

自由気球搭載装置の開発：2022年9月の黒潮町放球によるデータ取得状況

Development of free balloon-borne device: Data acquisition status of Kuroshio-cho balloon release in September 2022

須原 廉¹ 鈴木 悠泰¹ 生亀 弘務¹ 梅原 伊吹¹ 高田 拓¹

Ren Suhara Yuta Suzuki Hiromu Ikigame Ibuki Umehara Taku Takada

要旨：成層圏高度 20~30 km 程度まで到達可能な自由気球実験のため、搭載装置を開発し、実証試験および改良後の動作確認実験を実施した。搭載装置には、主に3つの機能があり、計測部では装置の位置や姿勢、周辺の環境データを取得し、カメラ撮像部では、回転サーボを用いることで気球経路に沿ったパノラマ画像を取得し、電源部では、上空での太陽電池パネル発電量を計測する。2022年9月24日に高知県幡多郡黒潮町で行われた自由気球実験では、実験中のプログラム停止によって上空でのデータは取得できなかったが、装置自体は成層圏へ到達した後、無事に海上へ着水し、装置を回収することができた。防水対策は万全であり、回収後、装置ボックス内の電子部品は正常に動作することを確認した。気球実験の結果を受けて、装置全体の改良を実施した上で想定実験を実施し、パノラマ動画撮像部と太陽電池パネルの電源部が適切に動作することを確認した。

キーワード：自由気球，気球搭載装置，成層圏，GoProカメラ

1. はじめに

自由気球実験では、地上から放球された気球が高度 20~30 km 程度の成層圏（10~50 km 程度）まで到達した後、気球は自然破裂し、搭載装置は海上へパラシュート降下する^[1,2]。気球を安全に飛行させるために、気球経路に沿った周辺の状況を把握することは重要である。カメラ撮像を行うことで、地形だけでなく、上空の雲の動きやその高度の様々な情報を得ることができる。しかしながら、気球自体は風によって流される上、気球から吊るされた紐はねじれ運動や振り子運動によりカメラ視野は常に変動するため、特定の方向を撮像することは難しい。

また、成層圏に長時間滞留する際には、装置の電源を太陽電池からの給電に頼ることになる。雲を超えた高度では、太陽電池の発電量は地上より高いと考えられるが、気球などの飛行では、装置の姿勢が大きく変動するため、実効的な発電量を調査する必要がある。

本研究では、気球搭載用の観測装置を開発し、自由気球実験での実証を目指している。主な目的としては、飛行経路の状況を把握するため、カメラを一定速度で回転させながら撮像することで 360 度パノラマ画像を生成する。また、高高度における太陽電池の実効的な発電量を計測することで、将来的な成層圏飛行中の太陽電池利用を検討する。

2. 装置の開発

2. 1. 気球及び気球搭載装置の全体像

今回の自由気球実験では、ペイロード以外の気球及びパラシュートなどは、気球甲子園の運営側が準備した。気球及び気球搭載装置の全体像を図 1 に示すが^[3]、上か

ら順番に、気球、パラシュート、GPS 発信機、シーマーカー、ペイロード 1（開発した搭載装置）と続き、最下部に運営側のペイロード 2 が搭載された。気球は 2,000 g のゴム気球を用いており、7 m³ のボンベ約 2 本分のヘリウムガスが封入された。

装置は、発泡スチロール製容器（18.3×24.8×17.3 cm）の中に緩衝材とともに入れ、2つの観測装置を搭載した発泡スチロール製の容器を重ねて、養生テープと結束バンド、長さ 6 m の紐を用いて固定した。搭載装置の気球への取り付けは、装置から伸ばした2本の紐を、ペイロード取付用のカラビナに結び付けた。

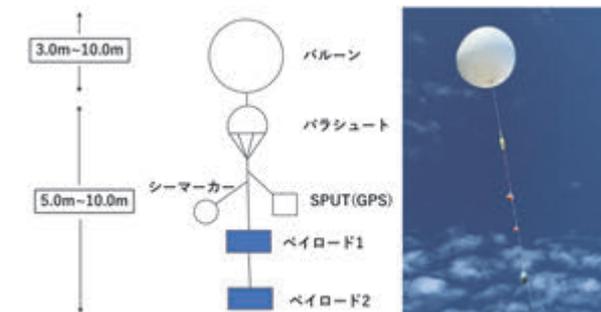


図 1 気球及び気球搭載装置の全体像



図 2 観測装置の全体像

2. 2. パノラマ画像撮像用の装置

地上と高度 20~30 km 程度を往復する飛行経路に沿っ

て、360度パノラマ画像を取得するための搭載装置を製作し、カメラを一定速度で回転させる撮像実験を実施する。

開発した搭載装置（装置1）は、撮像用カメラを取り付けた撮像部と環境計測のためのセンサを含む環境計測部の2つからなる。図3に装置1の外観を示す。アクチュエーターやセンサ類は、過去の係留気球実験や自由気球実験で使用した部品を用いた[1,2,4]。



