

# 炎越しの地球を撮影した中気球実験の概要

杉本 圭吾<sup>1</sup>, 川瀬 幹己<sup>2</sup>, 松岡 夏輝<sup>3</sup>, 望月 友貴<sup>3</sup>, 牧野 有里子<sup>4</sup>, 大隈 彩菜<sup>5</sup>, 佐藤 正騎<sup>6</sup>,  
田中 悠豊<sup>6</sup>, 高梨 晴己<sup>7</sup>, 庄司 康太<sup>8</sup>, 新井 翔太<sup>3</sup>, 笠原 萌寧<sup>9</sup>, 菊田 陽奈<sup>8</sup>, 宇井 瞭介<sup>10</sup>,  
飯田 和大<sup>10</sup>, 石崎 大貴<sup>6</sup>, 濱 祐輝<sup>3</sup>, 都築 則彦<sup>9</sup>

<sup>1</sup> 東京理科大学, <sup>2</sup> 名古屋工業大学, <sup>3</sup> 東京大学, <sup>4</sup> 慶應義塾大学, <sup>5</sup> お茶の水女子大学, <sup>6</sup> 埼玉大学, <sup>7</sup> 電気通信大学,  
<sup>8</sup> 法政大学, <sup>9</sup> 千葉大学, <sup>10</sup> 名古屋大学

## The Overview of the Medium-class Stratospheric Balloon Experiment to Capture the Scenery of the Earth with a Flame

Keigo Sugimoto<sup>1</sup>, Motoki Kawase<sup>2</sup>, Natsuki Matsuoka<sup>3</sup>, Tomoki Mochizuki<sup>3</sup>, Yuriko Makino<sup>4</sup>, Ayana Okuma<sup>5</sup>,  
Masaki Sato<sup>6</sup>, Haruto Tanaka<sup>6</sup>, Haruki Takashi<sup>7</sup>, Kota Shoji<sup>8</sup>, Shota Arai<sup>3</sup>, Mone Kasahara<sup>9</sup>, Hina Kikuta<sup>8</sup>,  
Ryosuke Ui<sup>10</sup>, Kazuhiro Iida<sup>10</sup>, Taiki Ishizaki<sup>6</sup>, Yuki Hama<sup>3</sup>, Norihiko Tsuzuki<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Tokyo University of Science, <sup>2</sup>Nagoya Institute of Technology, <sup>3</sup>The University of Tokyo, <sup>4</sup>Keio University,  
<sup>5</sup>Ochanomizu University, <sup>6</sup>Saitama University, <sup>7</sup>The University of Electro-Communications, <sup>8</sup>Hosei University,  
<sup>9</sup>Chiba University, <sup>10</sup>Nagoya University

### 1. はじめに

我々は国境線のない宇宙に炎を掲げ、その画像や映像を共生社会のシンボルとして活用することを目的として、2018年にEarth Light Project (ELP) というプロジェクトを始動させた。このプロジェクトは学生主体で活動を行っており30団体の学生団体が連携し、累計で37大学278名の若者が参画した。ELPは宇宙に炎を掲げる装置を設計・製作する技術班と活動の記録を撮影する撮影班、ELPの取り組みを広く知ってもらうためにSNSを運用したり、プレスリリースを配信したりする広報班など多種多様なチームに分かれて活動している。

今回の目的を達成するためにELPの技術班は、成層圏気球の放球の規則に則って地上から成層圏へ遠隔で炎を点灯し、極限環境下で炎を燃やし続け、かつカメラで撮影することを目指して、開発を進めてきた。そのために、これまで合計3回のスペースバルーンの打上げを行ってきた。

1回目は2021年4月3日に茨城県大洗町から点火装置や映像撮影機器などの搭載機器が成層圏で動作するのかを検証するために、放球実験を行った。結果は、機体に搭載した2台のカメラが高温のため自動停止してしまい、撮影できた映像はGoPro Maxによる360度映像のみとなった。

2回目は2021年6月26日に茨城県大洗町から炎越しの地球を撮影するために放球実験を行った。結果は、高温によりカメラが停止してしまう問題を解決す

ることに成功したが、機構トラブルの影響で通信が断絶したため炎の点火に失敗し、炎が灯った映像を撮影することができなかった。

3回目は前回の放球実験で課題となった点火システムを改良した新しい点火装置を搭載し、2022年9月4日に茨城県鹿嶋市から放球実験を行った。結果は、高度20km地点で炎を灯し、炎越しの地球の映像を撮影することに成功した。

