

# 成層圏気球におけるリーフィング機構及び切り離し機構の実証と姿勢制御実験

角田英里香, 酒見昇吾, 栗本壮, 小米良暖, 立川陽佑介, 牧尾陽向, 東山さくら, 奥村俊作,  
加納健太郎, 杉尾優斗, 児玉源太郎, 八幡伊織, 田中龍斗, 橋川莉奈, 田中愛, 松浦星河,  
加賀遼一朗, 小川秀朗(九州大学)

## Demonstration of parachute reefing and detachment mechanism and attitude control experiments using stratospheric balloon

Erika Tsunoda, Shogo Sakemi, Takeshi Kurimoto, Hinata Komera, Yousuke Tachikawa, Hinata Makio,  
Sakura Higashiyama, Shunsaku Okumura, Kentaro Kano, Yuto Sugio, Gentaro Kodama, Iori Yawata,  
Ryuto Tanaka, Rina Hashikawa, Ai Tanaka, Seiga Matsuura, Ryoichiro Kaga, Hideaki Ogawa  
(Kyushu University)

### 1 はじめに

我々は今までに5回の放球実験を行い、いずれも機体の回収に成功した。今回は第二回えひめ南予共同気球実験に参加し、放球・機体の海上回収を行った。図1は機体の構成図である。

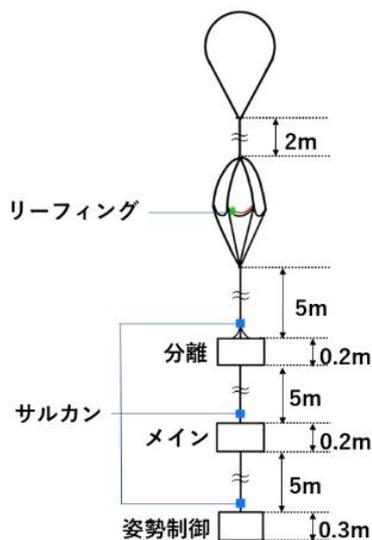


図1 機体の構成図

本実験では過去の実験を通して見つかった課題のうち3つの解決と、他分野への応用の利く新た

な技術開発の1つの、合わせて以下の4つをミッションとして見据えた。

- ① 映像の撮影や無線による通信に影響を与える、飛行中のペイロードの姿勢の制御
- ② ペイロードの回収の成否に大きく関わる飛行経路の制御
- ③ 減圧環境を考慮に入れたペイロードの水密
- ④ パラシュートのリーフィングの実証

### 2 各ミッションの概要と設計

#### 2-1 リーフィング機構

リーフィングの目的は、落下分散の抑制および開傘衝撃の低減である。本機構(図2参照)の特徴は、開発と運用の簡易化のために電装を用いないこと、小型化のために動力を用いないことの2つである。

脱進機<sup>[1]</sup>と減速機で構成され、従来のリーフィングでは難しい多段階減速の回数をほぼ無限回にすることで開傘衝撃を大幅に抑制することができる。成層圏気球などの開傘時に大気密度が地表に

比べて小さい環境下では、機構内部の減速比を小さくすることで開傘衝撃の實質無効化を実現できる。また、同機構で減速比を大きくするだけで落下分散の抑制も可能である。

内部動力は無く、開傘時にパラシュート外縁部に周方向の力が発生したとき、機構の動作を拘束するピン 1 (図 2 中赤矢印の位置に差す) が外れ動作を開始する。その後、リーフィングラインにかかる周方向の張力によって動作を行う。設計上機構の安定した動作のためには、一定間隔以内に一定以上の荷重が必要になる。

今回は減速機を搭載せず、パラシュートが開傘してから 3 秒後に全開傘するよう設定した。また、共同実験の規定に従い、落下分散の抑制および開傘衝撃の低減は実際には機能しない状態で、機構の正常な動作の実証のみを目的に搭載した。

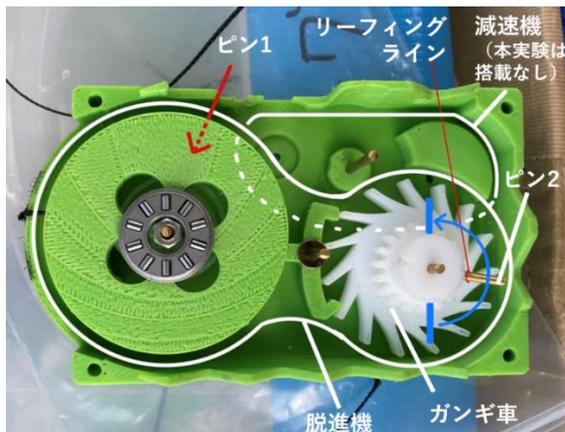


図 2 リーフing機構内部の様子

## 2-2 切り離し機構

気球の飛行経路は気球の上昇・下降速度、破裂高度に大きく依存する。このうち破裂高度について、想定した破裂高度よりも高高度まで上昇しないと破裂しない場合がある。このような場合に切り離し機構を使用することで、想定通りの破裂高度、飛行シミュレーション<sup>[2]</sup>から逸脱しない飛行経路を実現できる。

