におけるフライトシステム各部の姿勢運動特性を、フライトデータに基づいて定量的に明らかにすることを目的とした。そのために、まずフライトシステム各部の姿勢運動データの収集を行う。気球フライトシステムはミッションによって様々であるから、データもできる限り多くの事例を収集する。つぎに収集したデータを特に上昇から水平浮遊への移行時に着目して解析し、フライトごとの減衰特性や高度変化との相関を明らかにする。その後、気球のサイズや吊紐長さなどシステムの諸量と減衰特性の関係を調べ、フライト間相互の比較により、統一的な減衰モデルの獲得を目指す。

## 3. 研究の方法

まず、フライトごとの姿勢運動の減衰特性や高度変化との相関を明らかにすることを目指した。1 機の気球フライトシステムにつき、気球頭頂部からゴンドラまでの 6 箇所 (図 1) に GPS 姿勢ロガー (図 2) を設置し、各部の姿勢運動を計測する。ピギーバックとして様々な気球ミッションに相乗りするため、効率的に計測事例を増やすことができる。GPS 姿勢ロガー間の相対姿勢運動をフライトシステムの変形と見なす。姿勢運動、システムの変形の時変化と気球の高度変化から減衰区間を定め、減衰の性質、減衰定数、減衰時間などを求める。複数のフライトデータを同じ手順で解析し、解析手法の妥当性検証とブラッシュアップを進めた。

並行して GPS 姿勢ロガーを追加製造を進めた。研究開始時点で保有していた実証試験用に製造した GPS 姿勢ロガーでは台数が限られたため、1 年に 1~2 実験しかデータを収集できなかった。2 年目以降により多くのフライト機会を得てデータ収集効率を高めるため、GPS 姿勢ロガーを追加製造に取り組んだ。しかし、折からの半導体不足、コロナ禍によって GPS 姿勢ロガーの追加製造を研究期間内にできなかった。

フライト相互の比較からフライトシステムの諸量が姿勢運動の減衰に与える影響を求め、統一的な減衰モデルの獲得を目指す。JAXA が運用する気球は体積別に数種類が用いられる。はじめは同種の気球で比較し、検討を拡張する。順調に進まなかった場合でも、減衰時間の平均やばらつきを明らかにできれば、気球実験計画の立案において有意義な参考情報となり、気球実験コミュニティに対して貢献することができる。2018 年度までに収集したフライトデータの解析により、気球各部の姿勢運動の減衰特性と高度変化の相関をフライトごとに明らかにする。減衰のメカニズム (粘性、摩擦など) を検討し、それぞれの定数を求める。また現在保有する GPS 姿勢ロガーにより、フライトデータの追加収集を行う。

#### 4. 研究成果

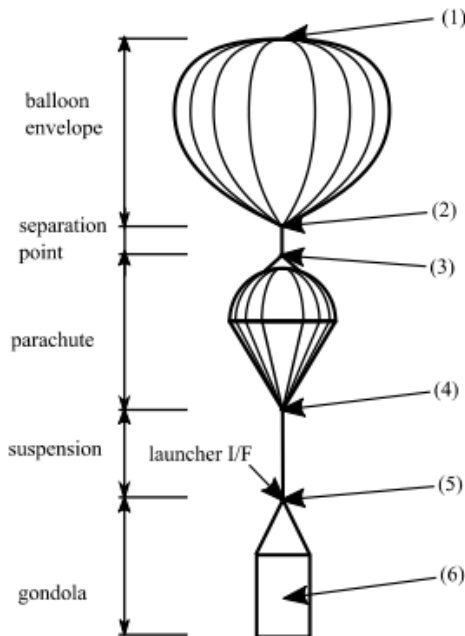
##### <フライトデータの取得>

研究期間であった4年間のうちに、毎年1回データ取得実験を行った。そのうち2023年3月末時点で3実験分のデータについてデータが完全であることを確認した。一方、1件の実験については、GPS姿勢ロガーから取り出したデータが不完全であるように見え、データの取り出し方法を変えて原因を調査中である。取得できたデータの一例を図3に示す。図は2021年に行ったデータ取得実験で気球頭部(図1(1))に取り付けたロガーの時間履歴である。上から順にロガーの高度(km)、重力加速度(G)、地磁場( $\mu\text{T}$ )、角速度(deg/s)、データから再構成したGPS姿勢ロガーの空間に対する姿勢ロールピッチヨー(deg)を示す。2時間以上にわたって成層圏にてデータの取得を行い、海上で回収された後までデータを保持できた。

