

超小型ロケット用独立搭載型テレメトリ装置の開発

星 拓磨^{1,*†}, 高野 敦¹, 三宅 真², 国廣 愛彦²

¹ 神奈川大学工学部機械工学科
〒221-8686 神奈川県横浜市神奈川区六角橋 3-27-1

² 株式会社フルハートジャパン
〒143-0024 東京都 大田区 中央 3-20-8

概要

神奈川大学では超小型人工衛星を超小型ロケットで打ち上げるためにハイブリッドロケットの研究, 開発を行っている. この開発の一環として, 神奈川大学にて 2017 年度に開発されたテレメトリ装置とデータロガーの機能を統合し, 将来の製品化を見据え信頼性の向上と既存プログラムの見直しによる性能向上と同時にさらなる小型化を行った. 本報告ではテレメトリ装置の開発と試験で得た知見について報告する.

* Corresponding author. Professor, Member UNISEC.

† E-mail: r201703858bp@jindai.jp, atakano@kanagawa-u.ac.jp, m-miyake@fullheart.co.jp, y-kunihiro@fullheart.co.jp.

Development of independent mounting type Telemetry device for micro launch vehicle

Takuma HOSHI^{1,*†}, Atsushi TAKANO^{1,*†}, Makoto MIYAKE², Yoshihiko KUNIHICO²

¹ Department of Mechanical Engineering, Kanagawa University.

3-27-1 Roxkakubashi, Kanagawa-ku, Yokohama-shi, Kanagawa 221-8686, Japan

² FULLHEART JAPAN INC.

3-20-8 Chuo, Ota-ku, Tokyo 113-0032, Japan

SUMMARY

Kanagawa University is researching and developing a hybrid rocket for launched nanosatellites by a microminiat rocket. We have reviewed existing programs that improve the reliability and performance by integrating the functions of the telemetry device and data logger developed at Kanagawa University in 2017, and have made them even smaller in anticipation of future commercialization. The development of telemetry device and test result are reported.

KEY WORDS: Telemetry device; Hybrid rocket

1. はじめに

近年超小型衛星の打ち上げ需要が高まっている。そこで神奈川大学高野研究室および宇宙ロケット部では超小型人工衛星を超小型ロケットで打ち上げるためにハイブリッドロケットの研究・開発・打ち上げ試験を行っている。

宇宙ロケット部では、2016年12月からテレメトリ装置の開発に着手した。これは2016年12月に伊豆大島での打ち上げ試験にて機体のうち片方をロストしてしまったが、フライトデータは機体搭載のデータロガーに記録されていたため、大部分のフライトデータを得ることができなかった。このような事象を受け、機体が回収できなかった場合に得られるフライトデータが非常に少なくなってしまうことを避けるためである。しかし、現在発売されているテレメトリ装置は高コストで扱いも難しいものが多かった。そこで神奈川大学高野研究室および宇宙ロケット部は超小型ロケット用テレメトリ装置の独自開発を行った。2017年に開発したテレメトリ装置は、無線局の資格を必要とせず長距離通信が可能な無線モジュールを用いて、センサから得られたデータを基に計算をした高度を送信するものと、GPSモジュールを用いて記録した座標データを送信する二種類を開発した。実際に2017年と2018年の打ち上げ試験では、打ち上げ中に機械環境下においても開発したテレメトリ装置が正常に動作することを確認した。

超小型ロケットの研究開発が盛んになりつつあることを受け、超小型ロケット用の小型で安価なテレメトリ装置の需要が高まってきた。そこで、上記テレメトリ装置の開発を進めてきた神奈川大学高野研究室および宇宙ロケット部と、電子機器の設計・開発を手掛けている株式会社フルハートジャパンが共同開発をすることで、将来の製品化、及びこれらの技術を応用したIoT製品を見据えた小型テレメトリ装置の開発を行った。

