

大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発と放球実験結果：
予測経路との比較とデータ通信に関する検討

下村克樹^{*1}・坪内麟太郎^{*1}・山田磨耶^{*1}・上田真也^{*2}・高田 拓^{*3}

**Development and Experimentation of Balloon-borne Observation Device for Atmospheric
Observations: Consideration of Predicted Orbit Comparison and Data Transmission**

Katsuki SHIMOMURA, Rintaro TSUBOUCHI, Maya YAMADA,
Shinya UETA, and Taku TAKADA

Summary

A balloon-borne observation device was developed for weather observation in atmospheric layers such as the troposphere and the stratosphere. The device, which includes two web cameras and several sensors such as GPS, barometer, temperature, humidity, acceleration, rate-gyro, and magnetic field sensors, was designed to send all the data during the balloon flight. A free balloon experiment was executed at Geisei-mura in Kochi, on November 11, 2017, where the balloon transmitted the sensor data and camera images below an altitude of 6,000 m to the data server. The obtained data show that the balloon orbit was a little lower than and south of the predicted orbit. We discussed the possibilities and future measures for complete data acquisition.

1. 序 論

地球の大気圏は4層構造であり、地上側から順に、対流圏・成層圏・中間圏・熱圏と呼ばれている。対流圏（高度約11km以下）では、高度の上昇に伴って気温と気圧が低下する。高度10kmを超えると気温は約 -50°C を下回り、気圧は約300hPaとなる。成層圏（約11km～約50km）の下部では、高度によらず気温がほぼ一定であり、高度約20kmから約50kmでは、気温は約 -5°C まで上昇していき、気圧は約数hPaまで低下する。

成層圏などの気象観測には、気象観測用の気球が用いられる（図1参照）。ゴム気球にヘリウムなどの軽い気体を注入して放球することで、成層圏（高度約30km程度）へ向けて上昇していく。成層圏上部では、ゴム気球内のガス膨張により気球が膨張していき、臨界を超えると気球は破裂する。その後は、パラシュート降下により、海などへ着水する。特に、小型気球を利用した成層圏気球の取り組みは¹⁾、教育的な効果を期待して大学生などによって実施されており^{2,3)}、超小型人工衛星開発と絡めた啓発活動などとしても予定されている⁴⁾。一方で、成層圏気球の実験には落下地点に関する問題が存在する。飛行経路を制御できない自由気球は、広い平野を持たない国内において陸地を落下地点に設定することが難しく海に落下させることになる。そのため放球後に観測器を回収す

*1 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 5年生
*2 高知工業高等専門学校 教育研究支援センター 技術専門職員
*3 高知工業高等専門学校 ソーシャルデザイン工学科 准教授

ることは難しく、上空からのデータ送信によるデータ回収が1つの有効な手段である。

本研究室では、小型気球を用いて、コンピュータボードRaspberry Piを搭載した安価な気球搭載観測装置の開発を行ってきた。1回目の自由気球の放球実験を2014年10月4日に実施し、飛行経路の一部のデータを取得した⁵⁾。得られた知見に基づき、観測データを全て上空からのデータ通信で回収するシステムを検討し、2016年10月7日に2回目の放球実験を行った⁶⁾。高度25kmまでの観測を目指した自由気球の放球を実施し、高度約6,000mまでのセンサデータ（温度・湿度・気圧・加速度・磁束密度）、高度約5,000mまでの水平方向カメラ画像（鉛直上向きカメラ画像は、高度約1,000mまで）が得られた。しかし、一部のセンサ（GPS）の不具合や、データ取得量とデータ通信速度の見誤りから、全ての取得データを回収することができなかった。そのため、取得データ量とデータ通信量の調整、および、放球地点と飛行経路などについて検討を行ってきた。今回、新たに製作した気球搭載観測装置を用いて、2017年11月11日に自由気球の放球実験を行ったので、その結果について報告する。

