

自由気球搭載装置の開発：2023年9月の宇和島市放球によるデータ取得状況

Development of free balloon-borne device: Data acquisition status of Uwajima-shi balloon release in September 2023

生亀 弘務¹ 稲尾 哲哉¹ 川嶋 勇輝¹ 鈴木 悠泰²
アンドレイ レムス デルーナ カシミナ¹ 高田 拓¹

Hiromu Ikigame Tetsuya Inao Isaki Kawashima Yuta Suzuki
Andrei Remus De Luna Casimina Taku Takada

要旨：成層圏高度 20~30 km 程度まで到達する自由気球実験のため、気球搭載装置を開発し、2023年9月23日に愛媛県宇和島市にて実証実験を行った。気球搭載装置はセンサ部と撮影部からなる。センサ部では、気温などの環境データと搭載装置の姿勢データを取得し、LoRa 通信により取得データの一部をリアルタイムで地上局へ送信する。撮影部では、GoPro カメラをサーボモータに取り付けて回転させることで、上部カメラでは 360°パノラマ撮像を、側部カメラでは地上の走査を行う。気球の着地場所は計画と異なり山中に落下したが、装置は無事に回収され、多くのデータを取得できた。撮像画像の時系列変化を基に、サーボモータ制御によるパノラマ撮像と地上走査撮像について評価を行った。

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

自由気球放球実験では、ヘリウムなどの軽い気体を封入することで、ゴム気球は成層圏（10~50 km）の 20~30 km 高度まで上昇し、ゴムが膨張圧力に耐えられなくなり破裂する。降下に転じた後は、パラシュートが開き、海上などに着水させ、計測装置等を回収する。そのため、比較的安価に、対流圏から成層圏に至る経路での計測や撮像などを行うことができる¹⁻³⁾。

自由気球による上空での計測において、高度に対する温度・湿度などの環境情報と共に、周囲の写真や映像を取得することは重要である。例えば、カメラ撮像により、地上の地形や上空での雲の有無、その形状などを捉えることができる。しかし、気球自体は風の影響を大きく受け、気球搭載装置がねじれ運動や振り子運動をするために、上空でカメラの視野角を制御することが難しい。前年度は、サーボモータを用いて GoPro カメラを一定速度で回転させながら撮像を行い 360°パノラマ画像を、生成することを目指した³⁾。しかしながら、プログラムの不具合や GoPro カメラの脱落などにより、目的を達成することができなかった。

本研究では、気球搭載用の環境計測装置を開発し、自由気球実験での実証を行った。装置上部のカメラでは、サーボモータによる水平面内の回転制御による 360°パノラマ画像を、装置側部のカメラでは、サーボモータによる地上の走査画像を生成することを目指した。得られたデータに基づいて、気球搭載装置の更なる改良策について、検討を行った。

2.気球搭載装置の概要

2.1.気球及び気球搭載装置の全容

今回の自由気球放球実験では、ペイロード以外の気球及びパラシュート等は、気球甲子園の運営側に用意して

いただいた。気球及び気球搭載装置の全容を図1に示す。運営側の GPS は Garmin 端末を用いている。本装置は図1左のペイロード3として搭載された。

計測装置の外観を図2に示す。計測装置は、撮影用カメラをボックス上部と側部に取り付けた撮影部、および、ボックス内部のコンピューターボードとセンサ部から構成される。センサ部はセンサ基板をポリプロピレン製の容器（14.6×17.8×8.7 cm）にねじ止めで固定している。ペイロードとしては、ポリプロピレン製の容器を、発泡スチロール製のボックス（18.3×24.8×17.3 cm）内に入れ、隙間には、気泡緩衝材を詰めた。ボックスの蓋を開けた後、外部から養生テープなどで密閉した。装置の総重量は 1,050 g であった。

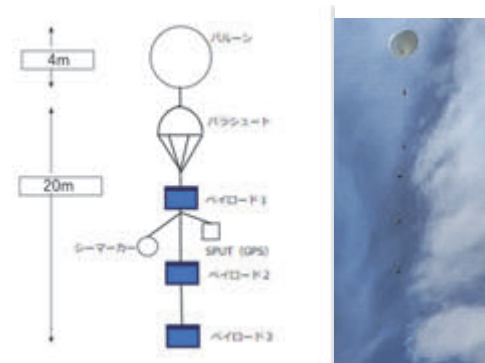


図1 気球及び気球搭載装置の全体像放球時の様子



(a)

¹東京都立産業技術高等専門学校 ものづくり工学科

²東京都立産業技術高等専門学校 専攻科



(b)

