

ハイブリッドロケット用テレメトリ装置の開発と打上結果

Development and flight test result of telemeters for hybrid rocket

吉田誠（神奈川大・学），島崎拓己（神奈川大・学），高野敦（神奈川大）

Makoto Yoshida, Takumi Shimazaki, Atushi Takano (Kanagawa University)

key Words : Hybrid rocket, loggers, telemeter, separation, flight data

Abstract

For measure flight data of hybrid rocket in flight test in order to reflect test results in study, a data logger and telemeters were improved. Last year the separation mechanism didn't work and rocket's body was broken and a part was missing, so the separation monitor to confirm that the separation mechanism is separated was developed. In addition, the separation power switch for forced separation by command from a base station was developed. An analysis was performed to relate to data of using them.

1. 緒言

当研究室ではハイブリッドロケットの設計開発，打ち上げ試験を行っている。

本研究の目的は計測装置を製作，打ち上げ試験時のデータを計測・回収し今後の研究に反映することである。昨年度開発された機体の各種データを得るためのロガーやテレメトリ装置の製作と改善に加え，昨年度機体が打ち上げ後に分離しないまま落下し破損・欠損した結果を踏まえ，今年度は分離の有無を確認するための分離モニタ，地上から分離を起動するための強制分離機構の設計開発を行った。

2. 分離モニタ

2.1 分離モニタ構成検討

当研究室で使用している分離機構はバネなどを固定バンドで抑えておき，発射と同時にタイマ回路が動作する構成になっている。所定の時間になると固定バンドに巻き付けられたニクロム線に電流が流れることでバンドを焼き切りバネが解放され分離するというものである。既存の回路に手を加えない分離の判別方法として電氣的観点からは Arduino のみで行うことが可能だが即座の判断は難しい電圧測定を，機械的観点からは分離の発生によるスイッチの切り替わりがリアルタイムで取得できるスイッチ回路を考え，2つの回路を組み合わせることにした。

地上へのテレメトリ通信には昨年度のテレメトリ装置に使用した RM-92A という素子を使用し受信側は

PC でモニタを行う。

2.2 電圧測定モニタ

分離機構の電氣的動作の観点からニクロム線の電圧を測定による分離の判別法を考えた。電圧測定であれば既存の回路に並列接続で追加できるためモニタが故障してもタイマ回路の動作を妨げる危険がないと考え製作を行った。

しかし電圧のみでは回路が動作しているかは判断できるが分離の有無は即時判断が難しいこと，電圧測定はマイコンである Arduino 単体で行うことができ，他のモジュールを必要としないことから後述するスイッチ回路に機能を追加する形で搭載することとした。

2.3 スイッチモニタ

分離機構の構造的観点からスイッチモニタを作成することとした。分離の動作によって分離面に押し当てられていたスイッチが解放され ON/OFF が切り替わるためリアルタイムで分離の有無を判別することが可能である。スイッチが一つだと誤作動の可能性があるため二つのスイッチを並列接続し，スイッチが両方解放された場合は「○」，そうでない場合は「×」が地上の PC 画面に表示される。

3. 強制分離機構

既定の時間を過ぎても分離が発生しないことが分離モニタから確認された際に強制的に分離機構を動作させるためのスイッチング回路である。地上からのコマンド送信により Arduino を起動させ FET に電圧を印加

することでニクロム線に電流が流れる仕組みである。トランジスタではなく FET を選択した理由は FET が電圧駆動であり、Arduino は電圧を出力する方が適しているからである。

4. 分離系回路

分離モニタと強制分離機構を機体に搭載するにあたり、タイマ回路と接続する必要がある。タイマ回路は電池基板と回路基板がスペーサを使用して段状に搭載されているため、同様にスペーサを用いてタイマ回路の段数を増やす形で搭載することにし、図 1 のように二つの回路を分離系として一つの基板内にまとめることとした。