図3 パノラマ画像撮像実験の装置

2.2.1. 環境計測部

環境計測部には、表1に示す複数のセンサを配置しており、図4に示す外観となっている。環境計測のため、気温と相対湿度、気圧を計測する。装置ボックスの姿勢情報のため、9軸センサを用いて、加速度、角速度、地磁気の値を取得する。また、装置ボックスの位置情報を取得するため、みちびき対応GPSモジュールにより、緯度、経度、高度の位置情報を取得する。図5に、計測部のシステム構成図を示す。センサ基板は、Raspberry Pi Zero対応のHAT基板として、Autodesk社のEAGLEで設計し、プリント基板製作を発注した。プリント基板は、Raspberry Pi Zero 2 Wの上に、ソケットを介して二段構造としている。GPSモジュールは受信部を鉛直上向きに配置するため、プリント基板には繋げずにプラスチックケースに接着剤を用いて直接取り付け、装置ボックスの発泡スチロールには、受信部用の穴を開けた。ただし、LoRaモジュールは動作が不安定だったため、気球実験では搭載しなかった。

表1 装置1内のセンサ表

名称	型番	計測パラメータ
温湿度センサ	SHT35	温度, 相対湿度
気圧センサ	LPS25HB	気圧
9軸セ	BNO055	9軸(加速度, 角速度,

ンサ		地磁気) クォータニオン, オイラー角
GPSセンサ	AE-GYSFDMAXB	緯度, 経度, 海拔高度, 測位利用衛星

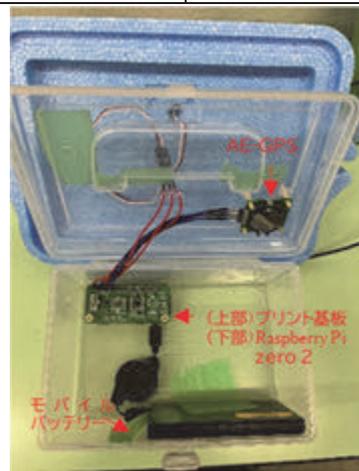


図4 環境計測部とセンサ用基板の外観

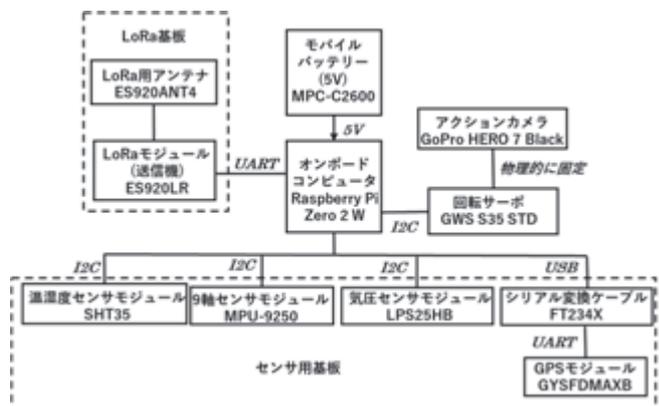


図5 装置1のシステム構成図(ただし、LoRaモジュールを実装しない場合は、シリアル変換ケーブルは不要)

2.2.2. 撮像部

撮像部は、アクションカメラとジンバルで構成されている。アクションカメラは、防水機能と軽量性を重視してGoProカメラHERO7 Blackを使用した。本実験でのGoProカメラの設定条件を表2に示す。GoProカメラにはGPSが搭載されており、タイムラプスモードでは、

画像毎に GPS 位置情報（緯度，経度，高度）が記録される。

ジンバルには，一定速度で回転し続けるように，回転サーボ（GWS-S35 STD）を使用した．装置ボックスの蓋の下側に，回転サーボを取り付け，蓋の上側に回転部が出るようにした．制御には Raspberry Pi Zero 2 W を用いて，ジャンプワイヤーをプラスチックケースから装置外側の回転サーボまで延ばして接続した．カメラは GoPro カメラ用の外枠に入れた上で，両面テープと結束バンドで回転サーボに取り付けた．

表 2 GoPro カメラの設定条件

使用機種	HERO 7 Black
モード	タイムラプスモード
撮像間隔	1 秒
SD カード容量	32 GB

表 3 GoPro カメラの重量比較

名称	重量[g]	外枠重量[g]	備考
HERO 7 Black	116	43	GoPro 専用外枠を使用
HERO 8 Black	126		外枠不要
HERO 9 Black	158		外枠不要

