

超小型衛星用分離機構システムの落下棟無重力試験とM-V ロケットによる軌道上実証

東京工業大学 松永三郎、藤原 謙、宮本 径、梶本晋嗣、宮下直己

Microgravity Experiment and On-Orbit Demonstration of Separation Systems for Nano-Satellites

Saburo Matunaga¹, Ken Fujiwara, Kei Miyamoto¹, Shinji Masumoto¹ and Naoki Miyashita¹

1:Tokyo Institute of Technology

E-Mail: Matunaga.Saburo@mes.titech.ac.jp

Abstract: In this paper, development and on-orbit demonstration of separation system for nano-satellites, in particular, Cute-1.7 + APD are described. Cute-1.7 + APD was successfully launched on Feb. 22, 2006 by the JAXA/ISAS rocket M-V-8 as a sub-payload which is a space for a balance weight to adjust rocket misalignment. The separation mechanism, the mechanical and electronic interfaces, and results of several functional and environment tests, in particular, microgravity tests are explained. Also the separation system for the follow-on nano-satellite Cute-1.7 + APD II is briefly introduced, whose satellite will be launched by an Indian rocket PSLV in the summer of 2007.

Key Words: Separation System, Nano-satellite, CubeSat, M-V Rocket, Launch, Microgravity Test

1. はじめに

世界中の大学などが中心となって数kg級の超小型衛星を短期間低コストで開発してピギーバック衛星として軌道上に打ち上げ、新規科学技術の早期実証などを行う計画が盛んに提案され注目を浴びている。このような超小型衛星の打ち上げに必須となるのがロケット打ち上げ時に衛星を安全に保持し、軌道上で確実に分離放出できる分離機構である。信頼性のある分離機構の実現は今後の超小型ピギーバック衛星の開発に避けては通れない。実際に日本、米国、欧州、ロシア、中国、インド等のロケットを用いる場合でも、分離機構を自前で用意するのが前提となるし、搭載可能性が格段に増大する。

東工大・松永研では、主にCubeSat用分離機構として、非火工品を使用した小型、軽量、低コスト、低衝撃、低擾乱分離の機能を持つ次世代超小型衛星用の分離機構を研究開発してきた。2003年6月30日のロシアロケットによるCUTE-Iの打ち上げ[1]、2005年7月10日のJAXA/ISASのM-V-6による分離機構実証実験TSD[2]を経て、今年2006年2月22日には、M-V-8号機により、赤外線天文観測衛星「あかり」とともに、東工大松永研の2機目の超小型衛星Cute-1.7 + APDが打ち上げられ軌道投入された[3-5]。さらに、現在、Cute-1.7 + APDの改良型であるCute-1.7 + APD II をインドのロケットPSLVにより、2007年6月30日に打ち上げ予定であり、そのため改良された分離機構を開発している。

本論文では、それら超小型衛星用分離機構の設計、開発、試験について述べる。

2. Cute-1.7 + APDとM-V-8サブペイロード

図1に示すCute-1.7 + APDはサイズ10cm*10cm*20cm、質量3.5kg（軌道寿命を延長するために重量化）の超小

型衛星である。主なミッションは下記である[3-5]。

- 1) PDAなどの民生品を用いて宇宙環境下での動作を保障した衛星バス機器の軌道上実証
- 2) APD (Avalanche Photo Diode)を放射線検出器として初めて軌道上で実証（理学ミッション）
- 3) 3軸姿勢決定と磁気トルカを用いた超小型衛星の姿勢制御実験の遂行
- 4) 世界中のアマチュア地上局を複数用いた広範囲データ取得実験の遂行と衛星を中継器として用いたデジタル・リピータ・サービス
- 5) 超小型テザー伸展機構の基礎的技術の軌道上実証

