

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

高田 拓^{*1}・加藤 樹^{*2}・坂本 知也^{*2}・上田 真也^{*3}

Development of an ultra-small balloon-borne observation device: Analysis of arrival data sent from the stratosphere by LoRa communications monitor

Taku TAKADA, Tatsuki KATO, Tomoya SAKAMOTO, and Shinya UETA

Summary

We developed an ultra-small balloon observation device for atmospheric observation. To ensure reliable data collection, we used a Long Range (LoRa) communication device with a 920 MHz band to transmit balloon flight information and implemented a system that cuts the balloon loose from the observation device at any altitude. An experiment to send a free air balloon to the stratosphere was conducted from the coast of Kochi Prefecture in Japan on November 1st, 2019. We acquired continuous flight information up to an altitude of approximately 30 km from launch to landing. Using this data, we discuss the validity of the device developed and the feasibility of retrieving it by ship.

1. はじめに

地球を取り巻く薄い大気の層である大気圏は、対流圏、成層圏、中間圏、熱圏からなる。対流圏（地上～約 11 km）には、地球大気質量の約 80% が含まれている。ほぼすべての気象現象が対流圏で起こっており、高度が 100 m 上昇するごとに気温は約 0.65℃ の割合で低下する。成層圏（高度約 11 ～ 50 km）にはオゾン層が存在しており、成層圏下部（約 20 km まで）では気温が約 - 56℃ と一定である。より上層ではオゾンと紫外線の反応のため高度とともに気温が上昇していき、中間圏（約 50 ～ 80 km）と成層圏の境である成層圏界面付近では - 15℃ ～ 0℃ にまで達する。また、大気圏での気圧は、高度上昇 15 km 毎に約 10 分の 1 に低下する。

地上からの直接観測が難しい成層圏や対流圏などの気象観測には、各種装置を搭載した観測用気球が用いられる¹⁻⁷⁾。内部に軽量のガスを入れた小型のゴム気球は、

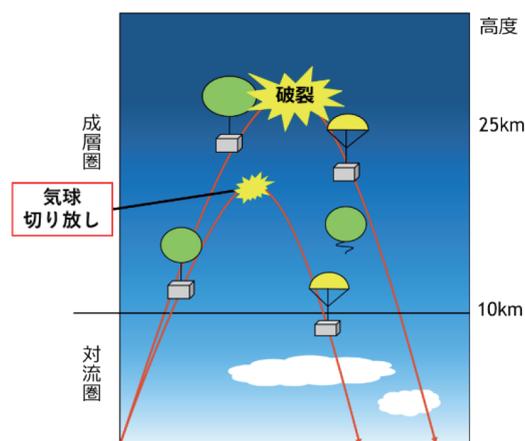


図1 自由気球のイメージ図

* 1 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
* 2 高知工業高等専門学校 電気情報工学科 5年生
* 3 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

ある一定の高度（約 20 ～ 50 km）に達すると、ゴム気球が破裂し、パラシュート降下を開始する。気球の着地・着水は人口密集地を避ける必要があるため、日本国内においては海などに着水させるのが一般的である¹⁻³⁾。着地点をコントロールするために、パラフォイルを利用した着陸誘導システムの開発や⁴⁻⁶⁾、気球破裂前に気球と観測装置の切り放しを行うものなどの開発が進められている⁷⁾。特に切り放しには、図1に示すように降下点までの水平距離を短くし、観測装置の回収を容易にする効果がある。

気球を利用する観測の1つの利点は、雲の上で撮像を行うことで、対流圏や成層圏のみならず、さらに上層の気象現象や天体の観測が可能になる点である。このような気象現象・天体の観測において、人工衛星は大気の影響がない理想的な宇宙空間で観測できる一方、莫大な費用がかかるため容易に開発し打ち上げることは難しい。高度約 10km 程度を航行する航空機に観測装置を搭載してもらうなどの方法もあるが、安全面の観点から観測装置を気軽に持ち込むことが難しくなっている。比較的安価に、雲の上に到達して、上空の対象物を撮像できる気球搭載装置は有用と考えられる。