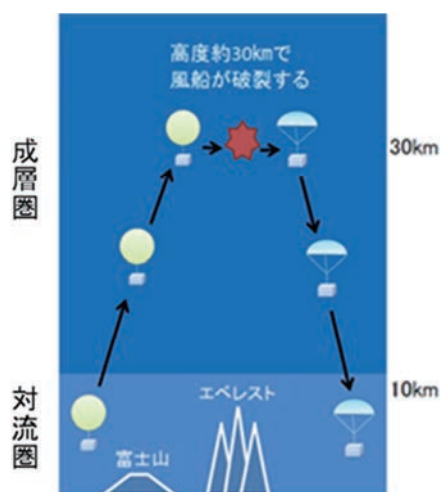


図1 自由気球実験の概要

2. 気球搭載観測装置の構成

2.1 観測装置の概要

今回開発した観測装置全体の外観を、図2（上）に示す。800gのゴム気球の口にカラビナを取り付けており、そこから約10mのPPロープ（太さ3.5mm）で観測器を搭載した発砲スチロール製のボックスに繋がっている。気球側のカラビナには、降下時に利用するパラシュートの紐（約1.0m）を取り付けており、パラシュートは上昇時に広がらないように、ケント紙で作成した円環に軽く差し込んでいる。図2（左下）に示すように、ボックス内の観測器は、コンピュータボード（Raspberry Pi Zero W）、データ保存用のマイクロSDカード、モバイルバッテリー、センサ類、Webカメラ2台、Wi-Fi対応のルータで構成されている。観測器の高度や位置、気温や気圧などの状態量、観測器の姿勢系データを得られるように、GPS、気圧、温湿度、高精度温度（ボックス内部と外部に1個ずつ搭載）、9軸センサ（3軸の加速度、地磁気、角速度センサを内蔵したモジュール）を搭載した。また、ボックス外部の様子を撮影するために、Webカメラを鉛直上向きと水平方向に1個ずつ配置した。コンピュータボードに内蔵されたWi-Fi接続によりルータに接続するように設定した。

図2（右下）に観測器を搭載したボックスの外観を示す。断熱性や耐衝撃性が高く、着水時に海に浮くように、発砲スチロール製のものを用いている。2つのWebカメラ、GPSセンサと温度セン

サをボックスの外側に取り付けるために、穴を開けて内側からテープで固定した。各センサ類を制御するプログラミング言語はPythonを用いた。Pythonは様々な分野に特化した大規模なライブラリが充実しており、シンプルに記述できる。カメラの制御やデータ転送はシェルスクリプトによって制御した。

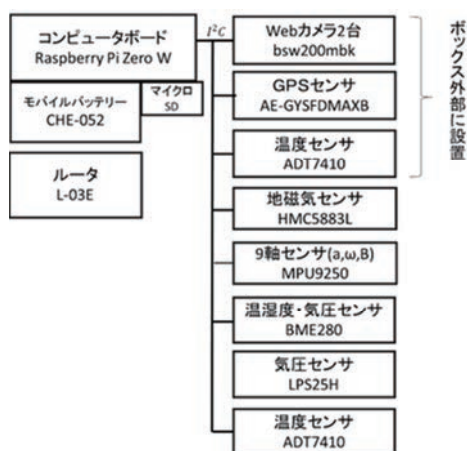


図2 観測装置全体の外観（上）、観測器の構成図（左下）、観測器ボックスの外観（右下）

2.2 観測装置の開発・打ち上げ費用

今回の装置の製作および気球の放球にかかった費用を表1にまとめた。費用の合計は約7万円程度であり、2016年の2回目の放球時の費用約8万2000円よりも価格を抑えることができた。特に、コンピュータボードをより安価で小型のRaspberry Pi Zero Wにしたこと、中古のルータの価格が下がっていることが効いている。今回、広視野を確保するため、Webカメラを比較的高価なものにしているが、一般的にはより低価格なもので十分である。また、ヘリウムガスに関しては調達の関係で7m³となっているが、実際には約4m³強の使用であり、残ったガスは、次回以降に使用可能である。

