

2023 年 8 月

第 19 回能代宇宙イベント打上実験

実験結果報告書



東京農工大学宇宙工学研究部 Lightus

## 目次

1. 団体概要 .....	3
2. ミッション概要 .....	4
2.1 ミッション項目 .....	4
2.2 サクセスクライテリア .....	4
3. 構造系機体設計 .....	5
3.1 機体概要 .....	5
3.2 減速装置 .....	7
3.3 ベアリング機構 .....	9
4. 電装系機体設計 .....	10
4.1 ロケット搭載ハードウェア .....	10
4.2 ロケット搭載ソフトウェア .....	14
4.3 地上局 .....	17
4.4 トラブル・変更点 .....	18
5. シミュレーション .....	20
5.1 シミュレーション概要 .....	20
5.2 現地シミュレーションについて .....	20
5.3 打上時の落下地点 .....	20
5.4 今回の課題点 .....	20
6. 推進系 .....	21
6.1 推進系概要 .....	21
6.2 GSE 改善点 .....	21
6.3 GSE に関して今後改善が必要な点 .....	23
6.4 燃焼試験結果 .....	24
6.5 打上当日に起きたトラブル .....	29
6.6 今後の方針 .....	29
7. 実験結果・考察 .....	30
7.1 当日の流れ .....	30
7.2 打上結果 .....	31
7.3 各班の反省・振り返り .....	33
8. 結言 .....	35
9. 謝辞 .....	35

## 1. 団体概要



図1 団体ロゴ

東京農工大学宇宙工学研究部 Lightus は、「机上だけでは学べない宇宙工学を実践的に学び身に付けること」を目的として宇宙工学に関連する活動を行う，東京農工大学工学部機械システム工学科公認のものづくりサークルである．2023 年現在，東京農工大学工学部の学部 1～3 年生を中心として，約 25 人のメンバーがハイブリッドロケットや CanSat の製作をメインに活動している．

## 2. ミッション概要

### 2.1 ミッション項目

Lightus は前回の 11 月大島が自作 GSE 完成後初の共同打上実験であったが、当日の GSE トラブルにより打上成功には至らなかった。よって、今回は GSE のロバスト性を高め、確実な打上成功に向けて手堅いミッション設定を行った。具体的なミッション項目は以下に示す通りである。

- 自団体 GSE による打上の成功
- 新しい解放機構の正常な動作
- カメラ回転抑制用ベアリングの効果確認
- 飛行データのダウンリンクの成功

### 2.2 サクセスクライテリア

表 2.2.1, 2.2.2, 2.2.3 に構造, 燃焼, 電装のサクセスクライテリアを示す。

表 2.2.1 構造系サクセスクライテリア

サクセスレベル	内容
Minimum	打ち上げ可能な機体の製作
Full	解放部の正常な作動, および解傘成功
Extra	パラシュートによるシミュレーション通りの減速, および破壊無しの落下

表 2.2.2 推進系サクセスクライテリア

サクセスレベル	内容
Minimum	GSE の改良を行い燃焼試験に成功する
Full	安全な GSE 運用と打上成功
Extra	自作した燃焼架台で燃焼試験を行う

表 2.2.3 電装系サクセスクライテリア

サクセスレベル	内容
Minimum	正常な離床検知・解放機構動作
Full	フライトデータの回収を行う 離床検知と解放のタイミングを加速度と気圧から決定する
Extra	ダウンリンクをリアルタイムで受信する

### 3. 構造系機体設計

#### 3.1 機体概要

ハイブリッドロケットモータには HyperTEK の J250 を使用した。機体には市販の GFRP チューブおよび PMMA チューブを使用し、アルミニウム合金製のカプラにボルトを用いて接続した。ノーズコーン、およびノーズコーンとボディチューブ間のカプラは 3D プリンタで作成した。パラシュートの放出には無火薬式の分離機構を用いた。

図 3.1.1 に実機写真、表 3.1.1 に機体諸元、図 3.1.2 に機体概観図、図 3.1.3 に機体組立図、表 3.1.2 に部品詳細を示す。



図 3.1.1 実機写真

表 3.1.1 機体諸元

機体名称	Twilight
機体ランク	ランク A
全長	1641 mm
外径	110 mm
酸化剤非充填時質量 $W$	5.5 kg
酸化剤非充填重心(機体後端から)	760 mm
全機圧力中心(機体後端から)	499 mm
目標到達高度	360 m
機体色	青
減速装置の色	青, 黄緑
使用エンジン	HyperTEK J250

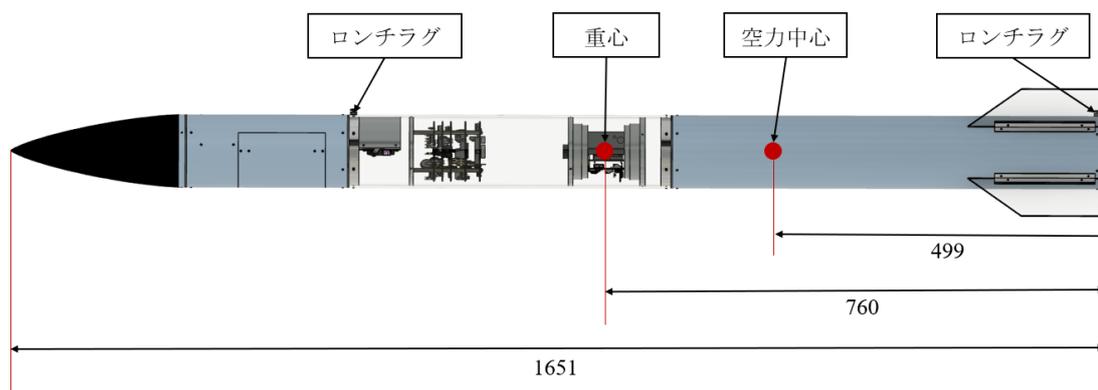


図 3.1.2 機体概観図

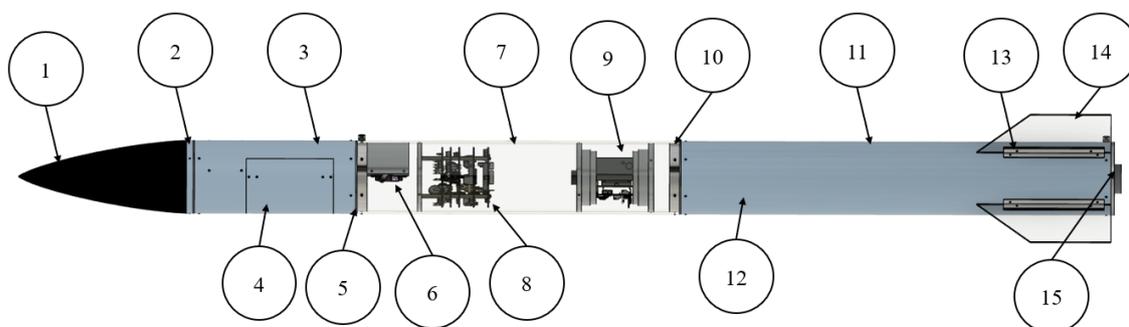


図 3.1.3 機体組立図

表 3.1.2 部品詳細

No.	部品名	材質	備考
1	ノーズコーン	PLA	3D プリンタで成形
2	カプラ A	PLA	3D プリンタで成形, ノーズコーン-解放チューブ間
3	解放チューブ	GFRP	市販の GFRP 円筒を使用, 肉厚 1.5 mm
4	解放扉	GFRP	No.3 から切り出し
5	カプラ B	A2017	旋盤で加工, 解放チューブ-電装チューブ間
6	解放機構	PLA 他	解放チューブの上下 2 箇所, 主に 3D プリンタで成形
7	電装チューブ	PMMA	市販の PMMA 円筒を使用, 肉厚 3 mm
8	電装部	-	4 章参照
9	ベアリング付カメラ	PLA 他	主に 3D プリンタで成形
10	カプラ C	A2017	旋盤で加工, 電装チューブ-燃焼チューブ間
11	燃焼チューブ	GFRP	市販の GFRP 円筒を使用, 肉厚 1.5 mm
12	センターリング	PLA	エンジンの軸方向固定用, ボディにボルトで固定
13	L 字アングル	A5056	フィン固定用
14	フィン	PMMA	市販の PMMA 板から切り出し
15	カプラ D	A2017	旋盤で加工, エンジン固定具を兼ねる

