

5m ハイブリッドロケット発射用 12m ランチャーの開発

立花優 (神奈川大学・学), 山口雄介 (神奈川大学・学), 高野敦 (神奈川大)

Development of 12 m launcher for 5 m hybrid rocket launch

Yu Tachibana, Yusuke Yamaguchi, Atsushi Takano (Kanagawa University)

Abstract

Our laboratory is developing a hybrid rocket aiming at an altitude of 100 [km]. The total length of the hybrid rocket with target altitude of 100 [km] is assumed to be 5 [m]. Under the above conditions, we developed a launcher with a rail length of 10 [m] or more in order to obtain launch clear speed necessary to enable stable flight of the rocket. The result of launch test with the developed launcher conducted in October 2018 is reported.

1. 研究目的

当研究室では、高度 100[km] を到達目標としてハイブリッドロケットの開発を行っている。今後、機体が大型化するため、目標高度 100[km] に到達出来るハイブリッドロケットの全長を 5[m] と想定した。

以上の条件の元、ロケットの安定した飛行を可能とするために必要なランチクリア速度を十分に得るため、レール長さが 10[m] 以上のランチャーの開発を行った。

2. 想定ロケット

目標高度 100[km] を到達できる想定ロケットの諸元は以下のとおりである。全長 5[m], 直径 300[mm], 重量 150[kg], ランチラグ間距離を 2000[mm] として強度計算を行う。

3. ランチャー要求性能

主要な要求性能を記載する。この要求性能を満たすようランチャーの設計を行なった。

- ・剛性が高いこと

仰角誤差を小さくするため、レールのたわみを抑える必要がある。

- ・組立が容易で軽量であること

複雑な構造や各部品が重い場合、時間と重機が必要となるので、各部品の重さを 20[kg] 以下に抑えることで、作業効率を上げ手作業で組立を行なえるようにするため。

- ・仰角の変更が可能なこと

打ち上げ角度はロケットの到達高度や飛距離だけでなく、落下範囲などに影響を及

ぼすため、仰角変更機能は必要である。

- ・レール長さが 10[m] 以上であること

目標高度 100[km] に到達出来るハイブリッドロケットを想定し、ランチクリア速度を満たすためレール長さを 10[m] 以上とする必要がある。

4. 諸元

今年度作成ランチャーを図 1 に示し、構造の概要を以下にまとめる。

- ・土台範囲 4098×9425[mm]
- ・仰角 79°時の全高 12597[mm]
- ・レール長さ 12[m]
- ・仰角は 60°~79°の間で 1°ごとの調整が可能。



図 1 開発ランチャー

5. 設計における主な特徴

レールの仰角変更には図 2 のウォーム減速機を用いている。これはウォームギアの特徴として操作していない場合に勝手に回転するのを防げることが理由として挙げられる。

土台のアルミフレームに支柱を固定する図 3 に示すフックを取り付けることで、仰角を一度ごとに調整できるようになっている。



図 2 ウォーム減速機



図 3 支柱用フック

目標高度 100[km]を到達できる機体の打ち上げを想定して、強度計算を行いランチャーの開発を行なった。

発射角が大きく変化するとロケット発射時の方向や飛距離に影響を及ぼしてしまうと考え、レール部分にロケット搭載及び発射時に生じるたわみによる仰角誤差を 1[deg]以内に押さえるために支柱を取りつけ、たわみ及び応力の計算を行なった。結果を表 1 に示す。支点 AB の位置をランチャーの図 4 に、ランチラグ間のたわみを図 5 に示す。支点 A は回転軸である。

表 1 発射角 60°における各梁の計算結果

各梁部の名称	たわみ[mm]
上部ランチラグ	22.88
下部ランチラグ	3.767

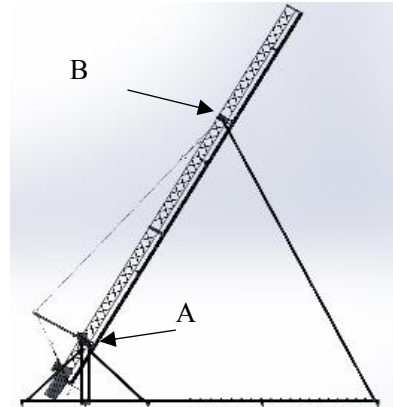


図 4 ランチャー作動時(側面) 支点 AB 位置

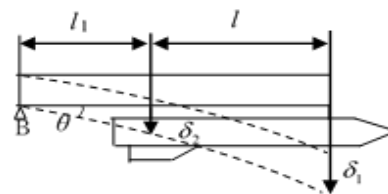


図 5 ランチラグ間のたわみ

想定ロケットがランチャーを離れる際のたわみ(表 1 の 22.88[mm], 3.767[mm])による仰角の誤差は、ランチラグ(ロケットをランチャーに取り付けぶれないよう固定する金具)の間隔 2000[mm]をスパンとして計算を行った。結果は 0.55[deg]と仰角誤差 1[deg]以下となった。

