

分離機構の信頼性試験

Separation mechanism reliability test

○渡邊舜也（神奈川大・学），岡村元太（神奈川大・学），高野敦（神奈川大）

喜多村竜太（神奈川大），正井卓馬（神奈川大），植村寧夫（神奈川大）

Shunya Watanabe (Kanagawa University), Genta Okamura ((Kanagawa University), Atsushi Takano (Kanagawa University), Ryuta Kitamura (Kanagawa University), Takuma Masai (Kanagawa University), Shizuo Uemura (Kanagawa University)

1. 緒言

近年，超小型人工衛星開発が活発に行われている。それら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に取り組んでいる。打ち上げ後，機体を損傷なく回収するためのパラシュートの展開，将来的なペイロードの放出を見据えて分離機構の開発が必要である。そこで，本研究では，分離機構の信頼性試験に取り組んだ。

2. 一段目分離機構

ロケット機体は一段目分離機構と二段目分離機構からなる二段分離式である（図1）。一段目分離機構はニクロム線がレニーロッド（樹脂製のロッド）を焼き切ることにより，プリロードのかかったバネが解放されて分離する仕組みである（図2）。

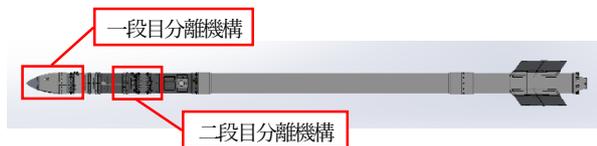


図1 ロケット全体図

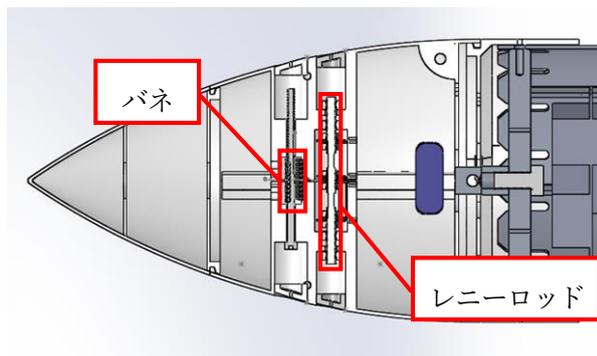


図2 一段目分離機構

3. 2021年度打ち上げ試験における不具合

2021年度の打ち上げ試験では，大気圧テレメトリのデータから高度10.1kmに到達したことを確認した。しかし，シミュレーション結果と実測データを比較する

と，頂点を過ぎた後の実測データは弾道落下及び減速落下の間に位置していた。シミュレーションと実測の比較¹⁾を図3に示す。

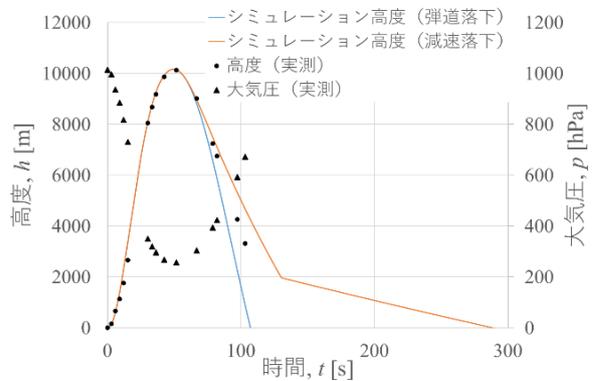


図3 シミュレーションと実測の比較

また，一段目の分離時間は49秒であるが，打上から約85秒後に撮影された写真からは分離していないように見える（図4）。CADを用いて，分離する前の機体を同じような角度から眺めてみると，写真に近いイメージを再現することが出来た（図5）。これらのことから一段目が正常に分離せず，二段目が分離する前に着水してしまったと考えられる。