## 3.2 減速装置

### 3.2.1 パラシュート

減速装置としてパラシュートを採用した。諸元を表 3.2.1 に、解傘時の様子を図 3.2.1 にそれぞれ示す。

表 3.2.1 減速装置の諸元

減速装置	パラシュート
色	青, 黄緑
主傘の直径, スピルホール直径	1160 mm, 116 mm
材質	ナイロン



図 3.2.1 開傘時の様子

### 3.2.2 解放機構

本機体ではサーボを用いた横型開放機構を搭載した。頂点到達時に上下 2 個のサーボを作動させ、扉側のツメからサーボに接続されたアームが外れることでばね付き蝶番の反力によって扉が開く機構を作成した。パラシュートは、シュラウドラインとショックコードを接続するカラビナを外側に設置することにより、自重によって扉の開放後速やかに放出される。

解放機構の概観を図 3.2.2 に、部品の詳細を表 3.2.2 にそれぞれ示す。

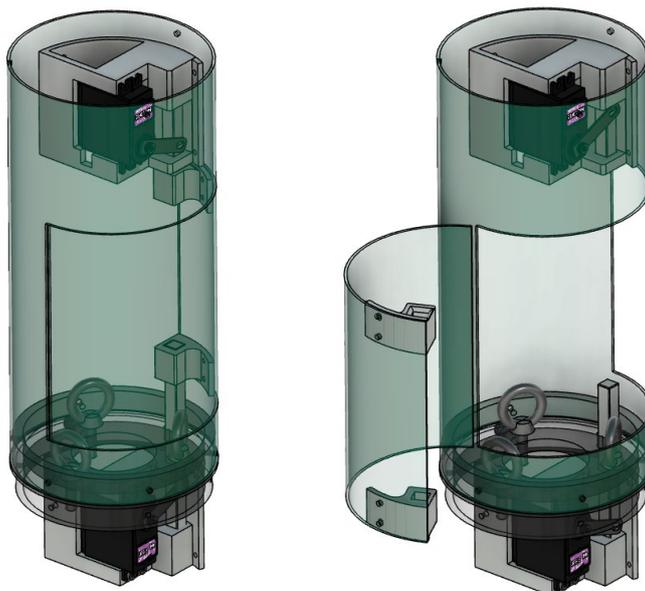


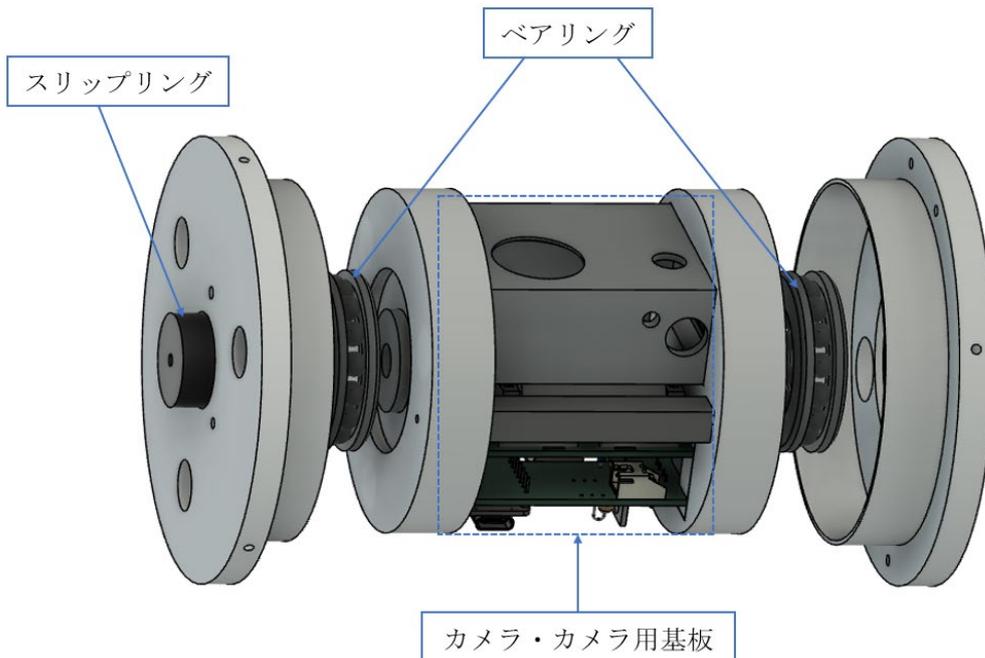
図 3.2.2 解放機構概観図

表 3.2.2 解放機構に用いた部品

部品名称	素材・詳細
解放チューブ	GFRP
解放扉	GFRP, 開放チューブから切り出し
サーボモータ	マイクロサーボ MG996R
サーボ固定具およびアーム	PLA, 3D プリンタで成形
扉側用ツメ	PLA, 3D プリンタで成形
蝶番	MISUMI 製スプリング蝶番 型番 HHSP38
M6 アイボルト	SS400, パラシュート固定具
カプラ B	A2017-T4, 解放チューブ・電装チューブ間のカプラとアイボルトの固定板を兼ねる

### 3.3 ベアリング機構

3.3.1 に、ベアリング機構の構成図を示す。



ベアリング機構は、映像への機体回転の影響を抑制する目的で立案，作製した。カメラとカメラ用の電装部，ベアリング，ボディチューブとの接続用コンポーネントから成る。また，カメラ用電装部はスリップリングを介して本体電装部と接続される。2つのベアリングでカメラ部分をはさむことで，機体からロール方向に独立して回転することができる。さらに重心位置に偏りをもたせることで，常に同じ方向を向いた映像を取得できることを期待した。

