

夜光雲撮像のための簡易姿勢安定機構を搭載した小型係留気球システムの実証実験

川上莉奈¹, 石井智士¹, 高田拓², 遠藤哲歩^{1,4}, 吉田理人³, 富川喜弘^{3,4}, 加藤恵輔¹, 鈴木秀彦¹

¹ 明治大学, ² 都立産業技術高専, ³ 総合研究大学院大学, ⁴ 国立極地研究所

Result of test flights of a small tethered balloon with a simple camera stabilizing system for observation of noctilucent clouds.

Rina Kawakami¹, Satoshi Ishii¹, Taku Takada², Akiho Endo^{1,4}, Lihito Yoshida³, Yoshihiro Tomikawa^{3,4}, Keisuke Kato¹, and Hidehiko Suzuki¹

¹Meiji University, ²Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, ³SOKENDAI, ⁴National Institute of Polar Research

1,はじめに

夜光雲は高度約 85 km に発生する地球大気中で最も高高度に発生する氷の雲である。夏至を中心とした 2 か月程度の期間、緯度 50 度から 60 度の中高緯度帯において、薄明時間帯の夜空に輝いて見える現象として知られている。近年、亜極域における夏の超高層大気発光現象として知られていた夜光雲が中緯度帯でも多く報告されるようになった。例えば 2015 年 6 月には北海道で初めて夜光雲が多地点で同時観測され[1]、2020 年には同じく北海道で 1 シーズンに 4 回もの夜光雲の出現を記録した。一方、大気大循環モデルによれば地球の下層大気で温室効果ガスの増加による温暖化が進行すると、高層大気は寒冷化し、夜光雲の発生領域が日本などを含む中緯度へ拡大するというモデル予測がある。したがって、地球温暖化の進行度の指標として、中緯度帯において夜光雲の連続監視を行うことは重要である。従来の夜光雲観測は地上光学観測や衛星観測が主力であった。しかし、極軌

道衛星による観測では中緯度帯の観測域に空隙が生じ、地上光学観測は悪天候に阻まれるデメリットがあった。一方、静止軌道からの観測は天候に左右されず特定の経度帯における夜光雲のリム観測が 24 時間可能であり中緯度帯の夜光雲観測手段として有効である[2]。本プロジェクトはこれらの既存の観測手法に加え、超小型係留気球による夜光雲観測実現を目指すものである。最も広く行われている夜光雲観測はカメラ撮像に代表される地上光学観測である。この手法は手軽に実施可能かつ微細な空間構造が得られるというメリットがあるが、低層の雲による影響を受けやすく、曇天時には有効データが得られないという弱点がある。そこで、本研究ではカメラを小型係留気球により低層雲より高高度まで飛揚させ、天候に左右されない安定した夜光雲観測を実施する手法の確立を目指している。2021 年 7 月には北海道の名寄市においてペイロード重量が 116 g から 1.4 kg の複数のシステムを用いて係留気球試験を行い、

2021年7月20日の夜間における試験においては116gの小型カメラと200gのゴム気球からなる軽量システムで、最高高度1,200mまでの往復飛揚に成功した[3]。しかし、夜光雲を撮像する上で必要な露光時間である1秒程度の間にも、係留索のねじれによるカメラの回転が生じてしまい多くの撮像画像に無視できないブレが生じてしまった。また、係留索のリリースと巻き取りは電動ドリルを動力とする、自作のてこクランク機構つき巻き上げ機を使用した。巻き取る際のトルクの微調節が困難であり、複数回の係留索断裂を起こしてしまう等多くの課題が生じた。そこで、2022年9月には飛揚中の姿勢安定、安定したリリリースおよび巻き取り機構を確立するために、簡易的な姿勢安定機構を搭載した小型係留気球試験を茨城県の大洗海岸にて実施した。本発表ではその実験報告を行う。

2. 実験の詳細

実験は茨城県の大洗海岸にて9月12日～14日の早朝および夕方の時間帯で実施する計画であったが、地上風速の条件や近隣の航空自衛隊百里基地との調整により、実際に係留気球の飛揚を行ったのは9月13日の午前および午後、14日の午前に計5回（上げ下ろしで1回）となった。そのうち、9月14日の午前に行った飛揚では係留索を1,400mまでリリース（推定高度約700m）したものの、索の巻き取り途中で断索してしまい装置回収に至らなかった。本発表では、9月13日の午前中（高度500mまで飛揚）および同日午後（高度1950mまで飛揚）に実施した計2回分の気球実験結果について報告する。

