

超小型係留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

田邊茉佑、高田拓、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 tethered-balloon system and its initial experiments for observing noctilucent clouds

Mayu Tanabe, Taku Takada, Shinya Ueta (NIT, Kochi College),
Akiho Endo, Hidehiko Suzuki (Meiji University)

1. はじめに

夜光雲は、中間圏（高度 50～90 km）に発生する氷粒の雲であり、太陽が地平線付近にある時間帯に太陽光線を反射し銀白色に輝く現象である^[1]。通常は極域で観測されるが、近年、中緯度地域で夏季の明け方と夕方に観測されることがある。日本では、2015年6月や2020年6月に北海道で観測された^[2]。しかしながら、地上からの光学観測では、雨天時や曇天時などの場合に夜行雲の観測を行うことができず、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。

これまで、夜光雲を継続的に観測することを目的に、超小型気球観測装置を開発し、実証実験を行ってきた。昨年度までは、主に自由気球用の観測装置を開発し、自由気球実験を実施してきた^[3]。自由気球実験では、雲がほとんどない成層圏高度まで観測装置を到達させることができるが、観測装置の着水点をあらかじめ確定させることが難しく、常に装置を回収できない可能性がある^[4]。

一方で、北海道での夜光雲光学観測で問題となる雲は、北側の空に薄く比較的広い範囲にかかるものであり、雲の高度がそこまで高くないものが多い。そこで、新たな観測手段として、長距離の係留気球を用いた夜光雲観測について検討する。係留気球実験は自由気球実験と比較すると確実に装置を回収できるため、安定した観測が可能である。また、長距離の航行や海上着水などに対応した構造や構成にする必要がなく、装置の軽量化が可能である。

本研究では、夜行雲の観測を目的とした、比較的

長距離の係留気球実験の検討を行った。主に、高度 2 km 程度以下の低い層に発生する雲を越えた観測を想定しており、係留索の巻取り装置の開発や長距離係留での風の影響についての検討、初期係留気球実験を行った結果を報告する。

2. 長距離係留実験と観測装置の概要

2.1 係留気球実験の概要

図 1 に、夜光雲観測を目指した気球実験の概念図を示す。1つ目としては、自由気球により成層圏高度で気球を切り放し、観測を行う。対流圏で発生する多くの種類の雲を越えて観測を行うことが可能となる。2つ目としては、係留気球により、層積雲や層雲などの高度 2 km 以下の低い層に発生する雲を越えて、観測を行う。2つの手段は、相補的であり、夜光雲が観測されうる期間の天候によって、地上観測、自由気球観測、係留気球観測を選択することを考えている。

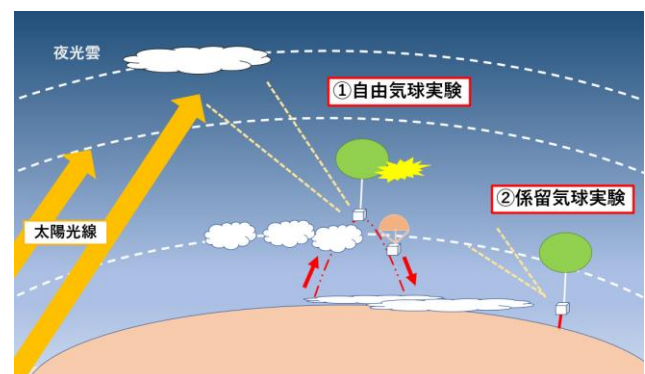


図 1 夜光雲観測のための気球観測実験の概念図

2.2 係留気球実験に有利な風向きの検討

高度 2 km 程度の係留気球では、風によって気球が東向きに大きく流される可能性がある。一般に、対流圏は 1~11 km の自由大気層と 100 m~1 km の境界（エクマン）層からなる。気圧配置にもよるが、日本上空の自由大気層では、東向きの風となることが多いため、境界層で西向きとなる対向する風向きを利用することができれば、係留気球が流される水平距離を短くできる。

高度 2 km 程度までの係留気球実験を想定し、気球シミュレータ⁴を用いて、気球に対する風の影響を調べた。2020 年 10 月下旬から 11 月上旬に、高知県沿岸部（中土佐町久礼海岸）から自由放球した場合の風向きと風向きが転換した高度を表 1 に示す。日中の複数の時刻を調べたが 1 日の中での大きな差はなかった。低高度と高高度で、対向する風が吹いている日は、時々ある。図 2 に 1 例を示すが、放球地点から西北西に流された後、高度 2.5 km 付近で徐々に進路が変わり、北向きから東向きへ進行している。ただし、風向きの転換高度は高度 2 km 程度以上であることが多く、対向する風を利用して水平距離を圧縮できる機会はそれほど多くないことが分かった。ただし、対向する風の転換高度は地勢依存すると考えられるため、係留気球実験の候補地ごとに検討する必要がある。