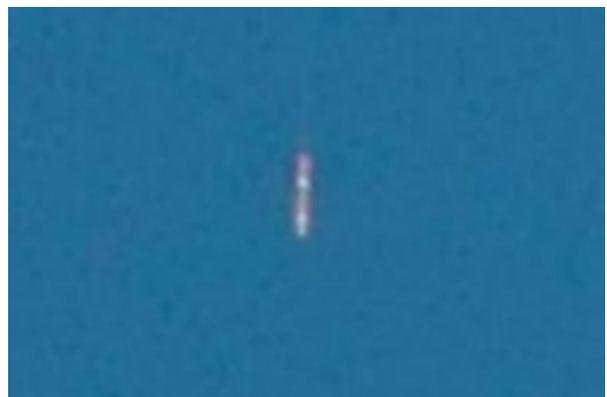


図4 打上から85秒後の写真（道浦直人氏提供）

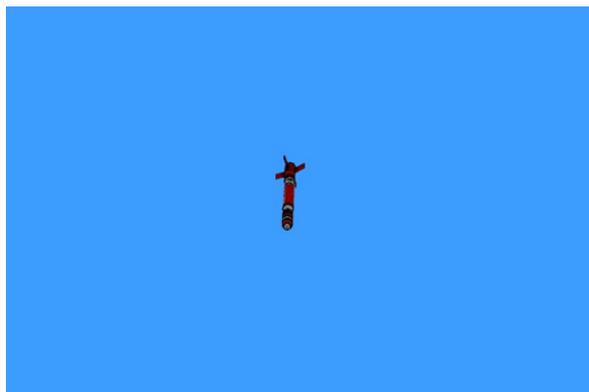


図5 CADでの再現

4. FTA(Fault Tree Analysis)試験

打ち上げ試験当日、機体から水滴が滴るほど結露が発生していた(図6)。



図6 機体から水滴が滴る様子

また、頂点では外気が -50°C 付近になる可能性がある。これらを踏まえて、FTAによる解析から低温、湿度及びそれらの複合が最も分離基板及び分離機構の不具合の原因として有力であると考え、原因究明のため試験を行った。試験内容は主にニクロム線とレニーロッドに水滴をつけた状態で分離させる露付き分離試験(図7)、液体窒素を用いて一段目分離機構を低温下にさらした状態で分離を行う低温分離試験(図8)及びそれらの複合である。