表1 気球搭載観測装置の製作および放球にかかる費用

	使用器具	価格 (税込み:円)
放球実験費用	ゴム気球 (800g)	10,300
	ヘリウムガス (7 m ³)	34,560
	圧力調整器 (レンタル代)	1,080
データ通信部	ルータ (L-03E Black)	3,000
	SIM カード (microSIM)	3,650
観測器とセンサ類	Raspberry Pi Zero W	1,296
	マイクロ SD カード (8GB)	1,489
	モバイルバッテリー (5,000 mAh)	2,280
	GPS センサ (AE-GYSFDMAXB)	2,200
	気圧センサ (LPS25H)	600
	温湿度・気圧センサ (BME280)	1,080
	高精度温度センサ (ADT7410) ×2	500×2
	9 軸センサ (a, ω, B) (MPU9250)	2,000
	地磁気センサ (HMC5883L)	600
	Web カメラ (bsw200mbk) ×2	3,190×2
	発砲スチロールボックス (6L)	509
合計		72,024

※その他として、USBアダプタ、PPロープ、カラビナ3個、結束バンドなどを使用

2.3 データ通信について

コンピュータボードに保存された観測データは、一定時間ごとにデータサーバに送信するようにした。取得データのサンプリングレートに関しては、センサデータは1.0s毎、カメラ画像は解像度352×288 pixelの画像を60s毎としている。取得したデータの送信に関しては、データ送信間隔が長すぎると、通信不可になった場合に損失するデータ量が大きくなることを考慮し、送信間隔を2分とした。観測データの通信経路に関しては、Raspberry Pi Zero WのWi-Fi接続機能を用いてルータに接続し、データサーバにデータ送信する。この通信システムは、地上付近（2回目の放球実験の結果を受けて、高度6 km程度以下を想定）でのみ通信可能となるため、気球がある高度以上になると通信できなくなる。気球破裂後、パラシュート降下で地上付近に到達すると、再度通信可能となり、データを送ってくることになっている。

データの転送にはrsyncコマンドを用いて、ミラーリングしており、差分データのみを効率的にデータ転送する。また、データ転送前にpingコマンドを実行し、接続の確認が成功した場合のみrsyncコマンドを実行することで、通信が不安定な状態でrsyncコマンドが乱打されないようにした。上空での通信状態とデータ転送状況を把握するため、pingコマンドとrsyncコマンドの実行結果のログを取得している。

3. 実験結果と観測データの解析

3.1 放球実験の結果

2017年11月11日15:00に高知県安芸郡芸西村の桜ヶ丘公園で自由気球の放球実験を行った。今回使用した気球の重量は800gであり、観測器の重量は約750gで、パラシュートや接続部などを合わせてペイロードは約830gである。気球へ封入したヘリウムの体積は約4,000L強とした。図4は事前に行った気球飛行経路のシミュレーション結果である⁷⁾。シミュレーションへの入力値としては、気球1,000g、ペイロード850g、気球の破裂高度約30km、パラシュートの降下速度は6.0m/sとした。この時、必要なヘリウムの量は約4,000Lであり、気球の平均上昇速度は約6.4m/sと計算された。気球の重量が異なっているのは、実験時に、急遽、予備の気球を使うことになったためである。予測軌道に関しては、この季節は偏西風の影響が強く、主に東向きに約2時間の飛行時間で190km程度移動し、紀伊半島南端の沖合に着水の予測となった。