気球の降下点での装置回収のためには、放球から着水までの観測装置の飛行情報を取得し続ける必要がある。長距離の通信手段として、920 MHz 帯の LoRa (Long Range) は、LPWA (Low Power Wide Area) の規格の一つであり、30 km 以上の直達距離の通信が確認されている⁸⁾。この通信規格は、特定小電力無線であり、低消費電力で、使用の際に無線従事者資格や無線局登録が不要である。そのため、LoRa は、IoT や防災無線としてよく利用されている^{9, 10)}。笹岡らは、地上での通信実験により、LoRa 通信機の気球搭載が十分有用であることを確認し、LoRa の少ないデータ送信量に合わせて送信する位置情報の形式などを検討した¹¹⁾。本研究では、LoRa 通信機を用いた気球搭載観測装置の開発状況と、成層圏気球のための放球実験の実施結果について報告する。

2. 気球搭載観測装置について

2.1 観測装置の構成

図2に示すように、開発した観測装置は、気球搭載用の観測装置と地上用の受信装置からなる。通信には、EASEL 社の LoRa モジュールを用い、気球搭載用を送信設定とし、地上用を受信設定とする。GPS センサモジュールは両装置に搭載し、緯度、経度、高度および時刻を取得する。気球搭載装置には、広角 Web カメラを2台配置し、温湿度・気圧センサモジュール、姿勢情報取得用の9軸センサモジュール、外気温取得用の温度センサを搭載する。ニクロム線回路は、切り放し機構を実現するための回路である。オンボードコンピュータには、Raspberry Pi Zero W を使用した。GPS センサモジュールにより、飛行中および着水後の観測装置の位置情報（緯度、経度、高度）を取得し、温湿度・気圧センサモジュールと温度センサ（外部）により、高度推定に利用する気圧と気温を取得する。

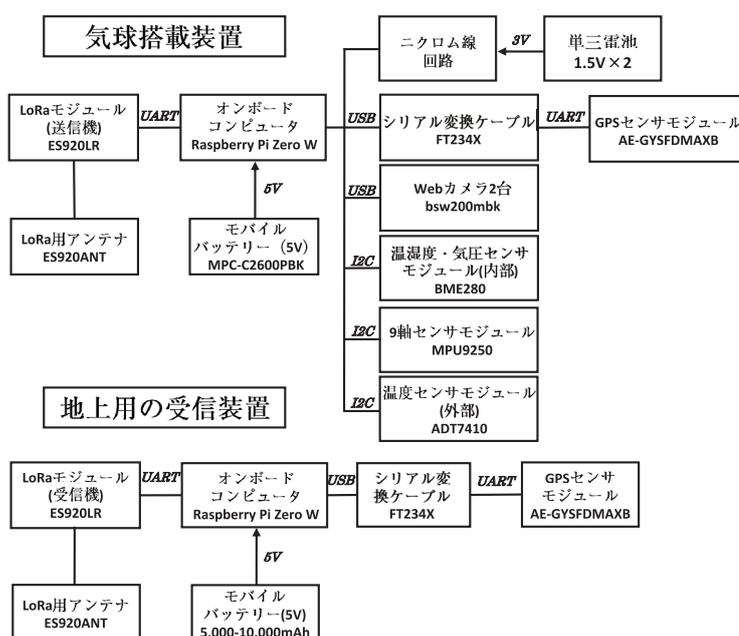


図2 観測装置の構成

センサデータは1秒毎にCSV形式で、カメラ画像は30秒毎のJPEG画像として、SDカードに保存する。

図3は、開発した気球搭載観測装置と地上用受信装置の外観図である。外気温の監視用として温度センサを装置外に、Webカメラは、雲などの監視用として上面に天頂向きと側面に水平向きに取り付ける。使用しているアンテナは、LoRa用のモノポールアンテナであり、送信機側は鉛直下向き、受信機側は鉛直上向きに配置する。