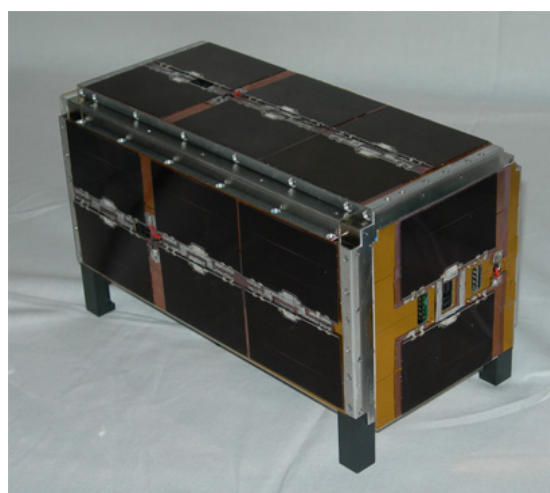


図1 Cute-1.7 + APD (フライトモデル)

サブペイロードへの主要な要求事項は以下である。

- 1) 大きさ：幅 200 x 奥行 150 x 高さ 125 の直方体以内
- 2) 重量：5kg/個 以下

3) 打ち上げ時の状態：コールドロンチ（電源 OFF の状態で打ち上げ）とする。

上記の1, 2)については、当該号機B3-PLの取付条件やサブペイロード全体の枠内で調整して最終的に決定された。なお、本サブペイロードはB3-PLの搭載機器に準じる形で搭載されるので、機械的・電氣的噛み合わせ、信頼性審査、安全審査などは、すべてロケット側で実施され評価がなされた。さらに衛星を軌道上に放出するということから、衛星としての安全審査も行われた。

東工大サブペイロード（図2）は、超小型衛星Cute-1.7 + APDとそれを軌道に投入するための分離機構システムで構成されている。分離機構システムはM-V-8ロケットとCute-1.7 + APDとの機械的I/Fを担っており、打ち上げ後ロケット側からの分離許可タイマ信号が来るまでの間、Cute-1.7 + APDを保持する。タイマ信号受信後、保持していたCute-1.7 + APDを分離する（図3）。

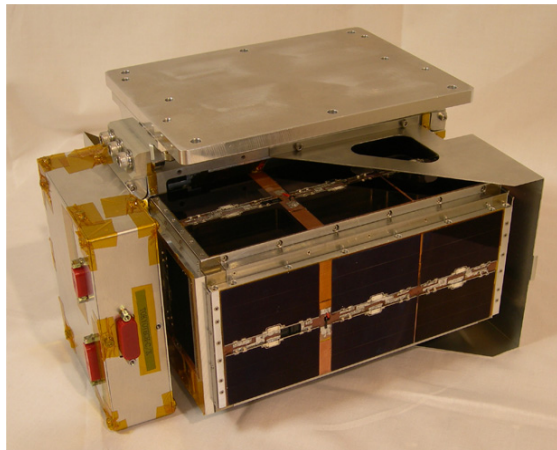


図2 東工大サブペイロード（衛星と分離機構）

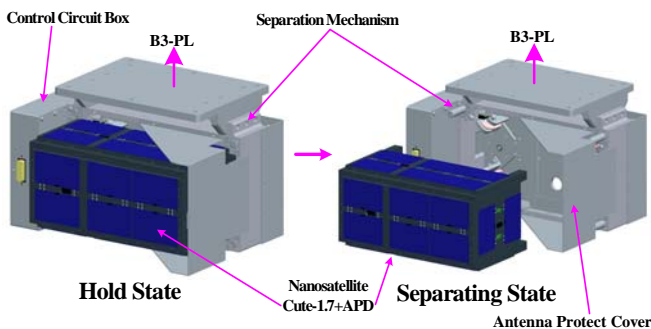


図3 衛星の分離放出のイメージ

3. Cute-1.7 + APD用分離機構システム

本機構で採用している本字分離原理は、CUTE-Iの分離機構やM-V-6サブペイロードTSDの分離実験で実証されてきた爪把持式分離であり、衛星の4隅の支柱から伸ばした足を分離機構側の爪で把持し、足の解放後、押し出しばねで衛星を放出する（図4）。本機構が過去の機構と大きく異なるのは、分離機構サイズが横に2倍長くなっていること、また、B3PLの設置条件を満たすため、および分離機構の衛星把持の作業を効率化するため、