3. 観測装置

小型係留気球システムの全体図をFig.1に示す。システムはヘリウム入り200gゴム気球、パラシュート、簡易スタビライザー、アクションカメラ(GoPro HERO7)、および巻き上げ機で構成されている。係留索は8号のPEライン（最大2000mリリース可）を使用した。GoProは観測中動画モードで稼働させた。これにより0.005秒おきにGoPro内蔵のGPSおよび加速度センサーのデータが動画とともに記録される。本研究ではGoProのGPSデータおよび角速度センサーのデータを姿勢の評価等に用いた。

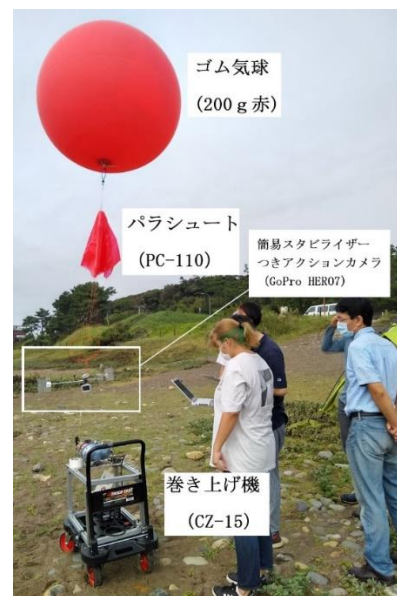


Figure 1. 係留気球システムの全体図



Figure 2. 簡易スタビライザーの外観

スタビライザーは Fig. 2 のような外観である。2021 年の試験観測によれば撮影画像のブレにつながるカメラの動きは係留索のねじれによる回転運動が主である[3]。そこで、索を中心軸として 120 度ごとに矢羽根を配置したスタビライザーを製作した。これは上空の風が羽根にぶつかることで係留索まわりのトルクを生じ糸のねじれによるねじれ振動を抑制できる効果が期待される。風向きによってカメラの向きは変動するが、風向が安定していればある方向に視野が固定される。スタビライザーは透明アクリル板、アルミ丸棒、3D プリンタ用レジン樹脂で構成されており総重量は約 160 g である。

4. 結果の概要

4-1. 9 月 13 日 午前中の試験飛揚

9 月 13 日 7 時 9 分から 7 時 45 分にかけて小型係留システムの飛揚を行った。システム全体での正味浮力は 7.7 N とした。試験開始時の地上風速は 2.0 m/s、最高到達高度は約 400 m で 300 秒程度上空に滞留させた。高度 400 m 以上の飛揚を断念した理由は上空の風により係留索の仰角が市街地方向にむけて 30 度以下となったためである。Fig. 3 に GPS による時間高度プロットを示す。リリースを止めた上空での滞留時間は 540 秒から 840 秒であるが、この間に 50 m 程度の高度変動が見られた。これは 400 m 高度付近の風速度が一定しないことにより、張力、浮力、重力のつり合い関係が変動した結果によるものと考えられる。このような高度の上下動は 2021 年 7 月 17 日に名寄で係留観測を実施した際のデータ（比較実験と呼ぶ）にも表れており、振幅