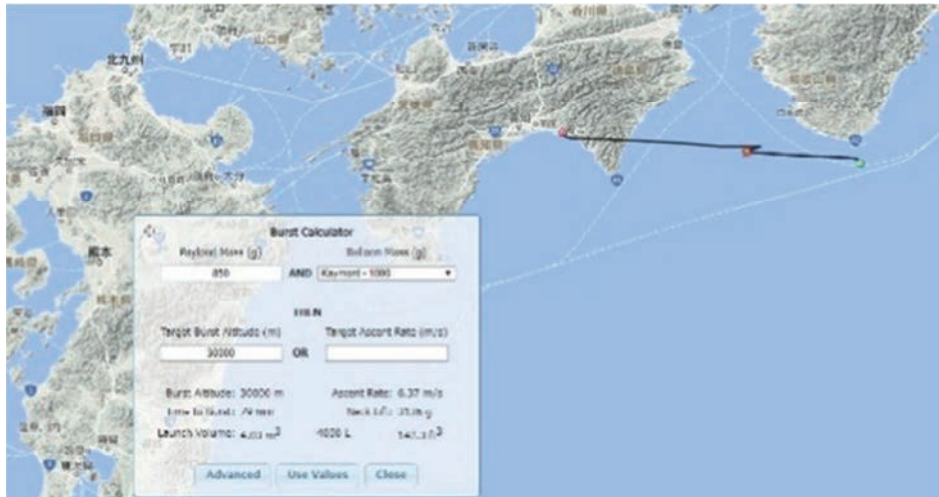


図4 気球の飛行経路シミュレーション

自由気球実験では、高度約6,000mまでのセンサ（GPS、気圧、温度、温湿度・気圧、加速度、角速度、磁気センサ）データとカメラ画像が取得できた。カメラ画像は、図5と図6に示すように、鉛直上向きと水平方向の双方の写真が得られた。特に、鉛直上向きカメラでは、天頂付近の空を常にモニターできており、高度が上がるにつれて、空の色が徐々に暗くなっていることが分かる。水平方向の写真に関しては、太陽光などの影響で、方位角方向による空の色の違いがあるため、厳密な比較が難しい。図6では、地上の同じ地点が画像に含まれるようにしているが、水平線からの高度が同じ付近の空を比較すると、高い高度ほど、より暗っぽくなっていることが分かる。