図 2 気球搭載装置の(a)外観と(b)内観

2.2 撮影部

撮影部は、アクションカメラとサーボモーターで構成している。アクションカメラは防水性や重量、視野角などを考慮し、GoPro HERO8 Black を使用した。GoPro カメラの撮影設定を表 1 に示す。

サーボモーターは軽量・小型でトルクの比較的大きい回転サーボ(GWS-S35 STD)を使用する。カメラマウントとサーボモーターは GoPro マウント付属の粘着テープで接続している。ただし、前年度は上部のカメラが脱落したため、図 2 上に示すようにボックス内に繋ぎとめた紐を GoPro に結びつけ、脱落防止を図った。回転サーボを一定方向に回転し続けると、紐がねじれる可能性がある。上部カメラに関しては、図 3 左に示すように。上部カメラに関しては、図 3 左に示すようにカメラ視野角は 121°なので、初期位置から角速度約 30 deg/s で左右に 120°ずつ回転させる。側部のサーボモーターは図 3 右に示すように、ボックスの長辺の中心部に固定した。同様にサーボモーターを用いて初期位置から角速度約 15 deg/s で左右に 30°回転させ、1 周期で下向き 180°を走査する。各々のサーボモーターを発泡スチロールボックスに埋め込み、隙間をグルーガンで塞いだ。また、側部カメラのモニターには、カメラ冷却用の超小型のファンを貼付けた。

表 1 GoPro カメラの設定条件 (上部、側部共通)

項目	設定値
使用機種	HERO 8 Black
撮影モード	タイムラプスモード、広角
水平視野角	121°
撮影間隔	1 秒
SD カード容量	128 GB

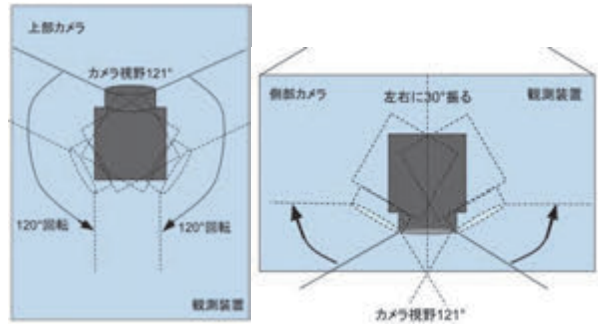


図 3 各カメラの視野範囲の模式図

2.3 計測部

図 4 に計測部全体のシステム構成図を示す。装置周辺の環境計測のため、気温と相対湿度、気圧を計測する。ただし、温湿度センサは外気温用とボックス内部用を 1 個ずつ搭載している。外気温用センサは、ボックス上部に穴を開け、外部に貼り付けている。ボックスの姿勢情報を得るため、9 軸センサにより 3 軸の加速度、角速度、地磁気の値を取得する。装置の位置情報を得るため、GPS センサをボックス上部に穴を開け外部に固定している。マイコンへの電源供給はモバイルバッテリーからスイッチ付きの USB ケーブルを介して行った。スイッチはボックス短辺から外に出ており、装置ボックスの蓋を開けた後に手でマイコンを起動できる。センサ部の回路は、Raspberry Pi Zero 対応の HAT 基板を設計し、Raspberry Pi Zero 2 W の上に、ソケットを介して図 5 のように三段構造としている。

取得データの情報をリアルタイムで確認するために 920 MHz 帯の LoRa 通信により、3 秒間隔で送信する。地上局での LoRa 受信画面例を図 6 に示す。ただし、図中の mag と GPS_altitude に関しては受信プログラムにミスがあり、正しい値を表示できていない。アンテナはボックスの長辺から水平方向に突き出している。LoRa で使用する送信フォーマットを図 7 に示す。LoRa では、1 パケットあたりの送信容量に制限があるため、必要最低限のパラメータ数に対して、必要最低限の有効桁数のみを送信するようにしている。