表 1 風向きと風向きの転換高度

日時	10/21	10/22	10/23	10/24	10/25	10/30	10/31	11/1	11/2	11/3	11/4	11/5
風向き	西→東	東	東	東	東	南→東	西→東	西→東	北→東	東	東	東
転換高度	約 2.5 km	—	—	—	—	約 1.8 km	約 4.0 km	約 2.0 km	約 1.2 km	—	—	—



図 2 対向する風向きの例（2020 年 10 月 21 日）

2.3 観測装置の概要

係留気球観測では、ガスを封入した気球、観測装置、係留索、係留索の巻取り装置が必要となる。今回の実験では、初期実験のため、自由気球用に開発した観測装置を基本とした装置（重量 578 g）、およびゴム気球（重量 700 g に 4,500 m³ の He 封入）を利用した。観測装置は将来的な軽量化のために、後述する設計・開発を予定している。今回、高度 2 km 程度まで到達させることを踏まえて、一般的な係留用気球ではなく、気象観測用のゴム気球を利用することとした。図 3 に係留用の巻取り装置の外観図を示す。係留索には釣り糸（9 編 PE20 号、1,000 m）を使用し、電気ドリル（8 N・m あるいは 140 N・m）により、軸棒を回転させ巻取りを行う。糸を誘導するためのガイダンスを取り付けてある。



図 3 巻取り装置の外観図

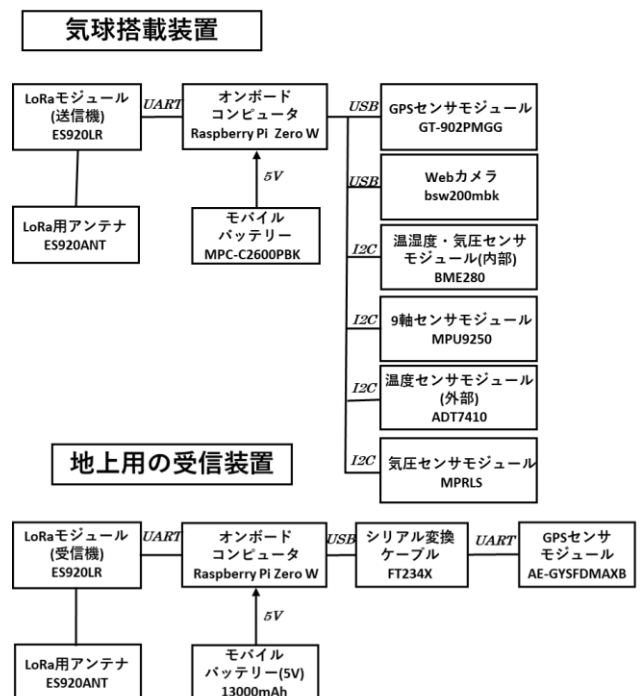


図 4 実験で利用した係留気球用装置の構成図

図 4 に観測装置の構成図を示す。通信には 920 MHz 帯の LoRa (Long Range) モジュールを使用し、気球搭載装置には、GPS センサモジュール、高度推

定のための温湿度・気圧センサモジュールと温度センサモジュール, 装置の姿勢情報取得のための 9 軸センサモジュール, 天頂向きの USB カメラを搭載した。

3. 係留気球実験の初期結果

2020 年 11 月 3 日に久礼海岸にて係留気球実験を実施した。図 5 に係留気球の予測飛行経路を示すが, 高度 2 km 程度までの風向きは南東向きであった。

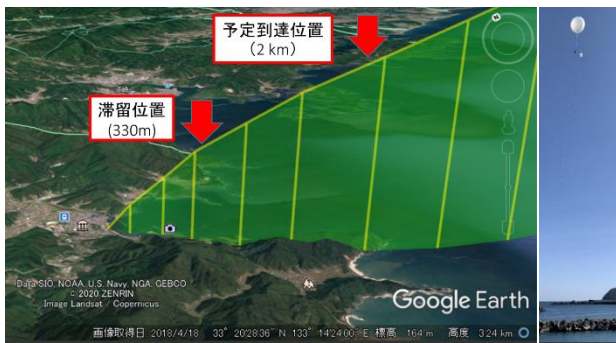


図 5 自由気球の予測飛行経路 (左: 予定到達位置と実際の滞留位置) と係留気球実験時の様子 (右)