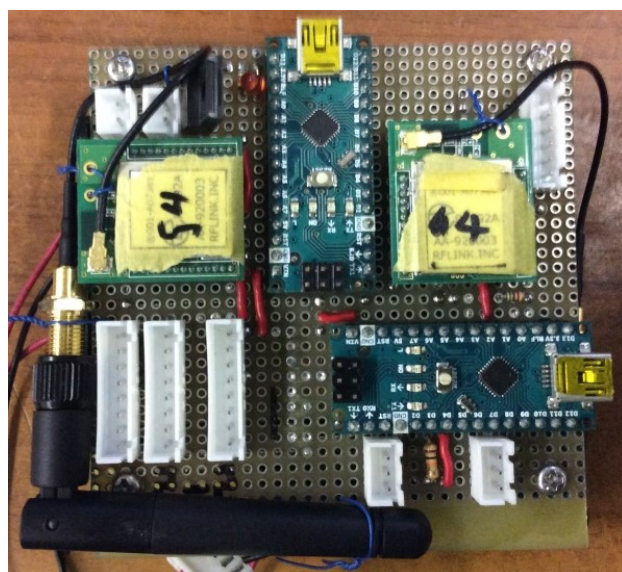


図 1 分離系回路

5. 搭載計器

表 1 に搭載計器の一覧をまとめた。

表 1 搭載計器一覧

名称	台数	機能
自作ロガー	1	気圧、気温、3 軸加速度、3 軸ジャイロ
購入ロガー	1	気圧、3 軸加速度
テレメトリ大気圧	2	気圧、気温
テレメトリ GPS	1	GPS
分離系回路	2	分離モニタ、強制分離機構
カメラ	1	映像

自作ロガーとテレメトリ装置は昨年度の打ち上げ試験にて搭載したもの^[1]を再製作した。その際にロガーとテレメトリ大気圧は測定範囲を広げるために気圧センサを変更した。

機体搭載時にテレメトリ装置はプラスチック容器に、ロガー類は保護等級 IP67 の ABS 樹脂製のプラボックスに入れることとした。理由としてテレメトリ大気圧は外気圧の変化に追従させる必要があること、テレメトリ装置はデータを無線通信で回収するのに対し、ロガー類は装置自体が回収できないとデータも回収でき

ないからである。

6. 最終コンフィギュレーション試験

2018 年 9 月 26 日に今年度最大高度の 10.9[km]を参考に野外で見通しの良い江の島湘南港灯台と立石公園間で長距離通信試験を行うこととした。江ノ島湘南港灯台を送信側、立石公園を受信側とし、2 点間の距離は 11.82[km]である。

しかしどの装置も通信が確認されず、原因として受信送信共に海の近くで行っていたことから海面による電波減衰を疑い試験途中で送信側を海拔約 38m である江ノ島のみどりの広場に移動して試験を行った。

表 2 に試験結果を示す。

表 2 長距離試験結果

	GPS	大気圧	モニタ	強制
山口丸 1 台目	× ⁽¹⁾	△ ⁽³⁾	○	△
山口丸 2 台目		○	○	-
福島丸 1 台目	○	× ⁽²⁾	○	-
福島丸 2 台目		△ ⁽³⁾	○	-

(1): アンテナの向きを見直したところ打上げ日には動作した。

(2): 再製作した。

(3): 試験後に江ノ島まで受信しながら近づくことで通信が確認された。

長距離通信試験を受けて通信が安定せずにコマンドを打ち込んでも反応がないこと、また予期せぬアンサーが返ってくるなど動作が不安定な強制分離の搭載は危険と判断し搭載はするが電源供給を行わずに使用しないこととした。

7. 打ち上げ試験

2018 年 10 月 6 日(土)に今年度の打ち上げ試験を行った。場所は秋田県能代市落合浜旧海水浴場で、午前 6 時に点火を行った。

リハーサルにて電圧モニタをタイマ回路に接続した際に意図しないニクロム線通電モニタ用の LED の点灯が確認されたため電圧モニタの接続を取りやめることで対応した。以下に試験の結果を示す。

表 3 打ち上げ試験結果

機体	計測対象	結果
大気圧	大気圧	混線しつつ着水まで受信
	気温	スタイロによって失敗
GPS	GPS	着水時まで受信
分離モニタ	スイッチ	分離を確認成功
	電圧	搭載中止
強制分離	スイッチング	搭載中止
自作ロガー	大気圧	水密性が高すぎて失敗
	気温	スタイロの断熱性により失敗
	加速度	約 9 時間の記録成功
	ジャイロ	約 9 時間の記録成功
	コンパス	約 9 時間の記録成功
購入ロガー	大気圧	水密性が高すぎて失敗
	気温	スタイロの断熱性により失敗
	加速度	記録に成功
カメラ	映像	回収まで記録成功