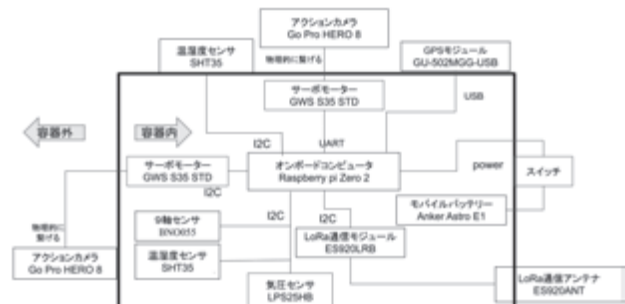


図 4 計測部のシステム構成図

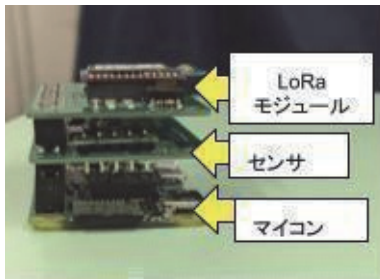


図5 コンピューターボードと各基板の接続例

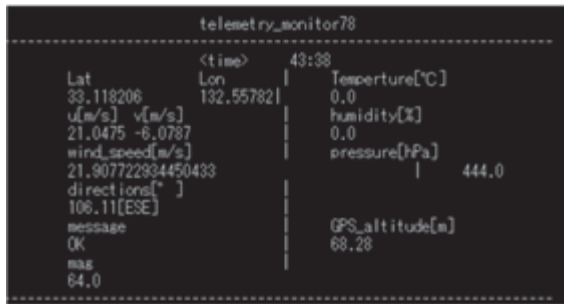


図6 LoRa 通信での受信画面の例

47.02	6133453	5492547	12096	1005	-262	58.1	1548
時刻 (mm:ss)	(緯度-132) +10000000 (°)	(経度-32) +10000000 (°)	海拔高度 (整数部) (m)	気圧+10 (整数部) (hPa)	温度+10 (整数部) (°C)	湿度+10 (整数部) (%)	方位角+10 (整数部) (deg)

図7 LoRa 通信用の送信フォーマット

3.自由気球実験結果

3.1 放球当日の状況

自由気球実験は、2023年9月23日に愛媛県宇和島市南レク南楽園ファミリーパーク駐車場にて放球を実施した。当日早朝は小雨が降っていたが、実験時は快晴で26°C程度であった。放球直前の様子を図8に示す。現地には7時10分頃に到着して機器の準備を行い10時頃から気球への装置の取り付け等を行った。放球直前の10時20分から装置に電源を投入し、プログラムを自動実行し、10時25分頃に放球された。事前の気球シミュレーションでは、放球された気球は東向きへ飛行し、高知県沖の海上に着水する予定であったが、実際には12時22分頃に高知県黒潮町の山中の木に引っかかった。



図8 放球の様子

3.2.LoRa 通信の状況

通信状況に関しては、放球から12分間程度の間、地上局のトラブルにより通信が確認できなかった。地上局に用いたRaspberry pi Zero 2 Wを予備品に取り替えることにより、受信できた。後日、トラブルが発生した端末の動作試験を行い、トラブルの原因は、基板とLoRaモジュールとの接続不良であることが確認できた。

LoRa通信により、GPS位置情報と気圧値をリアルタイムに取得できた。図9に、気球の位置情報の3次元プロットを示す。黄色の軌跡は、運営側のGarmin端末のデータ(約30秒値)であり、放球から落下まで全てのデータを取得できている。赤い軌跡は、LoRa通信で受信したGPS位置情報であるが、一部のデータが欠落している。また、Garmin端末のデータ取得周期は一定では無かったため、黄色い線と背後の山の緑が重なり、緑色の軌跡に見える部分がある。図10に、LoRa通信で取得できたデータを示す。高度には、GPS高度と気圧高度を示しているが、GPSセンサモジュールでは高度12,096 m以上で正常な値が取得できなかった。気圧高度に関しては、静水圧平衡を仮定した高度に対する気圧の関係と、標準大気モデルから得た高度に対する温度の関係を用いることで、気圧の関数として高度を算出している。通信は、10時37分05秒から約6分30秒間、10時59分24秒から約4分間、11時03分33秒から約60分間の間で断続的に通信できた。LoRa通信の受信電波強度(RSSI: Received Signal Strength Indicator)が低い部分では通信感状態が良くない。10時43分31秒から約16分間の中断に関しては、地上局からの視線方向に、山などの遮蔽物があった影響と考えられる。気球高度が高くなるとRSSIは小さくなるが、気球高度が急激に下がる部分ではRSSIはやや高くなっている。その後、気球高度が15 kmを下回ってくると、再びRSSIが下がり、最後に通信が確認できたのは12時03分13秒で放球地点から直線距離43.36 kmであり、放球地点から最も遠かった。その直前には、RSSIは-133~-137 dBm程度と通信できる限界の感度であった。また、11時21分24秒からは、30秒に1回程度の頻度でGPSが受信側端末のOS時刻に比べ1秒早く進んでいることが確認できた。今後は、気球搭載装置と地上局の時刻同期について厳密に実施する必要がある。