本機構 (図 3 参照) の主な構成部品は、引きバネがついたストッパー、バルーンに繋がるロープが締結された離脱部、カッターの刃が固定された

DC モーターの 3 つである。バネが引かれた状態でのストッパーの固定によって離脱部が保持される構造となっており、ストッパーを固定している糸をモーターの回転により切断すると、離脱部が抜け、バルーンと分離する。

今回は共同実験の規定に従い、実際には分離しないよう予備のパラコードをつないだ状態で、機構の正常な動作の実証のみを目的に搭載した。冗長性のため LoRa 通信によるアップリンク (放球から 50 分後) に加えタイマー (60 分後) によってモーターが作動するようなプログラムとした。

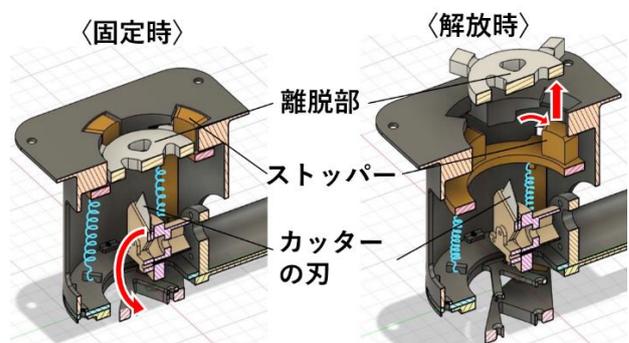


図 3 分離機構動作の様子

## 2-3 姿勢制御機構

本機構 (図 4 参照) は 1 軸のリアクションホイールを採用し、鉛直方向の回転を制御する設計である。ペイロードの角加速度に応じてアルミ円盤の回転速度を変化させ、ペイロードの回転を打ち消す方向にトルクを発生させる。制御方法には PID 制御を用いており、各項のゲインは地上での試験をもとに決定した<sup>[3]</sup>。以下に本機構の諸元 (表 1 参照) を示す。なお、ペイロードの慣性モーメントは 2 点吊り法<sup>[4]</sup>で求めた。

表 1 姿勢制御機構諸元

円盤を除くペイロードの慣性モーメント	$2.894 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
アルミ円盤の慣性モーメント	$1.696 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

モーターの最大回転数	720 rad/s
------------	-----------

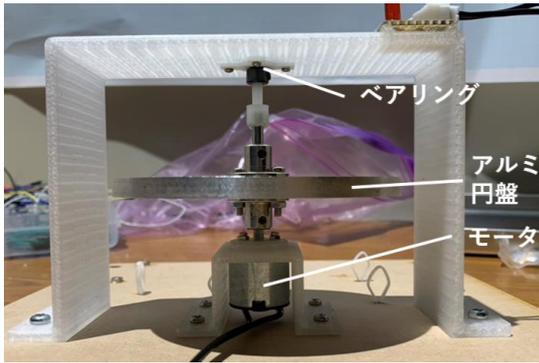


図4 姿勢制御機構の外観

### 2-4 通気水密管

海上回収の場合、ペイロードの沈没や搭載計器の不良を防ぐためにペイロードを水密する。その際、タイシラーなどで隙間を埋める従来の方法では通気性が失われ、高高度におけるペイロード内外の気圧差でペイロードの外装が破損することがあった。このため飛行中の通気性の確保と着水後の水密性能の両立が求められる。

そこで従来の水密方法に加え、ペイロードの壁を貫通させる形で通気水密管の搭載をした。これは直径 10 mm、長さ 100 mm の ABS 製の管に吸水性ポリマーを封入し、両端を目の粗い布でふさいだものである。飛行中は空気を通すが、着水後は管を通して侵入する海水によりポリマーが迅速に膨張し水密される。

## 3 実験結果

### 3-1 リーフリング

回収後の機構を目視で確認することで機構の動作を確認できた。具体的には、ピンが外れていること、ガンギ車の回転に伴いリーフリングラインを引っかけているピン 2 が図 2 に青色で示したように 180° 回転していること、リーフリングラインが解放されていることを確認した。

### 3-2 切り離し

回収後の機構を目視で確認することで機構の動

作を確認できた。具体的には、離脱部がペイロード本体から外れていることを確認した。

### 3-3 姿勢制御

放球前にリポバッテリーの電圧が低下し電装が停止していたと考えられる。このためログは放球前までしか得られなかった。電圧低下の原因として、リポバッテリーの経年劣化により想定以上に放球準備中のバッテリー消費が多かったことがあげられる。なお、地上の試験では本機構の動作によって 207 deg/s から 4 deg/s まで回転を抑えることができた。