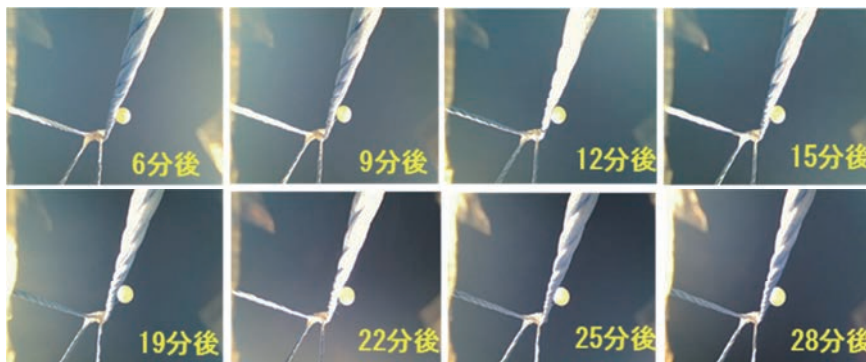


図5 鉛直上向きのカメラ画像

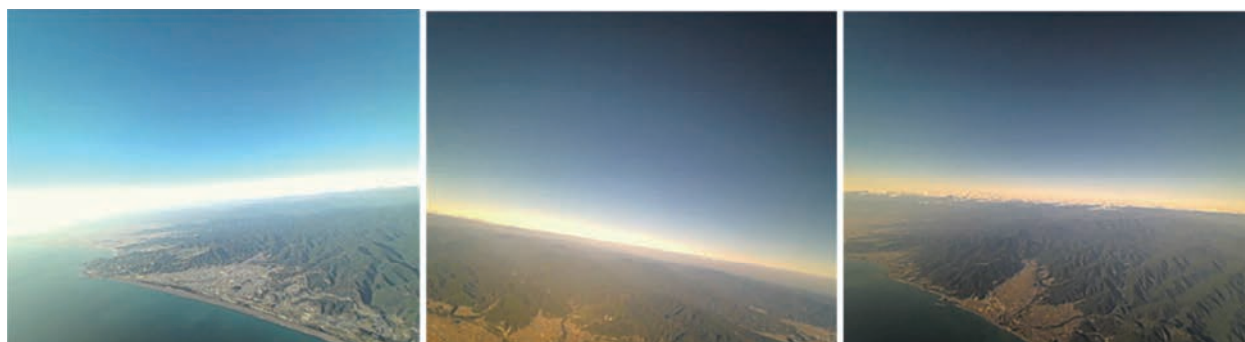


図6 水平方向のカメラ画像（左側より、時刻15：14、15：19、15：24）

3.2 センサデータの取得状況と解析結果

センサデータは、高精度温度センサ（ADT7410）のデータが高度6,000mまで取得されており、その他のセンサデータは、高度約3,000mまでと約5,500-6,000mまでのデータが得られた。図7に、気圧と気温のデータを示すが、観測器の起動後約1,600秒付近で（27分）で気圧は500hPa程度まで、外気温は約2℃まで下がっている。ボックス内の気温はボックス外の気温に比べて5℃以上温かく、コンピュータボードからの熱などにより保温されており、安定していることが分かる。図8（左）は3種類の高度（GPSの位置情報の高度、気圧・気温から推定した高度、気球シミュレータによる予測高度）を示している。本論文では、気圧から推定した高度を参照として用いている。GPS高度と気圧高度の差は高度3,000mで500m程度であるが、双方とも気球の予測高度に比べてやや低くなっている。図8（右）にはGPSセンサの緯度と経度を示しているが、予測軌道との比較に関しては、経度の差は小さく、緯度の差が少し大きく、南寄りに移動していることが分かる。水平方向の移動速度は約60km/hと推定される。予測軌道での着水地点は、紀伊半島南端の沖合であったが、実際の軌道は、シミュレーション経路より南側かつ東側に移動していると考えられるため、紀伊半島南端の通信圏外に出た可能性を否定できない。図9に、実測値の軌道をGoogle map上に表したものを示すが、シミュレーションによる予測軌道から、少し南側によった軌道となっている。

次に、観測器の姿勢系のセンサデータから、観測器の動きを把握する。図10（左上）で、上昇中の一部の区間を拡大して表示したものである。加速度のZ成分の値が概ね1.0gであり、他の成分の値は小さく、Z軸は観測器ボックスの水平面に垂直な方向であるので、観測器ボックスは概ね傾くことなく上昇していることを示している。図10（右上）で、角速度の値は、Z軸成分が支配的であり、正と負を繰り返している。図10（下）では、磁気センサから得られた水平面での方位角（厳密には、センサのX軸と北とのなす角）を示している。全体的には数秒以内の激しい変動が見られるが、例えば、450s付近では数秒程度-120°付近で停滞している。このとき、角速度は正から負へ反転しているタイミングであり、紐のねじれなどで、回転が弱まり、逆回転している可能性を示唆している。このような現象が観測装置に発生した結果、Z軸方向の加速度と方位角の急激な変動・停滞を繰り返していると考えられる。全センサの結果から、上昇中に観測装置自体は水平面内での回転を続けていたと推測できる。