図 6 に係留気球実験で取得したデータを示す。係留索を, 断続的に解放しながら最高高度付近に達し, その後, 断続的に巻取りを続けた。最高到達高度は 330 m 程度であったが, 気球の上下運動による 50~100 m 程度の高度変動が頻繁に見られた。係留気球実験のため, 装置ボックスの傾きと方位角は, 比較的安定しているが, 時折大きく揺らされ, 向きが変動している。図 7 に気球位置の緯度・経度分布を示すが, 大局的には南東向きに流されながらも, 係留中に水平位置が頻繁に変動している。今回の放球実験では, 上空の風が強く, 係留索の安全な解放が難しくなったため, 330 m 程度までで係留索の解放を断念した。また, ドリルのみによる巻取りが困難であり, 手動での巻取りを並行して実施する必要があった。

図 8 に高知高専屋上にて受信した LoRa の RSSI (Received Signal Strength Indicator) 値を示す。係留気球実験中のデータは, 放球地点の地上では全期間が, 高知高専屋上 (放球地点から 48.5 km) では, 装置高度 200 m 程度以上の場合に, データ受信を確認できた。データは 3 秒毎に送信し, 3 回分で 1 セット

のデータとなっているため, 実質 9 秒値である。

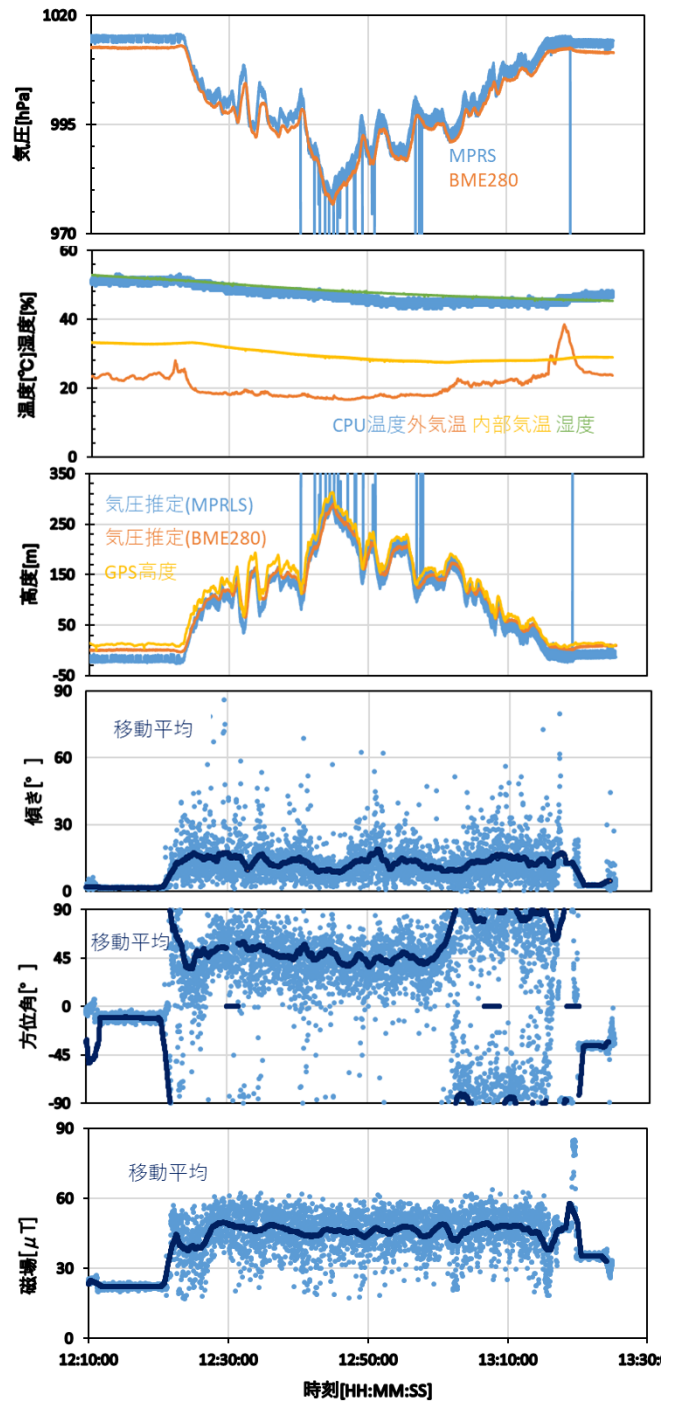


図 6 係留気球実験での装置データ (2020 年 11 月 3 日)