把持爪を分離機構の底板の外で固縛できるように設計変更されていることである。また、分離機構ガイド部分には、軽量化を図るために、Mg合金を採用して、ワイヤー放電加工による精密な一体加工を行っている。

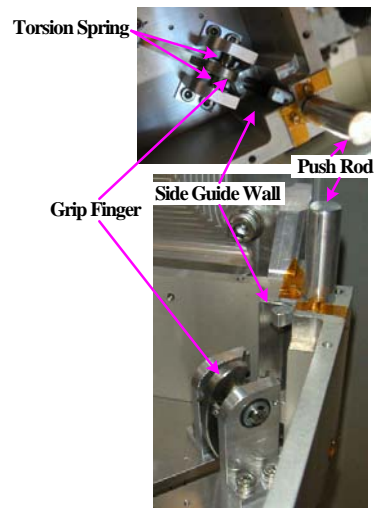
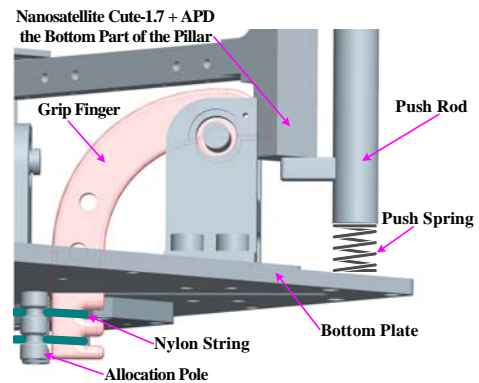


図4 爪把持式分離

図5に示すように分離機構は、ナイロン線で可動部を固縛することで、衛星Cute-1.7 + APDを機械的に把持した状態でラッチをかけている。分離許可タイマ信号を受信すると、東工大サブペイロードが起動しヒーターを加熱し始める。加熱後数秒でナイロン線は溶断し、ばね力によりラッチが外れ、衛星が押し出され分離となる。タイマによりヒーターの加熱は開始後5秒後にストップする。

M-V-8ロケットの打ち上げから1040秒後、ロケット3段部から分離許可タイマ信号を受けて、サブペイロード内部のラッチングリレーがONになり東工大サブペイロードが起動する。ここで始めてロケットからの電力が東工大サブペイロードに供給される。サブペイロードが起動すると、分離動作を開始し、5秒以内に衛星Cute-1.7+APDを分離する。

