

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

加藤樹、高田拓、坂本知也、上田真也（高知工業高等専門学校）

遠藤哲歩、鈴木秀彦（明治大学）

Development of ultra-small balloons-borne observation device and its initial experimental results for observing noctilucent clouds

Tatsuki Kato, Taku Takada, Tomoya Sakamoto, Shinya Ueta (National Institute of Technology, Kochi College), Akiho Endo, Hidehiko Suzuki (Meiji University)

1. 目的および背景

地球の中間圏上部（高度約 80~90 km）に発生する夜光雲は、太陽が地平線付近にある時に太陽光線を反射し、銀白色に輝く。通常、夏季に極域で見られるが、近年ではフランスやアメリカといった中緯度地域でも観測されており、2015年6月には北海道の複数の施設・天文台で観測された。しかし、地上観測では、雨天時や曇りの場合に、夜光雲の撮像ができないため、夜光雲の発生頻度や移動の様子を定量的に把握できていない^[1]。

一般に、地上観測が難しい対流圏（～11 km）の中・上部や成層圏（11～50 km）の気象観測には、超小型気球を利用した観測装置が用いられる^[2-4]。ゴム気球にヘリウムガスを封入して放球した場合、ある一定の高度（20～30 km 程度）に達すると、気球内外の気圧差で気球が破裂してパラシュート降下を始める。このとき、気球の水平移動距離が大きくなることから、回収のための移動距離が大きくなる。また、降下点予測の誤差が大きくなり、観測装置の回収率が下がる。ただし、安価で回収率の良い超小型気球観測が実現すれば、様々な用途に利用できる可能性があると考えられる。

20～30 km 程度におよぶ長距離の通信手段には様々なものがあるが、920 MHz 帯の LoRa (Long Range) は、LPWA (Low Power, Wide Area) として利用される通信規格の一つであり、近年 IoT や防災無線分野で注目されている^[5]。この規格は免許が不要な特定小電力無線で、低消費電力かつ長距離のデータ通信が可能であるという特長がある。

本研究では、中間圏の夜光雲観測を目的とした気球観測装置の開発を目指しながら、より多くの目的で利用できる、安価で回収率の高い汎用的な超小型気球観測装置の開発を目指している。具体的な特長としては、①LoRa 通信を用いた飛行経路情報の把握、②成層圏下部での気球切り放しによる水平距離の圧縮と回収率の向上、である。

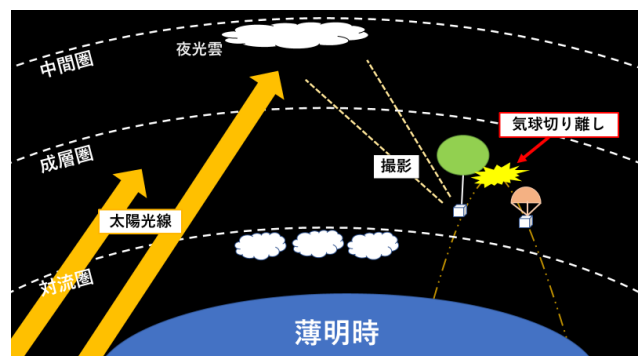


図1. 気球を利用した夜光雲観測

2. 気球搭載観測装置の概要

2.1 気球を利用した夜光雲観測

夜光雲は、夏至付近の朝夕に、比較的高緯度の地域で観測されるため、2020～2021年度の夏至頃に、北海道でキャンペーン観測を行う計画である。図1に示すように、気象状況などの理由で地上からの夜光雲撮像が難しい日に、超小型気球観測装置を放球し、対流圏上部から成層圏下部あたりで撮像観測を行う。高画質な夜光雲の画像を回収するため、観測装置の回収・再利用が必要である。2週間程度の連続観測を行うことで、夜光雲の定量的な特徴を理解することを目指す。