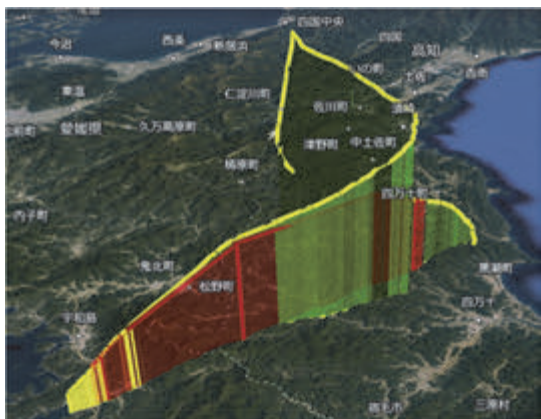


図 9 気球の軌跡 (赤:LoRa、黄色:Garmin)

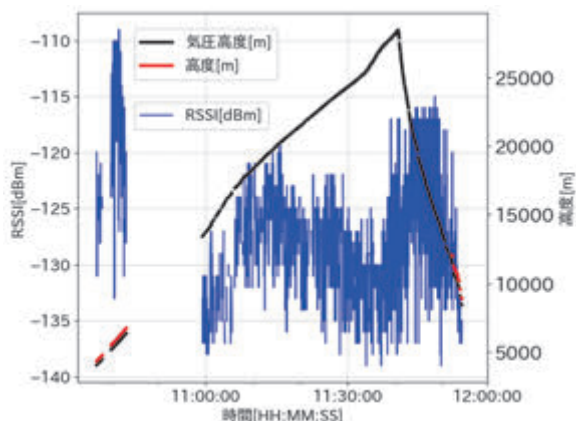


図 10 LoRa 通信で得られた高度と RSSI

3.3 気球搭載装置の記録データ

回収された装置の外観を図 11 に示す。回収後に、通信機能と 2 個のサーボモータ以外は正常に動作した。装置は山中で回収されたため、梱包の防水性に対する評価は確認できなかったが、ボックス内への侵入物はなかった。表 2 に、各データの取得状況を示す。

撮影部に関しては、ボックス上部のカメラやセンサなどは外れていなかった。側部のカメラはサーボモータと GoPro カメラの粘着テープが外れていたが、ボックス本体からの紐は GoPro マウントに結ばれており、カメラの喪失を防ぐことができた。ただし、カメラマウントがサーボモータから外れたタイミングについては、本実験ではこれ以上の情報は得られなかった。側面のサーボモータはボックスに食い込んでおり、ボックスが破損していた。2 台の GoPro カメラはいずれも起動可能で、SD カードから画像を取り出すことができた。

センサ部に関しては、ボックス内部の基板の配置やモバイルバッテリーの位置に大きな乱れは確認できなかった。しかし、サーボモータとの接続部 (図 11 右の黄色矢印) や LoRa アンテナと LoRa モジュールとの接続部 (図 11 右の赤色矢印) は大きく歪んでおり、当該機能は動作しなかった。サーボモータとアンテナは、ボックス外に

取り付けいていたため、外部から引っ張られるなどにより、歪みが生じたと考えている。ボックス内温湿度センサは、放球前からエラーが起きており、接触不良によると考えている。

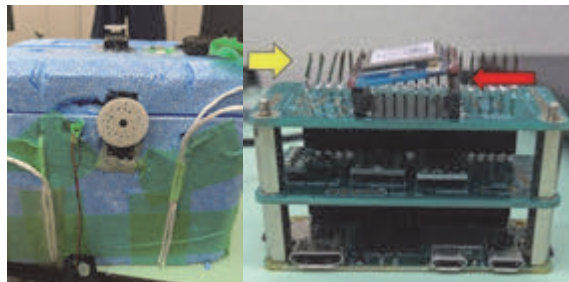


図 11 回収された装置の (左) 外観と (右) コンピュータボード下部

表 2 各データの取得状況

データの種類	状況
ボックス内気圧、加速度 角速度、地磁気、GPS 時刻	全区間でデータ取得
ボックス内温度・湿度 外部湿度、GoPro 温度	全区間でデータ未取得
緯度経度高度	12,096 m 以上の点は データが取れていない
重力、クォータニオン、直線加 速度、オイラー角(9 軸データ)	気圧推定高度:17,867 m 以降か ら、一部のデータ欠損がある
外気温度	-26°C 程度を記録した以降の すべてのデータが -45°C
GoPro 画像	上部:22 分 20 秒稼働し 1340 枚、 側部:23 分 20 秒稼働し 1400 枚