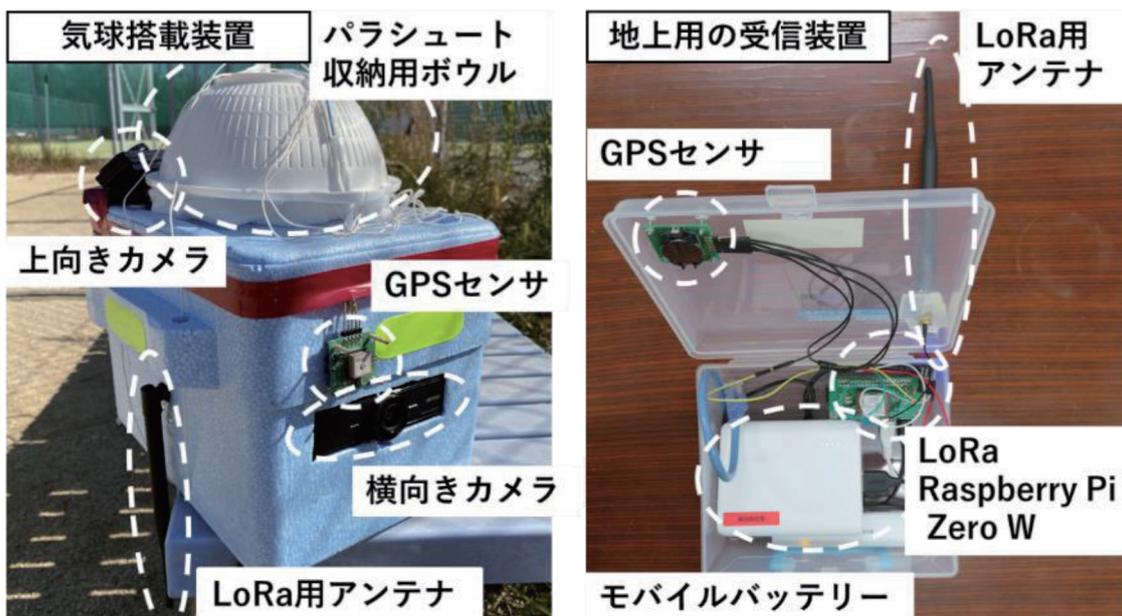


図3 観測装置の外観

2.2 気球切り放し機構

ゴム気球の上昇速度と破裂高度は装置などの総重量とヘリウム量で決まる。ただし、自然破裂による破裂高度と無関係に、切り放し等によって意図的に最高高度を選択することができれば、気球の水平飛行距離を調整しやすくなる。今回、任意の高度で観測装置と気球を切り放す機構を搭載し、放球地点から着水点までの水平距離を短くする試みを行った。また、観測装置から気球を切り放すことで、パラシュート展開をさせやすくなる。過去2回の自由放球実験では、対流圏高度8,000～9,000mでの切り放し機構の正常な動作を確認している⁷⁾。

図4に、切り放し機構の外観を示す。ナイロン線で観測装置に取り付けられた気球とパラシュート収納ボウルは、ニクロム線を加熱することでナイロン線が焼き切れ、観測装置と切り放される。ニクロム線の加熱は、オンボードコンピュータのRaspberry PiからGPIO (General-Purpose Input/Output) 制御でMOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を用いたスイッチング回路を通じて行われる。図5にニクロム線用のスイッチング回路を示す。

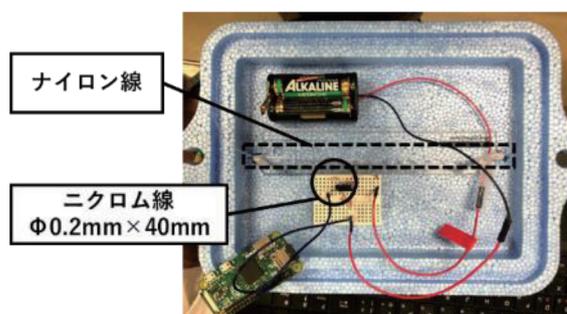


図4 切り放し機構の外観

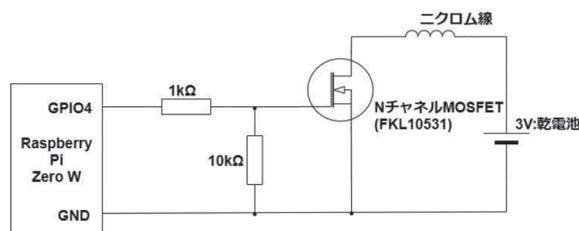


図5 ニクロム線回路

気球を切り放すタイミングは、まず気圧と気温からの推定高度を算出し、その値が切り放し高度を越えた場合に、コマンドを実行する。ただし、気圧値などの突発的なエラーで、切り放し高度を越えた値が瞬間的に出る場合に備えて、切り放し高度に達するまでの予測時間が5秒を切るまでコマンドの実行をしないことにした。予測時間の算出は、放球前のプログラム実行からの時間と高度変化を最小二乗法で直線近似して求めた高度差を、切り放し点までの上昇速度で除算する。