#### 4. 電装系機体設計

##### 4.1 ロケット搭載ハードウェア

##### 4.1.1 システム構成・全体概要

図 4.1.1 に電装系全体のブロック図, 図 4.1.2 に電装系の外観を示す。

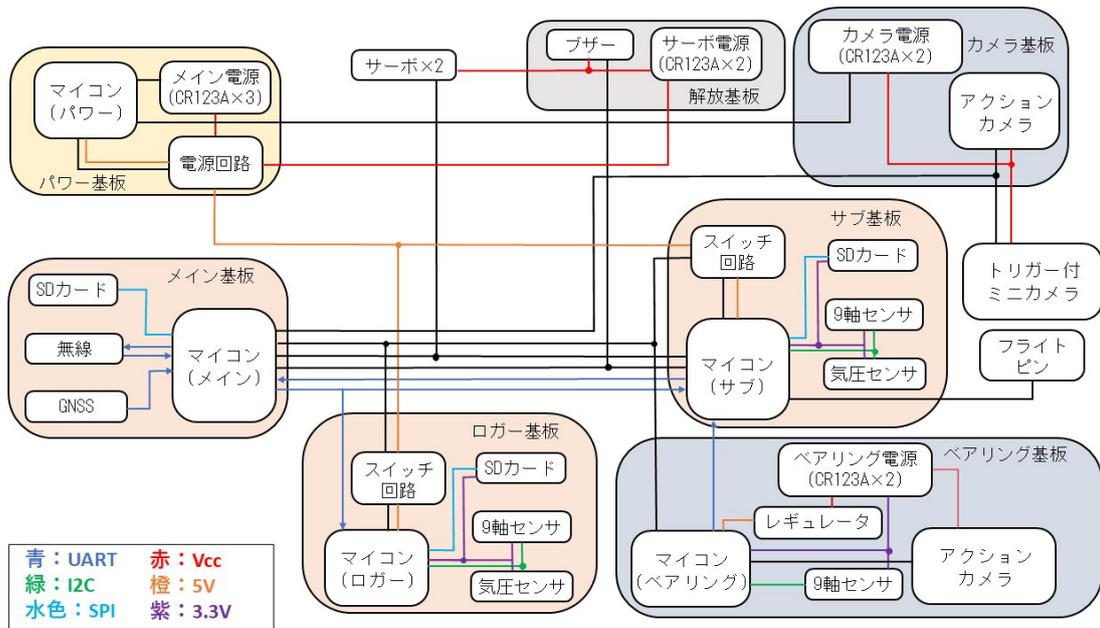


図 4.1.1 電装系ブロック図

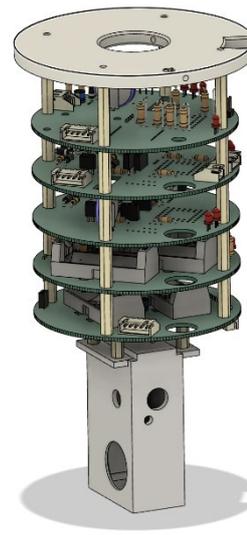
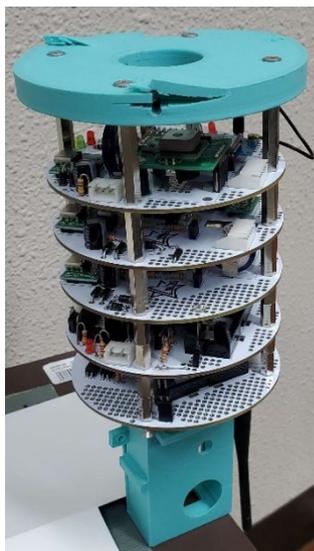


図 4.1.2 電装系の外観

本機では電装部には計 7 枚の基板及び 2 台のアクションカメラと 1 台のミニカメラを搭載し

た. 表 4.1.1 に各基板の名称・役割・機能の概要を示す.

表 4.1.1 各基板の名称・役割・機能の概要

基板名	役割	機能
メイン	制御	サブ基板とロガー基板に対して、モード・フェーズなどの飛行情報や動作指示を送信する。サブ基板が収集したデータの処理、通信モジュールの制御、アクションカメラの制御を行う。サブ基板、ロガー基板の電源投入を行う。
サブ	データ収集・保存、解放機構の制御	100Hz でセンサ測定値を収集・保存し、メイン基板に送信する。解放機構の制御を行う。
ロガー	データ収集・保存の冗長	250Hz でセンサ測定値を収集し保存する。
パワー	メイン・サブ・ロガー各基板の電源	メイン基板、サブ基板、ロガー基板に電源供給を行う。
カメラ	カメラ電源	アクションカメラへの電源供給を行う。
ベアリング	カメラとベアリングの制御・電源	ベアリング内アクションカメラの制御・電源供給とセンサ測定値の収集を行う。
解放	減速装置放出	サーボモータ、電子ブザーへの電源供給を行う。

## 4.1.2 搭載部品

表 4.1.2 に、主な搭載部品の一覧を示す。

表 4.1.2 主な搭載部品一覧

分類	型番	備考
マイコン	PGA2040	メイン基板
	PGA2040	サブ基板
	PGA2040	ロガー基板
	Seeeduino XIAO	パワー基板
	Seeeduino XIAO	ベアリング基板
通信機器	ES920LRB	メイン基板
サーボモータ	MG996R×2	解放機構
アクションカメラ	Movio M1034K	電装部下部に固定
	Movio M1034K	ベアリング基板に固定
ミニカメラ	トリガー付きミニスパイカメラ	電装部下部に固定
電源	CR123A×3	パワー基板
	CR123A×2	解放基板
	CR123A×2	ベアリング基板
	CR123A×2	カメラ基板
9 軸センサ	BMX055	サブ基板 サンプリングレート/100Hz
	BMX055	ロガー基板 サンプリングレート/250Hz
	BMX055	ベアリング基板 サンプリングレート/100Hz
温湿度気圧センサ	BME280	サブ基板 サンプリングレート/100Hz
	BME280	ロガー基板 サンプリングレート/250Hz
GNSS	GYSFDMAXB	メイン基板 サンプリングレート/10Hz
MicroSD カード	KIOXIA EXCERIA 16GB	メイン基板
	SanDisk 型番不明 8GB	サブ基板
	KIOXIA EXCERIA 16GB	ロガー基板
	KIOXIA EXCERIA 16GB×2	電装部アクションカメラ
	KIOXIA EXCERIA 16GB	ベアリング内アクションカメラ

### 4.1.3 電源系

表 4.1.3 に電源系統の一覧を示す。

表 4.1.3 電源系統の一覧

系統	電池の種類	個数	接続方法	用途
メイン電源	CR123A	3	直列	メイン基板 サブ基板 ロガー基板
サーボ電源	CR123A	2	直列	解放機構 メイン電源冗長系
カメラ電源	CR123A	2	直列	アクションカメラ用
ベアリング電源	CR123A	2	直列	ベアリング基板

サブ、ロガー両基板はメイン基板のデジタル出力で電源が投入され、切り替え後はオン状態を各基板で自己保持し、各基板のマイコンからオフ切り替えが行われる。搭載スペースの都合上、ベアリング基板はメイン基板から必要に応じてベアリングマイコンのスリープ投入/解除を行うことで代替とした。メイン電源及びサーボ電源からメイン、サブ、ロガー基板への電源供給ラインにダイオードを入れることで、メイン電源出力電圧がサブ電源出力電圧を下回った場合は、メイン基板、サブ基板、ロガー基板の電源が自動的にサーボ電源に切り替わるようにした。

瞬断対策として、パワー基板、メイン基板、サブ基板、ロガー基板に 1F の電池二重層コンデンサを配置することで、電源遮断時にも数秒のオーダーで各基板の動作を維持できるようにした。設計段階で、コンデンサによる駆動時にコンデンサ電圧の低下によるマイコンの動作不良を確認したため、各コンデンサに対して RC 回路を用いたタイマー回路を併設することで、コンデンサによる電源供給は指定秒数後に自動的に遮断されるようにした。

### 4.1.4 アクションカメラ

カメラ基板及びベアリング基板に搭載するアクションカメラとして、市販のアクションカメラを改造したものを利用した。バッテリーを取り外し、代わりに電源として USB 端子から 5V に降圧したカメラ、ベアリング電源をそれぞれ供給したほか、電源 on/off スイッチ及び録画開始/停止スイッチに対してフォトカプラを接続することで、マイコンからの信号によって電源や録画のスイッチを動作できるようにした。

## 4.2 ロケット搭載ソフトウェア

### 4.2.1 開発環境

ロケット搭載ソフトウェアについて、言語は Arduino、開発環境は Arduino IDE 及び Visual Studio Code を用いた。RP2040 用ソフトウェアの開発は、RP2040 用 Arduino ボードマネージャ―”Arduino-Pico” (<https://github.com/earlephilhower/arduino-pico>) を用いた。

### 4.2.2 状態遷移

表 4.2.1 に、モード及び各モードにおけるフェーズの一覧及び遷移条件を示す。

表 4.2.1 モード，フェーズの一覧及び遷移条件

モード	フェーズ	状態	遷移条件
Safety	Safety	発射前準備状態	電源投入または Safety や Flight 時にコマンド受信
Standby	Standby	発射前準備状態	Safety や Flight 時にコマンド受信
Flight	Launch	離床待機状態	Flight モード移行のコマンド受信
	Ascend	燃焼中及び慣性飛行中	離床検知
	Descent	パラシュートによる降下中	センサのデータによる解放条件の達成または離床検知から一定時間経過
Recovery	Recovery	陸着後	センサのデータによる陸着検知または離床検知から一定時間経過