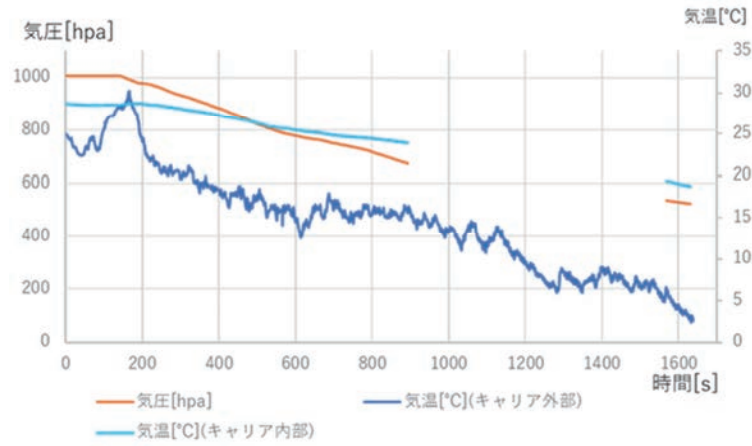


図7 気圧と気温の時間変化

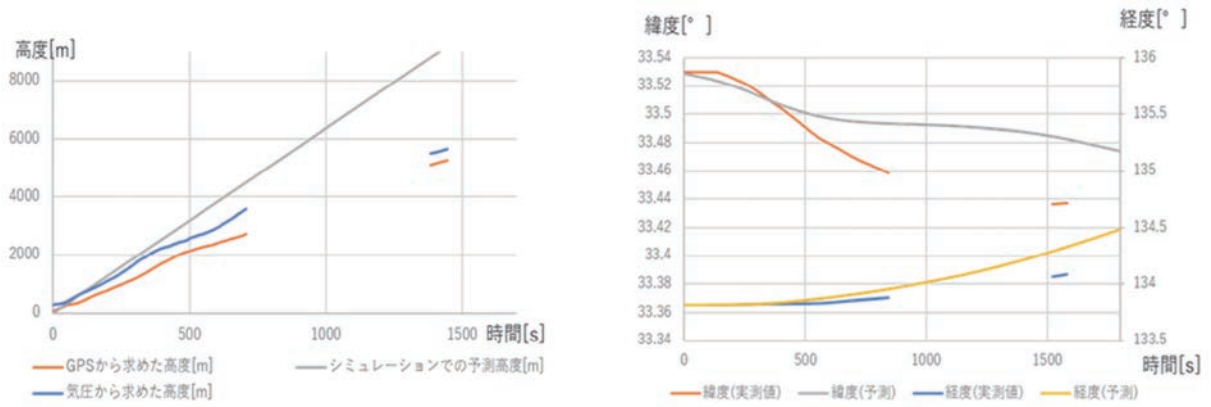


図8 予測軌道と実データの比較：(左) 高度データと (右) 緯度・経度データ

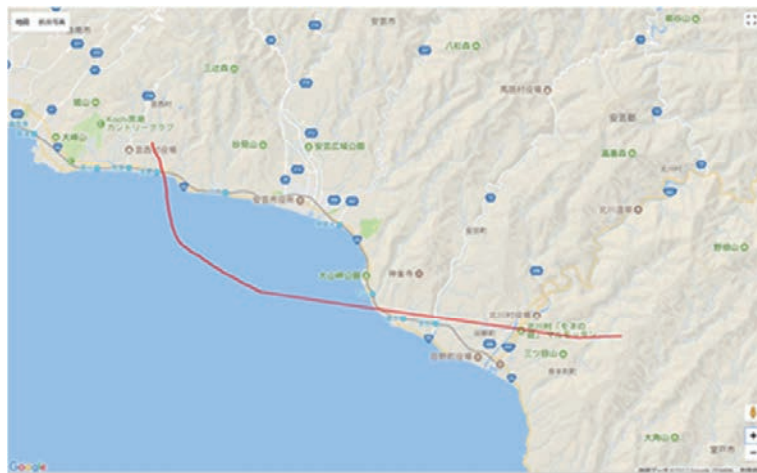


図9 Google map上での気球の軌跡 (GPSデータ)