SD カードに記録されていた環境データを図 12 に示す。GPS センサの設定を正しく実施しなかったため、GPS データが 12,096 m 以上の高度で取得できていない。姿勢系データは、ノイズが大きいため、9 s の移動平均を黒線で示している。装置の傾き角は $\pm 10^\circ$ 度で安定しており、図示していないが、角速度の 3 成分では、z 軸の回転成分が最も支配的であった。このことは、装置がほぼ水平を保っていたことを示している。また、11 時 43 分 11 秒頃から、加速度の大きさが大きく変動しているが、装置の傾き角は変動が小さい。気球の破裂後に、安定したパラシュート降下をするまでの間、装置自体の加減速があったと考えられる。外気温は高度が上がるとともに急激に下がっているが、CPU 温度やボックス内温度は緩やかに下がっており、コンピュータボードの発熱によりボックス内は比較的保温されていると考えられる。CPU 使用率は 3~4% で推移しており、大きな変化を示さなかった。

そのため、搭載するマイコンとして、Raspberry pi Zero2 は十分な性能を持っている。実験での取得データは 10 時 20 分 17 秒から 13 時 42 分 34 秒までであったが、上昇し始めた 10 時 22 分頃から着陸推定時刻 12 時 22 分頃までのデータのみ示している。図 13 はデータの傾向を読み取りやすくするため、図 12 のデータを一部抜粋したものである。グラフ中の灰色の部分には図 16 の時刻、青色は図 19 の時刻を示している。

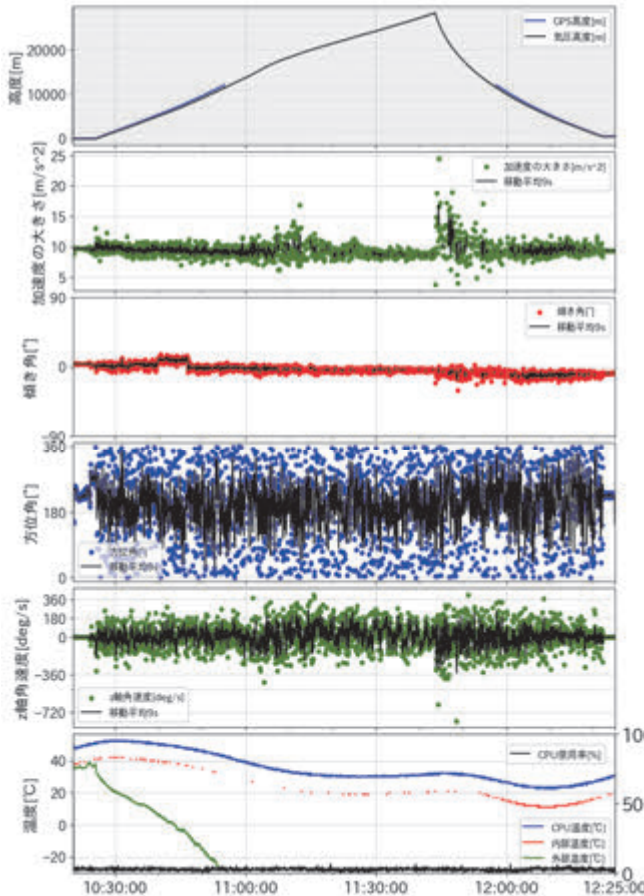


図 12 気球装置のセンサ部データ (10:22~12:25)

