

019 ハイブリッドロケット用無火薬式分離機構の開発と打ち上げ実験評価

北野裕己（神奈川大・学），西野沙也佳（神奈川大・院），高野敦（神奈川大）

A non-pyrotechnic separation mechanism for hybrid rocket was developed. The separating mechanisms were improved for failure of the first stage separation and non-separation anomaly of the second separation, on launch test in 2017. The launch experiment in Noshiro city, Akita prefecture on October 6, 2018 is reported.

1. 緒言

当研究室では，超小型衛星を安価で迅速に打ち上げるため，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，超小型ハイブリッドロケットの打ち上げ実験を行い，機体を全て回収するため，パラシュートを展開する分離機構の設計・開発を行った．

2. 分離機構の設計

2.1 分離機構の原理

一段目分離機構（図1）は，ニクロム線をレニー（エンジニアリングプラスチック）ボルトに巻き付け製作したフェアリング固定ロッドをノーズコーンに入れ，両端をレニーナットで締めて固定する．

ニクロム線に電流を流し，レニーボルトを焼ききること

で押さえられていたバネが開放され，分離する．火薬を使用していないため分離衝撃も小さく運用管理も容易である．

空気抵抗を減少させる流線形の形状で頭部付近に一定の空間を確保し，そこにペイロードを収納する形とするものである．

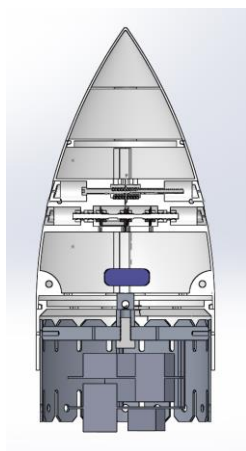


図1 一段目分離機構

二段目分離機構は，アルミの固定ボルトとセパレーションナット（図2）を連結させ固定している．セパレーションナットはニクロム線が巻きつけられたポリカーボネート固定バンドで固定されている．

ニクロム線に電流を流し，固定バンド（図3）を焼ききることによって押さえられていた固定ボルトがセパレーションナットから外れる．そして，押さえられていたバネが開放され，分離する．

一段目同様火薬を使用していないため，運用管理も容易である．

セパレーションナットはアルミの丸棒を縦割りにして製作したナットである．

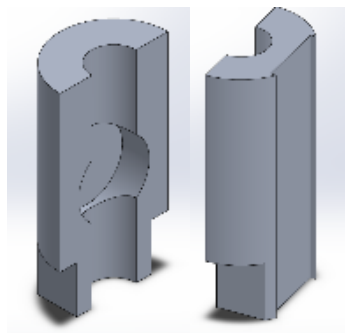


図2 セパレーションナット



図3 固定バンド

セパレーションナットにはニクロム線が干渉しないような溝と、分離用のバネを挿入出来るような窪みを設けた。そして、固定バンドの一部削ることで、ニクロム線を密集して巻き付けられるようにした。