本報告ではテレメトリ装置の開発と試験で得られた知見について報告する。

2. 2017年度に開発したテレメトリ装置の実績

上述のようにテレメトリ装置の開発には2016年12月に着手した。

2017年9月に伊豆大島にて同様に海に向けてハイブリッドロケットの打ち上げ試験を行った。2017年に開発したテレメトリ装置を搭載し大気圧から計算された高度データもリアルタイムで受信することに成功した。GPSデータについては宇宙ロケット部機体のものは機体を回収するまで取得できたが、研究室機体は打ち上げ直後に途絶えてしまった[1]。この原因は機体に搭載した際のアンテナの位置が悪かったことが原因と推定された。

2018年10月には秋田県能代市にて同様に海に向けてハイブリッドロケットの打ち上げ試験を行った。この打ち上げではGPSのアンテナの向きを改善しGPSデータも機体回収まで記録することができた。あわせて大気圧から計算された高度データもリアルタイムで受信することに成功した[2]。

これらのテレメトリ装置(図1)は、独立した電源を有する独立した装置として開発され、外部からの電源供給を必要としない。また、万一機体が着水時の衝撃で破損した場合でも回収可能なように、水密性のケースに格納され水に浮くようにしてある。さらに、電源スイッチなども省略することによりロケット機体内部への配線も不要である。このため、ロケット機体への組み込みは機体内部への挿入のみとなり非常に容易である。また、故障した際も予備の装置に交換することも極めて容易であった。これらの特徴を持つためこのテレメトリ装置は独立搭載型と呼ぶこととした。



図 1 2018 データロガー

3. テレメトリ装置の共同開発

3.1 概要

2019 年 6 月からは株式会社フルハートジャパンと共同開発を開始した。2019 テレメトリ装置は（図 2，図 3），将来の製品化を見据えて装置の小型化と機能集約，電源の見直しと表面実装を導入し高信頼性化を行った。これによりこれまでは学生の手はんだにより作成され出来栄が個々の技量に依存していたものが均一になり大幅に信頼性が向上した。

開発の担当として神奈川大学は，テレメトリ装置の仕様提案，既存のプログラムの見直し，開発したテレメトリ装置の動作検証及び性能試験を担当した。株式会社フルハートジャパンはテレメトリ装置の設計，電源部見直し，試作を担当した。

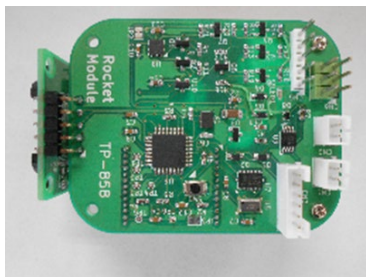


図 2 2019 テレメトリ試作機

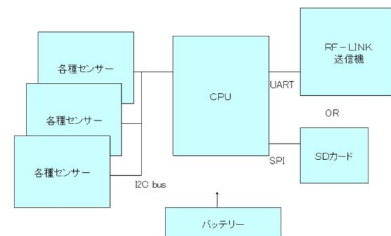


図 3 システムブロック図

3.2 テレメトリ装置の性能

新しく開発したテレメトリ装置は，今までの知見を基に開発を行った。開発したテレメトリ装置の最大の特徴は，外部からの電源供給を受けずに 8 時間以上にわたってバッテリー動作する。これは学生によるロケットの打ち上げ試験を想定して設計されており，打ち上げ試験前日に準備をすることで，試験当日のハンドリングミスを減らす狙いがある。また，このテレメトリ装置には無線資格を必要としない通信モジュールを搭載している。これにより誰でも取り扱いが容易なテレメトリ装置となっている。さらに，このテレメトリ装置は通信モジュールを省き，データロガーとして利用することもできる。

3.2.1 開発したテレメトリ装置の仕様

表 1 に開発した 2019 テレメトリ装置の仕様を示す。超小型ロケット用テレメトリ装置の主なミッションとして，ロケットの状態を常時記録すること，ロケットのデータを確実に回収するために位置情報を地上に送り続けることが挙げられる。そのために 2019 テレメトリ装置には①気温・温度センサ，③Hi-G センサ，④9 軸センサの 3 つのセンサと，②GPS モジュール，⑤通信モジュールが搭載されている（表 1）。

搭載されている計器の用途を以下に示す.