2. 3. 太陽電池パネル実験用の装置

高高度における太陽光エネルギーの利用可能状況を調べるため，搭載装置を開発し，実験を実施した．気球実験では，地上設置型の太陽電池と異なり，風の影響によって搭載装置の姿勢が絶えず変化するため，搭載装置の姿勢データを取得する必要がある．そのため，気球搭載用の観測装置（装置 2）は，気球や周辺の状況を把握するための環境計測部，太陽電池パネル，充電電池，および電源基板からなる．図 6 に装置 2 の外観を，図 7 にシステム構成図を示す．

図 8 に示す専用の電源基板⁴⁾はコンピュータボードへの給電，充電電池への充電，および各太陽電池パネルの電流・電圧計測の機能を有しており，電源基板には 3 つの太陽電池パネルと充電電池，Raspberry Pi を接続している．計測した太陽電池パネルの電流，電圧値から発電電力を計算できる．太陽電池パネルは発泡スチロール製容器の側面 3 面に貼り付け，残りの側面 1 面には実験状況監視用のカメラを取り付けた．カメラには GoPro HERO 8 Black を使用し，専用外枠にはめ込んだ状態で，発泡スチロール製容器を削って接着剤で固定した．撮像には撮像間隔 1 秒のタイムラプスモードを使用した．表 3 に，3 種類の GoPro カメラの情報を示す．

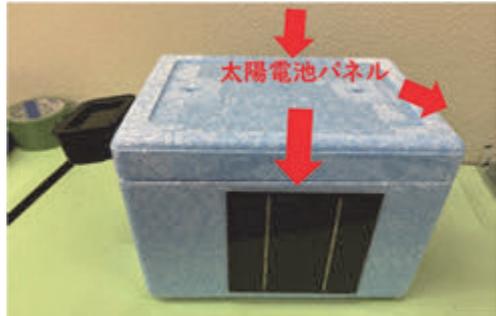
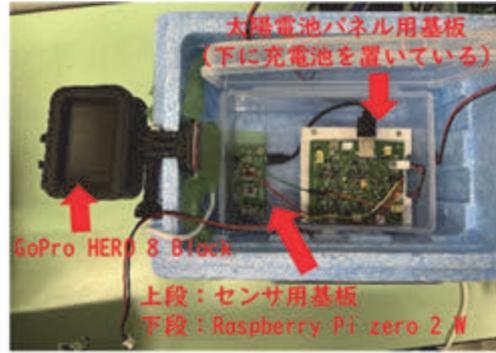


図 6 太陽電池パネル実験用の装置 2

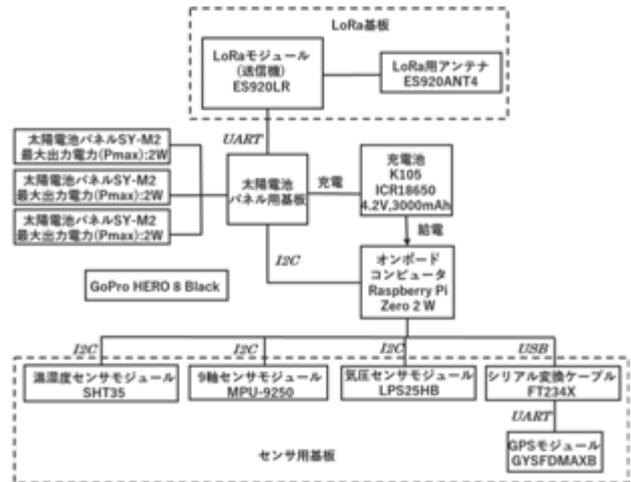


図 7 装置 2 のシステム構成図（ただし，LoRa モジュールを実装しない場合は，シリアル変換ケーブルは不要）



図 8 太陽電池パネル用の電源基板

3. 自由気球実験 2022 年 9 月 24 日

気球を飛ばせるにあたり、愛媛県南宇和郡愛南町を拠点とした、えひめ南予気球甲子園での自由気球放球の機会を利用した。製作した搭載装置を持ち寄って、自由気球実験を実施する。放球後に、成層圏まで到達させて着水するまでに 1 時間半程度の飛行時間となる。

3. 1. 放球当日の状況

2022 年 9 月 24 日に、高知県幡多郡黒潮町の土佐西南大規模公園にて自由気球実験を実施した。実験準備時の様子を図 9 に示す。現地には、午前 7:00 頃に集合し、搭載装置は、10:20 頃にカラビナで気球に取り付け、11:30 頃に放球された。装置の回収は、別動隊が放球地点から約 30 km 北東に位置する志和漁港から、漁船で回収に向かった。