2.3 送受信データの検討

使用した LoRa モジュールの実用可能な伝送容量は、1回あたり最大 50 byte である。伝送容量を抑え、最大限の情報を得るために、図6に示すように、送受信するデータ形式を定めた。GPS 時刻は分と秒のみとする。高知県内での放球実験を前提として、緯度・経度は、北緯 30° 東経 130° からの差分とした。緯度・経度は小数点以下 5 桁にすることで 1 m 以内の精度としている。気圧は daPa (10 Pa) とし、気圧から推定する高度の精度は 5 m 程度となる。切り放しの実行判定のために、モード変数を 1 から 7 の整数として定義する。算出した上昇速度を利用して、上昇速度が ± 1m/s 程度の小さい状態 (地上) を 1、上昇中を 2、降下中を 3 とし、切り放しが行済みの時、各値に 4 を足す仕組みとする。傾きは、9 軸センサモジュールの 3 次元加速度から、装置の水平に対する傾き角度 (0 ~ 90°) として算出する。装置が雲を抜けたかどうかを判断するために、空の代表値である空色を確認することにした。空色については、2.4 節で詳細に述べるが、最新の天頂画像の代表的な色の RGB カラーコードとしている。

使用した LoRa モジュールは、拡散率 (SF: Spreading Factor) を 10、帯域幅 (BW: Band Width) を 125 kHz に設定し、データ送信間隔は 5 秒とした。データ送信時間は拡散率と帯域幅に依存するが、今回使用した設定値では、データ送信時間は概ね 2 秒以内となる¹²⁾。

2.4 空色判定アルゴリズム

観測装置が雲を抜けたかどうかを確認するために、空色という値を決めた。この値は、LoRa 通信で地上に常に送信するため、1色のカラーコードとする。笹岡らは、天頂画像から代表的な空の色を抽出する手法を提案している¹¹⁾。画像を H (Hue : 色相)、S (Saturation : 彩度)、V (Value : 明度) で表される色空間に変換し、それぞれの最頻値からなる代表的な値を空色の値とした。



図6 LoRa による送受信データの形式 (コンマは 1 byte で、合計 47 byte)

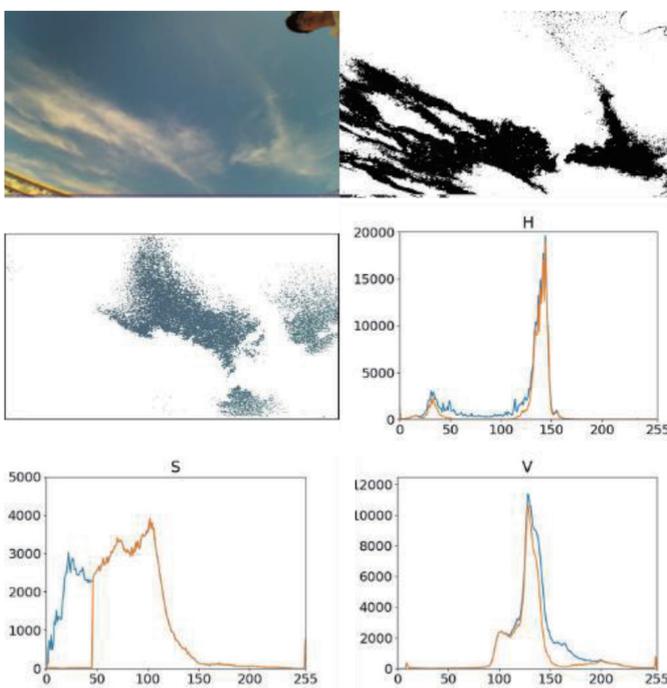


図7 空色の抽出例: (左上) 実験に使用した空の画像、(右上) 白色系のマスク画像、(左中) 抽出した空色の例、(右中) 空の画像における色相の頻度分布、(左下) 彩度の頻度分布、(右下) 明度の頻度分布 (青: マスク処理無、橙: マスク処理有)

LoRa モジュールで送受信する空色には、HSV の最頻値を RGB に変換した 16 進数のカラーコードを用いた。

今回、新たに雲やロープ、ゴム気球に見られる白色系に対してマスク処理を行う手法に改良した。図 7 に動作実験の結果を示す。彩度 0~45 かつ、明度 100~255 に指定した範囲に該当する、雲などの白色系に対して概ねマスク処理が行われていることが確認できた。抽出した空色の例として、HSV の最頻値から各々 ± 10 までの範囲を抽出したものであり、空色の代表値として妥当な色を抽出できたと考えている。