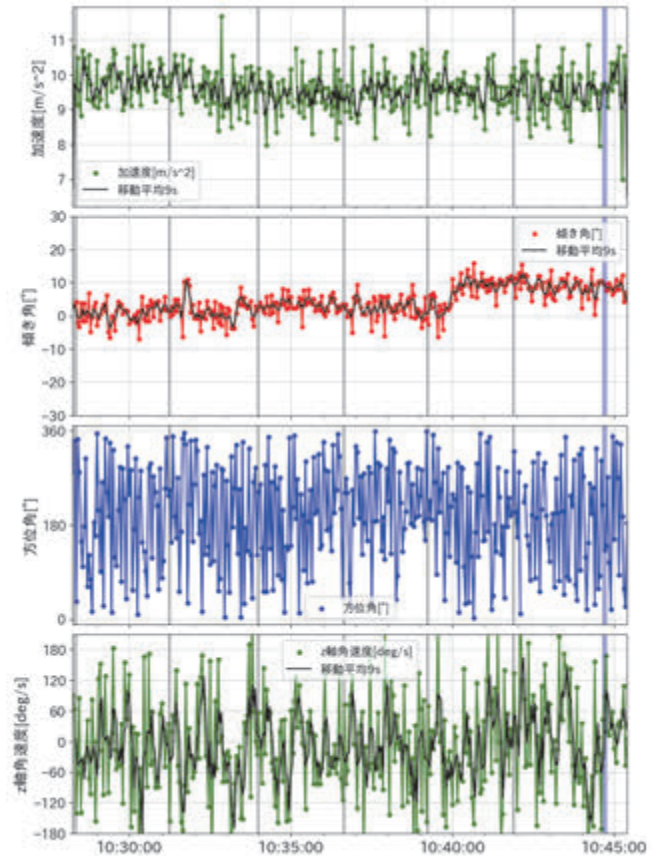


図 13 気球装置の姿勢系データ (10:28:00~10:45:14)

3.4.GoPro カメラによる撮像画像

今回はボックス上部のカメラで上空の水平 360°パノラマ撮影、ボックス側部のカメラで鉛直下向きの地上走査を行った。上部カメラはプログラム開始の 10 時 20 分 17 秒から 22 分 20 秒間稼働し 1,340 枚、側部のカメラは 23 分 20 秒間稼働し 1,400 枚の画像を取得した。

上部カメラで撮像した画像の例を図 14 に示す。地上で静止している際は、1 秒間隔で撮像しており、約 5 秒程度のサーボモータ周期で 360 度の視野を撮像している。サーボモータを往復させているため、10 秒毎に同一視野の変化を繰り返していることが確認できた。

一方、図 15 に示すように、上空では気球や装置の揺れや回転のため、カメラ視野の変化は一部不連続になっている。図ではサーボモータの一連の周期動作により、広範囲の撮像画像を取得できているが、360°視野を完全には達成できないことがある。また、約 10 秒間の撮像の間に、気球は約 60 m 程度上昇しているが、撮像対象までの距離を考えると、パノラマ画像として合成しても問題ないと考えている。

次に、側部カメラで撮像した画像例を図 16 に示す。黄色の枠は、高度 1 km の視野範囲を示したもので、赤枠はそれぞれの画像の 1 km 下の視野範囲を示す。また上段高度毎に視野範囲が異なるが、高度 1 km 程度では雲の影響

を受けずに地上を細部まで撮像できており、5~6 km 程度の高度では水平線や雲の様子を撮像できている。また、赤枠は高度が上昇するにつれ少しずつ小さくなっているため、撮像対象によって、高度や撮像間隔を選択すると効果的である。図 17 に、地上の静止状態で、サーボモータにより走査した画像を示す。約 5 秒間の周期で、地面を走査しているが、本来は約 6 秒間で 1 周期分となる予定であった。カメラ自体の自重や脱落防止用に接続した紐の干渉の可能性が考えられる。図 18 では、上空高度 6.6 km で撮像した連続画像を示す。上空では装置の回転運動などが大きく、連続的な走査は十分に達成できていない。ただし、6.6 km 高度のように、ある程度の高さの高度になると、視野範囲の重なりは大きく、得られた一連の動作範囲の画像を合成することで、1 枚の画像よりも広範囲の画像を合成できる。図 19 に、側部カメラの 10 秒間の合成画像を示す。上部カメラの水平線方向の画像を合わせることで、装置下側の半球に相当する合成画像を生成することが可能である。ただし、今後、サーボモータの回転方法については、再検討する。

今後、撮像画像と角速度や方位角との関係を確認し、より効率的なパノラマ及び走査画像の合成に必要な回転条件やサンプリング周期を検討する必要がある。また、気球上昇時の 10 秒間に機体は 100 m 程度上昇しているが、高度 6,600 m 程度から撮像しているため、画像中に高度差による大きな影響は見られなかった。