放球時には、装置を気球に取り付けてから放球までの時間が長かったため、GoPro カメラが熱暴走しないよう、雨傘や帽子などで日陰を作って待機した。ただし、準備から放球時刻までの時間は、様々な要因で変化するため、GoPro のバッテリーや SD カードの残量などを確保するため、装置準備に工夫が必要である。放球後は風と振動で装置が激しく回転している様子が見られた。図 10 に、運営側の GPS 位置情報発信機から得られた実験時の気球の飛行経路を示す。気球は放球後、北東の方向へ飛来し、約 1 時間半後に着水した。



図 9 放球準備時の様子



図 10 放球実験時の GPS の軌跡

3. 2. 実験結果

回収後の装置の外観を図 12 に示す。容器には破損やひび割れなどはなく、Raspberry Pi Zero 2 W は回収後も問題なく起動できた。しかし、装置 1 の上部に付けていたカメラが外れていた。

計測部に関しては、開始時には動作していたが、10 分程度の計測後に、プログラムが停止していた。実験時に取得されたセンサーデータを図 12 に示す。飛行時のデータを取得できなかったが、装置の準備の際にセンサが正常に動作していることは確認できた。

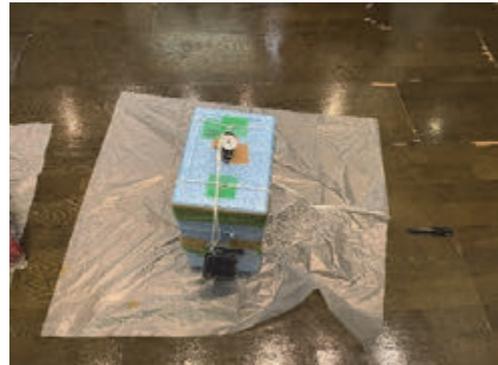


図 11 回収後の装置の外観

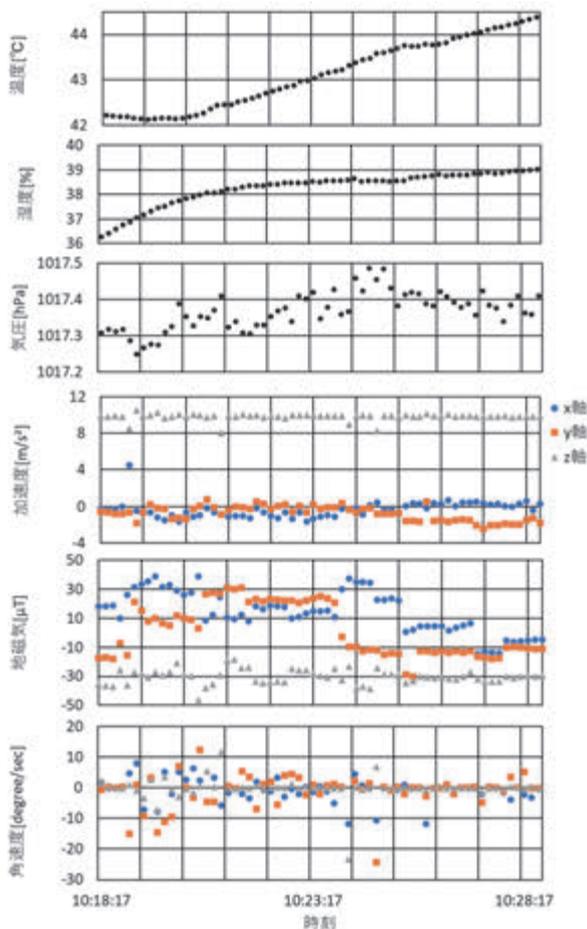


図 12 9月24日の装置1のセンサデータ

状態であり、カメラの角速度は鉛直向きのz軸周りの回転が支配的で、45 deg/s程度であった。

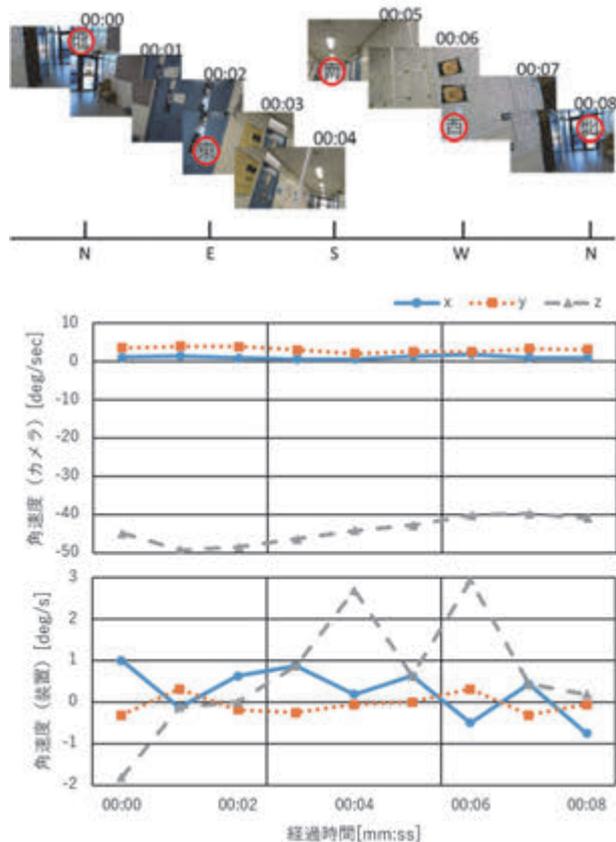


図 13 静止状態でのカメラ回転試験：(上)方位・時間に対する画像の時系列，(下)カメラ及び装置の角速度値

4. 改良装置による動作試験

4. 1. 回転サーボによるパノラマ画像撮像試験