3. 成層圏気球のための放球実験

3.1 実験計画

成層圏観測を目的とした放球実験を、2019 年 11 月 1 日に高知県高岡郡中土佐町久礼の海岸から実施した。気球の切り放し高度は 18,000m とした。図 8 に、気球シミュレータ¹³⁾による気球観測装置の予測飛行経路を示す。放球地点の座標や時刻など、放球時に調整できる複数のパラメータを指定することで、気球の予測飛行経路と封入するヘリウムガス量が求まる。今回、装置重量 700 g、気球の重量 800 g、上昇速度 6.0 m/s、降下速度 8.0 m/s を入力値とした。実測値は、装置重量が 692.5g、気球の重量が 800g である。3 台の受信装置を、放球地点、高知高専屋上、着水予定点に手配した船上に各々 1 機ずつ配置した。例えば、LoRa の直達距離が 25 km 程度以上であれば、今回の予測飛行経路上の飛行情報の取得がほぼ可能である。

図 9 に、当日の気球装置の全景を示す。また、装置回収用の船は、香南市赤岡港から出港し、着水予定点に放球開始時刻頃に到着した。船に搭載されている魚群探知用レーダーを利用できるように、観測装置の下部に反射板を取り付けた¹⁴⁾。魚群探知用レーダーは 6 km 程度の範囲を探知可能であり、LoRa モジュールによる飛行情報の送信とは異なる手段で、装置回収に必要な情報を得ることができる。

3.2 実験結果

図 10 に、LoRa 受信装置で受信したデータを示す。上から高度、LoRa の受信感度を示す RSSI (Received Signal Strength Indicator)、観測装置と各受信機との直線距離、観測装置の鉛直速度の大きさ、外気温、観測装置の傾きの時間変化をそれぞれ示している。黒線の予測高度は観測装置を 18,000 m で切り放した場合の高度、赤線の予測高度は気球が自然破裂した場合の高度、青線の高度は、実測した気圧と気温、気象庁が公開している海面気圧から算出した観測装置の高度をそれぞれ表している。放球開始した 13 時 50 分から 1 時間程度で最高高度に達し、30 分程度かけ着水している。GPS データの取得は放球開始から約 22 分後に停止したため、緑線の GPS 高度は約 8,000 m まで、送信機

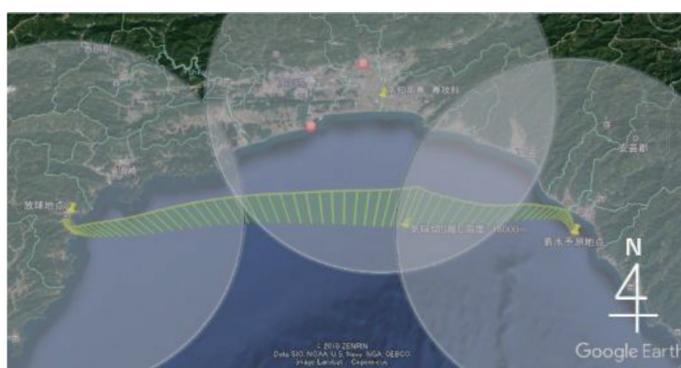


図 8 観測装置の予測飛行経路
(白円：3か所の受信装置から半径 25 km 範囲)

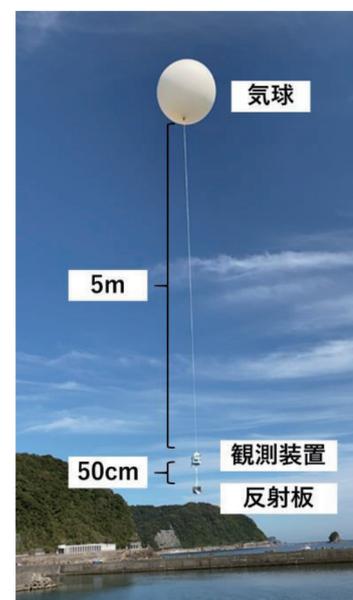


図 9 気球装置の全景

と受信機の直線距離の実測値は放球から約 22 分後までの表示となっている。

観測装置は想定の高知高専屋上で降下を開始せず、約 30,000 m まで上昇しており、切り放し機構は正常に動作しなかった。LoRa の受信感度を示す RSSI は概ね良好な値を示し、 -120 dBm 前後を平均としていた。RSSI 値は放球地点で非常に高く、直線距離に対して対数関数的に減少する。観測装置が近づくことで高知高専屋上に設置した受信機、船に設置した受信機の順に受信を開始しており、これは図 11 に示す受信機の位置関係とも合う。また、全ての受信機で最高高度（約 30,000 m）までのデータは取れており、最長で着水予定点から 58.4 km の直達距離でデータの送受信ができた。放球地点の受信装置は、高度 18,000 m を越えてから、車内に置いた状態で、車で高知高専まで移動したため、データ受信は少なくなっている。