本サブペイロードは正常に軌道上での動作に成功した。

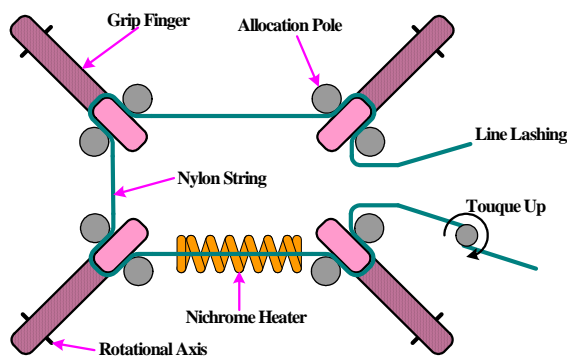


図5 ナイロン線固縛とニクロム線加熱による溶断

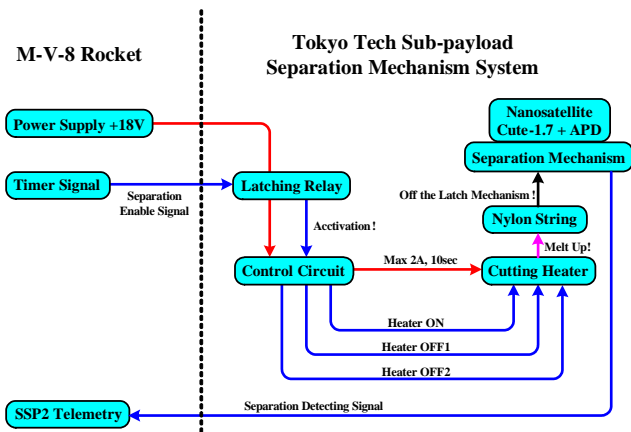


図6 分離機構の機能図

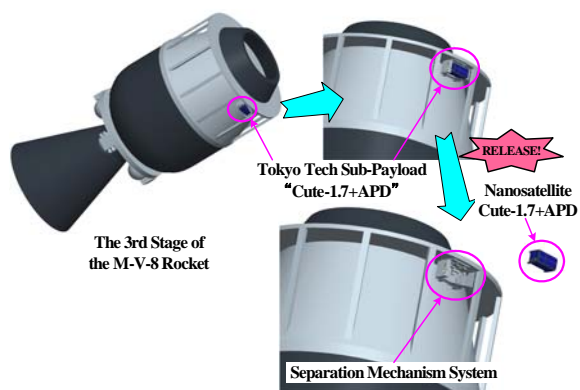


図7 M-V-8からの分離イメージ

4. 落下微小重力実験

本分離機構は、機械環境試験（EMにおいては複数回のQTレベルによる構造的耐性の確認、また、FMにおいては衛星表面全面に太陽セルを貼り付けた最終フライト状態での試験）、真空試験（特に、真空下でのナイロン線溶断時間の計測）、熱環境試験（恒温槽を用いた-20~+50°Cまでの熱環境における動作確認）を実施した。また、IA富岡での機械的I/F確認、ISAS相模原での噛合せ試験（機械的・電気的I/F確認）、内之浦での組立オペ、フライトオペを行なった。

ここでは、分離放出時の分離挙動の計測を目的として、岐阜県土岐市にあるMGLABにて実施した微小重力実験の結果を簡単に紹介する。

分離機構の性能評価に際しては、吊り下げばね方式など重力補償装置の使用が考えられるが、ロケットからの分離挙動を正確に予測するには、高精度な3次元微小重力環境下を模擬することが不可欠である。分離機構には、分離の放出速度、角速度、分散などの挙動予測が要求されるが、微小重力下では、分離機構と衛星の接触面の摩擦、分離後衛星を起動するための機械スイッチなど、地上では現れにくい弱い外乱要因が顕著になる。しかも分離時の不確定要素となる摩擦・衝突に関わる物理現象は、力学的にも予測が難しい。したがって、微小重力下での分離時における、並進・姿勢運動の分離挙動を計測し、その結果を実機の設計に資することを目指す。

平成17年3月28日~31日（10回の落下実験）と平成18年3月30日（2回の落下実験）にて、図8のような実験装置を用いて、ばね定数、ダミーマス質量、偏心による放出速度、姿勢挙動を計測した。即ち、ビデオによりダミーマスの分離後挙動を、パルスコードによりダミーマスの分離速度を、レーザ変位センサによりダミーマスの分離前後の姿勢変動を計測した。