2.2 観測装置の構成

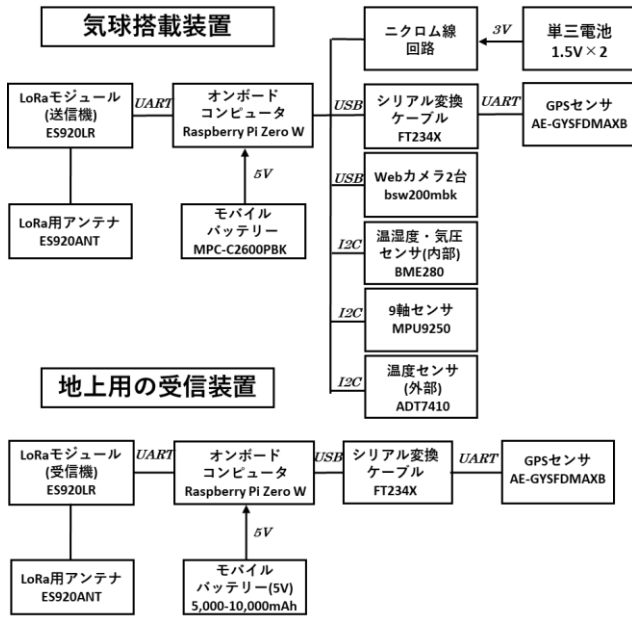


図 2. 観測装置の構成図

図 2 に観測装置の構成図を示す。気球搭載装置と地上用の受信装置があり、通信には EASEL 社の LoRa モジュールを使用している。位置情報取得用の GPS モジュールは、気球と地上用の両方の装置に搭載しており、送信側装置には高度推定のための温度センサと温湿度・気圧センサモジュール、装置の姿勢情報取得のための 9 軸センサモジュールを搭載している。2 台の広角 Web カメラはそれぞれ上向きと横向きである。



図 3. 気球搭載観測装置の外観

2.3 LoRa で送受信するデータ形式

本実験では、LoRa モジュールの帯域幅を 125 kHz、拡散率 (Spreading Factor) を 10 とし、データ送信を 5 秒毎に行う。LoRa モジュールでは、実用可能な伝送容量は 1 回あたり 50 byte 程度であり、観測装置の回収および装置の状況把握に必要なデータ形式を図 4 のように定めた⁶⁾。

GPS の緯度・経度は、小数点以下 5 桁まで (1 m 程度の精度) とした。装置の傾きは、9 軸センサモジュールの加速度値から装置の水平面に対する傾き角として算出した。また、雲の通過などを検知するため、上向きカメラの画像から、上空の代表的な値 (空色) を取り出すことにした。最新の天頂画像から白色系を取り除いたあと、HSV 値の最頻値を割り出し、16 進数のカラーコードに変換する。モードは、装置の状態 (地上、上昇中、降下中) および切り放し機構の実施状況を表す 1 桁整数値とした。

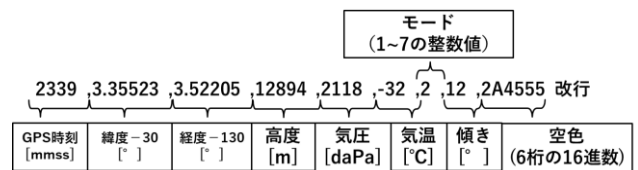


図 4. LoRa 用の送信データ形式 (49 byte)

2.4 気球切り放し機構の構成

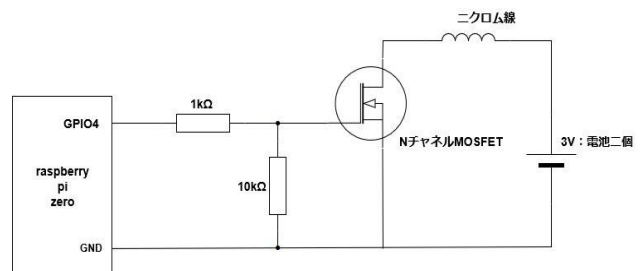
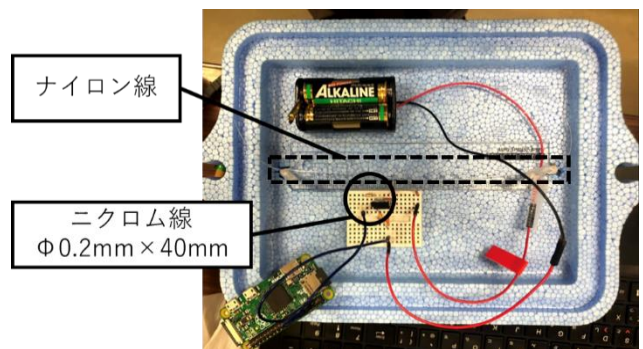