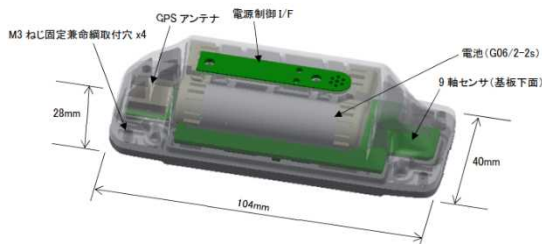
##### <データ解析>

本研究では運動の過渡状態の把握を主目的としていたが、データ解析において別の問題が発生したため、その解決に時間を要し、過渡状態の把握については2023年3月時点で不十分である。別の問題とは、センサーデータに対する温度変化の影響である。特に角速度センサにおいて温度変化が顕著であり、磁場センサにも温度変化の影響を疑わせる挙動が見られた。GPS姿勢ロガーは取り付け寸法を極力小さくすることを最優先に設計したため、温度環境に対してはほぼ環境暴露である。GPS姿勢ロガーは地上付近から対流圏界面、成層圏に至る間に、気温 $25^{\circ}\text{C}$ から $-60^{\circ}\text{C}$ まで大きな温度変化を経験する。そのため、地上で使用する分には無視できるような変化が、成層圏で用いられるときに顕著になる。姿勢運動の過渡応答は時間が長くかかるため、運動の時間変化は比較的小さい。そのため、温度変化の影響を適切に排除しなければならないことがわかった。

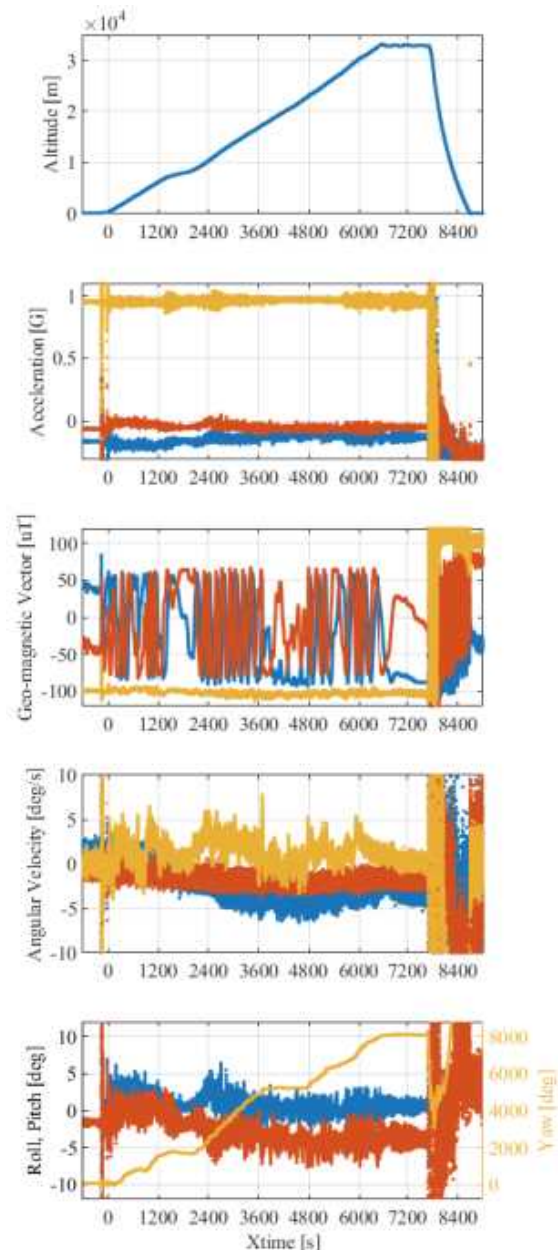
2023年3月時点で温度変化の補償方法を試行錯誤している段階であり、今後適切な方法を見いだせたら、過渡状態の運動の解析に進める予定である。



図：GPS 姿勢ロガーの取り付け位置



図：実験に用いた GPS 姿勢ロガー



図：取得されたデータの例 (2021年度 気球頭部)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 莊司泰弘, 飯嶋一征
2. 発表標題 気球系姿勢運動計測：2021年実験報告
3. 学会等名 2021年度大気球シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Shoji, Issei Iijima
2. 発表標題 Study on Attitude Motion of Balloon Flight Trains based on Distributed Attitude Measurements
3. 学会等名 33rd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 莊司泰弘, 飯嶋一征
2. 発表標題 気球系姿勢運動の計測と解析
3. 学会等名 2020年度大気球シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 莊司泰弘
2. 発表標題 Study on Transient Deformation of a Balloon Flight System based on Distributed Attitude Measurements of the Components
3. 学会等名 32nd International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 莊司泰弘, 飯嶋一征
2. 発表標題 気球系姿勢運動の計測と過渡状態の解析
3. 学会等名 大気球シンポジウム 2019年度
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------