### 4.2.3 離床検知・解放判定アルゴリズム

図 4.2.1 に離床検知のアルゴリズムの論理回路図を示す。

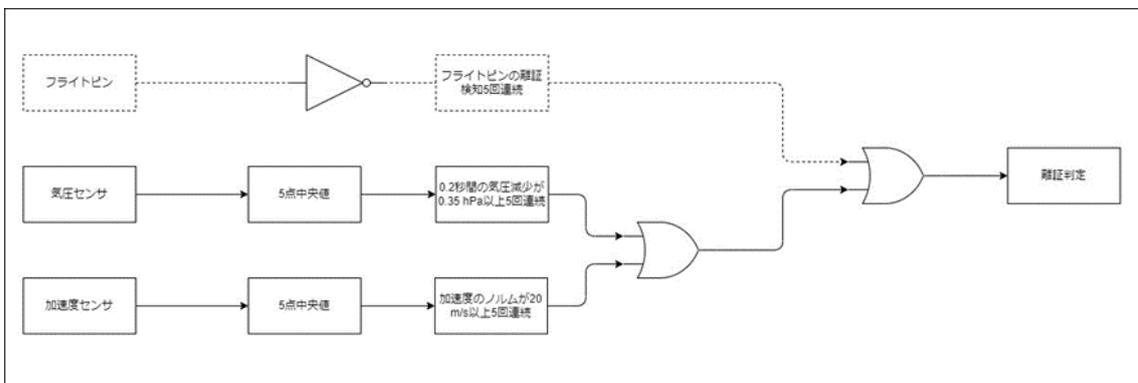


図 4.2.1 離床検知アルゴリズムの論理回路

離床検知は加速度センサ・気圧センサの計測データを用いて行う。フライトピンは冗長系で

あり、ランチャー挿入前にセンサとの通信が不可能になるなどのトラブルが発覚した場合にのみ用いることとした。

以下、時間当たりの気圧減少の閾値の決定方法について述べる。気圧と高度は式(1)で変換される<sup>[1]</sup>。

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

ここで、高度 $h$  [hPa]、気圧 $p$  [hPa]、海面気圧 $p_0$  [hPa]、気温 $T$  [°C]である。式(1)を時間微分することにより、式(2)を得る。

$$\frac{dp}{dt} = \frac{0.0065p_0}{T + 273.15} \left( \frac{0.0065p_0}{T + 273.15} h + 1 \right)^{-6.257} \frac{dh}{dt} \quad (2)$$

式(2)に対して、 $h$ に射点の海拔高度、 $T$ に射点温度（本実験では能代市の8月の平均気温を用いた）、 $dh/dt$ にランチクリア速度を代入することにより、ランチクリア時の単位時間当たりの気圧増加値 $dp/dt|_{t=0}$ を推定することができる。判定が行われる発射から1秒間においてエンジンは燃焼中であり、鉛直上向きの速度は増大することから、 $dp/dt|_{t=0}$ は発射から1秒間における $dp/dt$ の最小値となるため、 $dp/dt|_{t=0}$ を単位時間当たりの気圧増加（減少）値の閾値として用いることで、気圧測定値による離床判定が可能である。ランチクリアが想定よりも小さくなる可能性を考慮し、本実験では $dp/dt|_{t=0}$ の70%を閾値として用いた。

図 4.3.2 に解放機構動作判定のアルゴリズムの論理回路を示す。

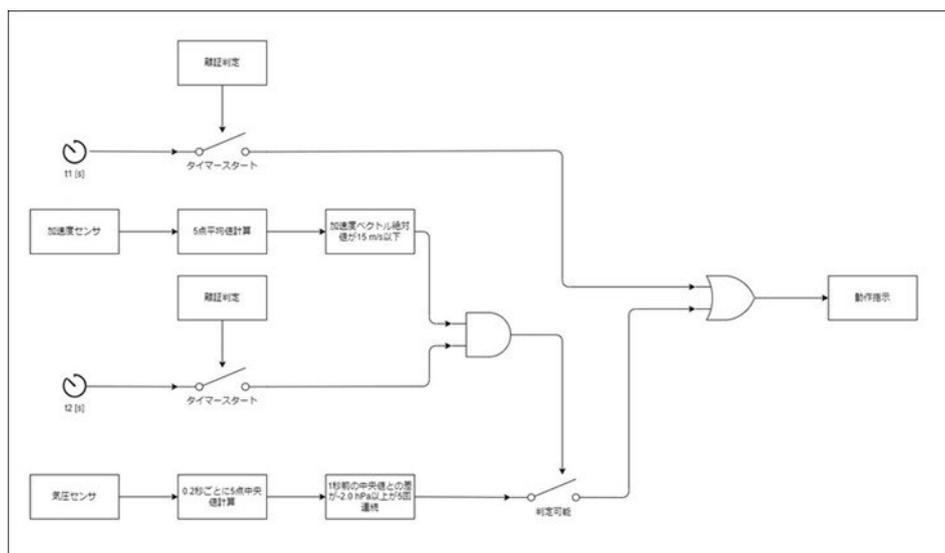


図 4.2.2 解放機構動作判定アルゴリズムの論理回路

タイマー時間 $t_1 = 5.0 \text{ m/s}$ ,  $t_2$ は現地シミュレーションで得られる頂点到達時刻とした。気圧センサによる判定に対して、加速度ベクトルの絶対値が $15 \text{ m/s}$ 以下である、及び離床検知から 5 秒以上経過しているという条件を加えることで、燃焼中の減速装置の放出を防いだ。

#### 4.2.4 基板間通信

各基板搭載のマイコン間の通信として UART を用いた。データは各基板間でバイナリ配列として送受信した。送信したい各変数をバイナリに変換したうえで 1 つのバイナリ配列として結合し、終端確認のため COBS へのエンコード、チェックサムとして先頭への COBS 配列長の付与を行ったものを 1 パケットとした。一連のバイナリ配列の操作には自作の Arduino ライブラリを用いた。

#### 4.2.5 無線通信

機体-地上局間の通信用のモジュールとして、ES920LR を用いた。表 4.3.2 に、ES920LR の諸元及び使用した周波数等の設定を示す。

表 4.2.2 ES920LR の諸元及び使用した周波数, チャンネル

項目	仕様内容
型名	ES920LRB
準拠法	ARIB STD-T108
周波数	920.6~928.0 MHz
変調方式	LoRa 変調(スペクトラム拡散)
チャンネル数	12ch(帯域幅 500kHz の場合)
中心周波数	923.2
帯域幅	500kHz
チャンネル番号(ARIB)	35

Flight モードでは、3 軸加速度の絶対値、気圧高度、クォータニアン、GNSS 位置情報、モード・フェーズ情報を基板間 UART と同様の形式で一連のバイナリ配列に変換したものを、1 パケットとして 1Hz で地上局に送信する。

### 4.3 地上局

機体へのコマンド送信や機体からのダウンリンクの受信，テレメトリーの可視化を目的に，通信地上局ソフトウェアを開発した．図 4.4.1 に，開発した地上局の GUI を示す．

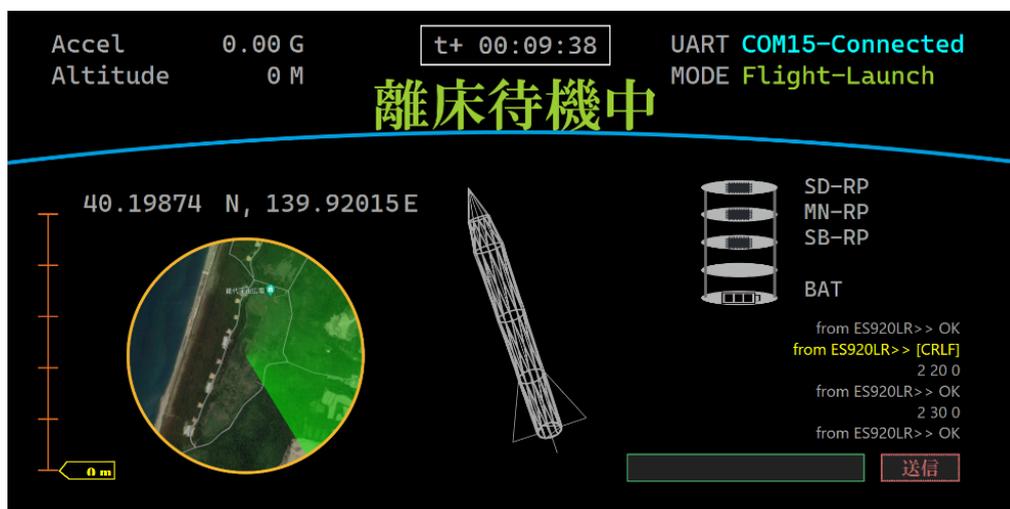


図 4.4.1 通信地上局ソフトウェアの GUI

本ソフトの開発について，言語は C#，開発環境は Visual Studio 2022 を用いた．加速度絶対値，気圧高度，GNSS 座標，モード・フェーズ情報を機体からダウンリンクされたテレメトリーをもとにリアルタイムで表示することが可能である．機体姿勢及び電源電圧の表示機能も実装する予定であったが，開発が間に合わず，実装を断念した．本ソフトは実験終了後も引き続き開発を進めており，本報告書執筆時点では，機体姿勢，地上局通信機からの応答の表示機能を新たに実装済である．今後は電源電圧の表示機能及び定期的な通信確認機能の実装，特に機体座標についてより見やすい GUI への改良を行う予定である．