4. 今後の課題と検討事項

今回, 上空の風が予想以上に強く, 予定していた 2 km 高度まで気球を到達させることができなかった。係留索の解放, および巻取りの方法について, 再検討が必要であることが分かった。また, 係留気球が不可

能あるいは不向きである条件など^[6,7]について、事前に検討し、ガイドラインを策定するの必要を感じた。その対策のために、観測装置全体の軽量化を進める。実験結果と直接関係ないが、係留気球実験中の装置の傾きや方位角方向の変動があるため、これらの実験結果を考慮して、カメラの姿勢制御装置の設計・製作を進めていく。図8に示すように、コンピュータボードをArduino Nanoに変更し、搭載するセンサ類などを精査した係留気球専用の観測装置の開発を検討している。装置全体を軽量化することで、気球のサイズや封入するHeガスの容量の削減が可能となり、係留索の巻取り力の軽減へ繋がると考えている。

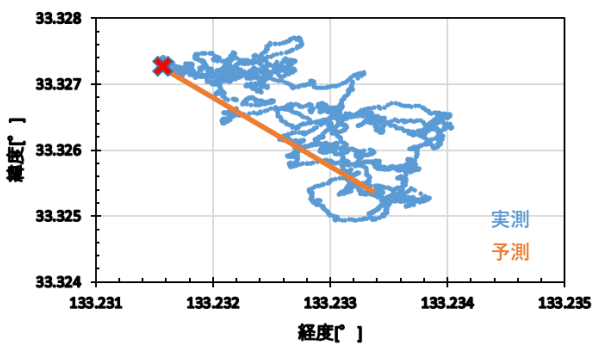


図7 気球位置の緯度・経度分布 (×は放球地点)

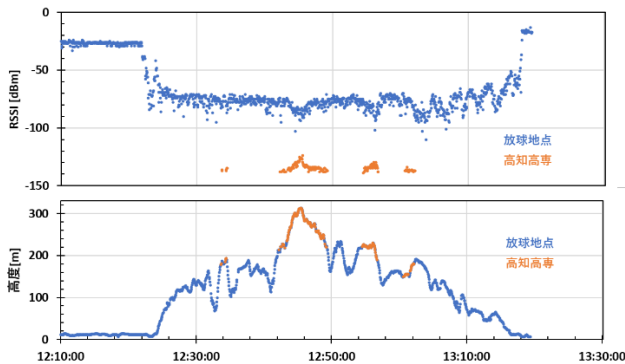


図8 LoRa受信機の取得データ例

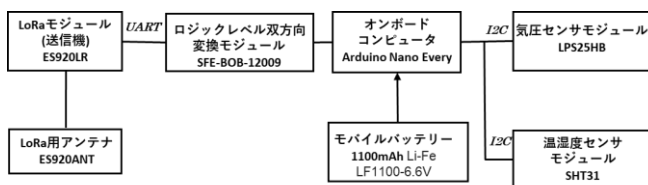


図9 開発予定の気球搭載用装置の構成図

5. まとめ

夜光雲観測のための気球実験として、今回は高度 2

km 程度以下の雲を越えた観測が可能な超小型係留気球による実験を検討した。係留気球実験に有利な風向きの検討、観測装置や係留索の巻取り装置の開発を行った。2020年11月3日に、到達高度 2 km 程度を目指し、高知県中土佐町久礼海岸にて係留気球実験を実施した。観測装置は高度 330 m 程度まで上昇させたが、係留索の解放や巻取りに関しては再検討が必要であることが分かった。今後、装置の軽量化を進め、カメラの姿勢制御装置の開発などを検討する予定である。一方で、夜光雲観測において、長距離の係留気球実験は、自由気球実験と相補的であり、係留気球実験を的確に実施できるシステム開発は、夜光雲の安定した観測のために有用であると考えられる。

謝辞

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] 村山泰啓, 夜光雲: 地球上で最も高い雲, エアロゾル研究, 25(3), 211-218, 2010
- [2] 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
- [3] 加藤樹ら, 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
- [4] 高田拓ら, 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
- [5] Cambridge University Spaceflight Landing Predictor, <http://predict.habhub.org/>, (閲覧: 2020年10月28日)
- [6] 中島正一, 係留気球昇降機について, 天気, 19(10), 555-561, 1972
- [7] 藤原和人ら, 係留気球の地上観測装置開発に関する研究 (A4 設計関連-3-), 日本機械学会九州支部講演論文集 2012, 35-36, 2012