なお、部品はすべて図4のようにショックコードでつなぎ紛失を防ぐ。

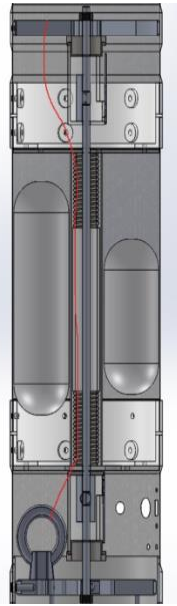


図4 ショックコード部

2.2 分離機構の概念設計

昨年度の打ち上げ試験にて一段目分離機構が破損したことで、二段目分離機構の分離が正常に行われなかった。

この問題の対策をするために、一段目分離機構および二段目分離機構を検討することとした。

検討するにあたって、FT図(Fault Tree 図)を用いた。FT図の一部を図5に示す。

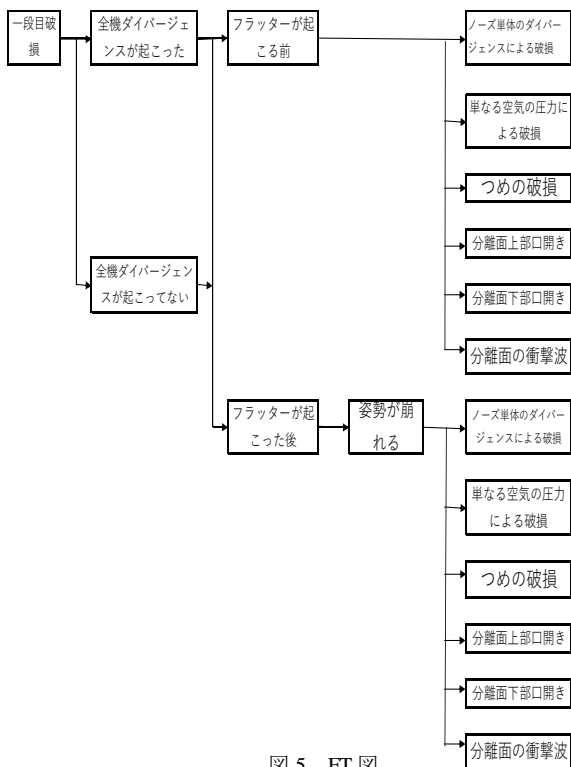


図5 FT図

FT図による検討の結果、図6に示すように一段目分離機構は、ノーズコーン先端をキャップ型へ変更、二段目分離機構は、セパレーションナットの回り止めをボルトではなく3Dプリンタで製作した回り止めへ改良することとした。

また、機体の外形が120[mm]から150[mm]へ変更したことに伴い、ノーズコーンの改良を行った。

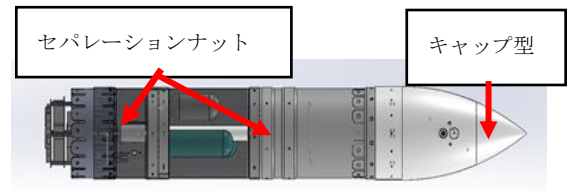


図6 分離機構全体図

2.3 一段目分離機構の設計

FT図による検討よりノーズコーン先端をキャップ型へ改良した(図7, 図8)。フィンの失速角の際の法線力による曲げモーメントを計算し、つめの厚さを4.064[mm]にした。またノーズコーン先端をキャップ型へ変更した。

フライト中の分離動作を確認する為、分離モニタ用スイッチを搭載した。ノーズコーンは機体直交方向に開くため、押しボタンスイッチを搭載した。

2.4 二段目分離機構の設計

昨年度回り止めは、ボルトとセパレーションナットが当たり、ニクロム線側のセパレーションナットが動かないのでボルトが引っかかることが原因で正常に分離しなかったと考えた。

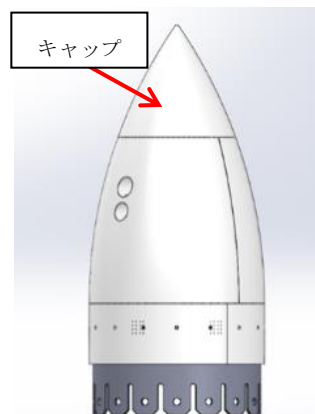


図7 一段目分離前

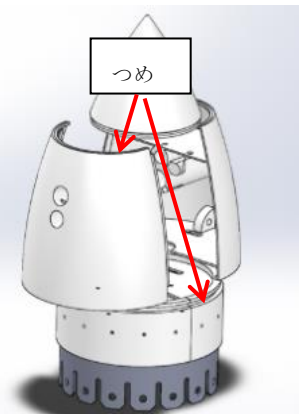


図8 一段目分離後

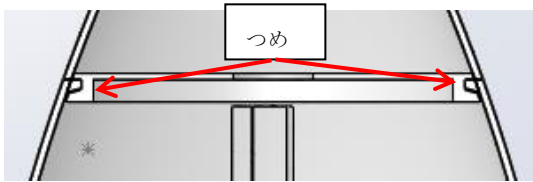


図9 一段目分離機構つめ断面図

そこでセパレーションナットの側面を削ることでよって回り止めにはまるよう設計し、固定ボルトが引っかかりからず分離する回り止めを3Dプリンタで製作し、図10のようなハウジングを設計・製作した。