## 4.4 トラブル・変更点

### 4.4.1 製作時に行った仕様変更

計段階で発生したトラブルと、それに伴い変更した設計について示す。

- 全体：ノイズの発生  
電装系全体，特に電源ラインやマイコンからサーボへの PWM へのラインにノイズが発生していた。特に，電源ラインのノイズは影響が大きく，アクションカメラを中心に動作が不安定となった。電源ラインのノイズについては，冗長ラインを切断し，Vcc—GND 間にセラミックコンデンサを設置することで対処した。
- メイン基板：CPU クロック周波数の固定  
設計段階では，消費電力削減のため，Flight モードとそれ以外でメインマイコンのクロック周波数を変更することを想定していたが，クロック周波数を変更した際にマイコンがフリーズすることが確認されたため，当機能は削除した。
- メイン基板，サブ基板：離床判定，解放判定のサブ基板への変更  
当初はサブ基板から送信されたセンサ測定値をもとに，メイン基板が離床判定や解放判定を行う予定だった。しかし，離床判定の冗長系となるフライトピンをサブ基板に実装したことで，メイン—サブ基板間の通信にトラブルが発生したときに判定が行えなくなることを考慮し，センサ測定値を用いた離床判定，解放判定の機能をメイン基板からサブ基板に移動した。
- メイン基板，サブ基板，解放基板：サーボ用 PWM の系統数の削減  
サーボへの PWM 信号のラインに対して，メイン，サブ両基板に信号線を接続し，必要に応じてサーボ動作指示に使用するマイコンをメイン，サブどちらか切り替えることを想定した。しかし，ソフトのミスにより 2 つのマイコンの動作指示が重なってサーボが誤動作を起こすことが多発したため，メインから解放基板への PWM 信号ラインは削除した。
- 解放基板：サーボの解放動作時の振動  
サーボが解放動作を行う際に振動する問題が発生した。サーボの解放動作における動作角を小さくすることで対処した。
- カメラ基板，ベアリング基板：レギュレータの削除  
電池から 5V レギュレータを介してカメラへ電源を供給した際，カメラへの供給電流量または電圧が足りず正常に起動しなかったため，電源からの直接供給に切り替えた。

#### 4.4.2 当日発生したトラブル

- **メイン-サブ間 UART の不具合**

内容：現地入り後、ソフトの確認を行っていた際に、メイン基板から UART で送信されたバイナリ配列がサブ側で正常にデコードされていないことが判明した。

原因：通信に用いる自作ライブラリの仕様上、パケット内に含まれる変数型などの設定を通信する双方で合わせる必要があるであったが、使用する UART の系統が多かったことやそもそもライブラリが不親切で使用方法が複雑であったことで、直前期に行った最終的なソフト統合作業のいずれかの段階でこの通信設定に関するコードにバグが生じた。

対処：ライブラリの使用方法の問題及びそもそものソフト全体の複雑さからバグ位置を特定することができなかつたため、メイン-サブ間の UART 通信を停止した。これにより、地上局へのテレメトリーの送信、メイン基板からサブ基板及びロガー基板への電源 off 指示の機能が停止した。離床判定はフライトピンにより行うものとした。
- **地上局からのモード遷移コマンドの送信の失敗**

内容：点火シーケンス直前、地上局から機体に対して Flight モード遷移を指示するコマンドの送信を試みたが、送信が行われなかった。結果、ロガー基板への電源投入及び 2 つのアクションカメラの起動が行われなかった。

原因：コマンド送信の直前に、地上局ハードウェアの接触不良により ES920LR が再起動された。本来、再起動後には ES920LR を通信用のモードに切り替える操作が必要で、それを行わない状態でバイナリ配列を送信するとエラーが返答される。しかし、地上局ソフトウェアにエラー応答を表示する機能がなく、コマンドが ES920LR に対して適切に送信されていないことを確認できなかった。

対処：実験終了後、地上局ソフトウェアについて ES920LR へのデータの送信に対する返答を表示する機能を追加した。
- **SD カードのソフトウェア的な破損**

内容：機体から回収した MicroSD カードのうち、データログが行われていたと思われるサブ基板のものについて、カードがソフト的に破損しておりファイルを開くことができなかつた。

原因：直前に MicroSD カードスロットのカードをひっかけるツメの一部が損傷しており、接触不良が起きやすい状態にあった。陸着衝撃で書き込み中の SD カードに接触不良が発生したこと、それにもかかわらずサブマイコンから SD カードへデータの書き込みが行われ続けたことがカード損傷の原因であると考えられるが、正確な原因は特定できていない。

## 5. シミュレーション

### 5.1 シミュレーション概要

Barrowman flow を用いて算出した抗力係数, 法線力傾斜, 空圧中心位置, 実際に制作した機体を実測して得られた重心や全長などの実測値, CAD によって得られたモーメントを入力し, FROGS を用いて飛行シミュレーションを行った.

飛行シミュレーションによって得られた落下分散を, Google my map を用いて射点付近の衛星写真上に表示し, 提出する落下分散図とした.

### 5.2 現地シミュレーションについて

ウインドウ時は北東の風であったが風速は打上可能な範囲であったため, 風待ちは行わなかった. 現地シミュレーションは滞りなく行うことができた.

### 5.3 打上時の落下地点

打ち上げ後機体が落下した地点は, 距離方角共におおむね予測通りであった. これによりシミュレーション結果の妥当性が確認できた.

### 5.4 今回の課題点

現在使用している FROGS の計算における問題点をいくつか指摘いただいたが, シミュレーションソフトが現状ブラックボックスであるため, プログラムの理解または自団体内での新規作成.

## 6 推進系

### 6.1 推進系概要

今回推進系は大きなトラブル等なく無事打上に成功し、サクセスレベルでは Full までを達成することが出来た。残念ながら自作燃焼架台については製作が間に合わず、SHARXS 様と共同で燃焼試験をさせていただくことで推力履歴の再現性を確認した。なお、今回使用したエンジンは HyperTEK J250 であるため、エンジンの詳細については省略する。

### 6.2 GSE 改善点

前回の 11 月大島では当日の GSE トラブルによって打上成功することが出来なかった。打上終了後の振り返りで GSE の構成に一部変更が必要な事及び、実用上不便な点が発覚した。よってこの項では 11 月大島より後に変更を加えた点について記載する。

なお、本項及び、11 月大島の実験報告書内 6 章 3 項「打上直前に発覚した問題点」において言及がない部分に関しては重要な変更は行っていない。よって全体の配管図や部品構成、電装構成に関しては省略する。

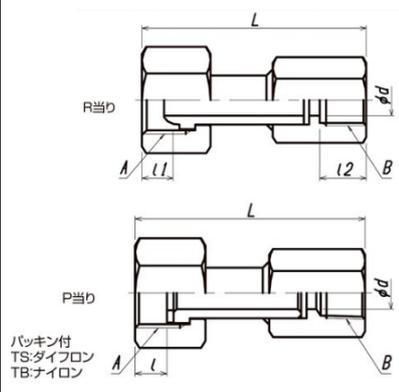
上記必要な場合は今回の推進供給系中間報告書か 11 月大島の実験報告書を参照されたい。