6. 打ち上げ試験

秋田県能代市にて単独での打ち上げ試験を行った。この打ち上げ試験に作成したランチャーを使用し、打ち上げに成功した。打ち上げ試験の様子を図 6 に示す。

機体挿入後仰角を 75°に固定したランチャーは三時間近く仰角を維持し、問題はみられなかった。打ち上げ時、ロケットはランチャーレールから離れた後ふらつきなどは確認できなかった。

たため、必要なランチクリア速度は十分に満たすことが出来たと言える。映像から支柱は発射時に振動していたが、トラスやレールには大きな振動やたわみは見られなかった。

よって開発した 12[m]ランチャーは機体発射には有害なたわみ無く使用できたと言える。



図 6 ロケット発射時

7. 剛性試験

7.1 目的

ランチャーのモデルを作成し、解析を行って得られた解析値と実際のレールのたわみを比較し解析モデルの妥当性を確認する。また、モデルの解析によって、想定ロケットの打ち上げ時の仰角誤差を求める。

7.2 試験パターン

試験方法は以下の3パターンに分けて行った。測定箇所を図7に示す。



図 7 測定箇所

(1) 上部から鉛直下向きに荷重負荷

ロケット発射時の仰角誤差を割り出す為に、上から荷重をかけて剛性試験を行った。実際の形に近づけるため、支柱部を単純支持にして解析と測定を行った。

測定箇所は、レール先端とレール中央部とした。測定の様子を図8に示す。

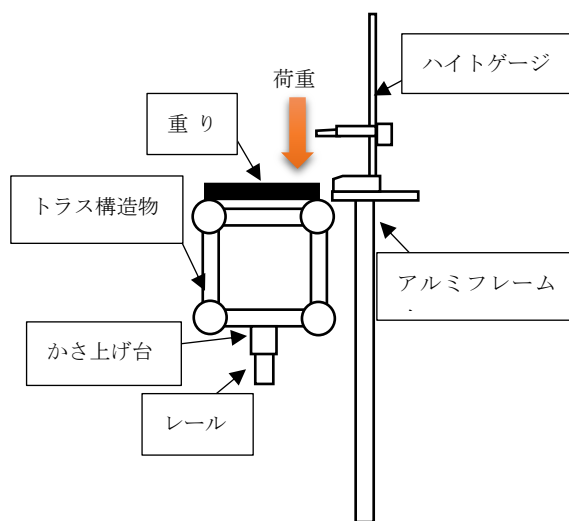


図 8 上部から鉛直下向きに荷重負荷

(2) 下部から鉛直上向きに荷重負荷

荷重方向に対しての剛性の違いを知るためにレールの垂直上向きの剛性試験も行う。支柱は、トラス構造物とレールの荷重によって、固定されている。しかし、レール先端に下から 276.5[N]の荷重が掛かると、支柱が浮くため、支柱がない状態で測定を行った。測定箇所は、レール先端と支柱部とした。測定の様子を図9に示す。

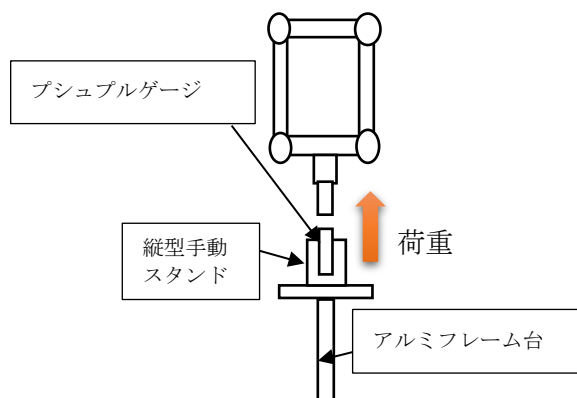


図 9 下部から鉛直上向きに荷重負荷

(3) 横方向に荷重負荷

打ち上げ試験の映像でトラス構造物が横方向に小さく振動していた。仰角を上げた状態での試験は困難であり、また、レールを下げた状態で支柱を再現できなかった為、支柱がない状態で解析と剛性試験を行った。測定箇所は、レール先端とした。測定の様子を図 10 に示す。