も同程度であった。Fig. 4 はヨー軸（垂直軸周り）の角速度値を積分し同実験期間中のヨー軸周りの回転角を示したものである。

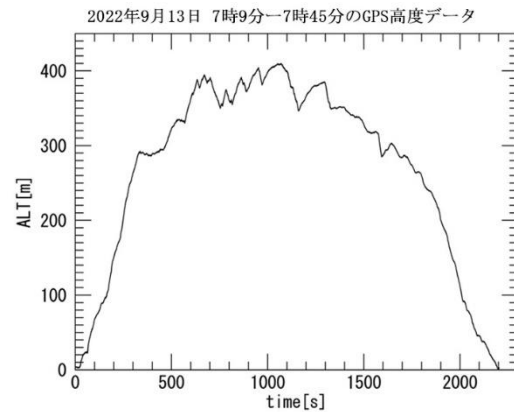


Figure 3. 2022 年 9 月 13 日 午前中の試験観測における GPS 高度データ。

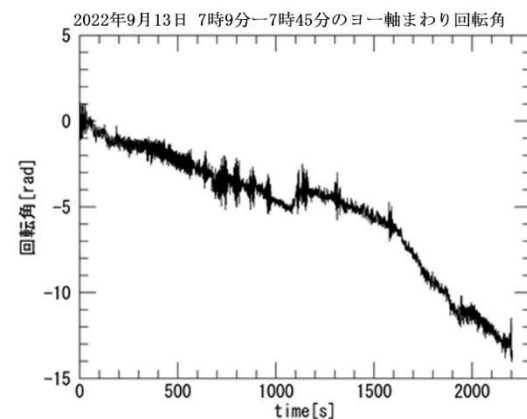


Figure 4. 2022 年 9 月 13 日 午前中の試験観測におけるヨー軸周りの回転角データ。

夜光雲撮像時の典型的な露光時間は 1 秒程度である。したがって 1 秒間にどの程度ヨー軸周りの回転があるかによって、画像のブレが起こるかが決まる。GoPro の場合 1 画素に相当する視野角が 0.063 度である。夜光雲の存在を画像で確認するには露光中のブレは 10 画素以下程度であることが要求される。したがって、1 秒間に 0.32 度以内の回転までは許容できる。そこで、1 秒

間の角度変動が 0.32 度以下の時間帯が何回あったか（安定回数）を、Fig. 4 の滞留時間中のデータによりカウントすると、45 回/300 秒となった。一方、2021 年の北海道における比較実験においては 400 秒間で 0 回であり、同程度の風速変動の中ではスタビライザーを導入したことにより安定度が向上したと言える。

4-2. 9 月 13 日 午後 の 試験 飛 揚

9 月 13 日 14 時 43 分から 16 時 00 分にかけて飛揚試験を行った。システム全体での正味浮力は 12 N とした。試験開始時の地上風速は 1.7 m/s、最高到達高度は約 1,950 m で、北海道における記録を上回り 300 秒（1260 s-1560 s）程度上空に滞留させた。この時間帯は地上から最高高度まで風が弱く、気球はほぼ直上に飛揚した。Fig. 5 は Fig. 3 と同様の GPS 高度—時間プロットである、風速変動による高度の上下動は見られなかった。気球高度に上下動が見られないことから本実験時は極めて風速の弱い好条件であったと言える。弱風条件下での実施であるため、スタビライザーの効果を検証することは難しいが、最高高度滞留中は無回転であった。この実験での成果は好条件下においては高度約 2 km までの往復飛揚を 77 分で実現できることを実証したことである。

5. 今後の課題

スタビライザーは係留索周りの回転運動を抑える上で有効であったが、上空の風速に緩急がある場合、気球高度の上下動に伴うブレが生じる。これまでは気球→パイロード→係留索を直列につないでいたため、

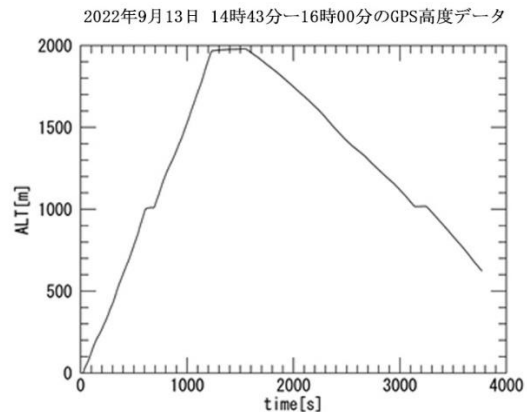


Figure 5. 2022 年 9 月 13 日 午後 の 試験 観 測 に お け る GPS 高 度 デ ー タ 。



Figure 6. 高 度 1,950 m 付 近 か ら の 画 像

係留索に傾度がつくとカメラの視野も傾いてしまい、その状態で上下動が加わるとピッチ軸まわりのブレが加わると考えられる。今後はピッチ軸周りのブレを抑制する機構について検討を行う。

6. 参考文献

- [1] Suzuki H. ほか, Earth, Planets and Space 68.1 (2016): 1-8.
- [2] Tsuda, T. T. ほか, Atmospheric Measurement Techniques 11.11 (2018): 6163-6168.
- [3] 石井ほか, 大気球研究報告(2022), 受理

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H01289 の助成を受けたものです。