図 5. 気球切り放し機構の (上) 外観と (下) ニクロム線回路図

放球後に、装置が降下点に到達するまでの水平距離を短くするため、任意の高さで観測装置から気球を切り放す機構を開発した。図5上に、切り放し機構の外観を示す。ニクロム線を加熱することでナイロン線を焼き切り、ナイロン線と紐で気球に取り付けられた観測装置を切り放し、収納ボウルからパラシュートが外れて展開する。ニクロム線の加熱は、Raspberry Pi から GPIO 制御で MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を用いたスイッチング回路 (図5下) により行われる。

3. 気球切り放し機構の動作確認実験

気球切り放し機構の動作確認と飛行経路の状況確認のため、高知県沿岸部にて2回の放球実験を実施した。放球地点は須崎市野見湖ばかり公園とし、切り放し高度は、2019年9月29日の実験で8,000 m、10月28日の実験で9,000 mとした。装置回収のため、着水予定点に受信装置を載せた船を手配した。ただし、1回目の放球時は、台風通過直後のため船の手配ができなかった。

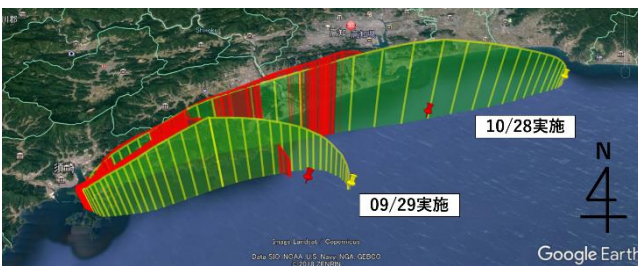


図6. 気球の飛行経路 (黄：予測、赤：実経路)

図6は、気球の予測飛行経路と実際の飛行経路を示す。予測経路の算出には、ケンブリッジ大学の気球シミュレータ^[7]を使用した。放球地点と時刻、観測装置の重量、上昇・降下速度を入力することで、気球の飛行経路、ヘリウム量を算出できる。受信装置は放球地点、高知高専屋上、着水予定点へ向かう船上に1機ずつ設置した。

2回の実験とも、想定した高度での気球切り放しが行われ、放球時から比較的低い高度に戻ってくるまでのセンサーデータを受信できた。例として、10月28日に実施した実験データを図7に示す。