回転サーボにより GoPro カメラを回転させる撮像試験を実施した。GoPro カメラは、HERO 9 Black を使用し、撮像間隔 1 秒、視野角狭角 (73 度) のタイムラプスマードで画像を取得した。気球実験を想定して、装置ボックスに取り付けた長さ 3.2 m の紐 (単振り子の周期は 3.6 s) を用いて天井から吊るし、①静止状態、②ねじれによる回転運動、③振り子運動の 3 パターンで実験を行った。静止状態でのカメラ視野 1 周の周期を 8 秒 (45 deg/s) とした。また、ねじれによる回転運動の実験ではモーターの回転とは逆方向に回転させた。実験ではカメラが向く方位が分かるように 4 方の壁に各々東西南北の紙を貼りつけた。装置内の 9 軸センサでは角速度値を 1 秒毎に取得している。

まず、静止状態の装置で GoPro カメラを回転させた結果を図 13 に示す。カメラの回転により、重心が変化するため、撮像画像は水平に対して多少傾いている。撮像画像では、8 秒の回転周期で、カメラ視野 360 度分の撮像ができた。また、装置の角速度はほぼ 0 deg/s で静止

ねじれによる回転運動での試験結果を図 14 に示す。カメラの撮像画像では、カメラ視野は、ゆっくりと北から西向きに回転した後、西から北向きへと 450 度程度の速い回転をしている。ねじれが逆向きの時には周期が 5 秒×4=20 秒程度、ねじれと同じ向きの時には周期が 5 秒程度であった。カメラの角速度は、z 軸周りの回転が支配的で、20 deg/s から -70 deg/s へと回転の向きが変化しており、撮像画像の時系列変化とよく合っている。装置の角速度からは、z 軸回りのねじれ回転は、30 deg/s 程度で正負が入れ替わっている。よって、ねじれの角速度が ±30 deg/s 程度であれば、十分に 360 度分の視野の撮像が可能であることが確認できた。

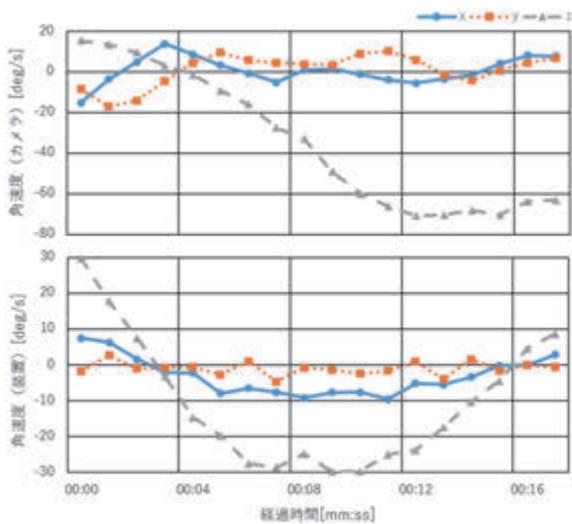
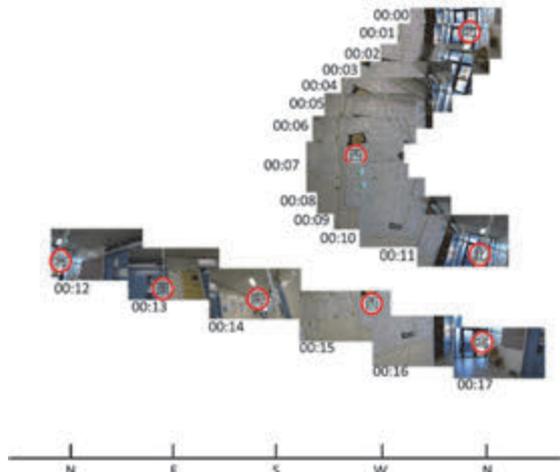