- ① 海面との気圧差から到達高度を記録する.
- ② 着水後の装置の位置情報を送信するために搭載する.
- ③ パラシュートの開傘衝撃や機体着水時など大きな衝撃を記録する.
- ④ 飛行中のロケットの回転速度や加速などを記録する.
- ⑤ 計測したデータを回収する際や、回収できない場合を想定し、大気圧と位置情報を取得する.

2019 テレメトリ装置の通信モジュールには、RF-LINK 社で販売している RM-92A という 920Mhz 帯の特定小電力通信モジュールを使用している. 開発にあたり長距離通信が可能でありかつ無線の免許を必要としないということで選定した.

2018 年度までは取得した NMEA フォーマットデータを緯度経度に変換してから地上に送信していたが、地図上に位置情報を表示するために NMEA フォーマットデータを直接地上局に送信できるようにした.

表 1

項目	内容	
サイズ	機器寸法 (GPS 有) : 57.0x45.0x10.0(35.0) mm 実装寸法 : 97.0x71.0x38.0 mm	
質量	機器重量 (GPS 有) : 14.8g (24.8g) 実装重量 (GPS 有) : 108.3g	
通信可能距離	0 ~ 30km (2017 度の通信試験より)	
運用可能時間	GPS テレメトリ : 13.5 時間 テレメトリ大気圧 : 16.4 時間 データロガー : 37.6 時間	
搭載計器	①気圧・温度センサ MS5607 ②GPS モジュール AE-GYSFDMAXB ③高 3 軸加速度センサ ADXL375 ④9 軸センサ ICM 20948 ⑤通信モジュール RM-92A	気圧 10~1200mbar 温度-40~85°C NMEA フォーマット ±200G 加速度 ±16G 角加速度 ±2000dps コンパス ±4900μT
電源	二次電池 : Li-Po 電池 (保護回路内蔵), 3.7V, 800mAh (2 並列)	
通信	・送信 (920 Mhz 帯) LoRa 方式 送信アンテナとしてモノポールアンテナが搭載されている.	
ケース	タッパー・専用ケース	

3.2.2 電気的性能

表 2 に 2017 および 2019 テレメトリ装置の電気的性能の比較を示す. 2017 年度からの主要な変更点は、省電力・小型化を目的として、電池を二酸化マンガニリチウム電池からリチウムイオンポリマー電池に変更した点である. システム全体を見直し、動作電圧を下げ CPU の動作周波数を 16Mhz から 8Mhz に下げ、バッテリー電圧を 9V から 3.7V に変更したことでテレメトリ装置の省電力化に成功し、小型小容量バッテリーにて、連続使用時間 8 時間以上を確保することにも成功した.

ソフトウェア機能では大気圧テレメトリ装置に SD カード保存機能を追加してサンプリングレートの改善を行った. なお 2017 GPS テレメトリから 2019 テレメトリ装置のサンプリングレートが低下しているのは RM-92A のデータ転送スピードに合わせたため、2 秒に 1 回となりました.

表 2

テレメトリ装置	使用バッテリー	連続使用時間	サンプリングレート	ソフトウェア機能	備考
2017 GPS テレメトリ	二酸化マンガン リチウム電池 (1200mAh)	実測値 27 時間 (電池 2 個)	0.8Hz	マイコンに Arduino nano を使用. 通信が途絶えないように定期的に再起動	データを取得していないときは"NODATA"を送信
2017 大気圧 テレメトリ	二酸化マンガン リチウム電池 (1200mAh)	実測値 37 時間 (電池 2 個)	0.9Hz	マイコンに Arduino nano を使用. 通信が途絶えないように定期的に再起動	取得したデータから高度を算出
2017 データロガー	二酸化マンガン リチウム電池 (1200mAh)	(電池 1 個)	7.9Hz	マイコンに Arduino nano を使用. 常に SD カードにデータを保存.	
2019 GPS テレメトリ	リチウムイオン ポリマー電池 (400mAh)	実測値 13.5 時間 (電池 2 個)	0.5Hz	マイコンに ATmega328P を使用. 地上に NMEA フォーマットのデータを送信	地上局側に位置情報表示ソフトを利用
2019 大気圧 テレメトリ	リチウムイオン ポリマー電池 (400mAh)	実測値 16 時間 (電池 2 個)	1.0Hz (地上局) 12.7Hz (SD カード)	マイコンに ATmega328P を使用. 通常は SD カードにデータを保存し, 通信周期に合わせてデータを地上に送信	取得したデータから高度を算出
2019 データロガー	リチウムイオン ポリマー電池 (400mAh)	計算値 37 時間 (電池 2 個)	7.5Hz ^{*1}	通信はせず データは SD カードに保存.	