### 3-4 水密

全てのペイロードで浸水していないことが確認できた。回収後に通気水密管内の吸水性ポリマーを確認したところ、海水に直接接触するペイロード外面側の約 1 cm 分のみ水分を吸収して膨張しており、それ以上の浸水を防いでいた (図 5 参照)。



図5 回収後の通気水密管の様子

## 4 その他結果と考察

### 4-1 メイン電装によるデータの取得

本実験ではメイン電装で気温、気圧、位置情報のログを取り、5秒ごとのダウンリンクを行った。GPS の設定を誤っており、高度約 12 km 以上での位置情報の取得はできなかった。GPS のみ停止し、プログラム全体としては動作していたため、ダウンリンクは放球前から回収後まで継続して受信できた。ログは着水約 10 秒前までのデータは得られた。ログの取得停止の原因は着水衝撃による

SD カードの損傷だと考えられる。

放球後 52 分で気球が破裂したが、その後もメインペイロード内の温度は下がり続けている（図 6 参照）。これはペイロード外側を覆う発泡スチロールの断熱効果により、気球の最高点到達時も温度平衡に至らず、高度減少中も内部温度が外気温より高かったためと考えられる。

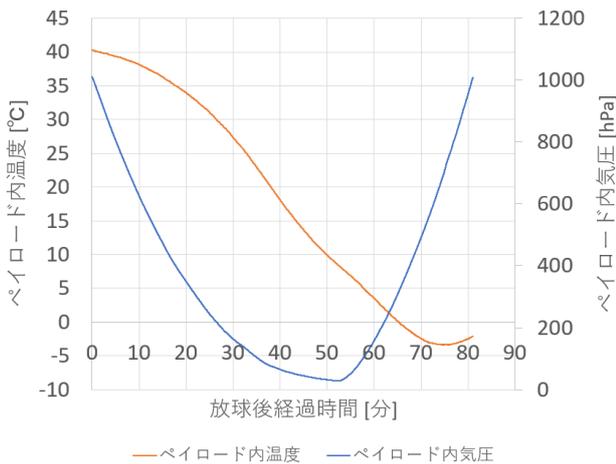


図 6 放球後のメインペイロード内の気温と気圧

#### 4-2 カメラによる映像撮影

本実験ではミッションの動作確認用に 2 台のアクションカメラと 1 台の 360° カメラを搭載した。しかし、熱暴走やバッテリー不足により動作を撮影できなかった。対策としてモバイルバッテリーなどの外部電源を用いることが考えられる。バッテリーの発熱により熱暴走したため、外部電源を用いることでカメラ本体の温度上昇を抑えられる。

#### 4-3 サルカンの効果

ロープのねじれによるペイロードの正逆回転の反復を抑制することを目的に、サルカンを気球、パラシュート、各ペイロード間に搭載した。カメラの映像から回転の繰り返しは起きており、ロープの剛性が小さいことでサルカン内部の回転よりもロープのねじれが起きやすかったため、回転を 0 にすることはできなかったが一定以下の回転には抑えられたと考えられる。

#### 5 まとめ

本実験を通し見つかった。1 つ目は、ミッションの動作確認をカメラの映像に頼りすぎたことである。撮影の成否に関わらず、視覚情報以外の客観的な記録を主な確認方法とすべきである。2 つ目は、電装のプログラム書き込み方法である。使用するマイコンを変更し、ペイロードの水密後に外側からプログラムの書き込みを行えるようにして、現地作業の簡略化を目指す。

今回はリーフィングと切り離しが機構の実証のみであったため、今後は改良により信頼性を向上させ、実際に両機構を機能させたい。また、飛行シミュレーションによる予想飛行経路とダウンリンクで得られた飛行中の位置情報を地図上に表示し、飛行中に比較して見られる環境を作りたいと考えている。

#### 6 謝辞

本実験は、共同実験の運営に携わった方々や、開催地である愛媛県の方々、実験に参加した他団体の皆様など様々な方々からのご協力のもとで行うことが出来た。関係機関・関係者の方々にこの場を借りて改めて御礼を申し上げたい。

#### 7 参考文献

最終閲覧はすべて 2023 年 10 月 18 日

- [1] BOOTH からくりすと 脱進機モデル【データ】 <https://booth.pm/ja/items/4419683>
- [2] Cambridge University Spaceflight Landing Predictor <http://predict.habhub.org/>
- [3] controlabo 実践 PID ゲインチューニング。失敗しない調整の極意とは？ <https://controlabo.com/pid-gain-tuning/>
- [4] 2 点吊り法による慣性同定 <https://digitalservo.jp/library/system-identification/inertia/bifilar-pendulum/>