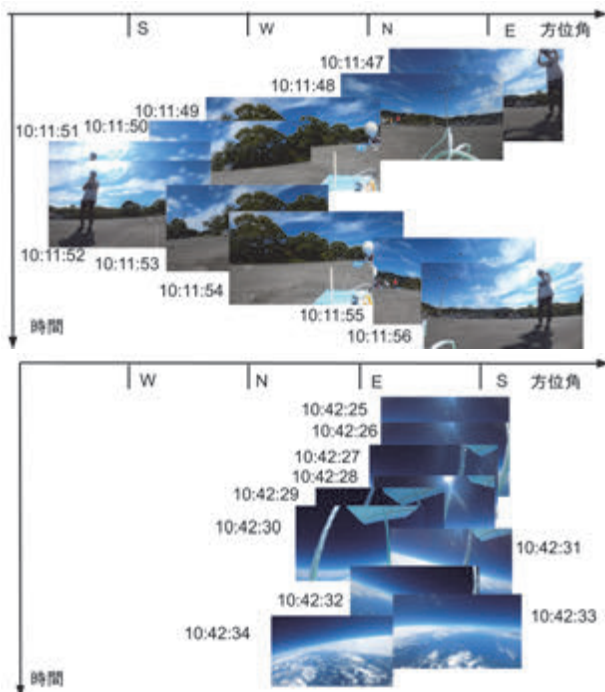


図 14 地上静止時の上部カメラによる撮像画像

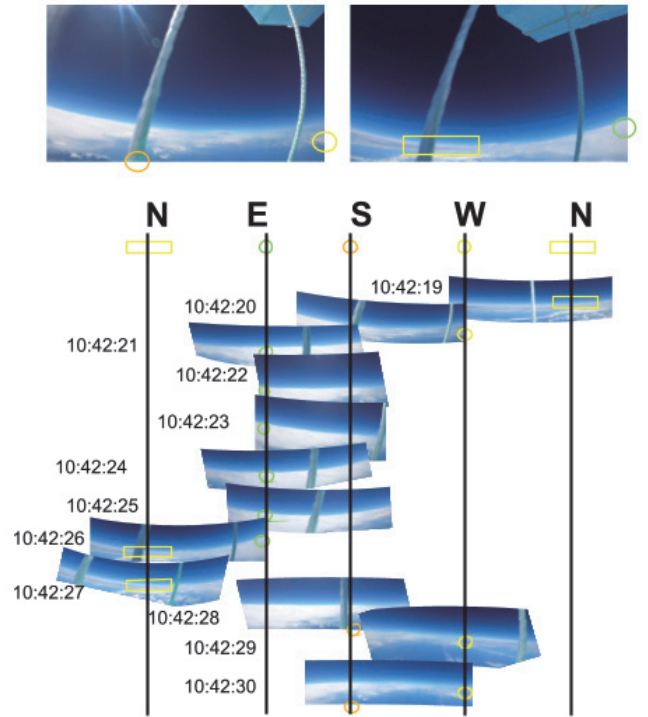


図 15 上空での上部カメラによる撮像画像：
(上) 画像例と (下) 水平線切り抜き画像の時系列変化

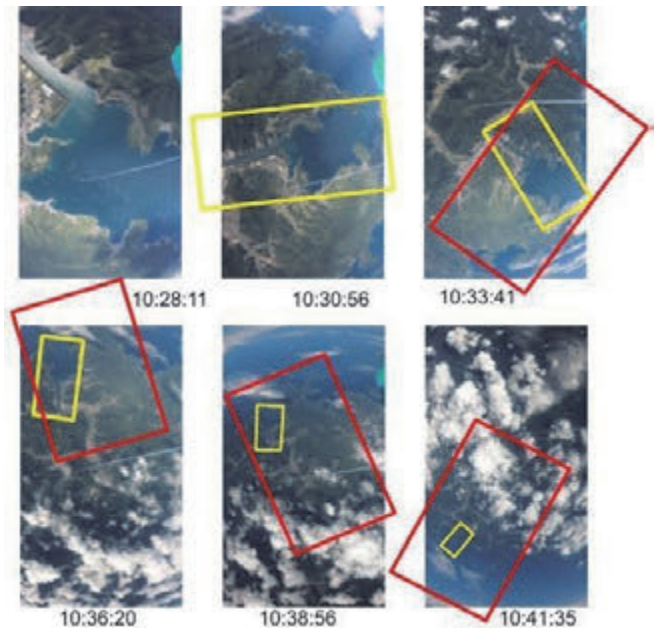


図 16 側部カメラによる高度 1~6 km 付近の画像：
(上) 1~3 km、(下) 4~6 km



図 17 地上静止時の側部カメラによる撮像画像

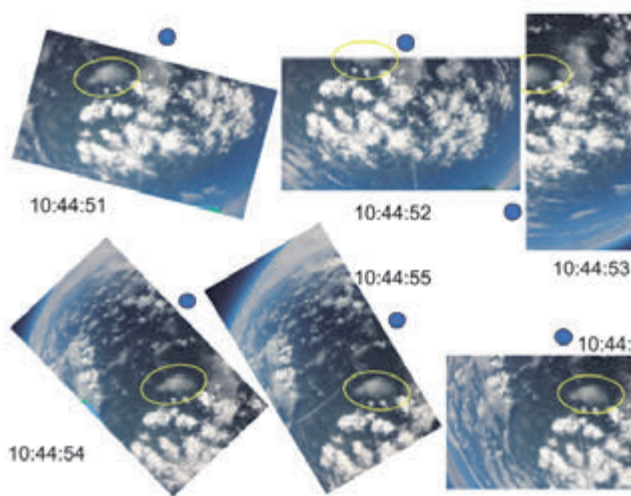


図 18 上空での側部カメラによる撮像画像

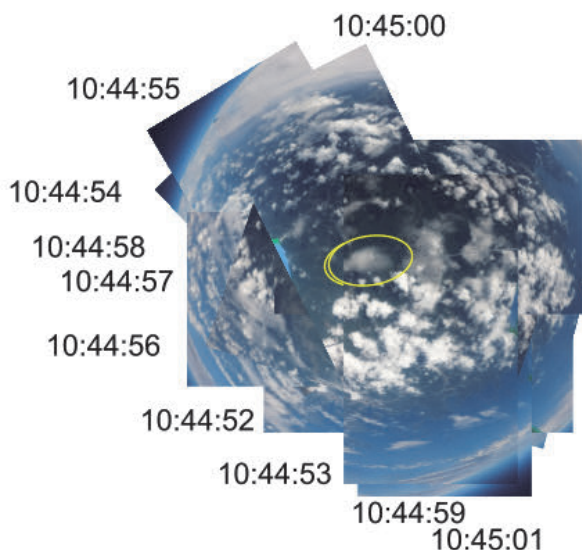


図 19 上空での側部カメラによる 10 秒間の合成画像

3.5. GoPro 停止と温度に関する考察

今回の実験では、上部カメラは 10 時 42 分 37 秒まで、側部カメラは 10 時 43 分 37 秒まで動作していた。GoPro カメラに貼り付けていた温度センサデータを取得できなかったため、停止した時刻の GoPro カメラの温度は不明である。ただし、カメラ停止時刻付近では、外気温が 0~2℃、CPU 温度は 50℃程度であり、CPU 使用率は計測時間内でほぼ一定であった。GoPro カメラの動作温度範囲は 10~35℃が推奨されており、低温環境によりバッテリー等の性能が急激に低下したと考えられる。今後は、対流圏上部での -50℃の低温環境でも、GoPro カメラが停止しないように、防寒対策を検討する必要がある。図 12 から、CPU 温度や装置内部の温度は、発泡スチロールの保温効果により、外部気温が急激に下がっても比較的保たれていることを確認できた。また、GoPro カメラには、地上付近での高温対策用に、ファンを取り付けていたが、ファン付きの側部カメラの方が長く動作していた。そのため、装置内の暖気を利用することや、電熱線などのヒーターにより温めるなどの対策を検討する予定である。