危険度	項目	原因	対処
注意	電装設計の不備によるイグナイタ不点火への対応	イグナイタを制御するためのリレーに、必要以上の大きさの抵抗が入っていて一次側電流が不足したため。	回路内で、コントローラーとリレーの一次側合わせて 660 Ω の抵抗が入っていたため 100 Ω × 2 = 200 Ω に変更した。
補足		リレーは秋月電子のキット品を使用しているため既に一次側の回路に抵抗が内包されていた。これに LAN ケーブルを介してコントローラーの基盤が繋がっているが、こちらでも LED を取り付けるために追加で抵抗をつけてしまったことが設計の不備につながった。 制御用の回路に動作確認 LED をつける際は、LED そのものの電圧降下（及び抵抗の追加）による電流値の変化に十分気を付ける必要がある。	
なし	サテライト BOX の外箱変更	持ち手がなく、運搬に不便であった。また、透明なアクリル製であったため夏の日差しに不安があった。	外箱を買い替えた。
微小	ユニバーサル基板の使用を辞めてプリント基板へ差し替えた	配線がニクロム線むき出しであり接触の危険があったこと及び見た目が悪いこと	プリント基板を作成し、さらに量産することで、故障時に簡単に取り換えられるようにした。

中程度	電磁弁制御回路の変更	電磁弁の制御に使用していたフォトカプラ TLP225A が適正電流値範囲を逸脱していたため.	フォトカプラで直接電磁弁の電流を ON/OFF するのではなく、FET とフォトカプラを併用するように変更した.
補足	<p>TLP225A の最大電流は 500mA であるが、電磁弁は 10W 程度のものが多いため 12V で動作する場合これを超過する。類似品に TLP241A があり、こちらは 2A まで流すことが出来るが、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・フォトカプラは大電流を流したとき発熱が大きい</li> <li>・一方で三端子 FET などは一次側と二次側が絶縁されておらず、一次側に電流が漏れるとコントローラーの基板まですべて交換となってしまう。</li> </ul> <p>以上の理由から、フォトカプラと FET を併用することとした。新しい回路図は以下に示すとおりである。</p>		

### 6.3 GSE に関して今後改善が必要な点

今回の打上実験を通じて、GSE にさらなる改良が必要と分かった。

危険度	項目	現状	改良点
中程度	イグナイタの安全設計	エマストがサテライト BOX 側にしかないため、点火シーケンス中に安全ロックをかけることが出来ない。	コントローラーの Fire 系統にキーロックを追加し、イグナイタの誤操作を未然に防ぐ。
中程度	N2O 系統のボンベ継手	N2O ボンベにつながる継手にパッキンを使用しないタイプの継手を使用していたが、不適切と指摘を頂いた。	同径のパッキンを使用するタイプに差し替える。
補足		 <p>これまで使用していた継手 TB144 は左図の上、R 当りのタイプであり、シールはパッキンではなく丸い部分を押し当てて行う。これまでリークは発生していなかったが、継手の金属に傷が蓄積すると今後発生する可能性が高いと指摘を頂いたため変更を行う。</p> <p>変更後の継手 TB152 は左図の下、P 当りのタイプであり、パッキンを使用してシールを行う。</p>	
なし	酸素系統電磁弁の変更	酸素系統に使用している電磁弁 VX234HZ1DXB が入手不可能になり、予備部品をそろえることが出来なくなった。	配管径 Rc1/4 及び動作電圧 12V が同じものを探し置換する。 現段階で FFB-5108A5P3A4 が候補に挙げられている。
微小	プリント基板設計変更	LAN の配線の順番がコントローラー側とサテライト BOX 側で一致しておらず、回路図で番号を確認しながらはんだ付けを行う必要がある。	設計者がいなくなった時配線ミスにつながる危険があるため、LAN の配線順番をそろえる。

#### 6.4 燃焼試験結果

SHARXS 様と共同で燃焼試験を行い、GSE は自団体のものを使用したが燃焼架台はお借りした。  
以下に燃焼試験中の写真を掲載する



図 3.1 GSE 展開中の様子

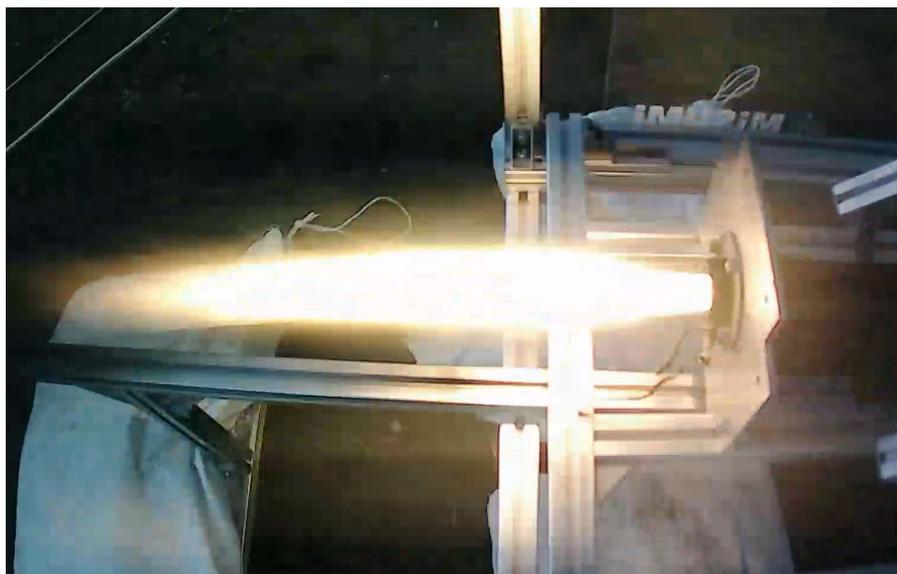


図 3.2 燃焼中の写真



図 3.3 スイッチコントローラー

燃焼試験で得られた推力履歴を以下に示す。オレンジが 6/10 に実施した分，青が 6/25 に実施した分である。グラフの様子が異なるのは，6/10 実施分は測定機器の設定によりローパスフィルタがかかってしまっているためである。

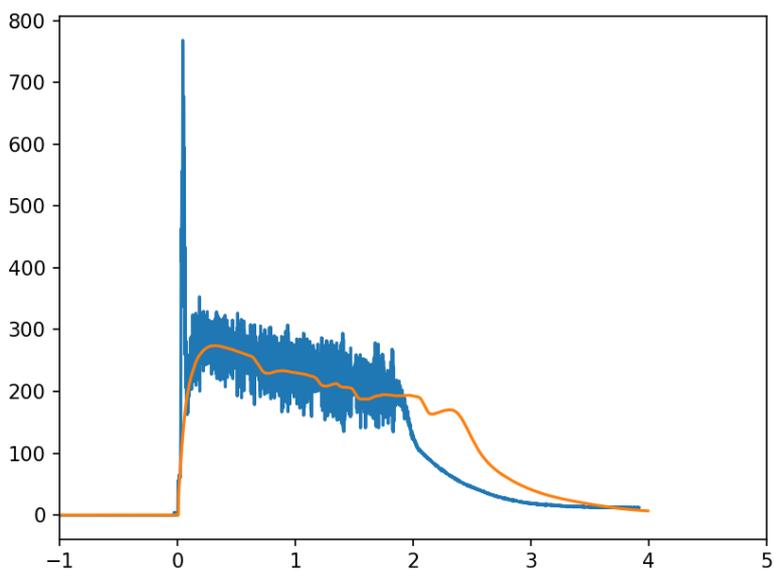


図 4.1 推力履歴

#### 6.4.1 推力履歴に関する考察

比較のため、6/25 実施分及び昨年の 10/2 実施分にも後から Python でローパスフィルタをかけプロットすると、図 4.2 のようになった。赤い線は ThrustCurve.org の公称値を表している。