上昇時の高度、鉛直速度の大きさは、概ね予測値と一致していることが確認できた。気温は概ね想定通りの値が得られた。装置の傾きは、100 秒の移動平均でおよそ 15 度以内の傾きであることから、観測装置の傾きが少ない安定した上昇を行っていたことが分かる。

降下時の高度、鉛直速度の大きさは、予測値との差があった。差は降下開始直後が最も大きく、降下に伴い収束していることから、パラシュートの性能は想定通りだが、完全なパラシュート展開に時間を要した可能性がある。これは、観測装置の構成上、切り放し未実行ではパラシュート収納用ボウルがパラシュートの上に置かれた状態のためと考えている。また、降下開始中は、観測装置の傾きが大きくなっており、大きく揺られながらの降下であったと推察される。図に示していないが、空色については、放球以降、同一の値を受信しており、カメラ回りの接触不良等の理由によって新規の天頂画像の撮像が行われていなかったと考えている。

気球の切り放し判定のためのモードは、予定の高知高専屋上を越える高度約 21,000 m での切り替わりを示した。しかし、切り放しコマンド実行後も観測装置は上昇を続けた。モード判定のアルゴリズムと切り放し機構の双方に問題がある可能性がある。図 11 に示すように、予測経路と実際の経路の比較から、飛行経路は概ね予測飛行経路に従っている。ただし、放球から約 22 分後の高度約 8 km 地点あたりから、GPS の緯度・経度の情報が取得できなくなったため、船による観測装置の回