8. 取得データ解析

8.1 大気圧

打ち上げ試験にて得られたデータを以下に示す。

表 4 大気圧データ

	33ch	34ch
大気圧最小値[hPa]	462.85	468.98
最小時時刻[s]	38.44	32.89
フライト時間[s]	270.94	276.97

表 4 の大気圧データを用いて高度の算出を行うこととした。以下に高度の算出に使用した式^[2]を示す。

$$h = \frac{\left\{ \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{1}{5.257}} - 1 \right\} (T + 273.15)}{0.0065} \quad (1)$$

高度の推定には気圧と温度が必要であるが、温度は表 3 に示した通りセンサのある機体内部の温度が外気温に比べて高かったため、表 4 の最小気圧における高度を式(1)より求め、その高度と以下の式^[3]を用いて近似温度を求めた。

$$t_h' = t - 6.5 \times \frac{h}{1000} \quad (2)$$

さらに求めた近似温度を使用して高度の再計算を行い、これを変化が小さくなるまで行った。これにより今年度の最高高度は 6204[m]と結論付けた。

8.2 加速度・ジャイロ

取得したジャイロ値がセンサの設定漏れにより 250[dps]でオーバーフローしていた。機体搭載カメラの動画より発射から 30 秒間で 26 回転であることが読み取れたためそれと一致するように補正を行った。

補正後と補正前のジャイロ値を図 2 に示す。

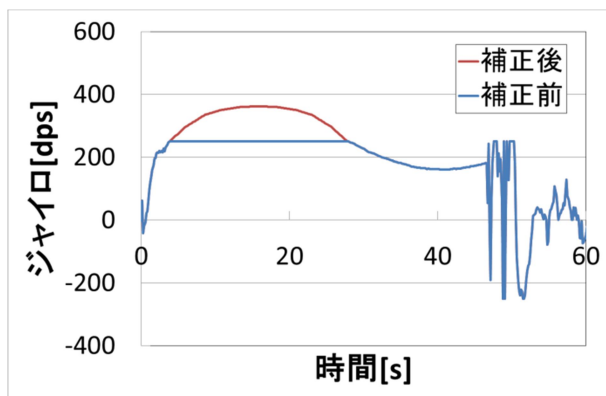


図 2 機軸回りジャイロ

補正後のジャイロデータを使用して地面固定座標基準の機体のオイラー角を求め^[4]、加速度を座標変換した上で積分を行い速度と高度を求めた。

図 3 に高度、図 4 に速度の比較グラフを示す。

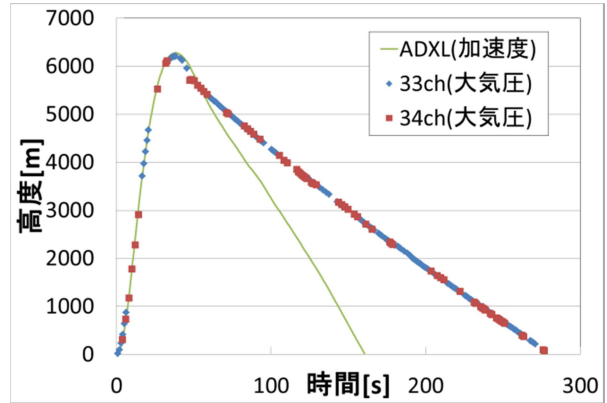


図 3 高度比較グラフ

座標変換後の加速度から求めた高度は 6277[m]であったこと、また試験後に行ったコリレーション解析では 6588[m]であったことから大気圧から求めた高度の妥当性が確認できた。