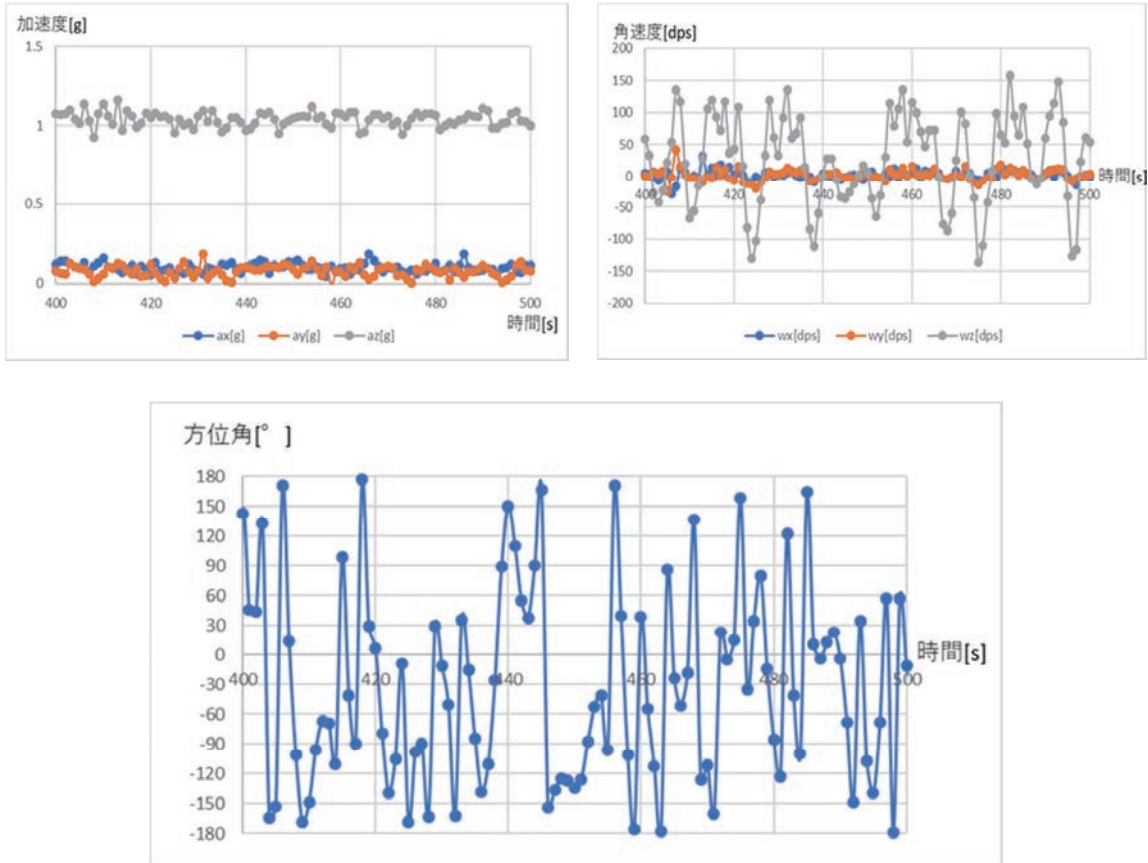


図10 姿勢系センサデータ（400～500秒区間）：
 （左上）加速度、（右上）角速度、（下）方位角（地磁気データより計算）

3.3 データ通信状況の結果

コンピュータボードで取得したデータの送信状況について述べる。rsyncのログから得られた送信データ容量、送信速度、送信時間を図11に示す。また、表2にping応答時間と、実際のデータ送信の可否をまとめた。

送信データ容量に関しては、15:08からの2回目以降の容量が330kbyte程度で安定しており、送信1回あたりの取得データが約330kbyteであることが分かる。例えば、15:28には、4回分の通信不通の後、約330kbyteの4回分である約1,300kbyteのデータ送信を行っている。ある程度のデータ不通状態があっても、問題なくデータ通信ができていることが分かる。送信速度に関しては、放球後すぐは、90kbyte/sであったが、通信期間中おおむね50-70kbyte/s程度での通信が安定的に行っていた。また、送信時間は、ミラーリングの時間間隔120sより十分小さい。また、pingの応答時間は送信時間に比べて十分小さいが、pingが不通の場合や応答時間が長い場合に、データ送信が行われないことがある。