*1 プログラムの見直しで向上の見込み

3.2.3 機械的性能

表 3 に 2017 および 2019 テレメトリ装置の機械的性能の比較を示す. 2017 度のテレメトリ装置と 2019 度開発のテレメトリ装置を比べると重量と機器単体の寸法が減少している. これは, 表面実装を導入したことにより従来のサイズよりさらに小さくし, かつテレメトリ装置の回路を省電力化することで小型軽量の電池を搭載できるようにしたためである. 2017 年の電池は 62.4g から 2019 年の電池は 9.0g と大幅に軽くなった.

表 3

テレメトリ装置	重量	寸法	耐環境性
2017 GPS	機器単体 : 49.0g 実装重量 : 135.0g	機器単体 : 45.0x66.0x36.0 mm 実装寸法 : 90.0x66.0x42.0 mm	防水性・耐振動性・ 水に浮く
2017 大気圧	機器単体 : 38.5g 実装重量 : 125.0g	機器単体 : 46.0x48.0x13.0 mm 実装寸法 : 90.0x66.0x42.0 mm	防水性・耐振動性・ 水に浮く
2017 データロガー	機器単体 : 29.6g 実装重量 : 92.3g	機器単体 : 56.0x68.0x18.0 mm 実装重量 : 90.0x66.0x42.0 mm	防水性・耐振動性・ 水に浮く
2019 テレメトリ	機器単体 : 24.8g 実装重量 : 108.4g	機器単体 : 57.0x45.0x10.0(35.0) mm 実装寸法 : 97.0x71.0x38.0 mm	防水性・耐振動性・ 水に浮く ^{*2}

*2 試験検証は未実施

4. 試験

開発したテレメトリ装置の性能を測るために以下の試験を行った。

4.1 動作時間の検証

表 2 に示した連続使用時間を計測するために動作電流の測定から求めた計算と実測を行った。結果を表 4 に示す。いずれの装置も要求である 8 時間以上の動作を大幅に超えていることが確認できた。

図 4、図 5、図 6、には実際に行った時間当たりの消費電力の試験結果を示す。

表 4

	データロガー (図 4)	大気圧テレメトリ (図 5)	GPS テレメトリ (図 6)
動作平均電流	21.6 mA	49.7 mA	58.3 mA
バッテリー動作時間 計算値	37 時間 6 分	16 時間 6 分	13 時間 42 分
バッテリー動作時間 実測値	—	16 時間 36 分	13 時間 52 分