昨年 10/2 実施後に酸素電磁弁の変更があり、流量が変化している可能性がある。

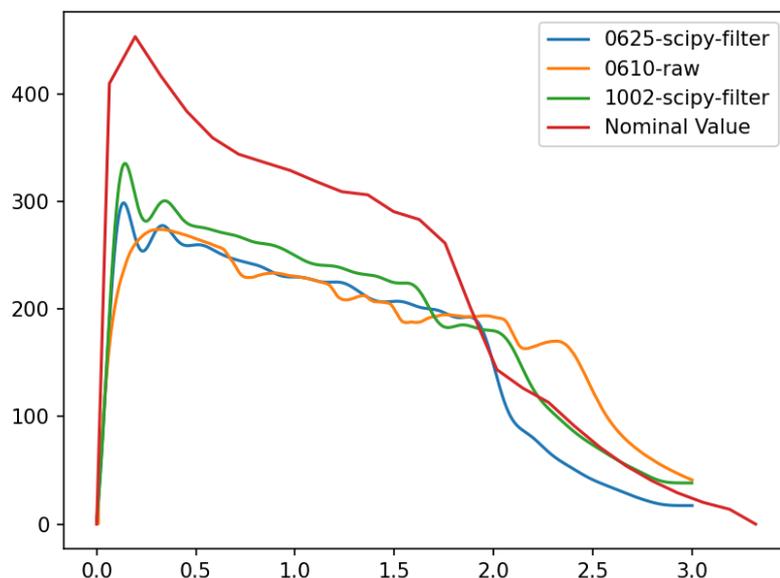


図 4.2 過去 3 回の燃焼試験比較

上図から分かる通り、3 回の燃焼試験では定常燃焼中はほとんど同じ推力履歴をたどっている。6/10 実施分のみローパスフィルタが測定機器によってかけられているため推力の初期スパイクがうまく観測できていないが、6/25、10/2 実施分について初期スパイクの形がほとんど同一である。この点において、所有する GSE を用いての燃焼は再現性が取れてきたといえるだろう。

また、酸素供給系の電磁弁オリフィス径が変更されているにも関わらず 6/25、10/2 実施分の推力履歴に大きな違いはない。よって前回の実験報告書における力積が小さいことに関する記述、「予備燃焼が長く結果として本燃焼が短くなったことなどが考えられる。」という記載は適切ではなく、実際には予備燃焼の影響は大きくないと思われる。

さらに、公称値と 3 回の実験を比較すると定常燃焼が終了する時刻は同じかむしろ公称値のほうが僅かに早く、「本燃焼が（公称値よりも）短くなった」という記載に関しては燃焼時間と作動時間を混同していたことに起因すると思われる。この原因として、定義のややこしさが考えられる。

### 6.4.2 推力履歴に関する定義について

以下に、審査ガイドライン及び HyperTEK の時間に関する定義をまとめる。

表 4.2 推力履歴の時間に関する定義

定義元	定義名	定義内容
審査ガイドライン	作動時間	推力が 10%以上の区間
審査ガイドライン	燃焼時間	上記作動時間の開始から後方接線角二等分線の交点まで
HyperTEK	Burn Time	推力が 5%以上の区間 (と思われる)

上記の定義に基づき、それぞれの位置を以下の図に示す。

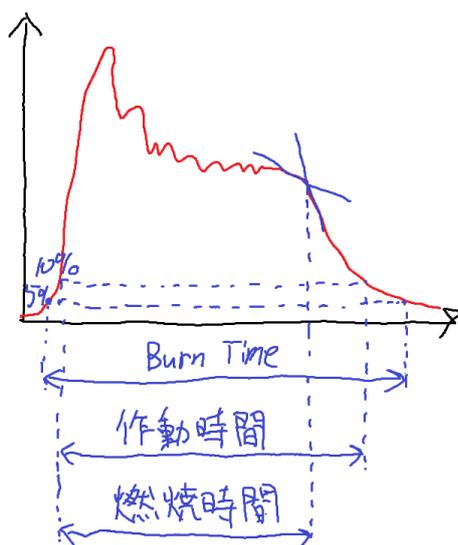


図 4.3 推力履歴の時間に関する定義の図

上図から分かる通り、HyperTEK の Burn Time はほぼ作動時間の事を示しており、一方で”Burn Time”の直訳は「燃焼時間」であるため非常に誤解を招きやすい。また、後方二等分線を過ぎてからは鎮火に向かっていて定常な作動とは言えないため、後方二等分線の時点までを作動時間としたほうが日本語の意味から考えても適切であると考え。よって学生ロケットの審査の中だけでも定義を再検討してもよいのではないだろうか。

### 6.4.3 推力履歴の実測値と公称値の乖離に関する再考察

弊団体の GSE を用いて HyperTEK エンジン を燃焼させたとき力積が公称値の 2/3 程度になる現象が複数回発生している。これに対する前回大島における「燃焼時間が短いことに起因する」という考察は適切ではないと思われるため、ここで再考察を行う。

表 4.3 6/25 実施分の推力履歴諸元と公称値との誤差

項目	公称値	実測値	誤差%
燃焼時間	-	1.90 s	-
作動時間	3.00 s	2.22 s	-26.0%
最大推力	501 N	762 N	52.1%
トータルインパルス	745 Ns	489 Ns	-34.4%
平均推力	248 N	220 N	-11.3%

図 4.2 を見ると公称値と大きく外れた履歴を辿っているのは定常燃焼中の推力が公称値の 3/4 程度で推移していることが、トータルインパルスに大きな影響を与えていると思われる。作動時間は 26% の誤差があるが、定常燃焼中に比べると力積への影響は微小である。

よって力積が少なくなる現象は、燃焼時間が短いことが原因ではなく定常燃焼中になんらかの原因で正常な燃焼が出来ていないことが原因である。

まず考えられる原因としてオリフィス径が 0.125inch ではないものを使用した可能性だが、これに関しては 6/10 の段階で疑念を持ち 6/25 では入念なチェックを行ったので排除できる。

次に考えられるのが酸化剤と燃料が適切に完全燃焼していないことである。ただし、現時点ではなぜ完全燃焼していないのかは不明である。今後の燃焼試験で原因を究明していきたい。

## 6.5 打上当日に起きたトラブル

危険度	項目	原因	対処
注意	打上後ランチャーに傷が見つかった	ランチラグの不備によるものか、運が悪かったのかは不明である。	現時点では無し
中程度	燃焼責任者が熱中症で途中離脱した。	本人が休憩できる時間に休憩していなかった、ことが原因である。	夏場は強制的に休憩をさせるよう上級生が注意する。全体にも危機管理意識を喚起する。

## 6.6 今後の方針

今回は SHARXS 様に燃焼架台をお借りして燃焼試験を行ったが、次の燃焼試験では今度こそ必ず自団体で完結できるように製作を進める。現段階では 12 月初頭の実施を目指している。

推進系としては、燃焼試験完成後自作エンジンの製作を始めたい。純粹に製作したい面もあるが、現在 HyperTEK のエンジンが入手しづらくなってきており、早期に HyperTEK への依存を解決しなければならないという側面がある。よってまずは HyperTEK J250 に近い性能の者を製作したい。

## 7 実験結果・考察

### 7.1 当日の流れ

#### 8月18日

- 7:30 射場入り
- 14:50 現地審査不合格
- 17:00 完全撤収

#### 8月19日

- 7:30 射場入り
- 8:40 イグナイタ試験完了
- 9:00 開会式
- 10:00 N<sub>2</sub> 開栓
- 10:30 現地審査合格
- 11:00 シミュレーション合格, リークチェック終了
- 12:20 ロンチャー挿入開始
- 13:00 オンタイム打上成功
- 17:00 完全撤収

#### 8月21日 機体捜索1日目

- 9:00 射場入り
- 9:30 機体捜索開始
- 16:00 機体現地捜索打ち切り
- 17:00 完全撤収
- 21:00 空撮映像から機体発見

#### 8月22日 機体捜索2日目

- 7:00 射場入り
- 7:50 機体捜索開始
- 8.23 機体発見
- 9:00 完全撤収

## 7.2 打上結果

8 月 19 日 13:00 に打ち上げが行われた。機体は正常にランチクリアし、ランチクリアから約 12 秒後、頂点到達から約 2 秒後に解放機構が動作、パラシュートが開傘した。開傘衝撃によりパラシュートが破損したため想定通りの減速効果は得られなかったものの、機体は減速落下し、保安区域内に着陸した。