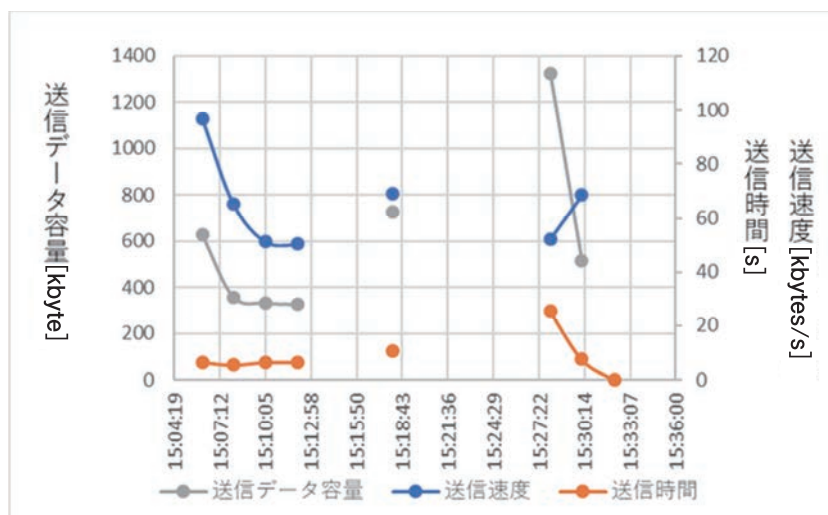


図11 データ送信について（送信データ容量、送信速度、送信時間）

4. 降下中のデータ回収に向けての検討

今回の実験では、気球上昇中のデータを高度6,000m程度まで回収できた。2016年に実施した2回目の放球時には、同様の通信システムで高度6,000m程度までのデータ回収を行うことができた。海岸線を含む陸に近い領域では、通信可能範囲が約6,000m程度と推測される。一方で、高度6,000m以降のデータを回収するため、気球が破裂した後、降下中に全データを送信する予定だったが、サーバ側では受信できていなかった。気球の着水地点は、気球経路と予測軌道があまりずれていないため、予定していた着水地点周辺は紀伊半島南端から、それほど離れていない領域であり、通信可能範囲ぎりぎりの場所だったと考えられる。高度約6,000m程度を下回って、着水するまで、十分な飛行距離と飛行時間があるため、それ以前に機器の不具合が発生した可能性も否定できない。例えば、気球破裂からパラシュートが開くまでに観測器に何らかの損傷が生じたなどである。原因を探るために真空状態での各機器の状態を確認するなどの実験を行い、確実なデータ回収に向けて検討していきたい。

表2 pingコマンドとデータ送信の結果

時間	ping応答時間[ms]	データ送信
15:06:06	101	成功
15:08:04	70.6	成功
15:10:06	70.7	成功
15:12:06	95.3	成功
15:14:06	76.7	途中まで
15:16:10	-	未実行
15:18:06	107	成功
15:20:10	-	未実行
15:22:05	87.9	-
15:24:09	-	未実行
15:26:08	544	未実行
15:28:04	117	成功
15:30:04	407	成功
15:32:06	84.2	途中まで

5. まとめ

本研究では、大気圏を観測するための安価な気球搭載観測装置を開発した。オンボードコンピュータに各種センサを取り付け、データ回収するシステムとした。装置の開発および放球実験にかかった費用は約7万円であり、2016年10月の2回目の放球実験に比べると、1万円以上安価に実

施することができた。2017年11月11日に、高度30km程度の成層圏への到達を目標に、高知県安芸郡芸西村から自由気球の放球実験を行った。

結果として、高度約6,000m上空までのセンサデータ（温度・湿度・気圧・加速度・磁場・緯度・経度・高度など）、と2方向のカメラ画像データを取得した。GPSデータと気球の飛行シミュレーション結果の比較から、実際の飛行経路は予測経路より若干南よりの軌道で、上昇速度がやや小さいことが分かった。また、姿勢系データの解析から、気球上昇時の観測器とパラシュートをつなげた紐のねじれによる回転などの状況が把握できた。通信状況に関しては、ミラーリングのログ解析から、通信不可時間帯があるにも関わらず、取得データを十分回収できていることが確認できた。気球観測器に関しては、データ取得部やデータ送信部に関して、十分な結果を残すことができた。今後はより高い確率で、成層圏から戻る際のデータ取得をするべく、検討を重ねていきたい。

謝 辞

本研究での装置開発にあたっては一般財団法人WNI気象文化創造センターからの助成金により開発することができましたので、厚く御礼申し上げます。本研究はJSPS科研費JP17K01169の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 河野紘基、枝本雅史、平塚丘将、山本真行、超小型気球をキャリアとする緩やかな着陸点誘導型パイロッドシステムの検討および開発、大気球シンポジウム：平成27年度 Balloon Symposium、isas15-sbs-025、2015
- 2) 横山佳紀、大国友篤、平尾千紗都、和歌山大学宇宙開発プロジェクト（WSP）による2012年度成層圏バルーンサット放球実験報告書、和歌山大学宇宙教育研究所紀要（Wakayama University bulletin of Institute for Education on Space）、2、55-68、2013
- 3) 島野侑加、大国友篤、横山佳紀、バルーンサット共同実験、和歌山大学宇宙教育研究所紀要（Wakayama University bulletin of Institute for Education on Space）、4、55-64、2015
- 4) 久保田晃弘、宇宙からの芸術、科学技術コミュニケーション（Japanese Journal of Science Communication）、21、111-118、2017
- 5) 益岡葵、大原万里奈、前田栄一、上田真也、高田拓、OS搭載型マイコンボードによるバルーンサットの開発：初期開発と実証試験、高知工業高等専門学校学術紀要、60、49-58、2015
- 6) 岡侑吾、大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発～取得データ解析と確実なデータ回収に向けた検討～、高知工業高等専門学校電気情報工学科卒業論文、2017年3月
- 7) Cambridge University Spaceflight Landing Predictor、CUSF、<http://predict.habhub.org/>（閲覧：2017年11月16日）

受理日：2017年11月21日