本稿では、2022年9月4日に行った、炎越しの地球を撮影した中気球実験の概要について報告する。

### 2. 実験内容

我々は、2022年9月4日7時48分に茨城県鹿嶋市において中気球の放球を行った。本実験では、事前にCUSF Landing Predictor<sup>1)</sup>を用いてフライトシミュレーションを実施し、イタレーションを行った結果、機体が回収可能な領域に落下させるために上昇速度を6.37 m/s、下降速度を7.77 m/sに設定した。この上昇速度をもとにCUFSのburst calculator<sup>2)</sup>を行いヘリウムを11000 L注入した。フライトシミュレーション結果をもとに算出された落下予測地点が回収可能範囲にあることを確認した上で放球を行った。機体には、カメラ、燃焼器、マイコン基板、機体追跡モジュール、バッテリーを搭載した。我々が開発したマイコン基板に搭載されているLoRaモジュールに加え、機体追跡モジュールとして、ゲーミンジャパン株式会社<sup>3)</sup>が販売している既製品のGPSメッセンジャーであるin-

Reach mini, GPSMAP 66i を搭載した。観測装置の飛行中及び着水後には、ペイロードに搭載した inReach mini の通信を継続して確認でき、同日 10 時 46 分に茨城県沖の海上で機体の回収に成功した。

### 3. 実験機器の構成について

#### 3.1. 燃焼器

燃焼器は成層圏における低温低圧の環境下において炎の燃焼を維持する保炎部 (図 1) と、空気やガスを一定流量に制御して保炎部に供給する配管部 (図 2) の 2 つの部分に分けることができる。

保炎部は内側に石英管、外側にガラス管で構成された二重ガラス管構造になっている。ガラス管の中心に炎を灯すトーチがあり、トーチの真上に電熱線が位置している。ガラス管の上部には熱電対と圧力調節機構がある。圧力調節機構はリニアアクチュエータとアルミニウム製のパーツとダイヤフラムで構成されている。リニアアクチュエータのロッドの部分に蓋がついていて蓋と排出口の位置を一定の距離に保つことで管内を一定の圧力に維持している。

配管部は (図 3, 表 1) のように空気ラインとガスラインと管内の温度、湿度、圧力を計測する BME280 が中に入ったハウジングに繋がるラインの 3 つのラインで構成されている。それぞれの部品はフッ素樹脂チューブとワンタッチ継手によって締結されていて、空気ラインとガスラインは、取り付けられたレギュレーターによって 0.2 MPa で気体を供給している。

本燃焼器において配管を流れる空気および燃料ガスは、Arduino Mega をベースとした電気系モジュール (燃焼基板) により電子制御される。燃焼基板における点火シーケンスのフローチャートを (図 4) に示す。

点火動作はシーケンス制御となっており、空気ライン、電熱線、ガスラインの順で操作が行われる。初めに空気を流す理由は、点火前に密閉された石英管内に残留している不燃性ガスを排気するためである。次に電熱線を操作する理由は、十分に加熱されていない電熱線に燃料ガスを吹きかけると、電熱線が冷却され発火しないケースを防ぐためである。最後に、燃料ガスを十分に加熱した電熱線に吹きかけることで点火する。

消火時には、空気および燃料ガスの供給を停止する。これにより炎は消える。その後、次回点火時の爆発を防ぐために電熱線を再度加熱することで未燃焼の予混合気を燃焼させておく。

燃焼器に供給する空気と燃料ガスは、熱式流量センサと比例制御弁を用いて PI 制御による流量制御を行った。熱式流量センサは、センサ中を流れる流体によってセンサ面の温度が変化することを利用して気体の流量の計測を行う。比例制御弁は、印加する電流値を変化させることで無段階に流量を制御することのできる電磁弁である。

燃焼基板では、空気、燃料ガスそれぞれの経路について流量センサの出力を AD コンバータで読み取り、PI 制御処理を行った後に PWM 制御を用いて比例制御電磁弁を駆動した。なお、PI 制御のゲインは限界感度法を用いて決定した。これにより石英管内の圧力や供給源の圧力が変動しても空気と燃料ガスを安定して供給することができた。