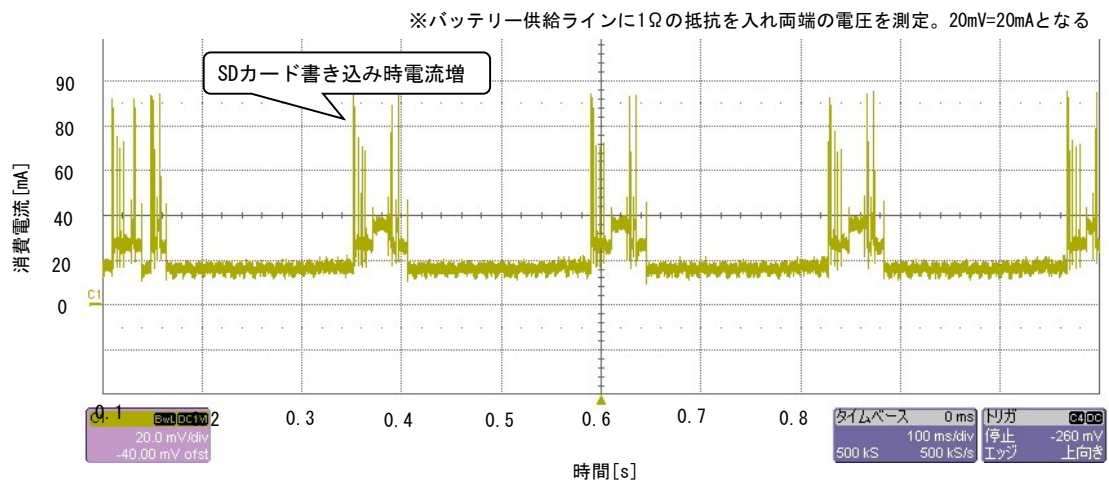


図 4 データロガーモードの消費電力

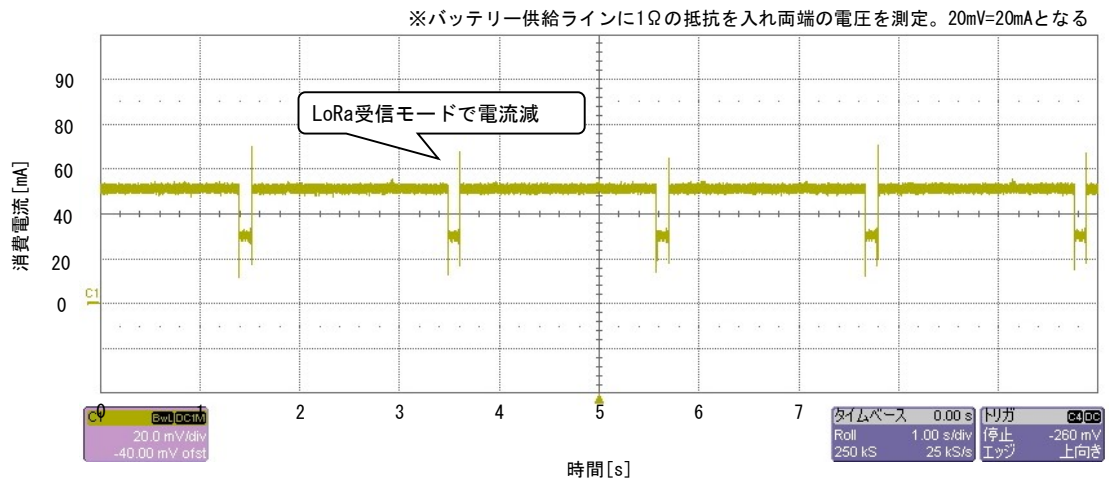


図 2 大気圧モードの消費電力

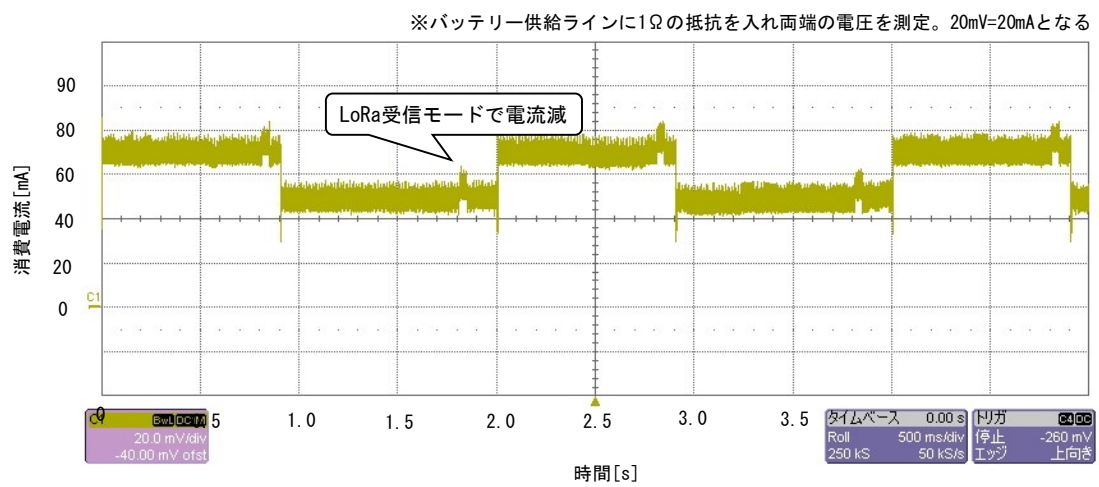


図 3 GPS モードの消費電力

4.2 通信実験

4.2.1 GPS データの NMEA フォーマット化

2017 GPS テレメトリ装置では受信した NMEA フォーマットデータを座標に変換してから地上局へ送信していたが、2019 テレメトリ装置では上記データを直接地上に送信するように変更した。これにより地上局側ではリアルタイムでマップ上に位置情報を表示することができた。

[2019-12-01 18:52:40.229] -92,			
[2019-12-01 18:52:40.229] \$GPGGA,095238.408,,,,,0.0,,M,M,,*41			
[2019-12-01 18:52:42.230] -91,			
[2019-12-01 18:52:42.230] \$GPGGA,095240.408,,,,,0.0,,M,M,,*4E			
[2019-12-01 18:52:44.214] -91,			
[2019-12-01 18:52:44.214] \$GPGGA,095242.408,,,,,0.0,,M,M,,*4C			
[2019-12-01 18:52:46.261] -93,			
[2019-12-01 18:52:46.261] \$GPGGA,095244.408,,,,,0.0,,M,M,,*4A			
[2019-12-01 18:52:48.231] -91,			
[2019-12-01 18:52:48.231] \$GPGGA,095246.408,,,,,0.0,,M,M,,*48			
[2019-12-01 18:52:50.231] -92,			
[2019-12-01 18:52:50.231] \$GPGGA,095248.408,,,,,0.0,,M,M,,*46			
[2019-12-01 18:52:52.232] -92,			
[2019-12-01 18:52:52.232] \$GPGGA,095250.408,,,,,0.0,,M,M,,*4F			
[2019-12-01 18:52:54.232] -92,			
[2019-12-01 18:52:54.232] \$GPGGA,095252.408,,,,,0.0,,M,M,,*4D			