図 14 ねじれによる回転運動でのカメラ回転試験：
（上）方位・時間に対するの画像の時系列，（下）カメラ及び装置の角速度値

振り子運動での結果を図 15 に示す。カメラの撮像画像では、回転速度に変動があるが、約 10 秒間で 360 度回転している。角速度は z 軸周りの回転が大きい、その他の軸周りの回転速度が大きく変動があるため、装置が揺れながら振り子運動をしていると考えられる。撮像画像の後半では、画像の重なりが小さくなっており、振り子の速度が大きい時には、カメラ視野の重なりが確保が課題となる。

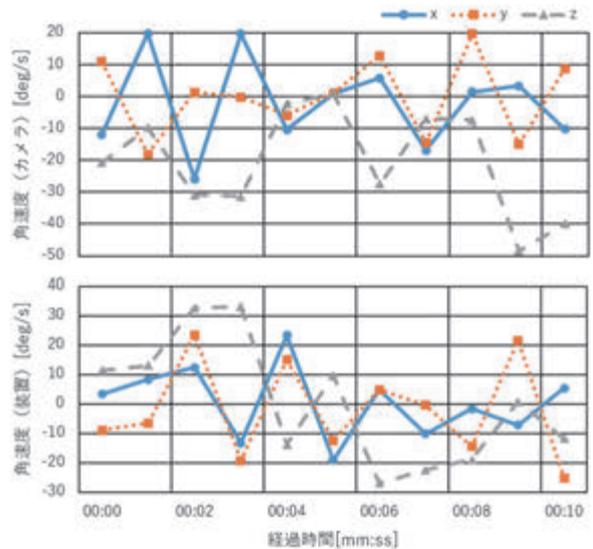
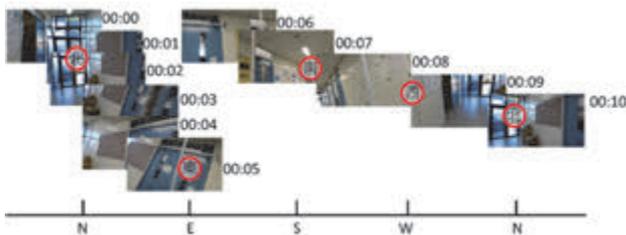


図 15 振り子運動でのカメラ回転試験：（上）方位・時間に対するの画像の時系列，（下）カメラ及び装置の角速度値

4. 2. 太陽電池パネルによる電源供給試験

試験中に Raspberry Pi が落ちることが何度もあり、原因は使用した充電電池の電圧不足が考えられる。そのため今回はデータの取得を優先し、電源にはモバイルバッテリー（MPC-C2600）を使用した。図 16 に示すように、対となる側面に 2 枚の太陽電池パネルを、上面に 1 枚を取り付けた。今回は回転台を用いてハロゲンランプと屋外で太陽光を当てた場合の 2 つの条件で試験を行った。

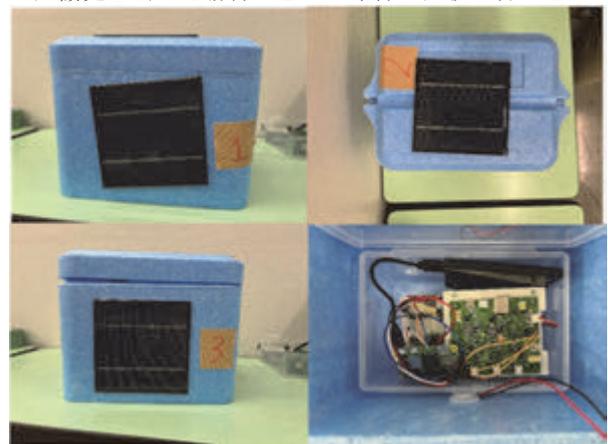


図 16 改良した装置の外観

4. 2. 1. ハロゲンランプ試験

ハロゲンランプ試験の概要を図 17 に示す。回転台の回転周期を約 15 秒とし、ハロゲンランプから 1 m 程度離れた場所で試験を行った。電源基板の電流と電圧値のサンプリング間隔は 7 秒、角速度は鉛直上向きを z 軸とした。ハロゲンランプへの仰角は 25.8 度であった。