本機体における点火のタイミングは、高度 5 km, 10 km, 15 km, 20 km の 4 ポイントとした。これは目標とする高度 20 km での点火に失敗した場合に予備の映像を記録として残すためである。点火する高度は搭載した気圧センサから得られた値を元に判定し、高度 20 km 以外では 30 秒間のみ点火を行うこととし、高度 20 km 以降では点火し続けるよう設計した。

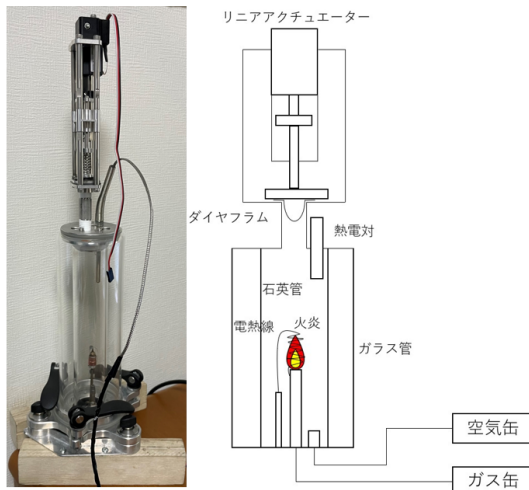


図 1: 燃焼器保炎部の写真と概略図

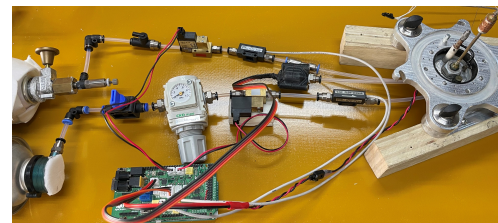


図 2: 燃焼器配管部



図 3: 燃焼器配管図

表 1: 燃焼器配管図表

ID	詳細	個数
①	M5-Φ 4 ワンタッチ継手(ストレート)	14
②	Φ 4 ワンタッチ継手(エルボ)	5
③	BME280 が入った気密センサハウジング	1
④	逆止弁	1
⑤	流量計 (0~0.5 L/min)	1
⑥	小型比例制御電磁弁 (12 V)	2
⑦	二方弁ハンドバルブ	1
⑧	M5-Φ 4 レギュレーター	1
⑨	流量計 (0~1.0 L/min)	1
⑩	レギュレーター (モジュラータイプ 標準)	1
⑪	三方弁ハンドバルブ	1
⑫	3 本タイプガスアダプター (1 個ずつ加工)	1
⑬	ガスランタンのアダプタ	1
⑭	フッ素樹脂チューブ	1

た、強度を確保するため内部にアルミフレームを搭載して、このフレームに燃焼器、カメラ、バルーン吊り下げ用ワイヤー等を固定した(図 6)。



図 5: 舟形構造

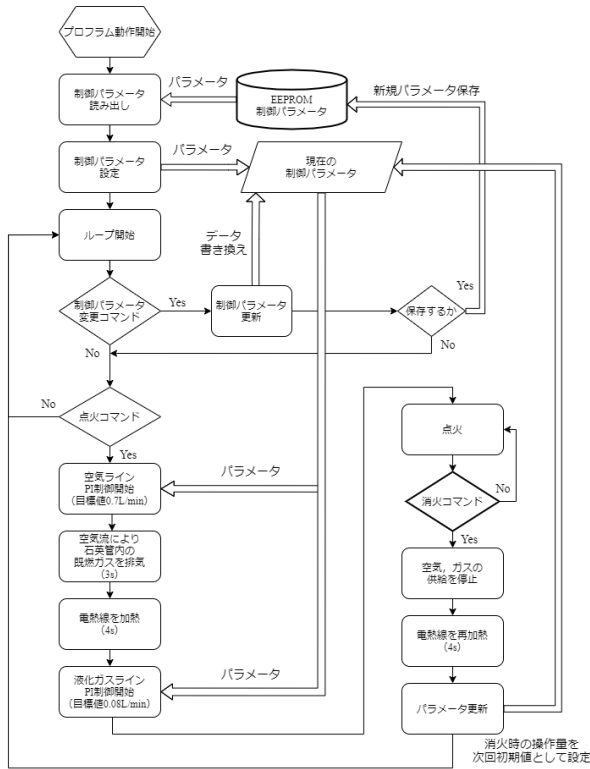


図 4: 点火シーケンスのフローチャート

### 3.2. 機体

機体は燃焼器を成層圏まで運び、点灯した炎の映像を撮影、その後回収することを目的として製作された。地球を背景とした成層圏での炎の映像の撮影を可能にするため、背景の地球の映り方を想定してカメラと燃焼器の配置を行った。また、放球時や上昇中および着水時にかかる力に耐えることのできることや、着水後の海上での安定性や視認性も考慮して設計した。機体は海上での安定性を考慮して舟形構造(寸法: 600 mm x 590 mm x 200 mm)を採用した(図 5)。機体素材は主にスタイロフォーム IB を積層することで製作し、ま