図7 露付き分離試験

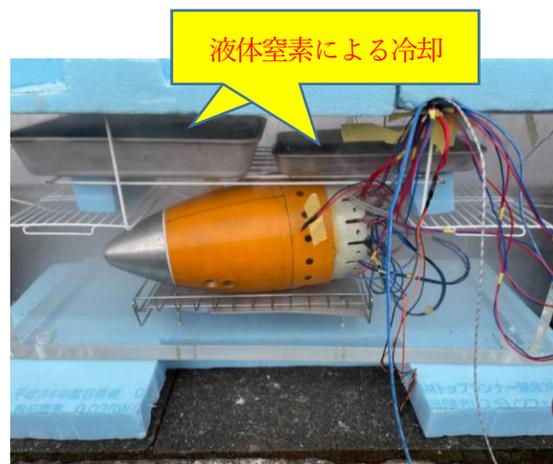


図8 低温分離試験

また、レニーロッド単体での試験は図9に示すような水槽に滑車を取り付けた装置を作製して行った。

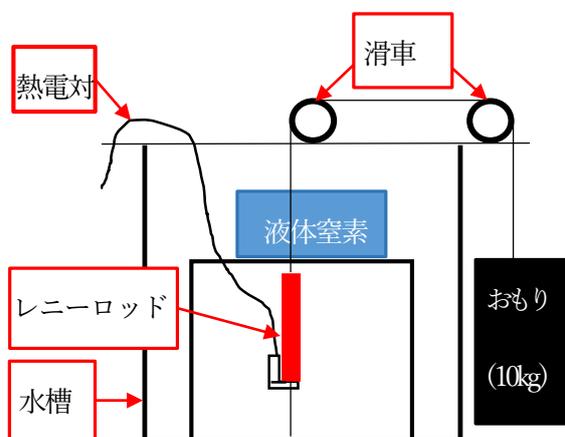


図9 滑車を取り付けた概要図

試験結果を表1に示す。ニクロム線とレニーロッドが凍り付いていると分離時間が3,4秒遅くなるため一段目分離タイミングが遅れ、二段目分離タイミングよりも早くに着水してしまった可能性がある。タイマーは -20°C では動作したが -50°C では動作不能となった。このことから、 -20°C から -50°C までの間にタイマーが働かない温度がありフライトではこの非動作温度になった可能性もある。基板の結露を模擬した試験を行った結果、タイマーが動作せず分離しなかったため、基板が結露により故障したことが分離失敗の要因である可能性が高い(図10)。常温で基板を濡らした場合に動作不能となったため、より条件の厳しい基板を濡らした状態で低温環境にさらす試験は行わないこととした。

以上の2つの可能性を考慮し、今後は基板ユニットをケースに入れ乾燥窒素を封入し、結露、温度低下を防ぐ必要がある。分離タイミング遅れ及び減速速度のばらつきに対する対策も必要である²⁾。

表1 FTA 試験結果

| 試験順 | 試験内容 | 分離 | 備考欄 |
|-----|---------------------------|----|--|
| 1 | 露付き常温分離試験 (ニクロム線とレニールボルト) | ○ | 分離時間に大きな変化はみられなかった。 |
| 2 | 低温分離試験 (露なし) | ○ | -50°Cで分離させたときは分離時間に変化はみられなかった。-33°Cで分離させたときは分離時間が通常より4秒程長くなった (雨で湿度が高く結露していた)。 |
| 3 | 露付き低温分離試験 (ニクロム線とレニールボルト) | ○ | 分離時間は10秒であり10kgのおもりでの通常の分離時間よりも3秒程度長くなった。 |
| 4 | 低温分離試験 (露なし) -20[°C] | ○ | 分離時間は約5秒であり常温と差はなかった。 |
| 5 | 低温分離試験 (露なし) -50[°C] | × | 分離しなかった。タイマー動作音も聞こえなかった。 |
| 6 | 常温戻し試験 | | ニクロム線が赤熱することを確認した。 |
| 7 | 露付き常温分離試験 (基板) | | タイマーが動作しなかった。 |
| 8 | 露付き低温分離試験 (基板) | | 実施していない。 |

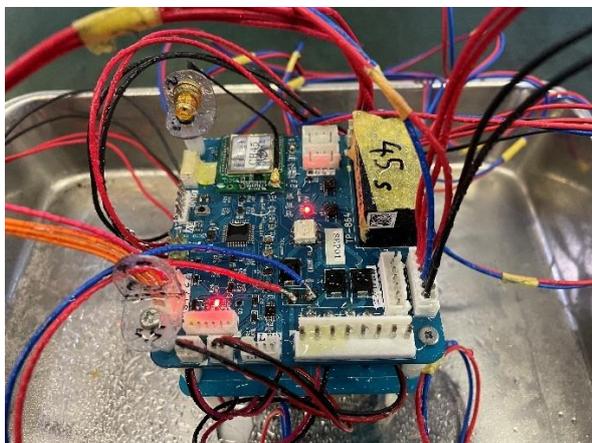


図10 濡らした基板

5. 結言

打ち上げ後のFTA試験から、基板ユニットをケースに入れ乾燥窒素を封入し、結露、温度低下を防ぐ必要があることや分離タイミング遅れ及び減速速度のばらつきに対する対策が必要であると分かった。

参考文献

- (1) 中尾仁, ユウリエイ, 音速を超える超小型ハイブリッドロケットの抗力係数の推算, 令和3年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2021-008, (2022).
- (2) 岡村元太, 渡邊舜也, 分離機構の信頼性試験, 令和3年度宇宙輸送シンポジウム, STCP-2021-011, (2022).

謝辞

本研究を進めるにあたり、分離機構の製作にご協力して頂いた株式会社ツツミ産業, 有限会社里中精機, 並びに計測機器開発にご協力して頂いた株式会社フルハートジャパンに厚く御礼を申し上げます。