

令和四年度 宇宙運送シンポジウム (STCP-2022-010)
トータルインパルス 100kN・s 級ハイブリッドロケットの打ち上げ試験と飛行シミュレーション
Total Impulse 100kNs Class Hybrid Rocket and Flight Simulation

ウイ ヤンイ¹, 高野 敦¹, 喜多村 竜太¹
Yenyi Ooi¹, Atsushi Takano¹, Kitamura Ryuta¹
¹ 神奈川大学
¹Kanagawa University

Abstract

The flight simulation before launching was done by using data from wind forecast. The plan was use one wind data of the past for the flight simulation and got a prediction of highest height achieve at 23km, but during the flight test by using the data from wind forecast to simulate the area of falling, we had to drop the angle of launch from 85° at the beginning to 72°, the prediction of highest height achieve drops from 22km to 4km to make it fall into the area planned. After the flight test, highest height achieved was 3.7km, which was lower than expected, so another flight simulation with reconsideration for the drag coefficient is needed.

1. 緒言

超小型人工衛星を安価かつ迅速に打ち上げるため、当研究室では超小型ハイブリッドロケットの開発を行っている。

本研究では風速と風向の影響を確認した。また、概念設計ではある 1 ケースの風向風速によるシミュレーション^[1]に基づいてエンジン推力を設計したが、打上月の風向風速実績を反映した解析を 28 日分について行ったところ、大部分が目標高度より著しく低い結果となることが判明したため、その原因究明と、今後に向けての対策検討を行った。

2.2. 打ち上げ前シミュレーション結果

2.1. 概念設計シミュレーション

概念設計では 2019 年 9 月 21 日 9 時の秋田観測所の風速データ^[2]を 10 次多項式近似し、シミュレーションを行った。打ち上げ角度を 75°と 83°、方位角を 220° (磁北基準, 時計回り正) にした。概念設計機体は空虚質量 25[kg] (構造設計上より厳しくなる最高速度が高めになる見積もりを得るため最軽量ケースとして 2021 年度打ち上げた機体と同じ値) にしたところ、表 1 のように打ち上げ角度 83°に最高高度 24[km], 最高速度 560[m/s]となった。この最高速度の値を基に、機体の強度計算を開始した。

表 1 シミュレーション結果 (最軽量パターン)

| 打上げ角 [°] | 最高高度 [m] | 最高速度 [m/s] | 頂点速度 [m/s] | 頂点時間 [s] | ランデブ リア速度 [m/s] | 最高速度 の時間[s] |
|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-----------------------|----------------|
| 75 | 19079 | 544.2 | 187.8 | 71.8 | 26.31 | 30.7 |
| 83 | 23939 | 560.2 | 46.4 | 81.5 | 21.96 | 30.8 |

2.2 打ち上げ前シミュレーション

打ち上げ前シミュレーションとして、打ち上げ日 (2022 年 10 月 8 日~11 日) 周辺の一年前の 2021 年の 9 月 23 日~10 月 24 日一ヶ月間の風速データを気象庁^[4]から取得し、x および y 方向の風速成分を計算した後、これを区分線形補間して、飛行シミュレーションを行った。図 1 及び図 2 に落下分散を示す。保安円の左に欠けているのは船舶の航路である。左の弾道落下では機体が保安円外に落下してしまうことを確認した。しかし打ち上げ角度を調整すれば回避可能であると判断した。