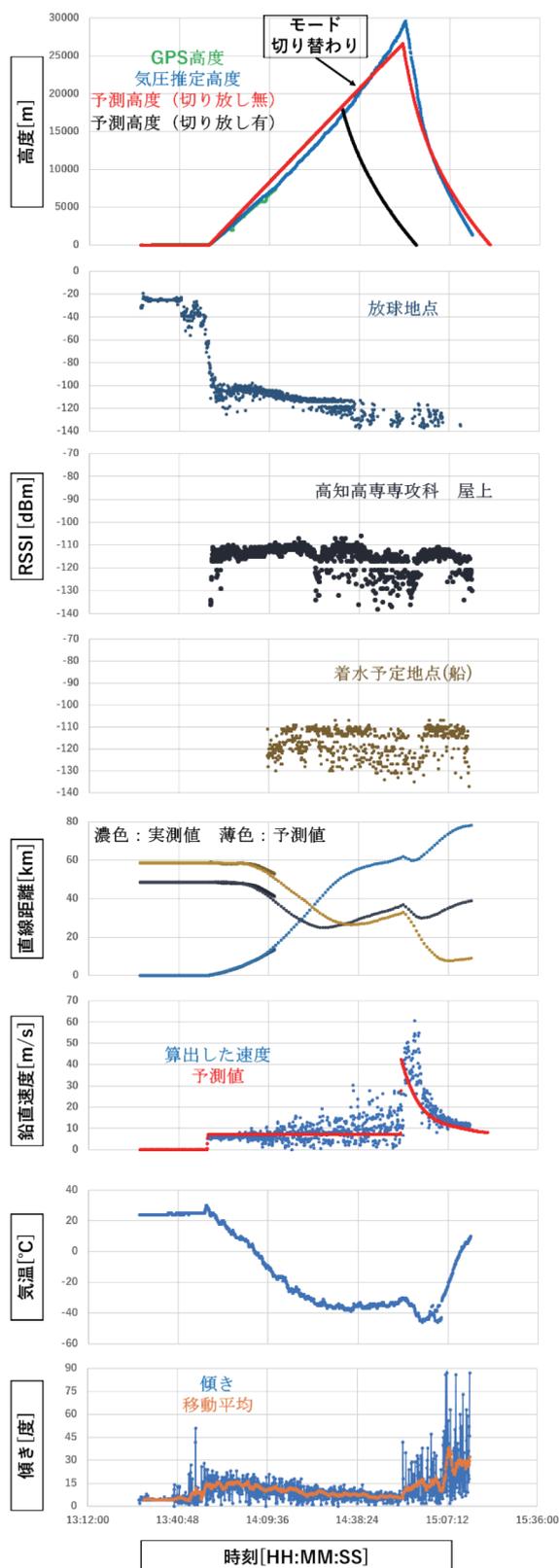


図 10 2019 年 11 月 1 日の放球中のデータ（観測装置の高度、RSSI、直線距離、鉛直速度の大きさ、気温、観測装置の傾き）

図 11 に示すように、予測経路と実際の経路の比較から、飛行経路は概ね予測飛行経路に従っている。ただし、放球から約 22 分後の高度約 8 km 地点あたりから、GPS の緯度・経度の情報が取得できなくなったため、船による観測装置の回

収はできなかった。

3.3 実験結果の考察と今後の予定

得られた結果から、気球の切り放しは行われず、気球が外部との気圧差で自然に破裂し、降下したと考えられる。高度、鉛直速度の大きさともに上昇時、降下時のどちらも予測値に概ね従っていることから、気球シミュレータ¹³⁾の予測経路の精度は高い。

図12は、気温と気圧の散布図を示しており、特に気圧の変化に伴う気温変化は、一般によく知られている変化とよく一致している。一方で、上昇時の気温変化は高温側によっており、降下時の気温変化は低温側によっている。地上付近で比べると外気温が7℃程度異なる。降下時の鉛直速度の大きさが大きいいため、温度センサが平衡温度に達していなかった可能性がある。

図13は、気圧推定高度と、取得したGPS高度の差の時間変化を示す。地上付近では高い精度で合っていた気圧推定高度とGPS高度であるが、高度の上昇にしたがって差が大きくなっており、高度8,000mで約300m程度の差となっている。一般に、GPSの高度誤差が、高度変化とともに変化する理由はないため、気圧推定高度の絶対値の精度が悪くなっていると考えている。一方で、図11で示したように、気圧推定高度はほぼ直線上に変化するため、GPS高度のばらつきが大きいことが分かる。8,000m付近でGPSデータの取得が途絶えたが、それ以前も数回にわたってGPSデータの更新が停止している。復帰した直後はより低い高度を示しており、結果として大きな差となっている。

今回の放球実験で観測装置を回収できなかった要因として、GPS情報の更新が途絶えたこと、気球の切り放し機構が正常に動作しなかったことの2つが挙げられる。今後、観測装置の確実な回収に向け、GPSの長時間動作試験を行い、GPSデータ取得の途絶の原因を探る。また、切り放し機構のアルゴリズムの見直しを検討している。空色の取得が正常に行われなかった点については、カメラの動作試験等を入念に行う予定である。

今後、観測装置へ複数の機能追加を検討している。成層圏で想定される低圧下での動作を保証された気圧センサを追加することで、気圧推定高度の絶対値の信頼度が増すことが期待できる。また、パラシュートの形状を任意に変更することで降下速度を調整可能にするパラシュート巻取り機構の開発を検討している。降下速度を任意に変更できるようになれば、降下位置を大まかに指定できる



図11 気球の飛行経路
(黄：予測経路、赤：実際の経路)