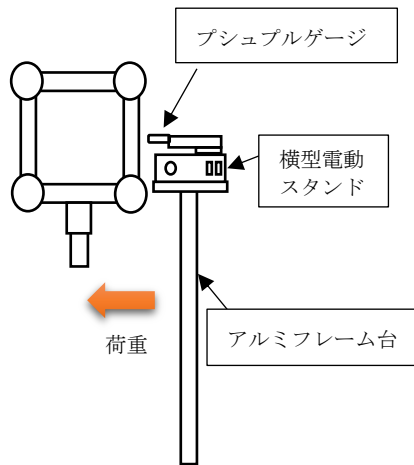


図 10 横方向に荷重負荷

7.3 結果

上記の試験結果と解析値の比較を表 2 に示す。

表 2 解析結果と実験値の比較

測定方法	実験値 [N/mm]	解析値 [N/mm]	誤差 [%]
先端部に上から荷重	23.95	24.40	1.84
先端部に下から荷重	0.369	0.491	24.8
先端部に横から荷重	0.840	0.960	12.5
中央部に上から荷重	135.9	143.9	5.56
支柱部に下から荷重	0.823	1.186	30.6

表 2 よりロケット発射時の仰角誤差に最も影響する「先端部に上から荷重」の解析結果は、実験値との誤差が小さく妥当であると言える。また、誤差の大きな結果については、

今後、剛性試験結果と解析値の誤差が大きかった解析結果において、モデルの合わせ込みを行うことで、より詳細な仰角誤差の解析が可能である。

7.4 仰角誤差の解析

上記の結果より、「先端に上から荷重」の解析結果を用いて、想定しているロケットがランチャーを離れる際のレールのたわみによる仰角誤差を解析する。仰角は、60 度の条件で行うため、想定ロケットの重量 150[kg] に $\sin 60^\circ$ をかけた 75[kg] を図 11 のモデルのレール先端に荷重をかけて解析を回し、解析値のたわみから仰角誤差を求める。図 11 の赤い点は変形前を表し、青い点は変形後を表している。図 11 の解析結果の先端部分を拡大したものを図 12 に示す。変形量は、10 倍で表している。

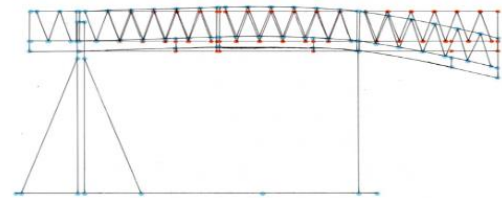


図 11 ランチャー解析モデル

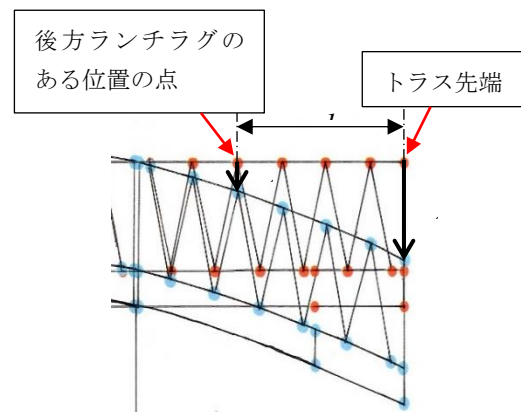


図 12 レール部先端の変形の様子

解析の結果、先端のたわみは、 $\delta_1=27.69[\text{mm}]$ であった。想定ロケットのランチラグ間の距離を $l=2000[\text{mm}]$ と設定しているため、後方のランチラグのある点のたわみを解析の結果より求める。後方のランチラグのある点のたわみは、 $\delta_2=8.47[\text{mm}]$ であった。よって、仰角誤差は、

$$\theta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{l} = \frac{27.69 - 8.47}{2000}$$

$$= 0.00961[\text{rad}] = 0.55[\text{deg}]$$

となった。以上より，設計時に想定している仰角誤差 1[deg]以内であることが分かり，想定
のロケットの打ち上げに際しても問題なく使用
できることが分かった。

8. 結論

- ・解析の結果，想定ロケットの打ち上げに問題なく使用できることが分かった。
- ・ウォーム減速機以外の重さを 20[kg]以下に抑えることができた。ウォーム減速機部分は，組み立て手順を工夫することで，手作業での組立を可能にした。
- ・ウォーム減速機を使用する事で，安全な仰角変更が可能である。
- ・レール長さ 12[m]で開発を行い，今年打ち上げた機体において，ランチクリア速度は十分満たした。

以上の 4 点より，要求性能を満たすランチャーの開発に成功した。

参考文献

- [1] JIS B 8830 クレーン-風荷重の評価