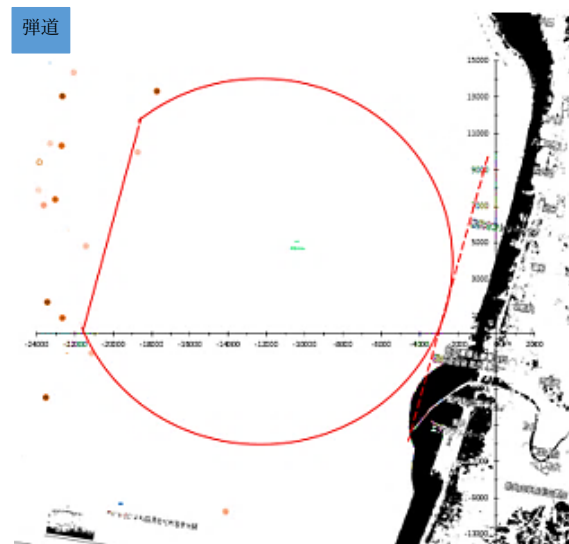


図 1 弾道落下

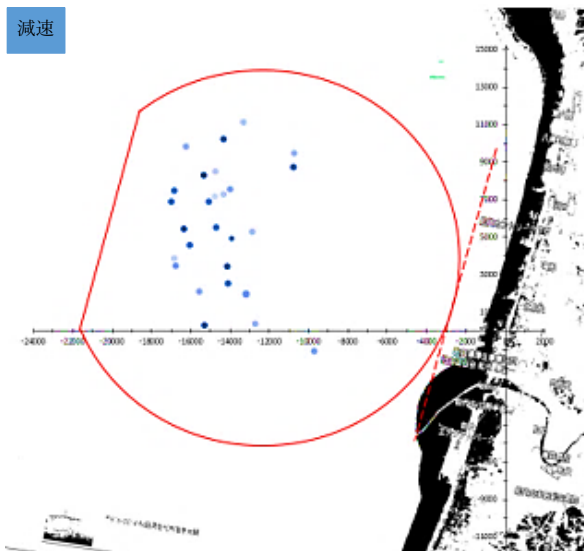


図2 減速落下

結果、風速データ9月24日では26km(最大), 10月20日では9km(最低)結果が得られた。9kmしか飛ばなかった原因は打ち上げ直後に縦揺れ角は上昇し、機体が水平方向に傾いたため高度が低くなったと考えられる。図3に縦揺れ角対高度グラフを示す。図4と5に9月24日と10月20日の風速風向データを示す。方位角は282°に対して9月24日の風は追い風, 10月20日の風は横風であることが分かった。

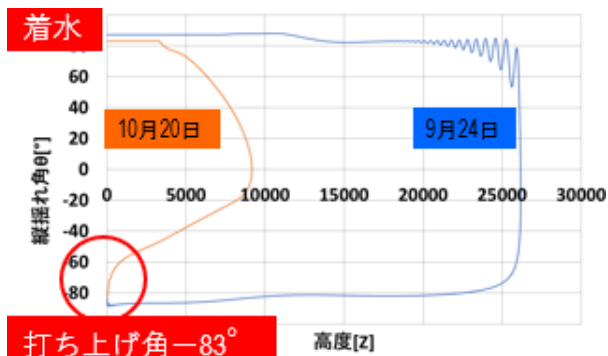


図3 縦揺れ角 θ - 高度 Z グラフ

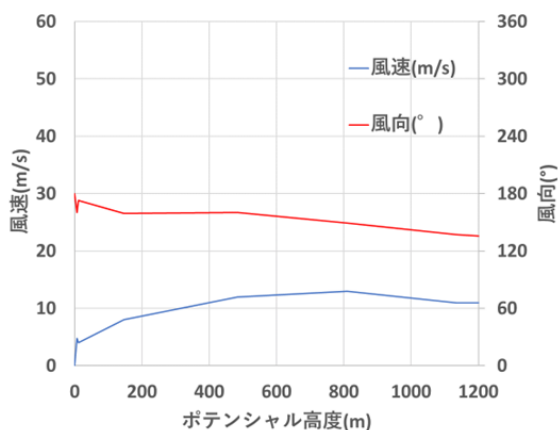


図4 9月24日風速風向データ

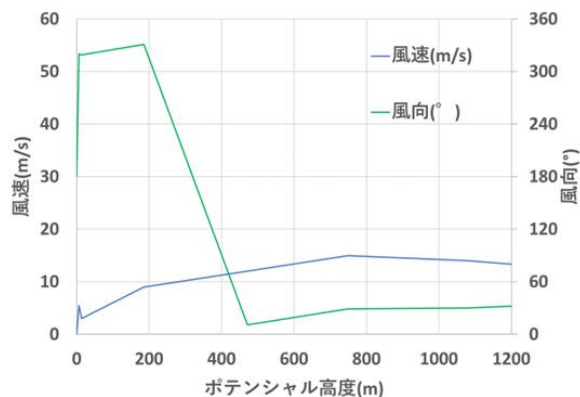


図5 10月20日風速風向データ

3. 打ち上げ直前シミュレーション

打上予定日 10/8-11のうち, 10/8,9は強風注意報が出ており, 10/10, 11は雨のため落下予定の海上の視界が確保できず, やむなく強風注意報が出ているが, 海上のうねりが成長しないと思われる10/8に打ち上げを行った。風速は地表~13.5kmまでは Windy^[3]で, 14~30kmは気象庁数値予報モデル GPV^[4]で取得した。2022年10月8日の0:00時の6:00時予報データを用いて方位角262~282°, 打上げ角度70~83°の範囲でシミュレーションを行った。強風のため, 打ち上げ角度を72°までさげることで, 図6及び図7のように機体落下を保安円内におさめることができ, 方位角262°で打ち上げを実施した。この条件での最高高度は4844[m]と, 当初の目標である30kmには及ばない結果となった。