[2019-12-01 18:52:56.233] -91,			
[2019-12-01 18:52:56.233] \$GPGGA,095254.408,,,,,0.0,,M,M,,*4B			
[2019-12-01 18:52:58.233] -91,			
[2019-12-01 18:52:58.233] \$GPGGA,095256.408,,,,,0.0,,M,M,,*49			
[2019-12-01 18:53:00.233] -92,			
[2019-12-01 18:53:00.233] \$GPGGA,095258.408,,,,,0.0,,M,M,,*47			
[2019-12-01 18:53:02.218] -91,			
[2019-12-01 18:53:02.218] \$GPGGA,095300.408,,,,,0.0,,M,M,,*4B			
[2019-12-01 18:53:04.234] -91,			
[2019-12-01 18:53:04.234] \$GPGGA,095302.408,,,,,0.0,,M,M,,*49			
[2019-12-01 18:53:06.219] -92,			
[2019-12-01 18:53:06.219] \$GPGGA,095304.408,,,,,0.0,,M,M,,*4F			
[2019-12-01 18:53:08.219] -91,			
[2019-12-01 18:53:08.219] \$GPGGA,095306.408,,,,,0.0,,M,M,,*4D			
[2019-12-01 18:53:10.220] -91,			
[2019-12-01 18:53:10.220] \$GPGGA,095308.408,,,,,0.0,,M,M,,*43			
[2019-12-01 18:53:12.220] -92,			
[2019-12-01 18:53:12.220] \$GPGGA,095310.408,,,,,0.0,,M,M,,*4A			
[2019-12-01 18:53:14.221] -92,			
[2019-12-01 18:53:14.221] \$GPGGA,095312.408,,,,,0.0,,M,M,,*48			
[2019-12-01 18:53:16.221] -92,			
[2019-12-01 18:53:16.221] \$GPGGA,095314.408,,,,,0.0,,M,M,,*4E			