4. まとめ

今回、自由気球に搭載する計測装置を開発し、2023 年 9 月 23 日に愛媛県宇和島市南レク南楽園ファミリーパーク駐車場にて自由気球実験を実施した。気球搭載装置としては、リアルタイムで上空の環境や、装置の姿勢を把握するためのセンサ部、上空の環境を把握するための撮像部からなる装置を製作した。地上からの装置監視としては、LoRa 通信によりセンサデータをリアルタイムで取得できていた。撮影部に関しては、GoPro カメラ本体にボックス内からの紐を結びつけることで、カメラの脱落を防いだ。撮像に関しては、上部カメラ、側部カメラともに 20 分間程度の画像を取得した。回収された装置は、着陸の際に、破損したと考えられる LoRa 通信機能とサーボモータ以外は正常に動作しており、放球時の梱包による安全性を確認できた。ただし、外部から力がかかる箇所の対策は必要である。

今後は、上空での継続的なデータの取得、カメラ視野角の制御、カメラの温度管理や防寒対策が必要である。センサについては、ボックス内の暖気の流用や、ヒーターなどを用いてセンサなどの温度を適切に管理することが挙げられる。カメラを発泡スチロールで覆うなど対策が必要である。

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

由気球の事前準備、装置の回収にあたり、大変感謝しております。

本研究は、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、上田真也、遠藤哲歩、鈴木秀彦、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、上田真也、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、高知工業高等専門学校学術紀要、65、29-37、2020
- 3) 須原廉、鈴木悠泰、生亀弘務、梅原伊吹、高田拓、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、東京都立産業技術高等専門学校研究紀要、17、78-86、2023