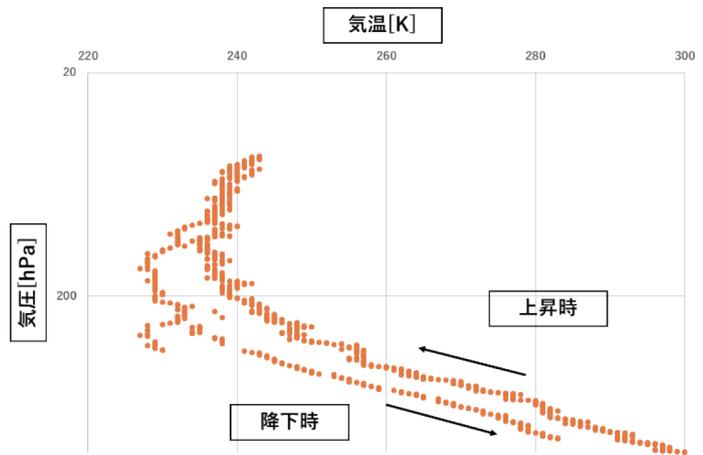


図12 気温と気圧の散布図

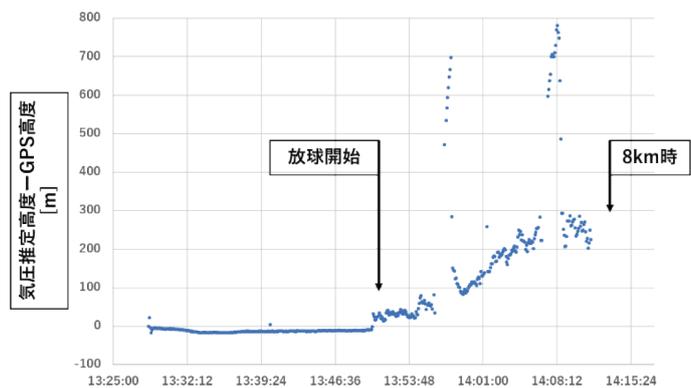


図13 気圧推定高度とGPS高度の差の時間変化

ため、観測装置の回収が容易になると考えている。今後、確実な観測装置の回収と空色の取得に向けて適切な動作試験を行い、追加機能の検討を行った後に、放球実験の実施を検討している。

4. まとめ

今回、LoRa 通信機を用いた超小型気球搭載観測装置の開発を行い、成層圏までの各種センサデータの取得、観測装置の回収を目的とした自由気球の放球実験を行った。観測装置回収のために、気球と観測装置を任意の高度で切り放す機構を開発し、伝送容量が少ない LoRa 通信の送受信データ形式を検討した。また、観測装置が雲の上に到達したかどうかを確認するため、画像処理による空色判定アルゴリズムを改良した。

2019 年 11 月 1 日に実施した放球実験では、3 機の地上用受信装置を異なる 3 地点に配置することで、観測装置の放球から高度約 30 km を経て、着水直前までのセンサデータを取得することができ、予測飛行経路との比較などを行った。取得したデータから、気球の飛行経路は気球シミュレータの予測飛行経路とよく合っていること、パラシュートの構成にも問題がないこと、LoRa 通信の直達距離が 58 km 程度でのデータ送受信をしたことなどを確認した。

謝 辞

機器開発に関して、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) 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、2、pp.55-68、2013
- 2) 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、4、pp.55-64、2015
- 3) 尾久土正己、佐藤奈穂子、吉住千亜紀、秋山演亮、藤垣元治、曾我真人、石塚互、富田晃彦、中串孝志、荻原文恵、Only one を創る：和歌山大学オンリー・ワン創成プロジェクト報告書 2011、pp.5-20、2011
- 4) 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ードシステムの検討および開発、平成 27 年度大気球シンポジウム、isas15-sbs-025、2015
- 5) 平塚丘将、河野紘基、山本真行、超小型気球の回収に最適化された制御降下式パイロードシステムの開発と飛行試験結果の評価、宇宙航空研究開発機構研究開発報告：大気球研究報告、JAXA-RR-16-008、pp.81-100、2017
- 6) 平塚丘将、河野紘基、山本真行、超小型気球のための準着陸誘導型パイロードシステムの開発と検討、平成 29 年度大気球シンポジウム、isas17-sbs-019、2017
- 7) 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
- 8) AmbientData Inc.、<https://ambidata.io/examples/lora/> (閲覧：2019 年 11 月 18 日)

- 9) 鈴木一哉、森本昌治、岩井孝法、IoT 技術の最新動向、電子通信情報学会通信ソサイエティマガジン、45、pp.12-20、2018
- 10) 秋山演亮、山口耕司、吉村元吾、菅原寛明、田中健貴、IoT 機器（衛星）を利用した低コストな現地観測情報収集システムに関する実証試験、平成 30 年度砂防学会研究発表会概要集、V-094、2018
- 11) 笹岡由唯、上園波輝、上田真也、高田拓、大気圏観測のための気球搭載観測装置の開発：LoRa 通信実験と気球観測計画、高知工業高等専門学校学術紀要、64、pp.19-27、2019
- 12) 株式会社 EASEL、各種資料ダウンロードページ、<http://easel5.com/download/>（閲覧：2019 年 11 月 18 日）
- 13) Cambridge University Spaceflight Landing Predictor、CUSF、<http://predict.habhub.org/>（閲覧：2019 年 11 月 18 日）
- 14) 第四管区海上保安本部、改訂版 空き缶レーダー反射器「みえな ア缶」のつくり方、https://www.kaiho.mlit.go.jp/04kanku/safety/mienaakan_02.pdf（閲覧：2019 年 11 月 18 日）

受理日：2019 年 11 月 18 日