図 4 NMEA フォーマットの受信データ

4.2.2 大気圧データ

2019 テレメトリ装置では大気圧データの保存方法を変更した。大気圧テレメトリのダウンリンクデータ（図 7）と同時に SD カードにもデータを保存できるようにプログラムを変更した（図 8）。これにより従来では 0.9Hz でしか大気圧データをダウンリンクできなかったものが、1Hz でダウンリンクすると同時に図 8 に示すように 12.7Hz のレートで SD カード内に記録できるようになった（図 7）。これにより、より早い現象、例えば音速突破時の気圧の急変のピークなどをより精度よく取得できることが期待できる。

.783]	-129,		受信電力[d
.783]	3190		時間[ms]
.783]	Temp[C]: 25.66		温度[°C]
.783]	Press [hPa]: 1013.56		気圧[mPa]
.783]	Height [m]: 7.24		高度[m]
.783]	---		
.783]			
.078]	-128,		
.078]	4247		
.078]	Temp[C]: 25.74		
.078]	Press [hPa]: 1013.58		
.091]	Height [m]: 7.08		
.091]	---		
.091]			
.125]	-128,		
.125]	5310		
.125]	Temp[C]: 25.79		
.152]	Press [hPa]: 1013.60		
.152]	Height [m]: 6.90		
.152]	---		
.152]			
.152]	6361		
.152]	Temp[C]: 25.82		
.152]	Press [hPa]: 1013.54		
.152]	Height [m]: 7.43		
.152]	---		

図 7 ダウンリンク側ロギングデータ

時間[ms]	気圧[hPa]	高度[m]	温度[°C]
208	1013.54	7.37	25.24
292	1013.52	7.55	25.28
366	1013.53	7.48	25.32
442	1013.53	7.49	25.35
518	1013.52	7.56	25.38
591	1013.55	7.33	25.4
665	1013.52	7.58	25.41
741	1013.56	7.23	25.43
815	1013.56	7.26	25.44
888	1013.52	7.62	25.46
964	1013.55	7.35	25.47
1038	1013.5	7.76	25.48
1120	1013.52	7.57	25.49
1193	1013.52	7.6	25.5
1267	1013.47	8.04	25.51
1343	1013.46	8.08	25.52
1417	1013.52	7.59	25.53
1492	1013.53	7.47	25.54
1570	1013.55	7.35	25.54
1644	1013.51	7.67	25.55
1720	1013.53	7.53	25.56
1800	1013.55	7.35	25.57
1873	1013.55	7.33	25.57
1949	1013.51	7.67	25.58
2023	1013.55	7.31	25.58

図 8 SD カード側ロギングデータ

4.2.3 充電時間

表 5 に 2019 テレメトリ装置の充電時間の実験結果を下記に示す。

表 5 放電状態からの充電時間

バッテリー1	4 時間 54 分
バッテリー2	4 時間 59 分

2 個のバッテリーを USB 充電器 2 系統で充電を行い計測した。充電時間は充電器の充電電流方式に依存する。使用している充電器の性能は 0.2C 充電のため、満充電（1C）までに 5 時間と仕様通りであることが確認できた。

2018 年度からの変更点として、充電時はバッテリーを基板から取り外すことなく充電できるようにした。また、充電中は他のマイコンやセンサへの電源供給を断っている。

5. 終わりに

2019 年度のテレメトリ開発では、従来のテレメトリ装置の大きな問題であった回路の信頼性を改善することができた。また株式会社フルハートジャパンと共同開発したことにより技量が求められ学生の手作りでは難しい表面実装を導入することにより小型化にも成功した。本開発品の試験は動作試験しかできておらず、打ち上げ実証は 2020 年 9 月の予定だが、すでに開発のテレメトリ装置の実績を引き継いで実装方法も改善したため、次回の打ち上げ試験では正常に動作する見込みである。

参考文献

- [1] 島崎拓巳, 「テレメトリ装置の開発と伊豆大島打ち上げ結果」, 8th UNISEC Space Takumi Conference, 2018.

- [2] 吉田誠,「ハイブリッドロケット用テレメトリ装置の開発と打ち上げ結果」, 宇宙輸送シンポジウム, 2018 年