表4 ハロゲンランプの詳細

型式	HS-500D-5ME
定格電圧	100 V
定格電流	3.8 A
消費電力	415 W

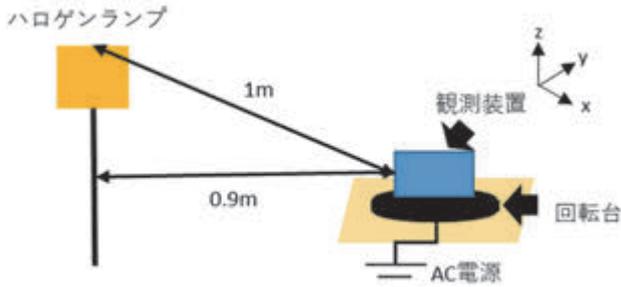


図17 ハロゲンランプを用いた動作試験：（上）概要，
（下）試験の様子

ハロゲンランプを用いた照射実験の試験結果を図17に示す。角速度は、鉛直上向きのz軸周りの変化が支配的であった。側面の太陽電池パネルの発電量は、ハロゲンランプ側を向いている時には60 mW程度の発電量であり、その際、対になっているパネルの発電量は10 mW程度であった。装置上面のパネルは安定して60 mW程度の発電量だった。総発電量としては、最大で130 mW程度、最低で70 mW程度の発電量となっていた。また、側面パネルの電流や電力量は回転周期で振動しているが、周期とデータの取得間隔のずれによって太陽電池パネルがハロゲンランプに当たる面積がずれていくためと考えられる。

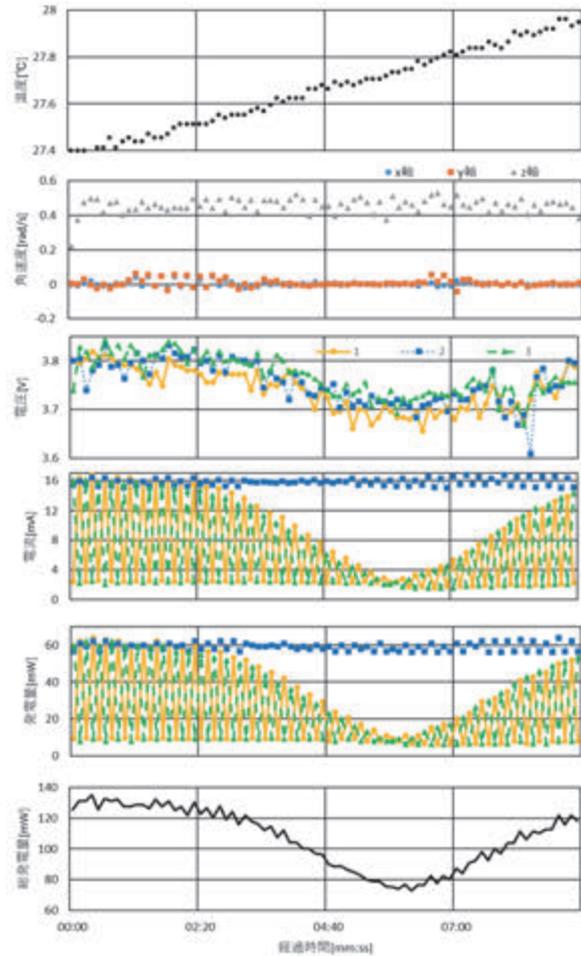


図18 ハロゲンランプでの動作試験結果

4. 2. 2. 屋外での太陽光による動作試験

太陽光での動作確認を行うため2022年11月9日13:00頃に装置と回転台を用いて屋外での動作試験を行った。図19に、試験の状況を示す。サンプリング間隔は7秒とし、回転台の電源にはモバイルバッテリーを使用した。実験時の天気は晴れていたが時々雲で太陽が隠れていた。太陽の仰角は29.6度であり、角速度は鉛直上向きをz軸とした。