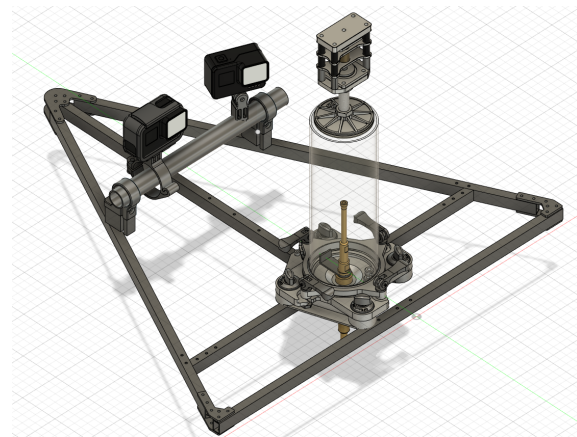


図 6: アルミフレーム図

海上での視認性を確保した上で、プロジェクトの理念などを反映した機体デザインを施した。機体内部には Arduino Mega<sup>4)</sup> をベースとした電気系モジュールを搭載しており、温度湿度気圧や GPS データを LoRa 通信を用いてダウンリンクを行った。機体には、高画質録画用に GoPro7 および GoPro8 を 1 台ずつ、同時中継用に FPV カメラを 1 台搭載した。FPV カメラの送信機と HN1000TR を用いて、5.7 GHz 帯による映像のダウンリンクを行った。機体追跡モジュールとしては、上記の電気系モジュール、inReach mini、GPSMAP 66i の 3 系統を搭載した。

## 4. 実験の結果

### 4.1. 燃焼器

本実験において燃焼基板より得られたログデータを(図 7)に示す。空気の流量(Air\_y)、燃料ガスの流量(LPG\_y)がそれぞれの目標値である 0.7 L/min, 0.08 L/min で供給されており、熱電対の測定値が上昇して

いることから、4ポイントの点火タイミングすべてにおいて点火に成功したことが確認された。高度 20 km において撮影された燃焼器の様子を（図 8）に示す。

また、燃焼器内の気圧および外気圧の変化について（図 9）に示す。燃焼器内の圧力である Pressure.In は、外気圧 Pressure.Out の低下に伴い低下していく。しかし、点火時に空気や燃料ガスを供給すると一時的に燃焼器内圧が上昇していたことが確認できた。したがって、成層圏の環境下においても地上と同様の燃焼密度を実現することができ、明るい火炎を維持することができたと考えられる。