機体軸方向に開くため、ローラー付きのマイクロスイッチを搭載した。

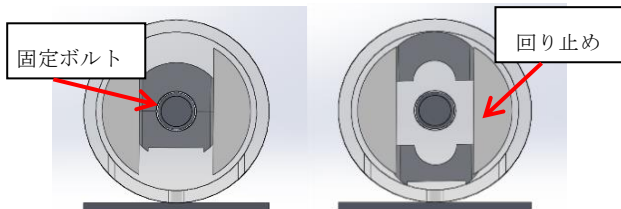


図10 二段目分離後

図11 二段目分離後

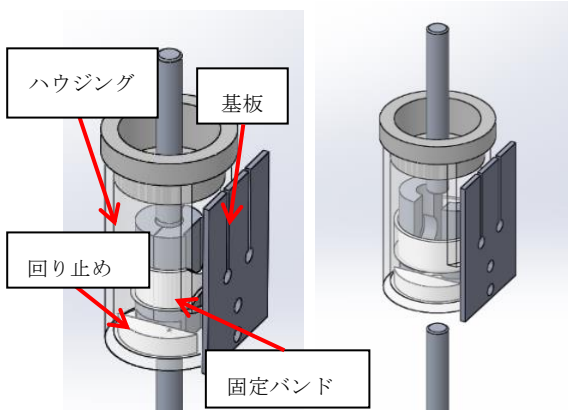


図12 二段目分離前

図13 二段目分離後

3. 打ち上げ実験

製作した一段目分離機構と二段目分離機構を搭載したハイブリッドロケットを2018年10月6日秋田県能代市にて打ち上げ試験を行った。

3.1 打ち上げ実験結果

一段目パラシュートの開傘は成功した。

機体カメラのデータ(図14) 頂上付近で一段目が分離した直後に二段目のパラシュートが展開

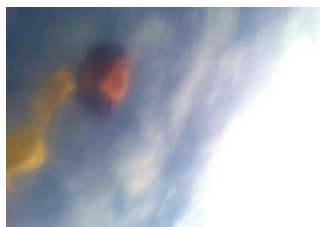


図14 機体カメラの映像

していることがわかった。つまり一段目と二段目がほぼ同時に分離していることがわかった。

二段目分離機構の分離面より上部の回収をすることが出来なかった。また、固定ボルトは曲がった状態で回収された(図16)。

3.2 打ち上げ実験後評価

さらに、分離スイッチモニタのデータからも一段目と二段目がほぼ同時に分離したことがわかった。

分離スイッチモニタから一段目と二段目がほぼ同時(一段目は51.5秒、二段目は52.4秒)に分離したことがわかった。

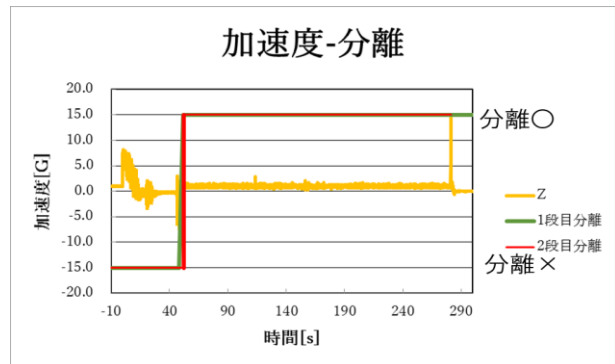


図15 分離スイッチモニタと時間のグラフ

図15に示すように分離スイッチの時間と加速度の変化が重なっていることがわかる。一方で二段目分離時間は172秒で設定していることから、二段目が予期せぬ分離をしてしまったことが判明した。