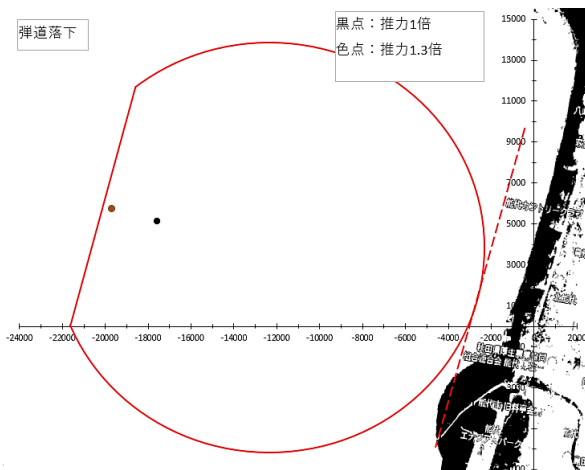


図6 弾道落下

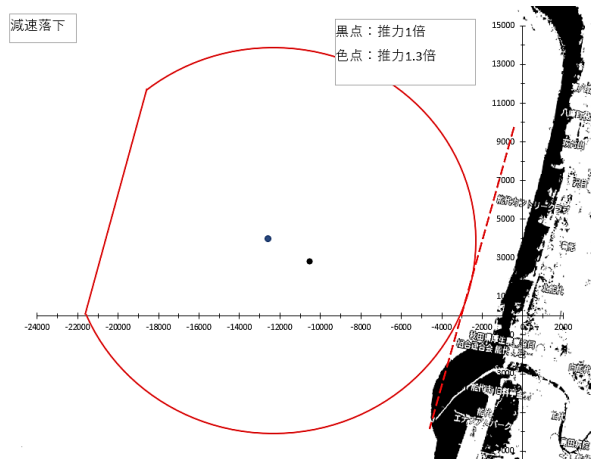


図7 減速落下

4. 打ち上げ直前シミュレーションと打ち上げ結果の比較

シミュレーションでは最高高度 4844[m]を得たのに対してフライトデータでは最高高度 3706[m]しかなかった。図 8 に高度 Z -時間 t のグラフを示す。打ち上げの動画を確認したところ、点火後 5s ほどランチャーに居座ったことが確認した。発射後、ロケットがスピンしていることも確認した。以上の考察からエンジンの推力プロファイルの見直しや、スピンによるフィンの誘導抗力などを考慮したシミュレーションを行う必要がある。

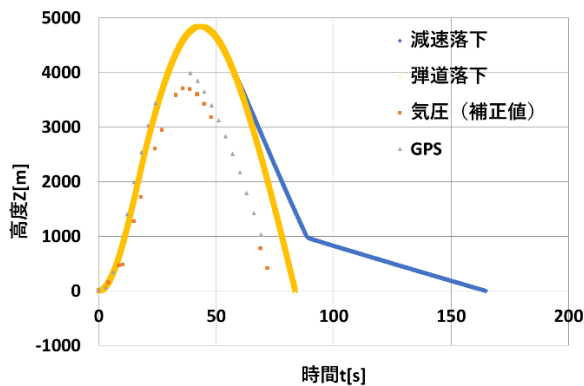


図8 高度 Z -時間 t グラフ

5. 今後に向けて推力の検討

推力を抑えたため、地上付近での速度が上がらず、横風の影響を受けやすくなったと考え、トータルインパルスを変えずに推力を変化させる解析を行った。結果を表 2 に示す。以下の結果を見るとトータルインパルスを変えずに推力を上げることが有効であった。

表 2 シミュレーション結果

| 風速データ | 最高高度[m] | | |
|-------|---------|----------|--------|
| | 推力 1 倍 | 推力 1.3 倍 | 推力 2 倍 |
| Case1 | 6885 | 14678 | 20647 |
| Case2 | 7275 | 15072 | 20814 |
| Case3 | 19960 | 24061 | 24228 |
| Case4 | 23103 | 25178 | 24532 |

6. 結言

打ち上げ前シミュレーションでは、地上風が機体に大きな影響を与えることが分かった。打ち上げ当日は強風の影響で打ち上げ直前のシミュレーションで最高高度 4.8km しか到達しなかった。動画を確認したところ、点火後 5s ほどランチャーに居座り、発射後スピンが起きたことを確認した。概念設計の時点でも、最低でも高度が高くなるケースと低くなるケースを含めた、数ケースの風についてシミュレーションをすることが必要。今後に向けてトータルインパルスを変えずに、推力を上げることが有効であった。

参考文献

- [1] 戸川隼人, 石黒登美子, 山本浩通, 航空宇宙技術研究所資料, 航空宇宙技術研究所, 1968年 p.1
- [2] 気象庁, https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/view/daily_uwd.php?year=2021&month=10&day=08&hour=9&point=47582&atm=&view=, 2022年9月1日アクセス
- [3] Windy.com, <https://www.windy.com/?925h,40,241,140.016,16>, 2022年10月8日アクセス
- [4] デジタル台風, <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/gpv/wind/>, 2022年10月8日アクセス