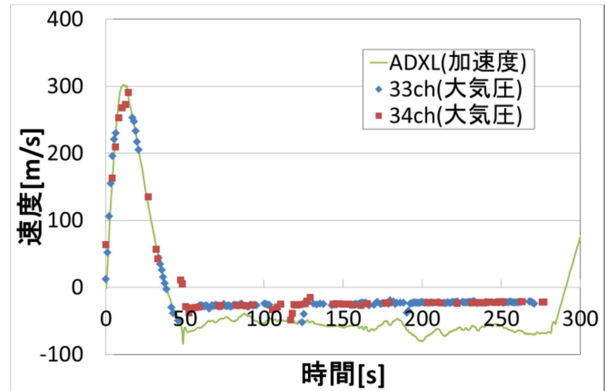


図 4 速度比較グラフ

図 4 より発射から 50 秒付近までは大気圧高度を微分して求めた速度と近い値を取得している。最高速度は 302[m/s]であり、マッハ数は $Ma=0.95$ である。

50 秒以降でグラフが一致しない原因として大気圧ではパラシュートの開傘衝撃による大きな加速度の変化が見られないことが考えられる。

8.3 分離モニタ

図 5 に大気圧から求めた高度と機軸方向の加速度、分離モニタをまとめたグラフを示す。

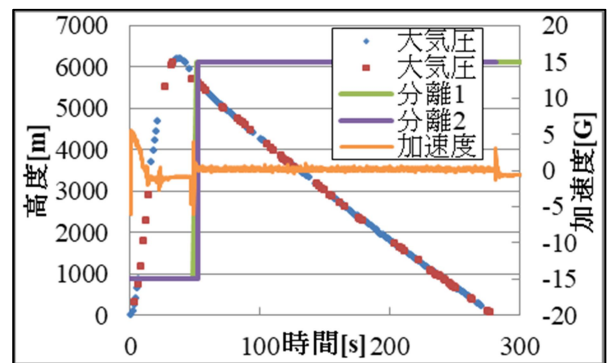


図 5 高度-加速度-分離

図より 1 段目と 2 段目がほぼ同時に分離していること

が分かる。分離時の大きな加速度や高度変化の様子、搭載カメラの映像からも正しいと考えられる。

8.4 GPS

図6に得られたGPS座標を地図にプロットしたものを示す。

機体が最後のプロット付近で発見されたため正しく座標を取得していたと考えられる。

発射から海上での測定復帰に50秒かかっておりこの間も計測点との通信はできていたことからロケットの速度が速く、GPSセンサーが衛星をとらえきれなかったと考えられる。

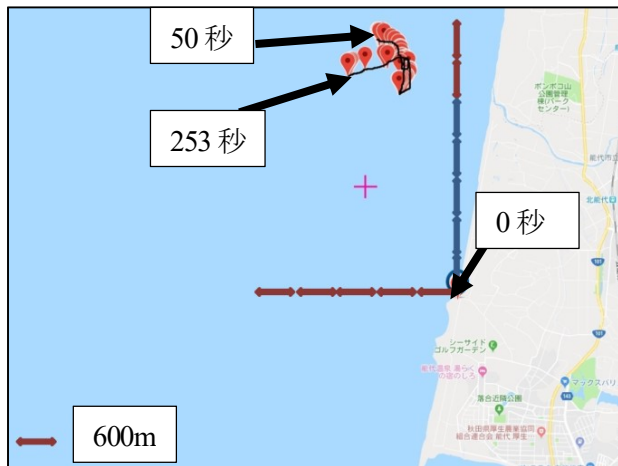


図6 GPSプロット

8. 結言

分離モニタと強制分離機構の設計開発の他、昨年度までのテレメトリ装置の測定範囲を広げた。

打上試験ではテレメトリ装置よりリアルタイムで分離の有無や大気圧、GPSデータを取得し、回収したロガーから機体の各種データを得られた。得られたデータを解析し比較することで今年度の到達高度や機体の姿勢角、分離の同時発生の裏付けを行うことができた。

9. 参考文献

- [1] テレメトリ装置の開発と伊豆大島打ち上げ結果、島崎拓己，高野敦 UNISEC 2017年
- [2] keisan 生活や実務に役立つ計算サイト 気圧から標高を計算 <https://keisan.casio.jp/exec/system/1257609530>
- [3] 理科年表 平成6年 編纂者:国立天文台 発行者:鈴木信夫 発行所:丸善株式会社 平成5年11月30日発行
- [4] 航空機力学入門 著者:加藤寛一郎，大屋昭男，柄沢研治 発行所:財団法人 東京大学出版会