一段目と二段目がほぼ同時に分離してしまった原因として考えられるのは、図17に示すように一段目開傘衝撃によって二段目分離機構の固定ボルトに軸力15.0[kN]が加わったためと推定された。

セパレーションナットの最大保持軸力4.3[kN](昨年の試験結果)を超えたため、最大保持軸力が原因と推定した。これは、図5に示したFT図でも想定できていなかった破壊モードであった。



図16 曲がった固定ボルト

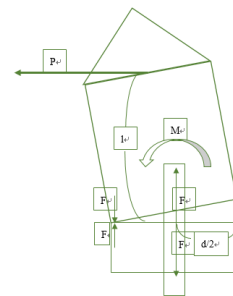


図17 曲げモーメントと荷重

4. 最大保持軸力

最大保持軸力とはセパレーションナットに過大な荷重が加わるとボルトが抜けてしまうのでボルトが抜けない最大荷重である。

セパレーションナットの最大保持軸力を測定するため、セパレーションナットと固定ボルトの引張試験（図 18）を行った。

更に軸力を向上させるため、ボルト径、固定バンド幅、溝幅、加工方法を変更して試験を行った。



図 18 最大保持力測定試験

4.1 セパレーションナット寸法の影響

ボルトサイズ、固定バンド幅を増加して試験を実施した。

表 1 試験結果

	ボルトサイズ	固定バンド幅[mm]	溝幅[mm]	最大保持軸力[kN]
セパナット①	M6	10	8	3.44
セパナット④	M8	20	8	5.56

セパレーションナット①は昨年度と同じ寸法だが、4.3[kN]より低い値になった。これは分離用のバネを挿入出来る窪みの直径を8[mm]から10[mm]へ変更しているため、はめあい長さが短くなり低い値になったと考えられる。



図 19 セパナット

ボルトサイズ、固定バンド幅を増加して試験を行った結果、最大保持軸力5.56[kN]に向上した。



図 20 ダメージを受けた固定ボルト

主に材料強度の低いボルト側ねじ山（A5052）がダメージを受けている（図 20）。ボルト材質をから強度の高いものに変更すると最大保持軸力を向上できる可能性がある。

4.2 加工方法の影響

加工方法を変更して試験を行った。

表 2 試験結果

	ボルトサイズ	固定バンド幅[mm]	溝幅[mm]	最大保持軸力[kN]
セパナット②	M8	20	10	4.91
セパナット③	M8	20	8	3.77
セパナット④	M8	20	8	5.56

溝幅を10[mm]から8[mm]へ変更した際荷重が3.77[kN]に下がった。セパレーションナットに固定ボルトが斜めに入っていた（図 21）。

タップ加工を手加工で行ったため、めねじが斜めに加工され軸力が下がったと考えられる。

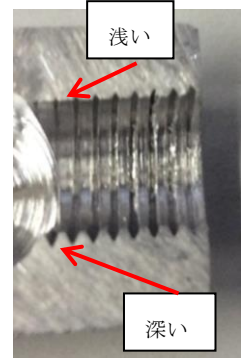


図 21 斜めに加工されたナット

5. 結言

一段目のパラシュートは正常に展開できた。一段目パラシュート開傘衝撃によって二段目分離機構が分離した。

最大保持軸力の向上に取り組んだが、最大保持軸力は5.56[kN]で15.0[kN]を超えることが出来なかった。

ただし、ボルトサイズを増加させることで最大保持軸力を向上できることがわかった。

また、はめあい長さを増加、およびボルト素材の強度を向上させることで最大保持軸力を向上できる可能性がある。

さらに、セパレーションナットの最大保持軸力を保証するためには、固定バンド幅、溝幅、下穴径および加工方法も管理も重要であることがわかった。

これらを反映することで、今後より信頼性を向上した無火薬式分離機構が実現できるものと考えられる。

6. 参考文献

- (1) 榊原裕太, ハイブリットロケット分離機構の開発, 神奈川大学卒業論文, 2016年
- (2) 西野沙也佳, セパレーションナット方式による分離機構の開発, 神奈川大学卒業論文, 2016年