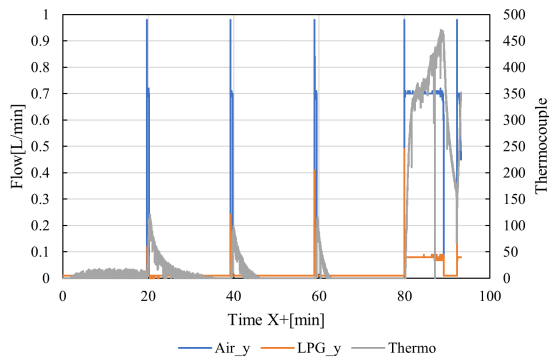


図 7: 燃焼基板のログデータ

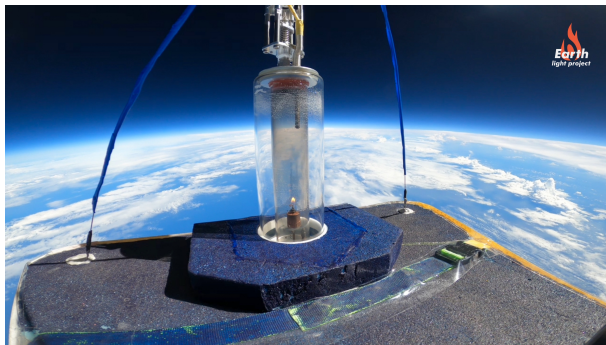


図 8: 撮影された炎越しの地球

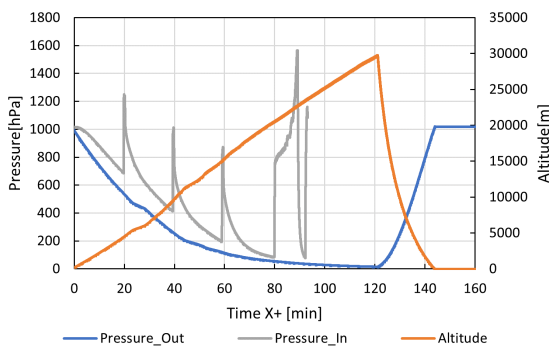


図 9: 圧力変化

#### 4.2. シミュレーションと実際の飛行の差異

本実験の飛行は、inReach mini によって得られたデータによると、気球は平均 4.0 m/s で上昇したのち、高度約 29.4 km で破裂したことが確認された（図 10, 図 11）。今回の放球では、上昇速度が設計値と大幅にずれがあったことにより、飛行時間が想定よりも 43

分長い結果となった。これは、事前に上昇速度算出に用いたツールが 5.0 kg 以下の機体重量のみに対応しているものであったため、本機体の重量 6.0 kg の上昇速度算出を正確に行うことができなかったことが原因と考えられる。また、上昇速度が想定よりも小さくなったことにより、予定よりも南東に流される結果となり、着水予測地点から 12.7 km 離れた地点に着水した（図 12）。

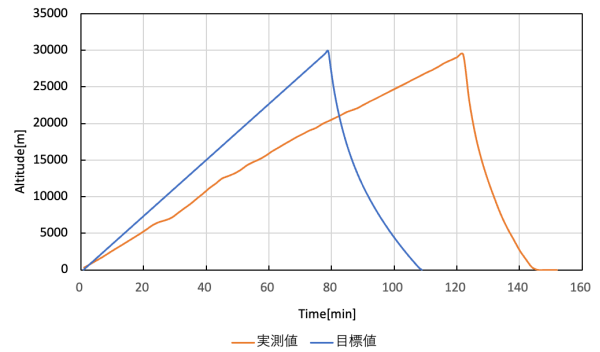


図 10: 高度の変化

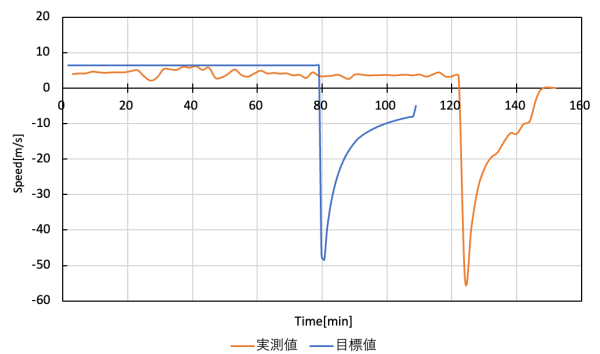


図 11: 上昇速度及び降下速度

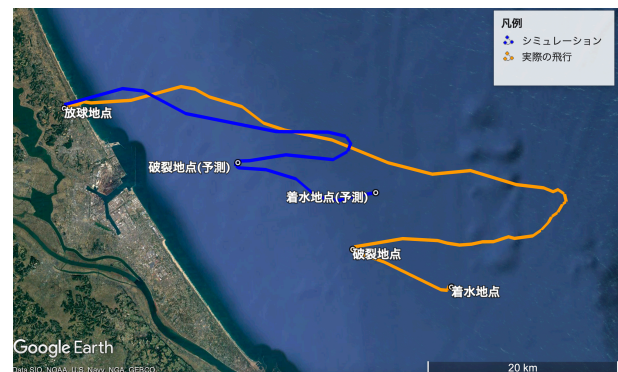


図 12: シミュレーションと実際の軌跡の比較

#### 参考文献

- 1) habhub. "CUSF Landing Predictor 2.5" <https://predict.habhub.org/> (20/Aug./2020)
- 2) habhub. "balloon burst calculator" <http://habhub.org/calc/> (4/March/2021)
- 3) GARMIN "Garmin について" <https://www.garmin.co.jp/company/about/> (20/Aug./2020)
- 4) Arduino. "Arduino Mega 2560 Rev.3 - Arduino Official Store" <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> (18/Sep./2020)