回収後、機体への記録開始コマンドの送信失敗により、機体に搭載した 2 つのアクションカメラ、並びに 2 つあるセンサ測定値記録系のうち 1 つが動作しなかったこと、もう一方の記録系についてもデータを記録した SD カードが破損したことが確認された。記録が行われたと思われるもう 1 つの記録系についても、それらしいファイルが保存されていることは確認できたが、SD カードが破損しておりファイルを開くことができなかった。また、前述のコマンド送信失敗により飛行時のモードに遷移しなかったことで回収用のモードへの遷移も行われず、位置情報の地上局への送信が行われなかったため、捜索に大きく時間を要することとなった。

21 日の機体捜索では、複数地点からの映像や飛行方位角をもとに算出した予想落下地点を中心に捜索を行ったが、発見には至らなかった。しかし、その日の夜にドローンによる空撮映像内に機体を発見し、映像をもとにおおよその落下地点を特定した。22 日、特定した地点で捜索を行ったところ、8:30 頃に機体を発見、全コンポーネントの回収に成功した。

図 7.2.1 に回収時の様子、図 7.2.2 に回収後の機体の様子を示す。



図 7.2.1 回収時の様子



図 7.2.2 回収後の様子

回収した機体には、着陸の衝撃や長時間直射日光にさらされたことが原因と思われる損傷が見られた。表 7.2.1 に損傷部分の一覧を示す。

表 7.2.1 打上後損傷部分一覧

ノーズコーン	直射日光下における変形
パラシュート	開傘時衝撃による破壊
解放機構	落下時衝撃による蝶番の変形
電装チューブ	カプラとの接続部分の落下時衝撃による破壊
フィン	落下時衝撃による破壊

以上の結果を踏まえて、2 章に記載したサクセスクライテリアの達成状況を表 7.2.2 に示す。

表 7.2.2 各班のサクセスクライテリア達成状況

	構造班	燃焼班	電装班
Minimum	○	○	○
Full	○	○	×
Extra	×	×	×

### 7.3 各班の反省・振り返り

#### ・ 構造班

(スケジュール管理)

春休みに機体製作を行う予定だったが想定通りの進捗を得ることができず、詳細設計の完了が5月頭、製作が能代直前までずれこむことになった。とくに、今回の機体は従来よりも3Dプリンタによる成形箇所が多く、印刷時間の確保や他班との兼ね合いについての見通しが甘かったと感じる。上記のほかには電装班との連携不足があった。電装部分の加工は電装班の完成を待つ必要があったため、結果として打上の前日まで加工作業が生じた。

(製作中の事故)

ボール盤の使用中にアルミがドリルに噛んで暴走したことで指先を裂傷する事故があった。ワークの固定が甘かったこと、ボール盤の性能に対して大きな径のドリルを用いたことが原因だった。事故は班内で共有し、固定の確認や1人では作業を避ける等再発防止に努めた。

(現地審査)

18日にX予定で枠をいただいたが、現地審査で合格ができず翌日に延期となった。フィンの計測方法および許容誤差の認知不足、および責任者による確認不足が原因である。前機体製作時の反省点であった重心位置や重量のずれは複数回確認を行い、許容誤差内に収めることができた。

(解放機構)

解放機構は離陸後約12秒で正常に作動した。パラシュートは解放機構の動作後速やかに放出され、開傘したことが確認できた。しかしながら、開傘直後にスピンホール上から半径方向に複数箇所の裂け目が生じたため、想定通りの減速効果は得られなかった。裂け目が生じた原因として、解放機構の動作が頂点で行われなかったことによる抗力の増加、縫合時の補強不足、布の強度不足が考えられる。

(落下時の破壊)

回収後の機体は、特にPMMA製の電装チューブとフィンに大きな損傷があった。パラシュートによる減速が十分でなかったことに加え、機体に用いる際の耐衝撃性の検討が不十分だった。

#### ・ 燃焼班

燃焼班は今回目立ったトラブル等なく打上を行うことが出来た。また、下級生のGSE展開練度も確実に向上してきておりこのまま引き継ぎを行えると感じている。一方でインシデントが発生した時の対応に関してはまだ粗が目立つため、今後の経験で改善してもらいたい。

燃焼架台の製作に関して、当初3月の完成を目標にしていたが現段階になっても完成しておらず、最終的には12月ごろまでずれ込むと目算される。これに関して、部として知識や経験、人材が足りなかったことがある。上記の通り最近では大幅に改善してきているので、今後は着実に進めていきたい。

・電装班

正常な解放機構動作の動作を行うことができたという点で、電装班としての最低限の仕事はこなすことができたと評価できる。しかし、その他のミッションのほとんどを達成することができず、総じて課題の多く見つかる打上となった。

反省点は複数あるが、特に重要なものとして、以下が挙げられる。

(技術) 各基板の相互依存性が高かった

各基板の相互依存性が高かったことから、1つの機能の停止に伴って連鎖的に他の複数の機能を止めてソフトウェア全体の構成を大きく変更する必要が生じるようなシステム構成となっていた。そのため、トラブルが発生したときにその内容次第ではトラブルが発生した機能のみを停止して残りの機能で打ち上げをそのまま行う、ということができず、トラブルへの対応に多くの時間を要することとなった。

(技術) 機体位置情報が取得できなかった

飛行時のモードへの遷移を指示コマンドの送信が行えなかったことで、飛行のモードから自動遷移する設定となっていた捜索用のモードへの遷移も行われなかった、結果、機体位置情報が取得できなかったことで捜索が困難となった。このような電装系のトラブルによる機体ロストへの対策として、電装系と独立して回収用のビーコンを搭載する、飛行時のモード以外でも一定時間経過により自動で捜索用のモードへと遷移するようにする、定期的な位置情報の送信は常に行う設定とする、などの方法がある。

(開発) 要求仕様のハードルが高かった

当初、今回の電装系は各部分で見れば製作を開始した時点で既に開発、動作確認が終了していた機能が殆どであったため、設計時点で設定した製作予定はこれまでの実験と比較して余裕があるものであると考えていた。しかし、要求する機能が多かったことでシステムとして過去 Lightus に経験がほど複雑になり、各要素のシステムとしての統合やそのデバックに想定以上の時間を要した。前述の内容と合わせて、スケジュールが予定より大幅に遅延したことで、連鎖的に他班の製作や現地での打ち上げ準備のスケジュールについても大幅に遅延させることとなった。

打ち上げ自体は成功することができたものの、電装班としては成功したことよりも失敗したことの方が圧倒的に多く、他班と比べて悔しい結果となった。しかし、これまで Lightus が製作してきたものと比較して最も完成度の高いものを製作することができ、今回の打上でその課題点も明確にすることができたという点で、大きな収穫を得ることができたと考えている。数年来の目標である飛行データのリアルタイムでの受信、地上局での可視化に向けて、今回の反省を踏まえて引き続き開発を進めていきたい。

## 8. 結言

今回の打上実験は、団体として1年5カ月ぶり、また自団体 GSE によるものとしては初めての打上成功となった。これは Lightus にとって今回の実験参加で得られた最も大きな成果である。一方で、2年ぶりの打上成功、燃焼班としては初打上成功を通して、地上でテストするだけでは分からない課題も多く見つかった。これも非常に有意義な収穫であったといえる。

今回の反省とさらなる目標をもとに、今後着実に知識と実績を増やしていきたい。

## 9. 謝辞

今回の実験への参加にあたり、多くの方々のご協力を賜りました。能代宇宙イベント運営の学生の皆様や先生方をはじめとして、共同打上実験の関係者の皆様、他参加団体様、能代市の皆様、責任教官の西田先生、他ご支援をいただいている農工大機械システム工学科の皆様、協賛をいただいたサンステラ様など、今回の打上実験に関わってくださったすべての皆様に深く御礼申し上げます。また、燃焼架台をお貸し頂いた SHARXS 様には感謝の念に堪えません。

誠にありがとうございます。今後ともよろしく願いいたします。

## 参考文献

[1] CASIO, keisan 生活や実務に役立つ計算サイト 気圧から標高を計算,  
<http://keisan.casio.jp/exec/system/1257609530>, (最終閲覧日 2023 年 10 月 12 日)