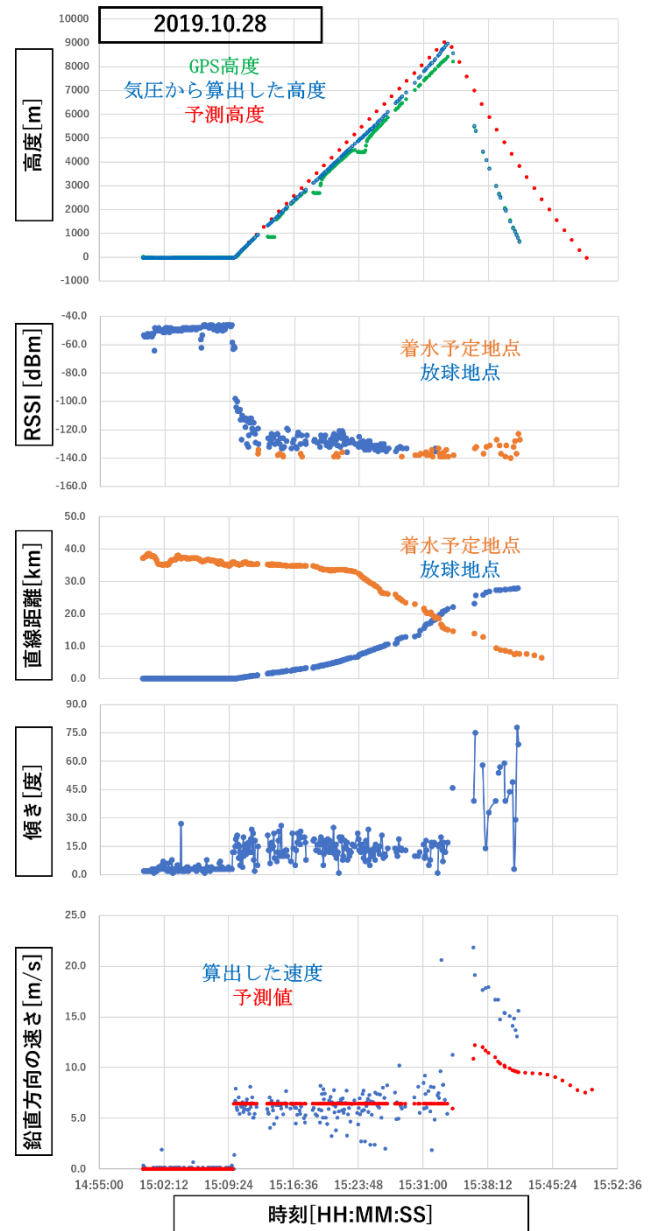


図7. 2019年10月28日の放球実験データ (装置の高度、LoRa の RSSI、装置との直線距離、装置の傾き、装置の鉛直方向の速さ)

LoRa 通信では、直線距離で最大約 34.5 km 地点からの送受信を確認でき、約 10 km までは連続受信を確認した。受信感度を示す RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値は、距離に対して対数関数的に減少する。

気球の上昇時は、概ね予測経路に従っているが、降下する速さは約 16.9 m/s と、予測値の約 10.1 m/s よ

り速かった。そのため、着水予定地点より、かなり手前に降下し、海流で西へ流されたこともあり、観測装置の回収には至らなかった。1回目の実験については、降下する速さは約 8.7 m/s で予測値の約 6.6 m/s より大きかったが、パラシュートの降下速度としては妥当な範囲であった。2回目の実験では、LoRa の RSSI は、切り放し後に低くなり、想定より早く通信が途切れた。機体の傾きは、上昇時には 5~27° のほぼ水平な状態から、降下時には 30~75° の非常に傾いた状態となり、降下速度が非常に速いことを考えると、パラシュートが完全に展開されなかったと考えられる。

4. 今後の検討事項

今後、観測装置を確実に回収するには、着水直前までのデータを連続的に受信する必要がある。パラシュートの設置位置や形状といった構成を見直した後、新たにパラシュートのモータによる巻取り機構を開発する予定である。形状を変化させることで観測装置の降下速度を選択できるようにする。

他の追加機能として、LoRa のデータ形式に、観測装置のある面が向く方位角を追加する予定である。成層圏で想定される低圧下でも動作が保証されている気圧センサの追加などを検討している。さらに、船に搭載されている魚群探知用（6 km 程度までの範囲）のレーダーで観測装置が探知されやすくするため、レーダー用反射板の取り付けを予定している。レーダーによる位置情報取得の手段が加わることで、より観測装置の回収可能性が向上すると考えられる。

表 1. 今後の検討項目など

追加・検討項目	備考
パラシュートの構成見直し	パラシュートの確実な展開
パラシュート巻取り機構の開発	降下速度を選択可能にする
観測装置の方位角の算出	アンテナの向きによる RSSI 変化の確認
低圧力対応の気圧センサの搭載	低圧での高精度な気圧データ取得
反射板の取り付け	船からのレーダー探知による、装置の回収可能性向上

5. まとめ

今回、夜光雲観測を目的とした超小型気球搭載観測装置の開発に合わせて、2回の放球実験を行った。実験の結果、着水前までの妥当なセンサデータを回収でき、上昇時には実際の飛行経路が概ね予測経路に従っていることを確認できた。今後、追加機能を実装し、放球実験を行う予定である。

謝辞

国立研究開発法人情報通信研究機構の村田健史研究統括には、LoRa 通信機を用いた実験に関するご助言を頂きましたので、感謝致します。本研究は JSPS 科研費 JP19H01956 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Suzuki, H., et al., First imaging and identification of a noctilucent cloud from multiple sites in Hokkaido (43.2-44.4° N), Japan, *Earth Planets and Space*, 68(1), 182, 2016
- [2] 尾久土正己ら、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、5-20、2011
- [3] 島野侑加ら、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、55-64、2015
- [4] 平塚丘将ら、超小型気球のための準着陸誘導型ペ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
- [5] 秋山演亮ら、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
- [6] 笹岡由唯ら、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、19-27、2019
- [7] Cambridge University Spaceflight Landing Predictor, <http://predict.habhub.org/>, (閲覧：2019 年 10 月 28 日)