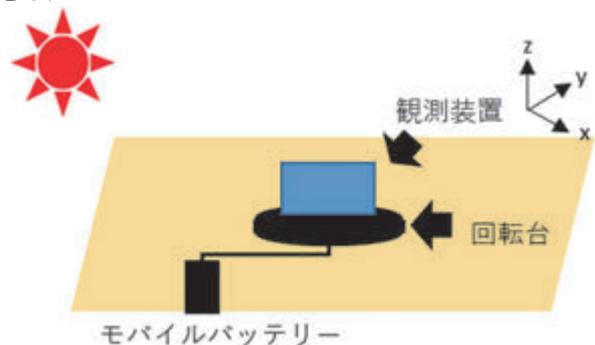




図 19 屋外での動作試験：(上) 概要，(下) 実験状況

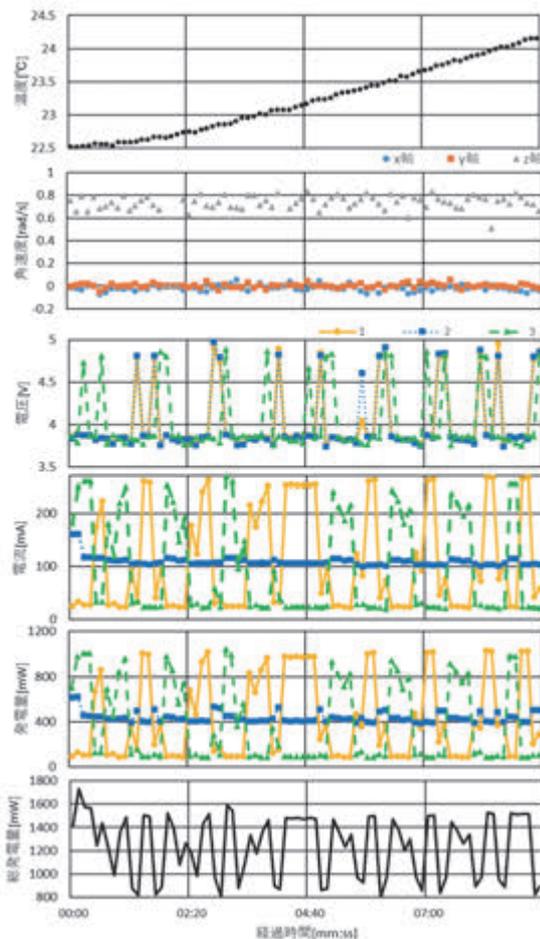


図 20 屋外での太陽光による動作試験結果

屋外での太陽光による照射試験の結果を図 20 に示す。角速度は z 軸周りが支配的であった。発電量は装置上部の太陽電池パネルでは 400~500 mW 程度でほぼ一定となっており、側面に取り付けた太陽電池パネルでは太陽光側が 1 W 程度、反太陽光側が 100 mW 程度の発電量であった。発電量は、ハロゲンランプ試験に比べて大きいですが、実験中に雲で太陽の一部が隠れていたため、太陽電池パネルの最大は 4 W 程度であるが、総発電量は 0.8~1.6 W 程度であった。

5. 今後の課題

今後の課題として、長時間稼働による負荷や外部からの衝撃により、マイコンやプログラムが停止することがあり、エラー監視とエラー発生時の OS やプログラムの再起動設定が必要と考えている。パノラマ画像に関しては、ジンバルとカメラの接続機構の脆弱性に対して、カメラと回転サーボの接続部分の強化や、回転サーボを内部に取り付けて容器の外に接続部分が出ないようにするなどの対策を検討する。また、GoPro カメラの熱管理の問題では、強い日差しによってカメラの温度が上がり動作が不安定になることがあるため、保冷剤を入れて機器の温度を下げる工夫や、カメラを放球直前に取り付けるなどの対策をする。電源部に関しては、太陽電池パネルを用いた想定実験を行った際に Raspberry Pi がシャットダウンすることがあり、充電電池の電圧不足が考えられるため、充電電池を 2 個並列にすることを検討している。

6. まとめ

成層圏高度 20~30 km 程度まで到達可能な自由気球実験のため、搭載装置を開発し、自由気球実験での実証試験および改良後の動作確認試験を実施した。搭載装置には、主に 3 つの機能があり、計測部では装置の位置、姿勢、周辺の環境データを取得し、カメラ撮像部では、回転サーボを用いた気球経路に沿った 360 度パノラマ画像を取得し、電源部では、上空での太陽電池パネル発電量を計測する。

2022 年 9 月 24 日に高知県幡多郡黒潮町で行われた自由気球実験では、実験中のプログラム停止によって上空でのデータを取得できなかったが、装置自体は成層圏へ到達した後、無事に海上へ着水し、装置を回収することができた。防水対策は万全であり、着水後の装置ボックス内の電子部品は正常に動作することを確認した。気球実験の結果を受けて、装置全体の改良を実施した上で想定実験を実施し、パノラマ画像撮像部と太陽電池パネルの電源部が適切に動作することを確認できた。

謝辞

千葉工業大学の前田恵介研究員、香川高等専門学校の村上幸一准教授を始め、気球甲子園関係者には今回の自由気球実験の準備に携わっていただき、大変感謝しております。

本研究は、公益財団法人 島津科学技術振興財団の助成を受けたものです。観測装置の開発に関して、一般財団法人 WNI 気象文化創造センターから助成を受けました。

参考文献

[1] 加藤樹, 高田拓, 坂本知也ほか: 超小型気球による夜

光雲観測を目指した装置開発と初期実験結果, 大気球シンポジウム: 2019年度, isas19-sbs-005, 2019

[2]高田拓, 加藤樹, 坂本知也ほか: 超小型気球搭載観測装置の開発: LoRa 通信モニターによる成層圏到達データの分析, 高知高等専門学校学術紀要, 65, pp. 29-37, 2020

[3]えひめ南予気球甲子園レギュレーション (改定・確定版), 2022

[4]須原廉, 高田拓, 石井智士ほか: 夜光雲観測のための超小型係留気球観測システムの軽量化に向けた検討, 大気球シンポジウム: 2021年度, isas21-sbs-034, 2021

[5]中谷淳, 土屋華奈, 坂本知也ほか: 宇宙技術教育のための2Uモデル CubeSat の開発と活用実践:1. ミッション系空間を確保した機体開発, 工学教育, 68-2, pp. 56-61, 2020