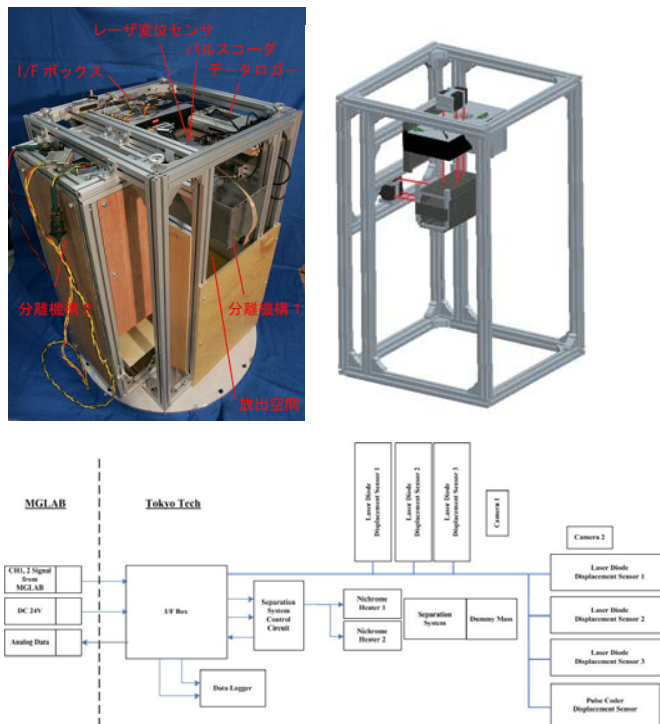


図8 微小重力実験用試験装置およびシステム図

平成17年の実験で得られたデータや技術的ノウハウにより、Cute-1.7 + APD用分離機構自体の最低限の機能保障、問題点の改善、実際のパラメータ設定に貢献できた。平成18年の実験では、Cute-1.7+APD用分離機構の同等品を用いてフライト時と同様なパラメータで、放出速度、衛星擾乱の計測を行った。平成17年の実験と、衛星質量、メカニカルスイッチ（擾乱源）、フライト用ばね、足加工（摩擦の違い）などの点で異なっている。

図9に分離時の様子を示す。図10にダミーマス質量ごとに、縦軸を放出速度、横軸をばね定数で実験結果をま

とめたのを示す。ばね定数が1N/mmと大きい場合に、数値がずれているが、これは分離時に構体がわずかに傾斜して足部分が引っかかったことが原因である。この平成17年度に得られた結果より、Cute-1.7 + APDのフライトには、ばね定数0.6N/mmを採用した。

そして平成18年に行なった3.5kgの場合の放出速度0.43m/sは、平成17年の結果から予測される値0.48m/sに対して、0.05m/s、即ち、10%ほど小さくなった。ガイド等のわずかな摩擦が誤差の原因であると考えられる。衛星質量と速度誤差を考慮すれば、誤差運動量は0.2kgm/s=0.2Nsと小さいので、ロケット側に提出すべき予測データとしては概ね許容範囲と判断できる。一方で、もっと精密な放出速度予測を要求される場合は、無重力実験をFM相当品で行う必要のあることが確認された。さらに、姿勢変動は0.2~0.3rad/sである。

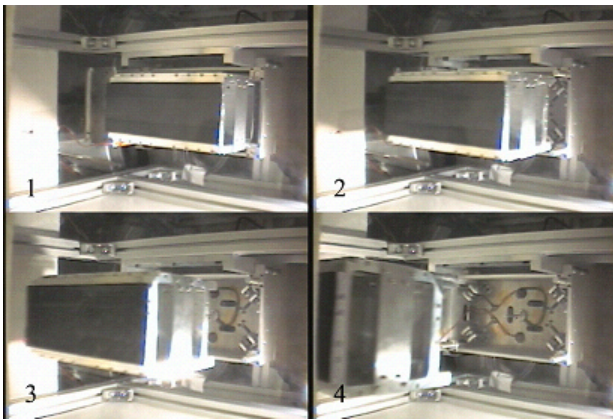


図9 分離時の様子

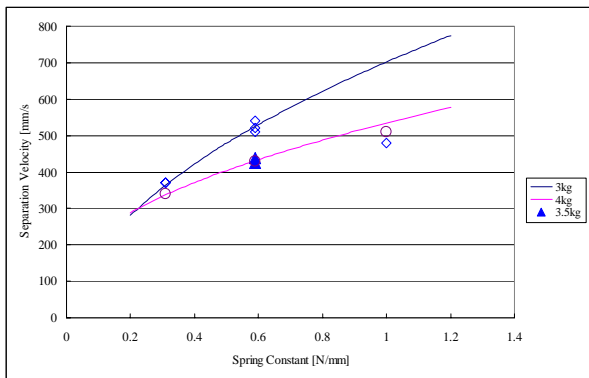


図10 放出速度の大きさ

5. Cute-1.7 + APD II 用の分離機構について

Cute-1.7 + APD II は、前号機の開発経験および軌道上運用結果を踏まえて、様々な点を改良設計した衛星であり、2006年4月より設計開発を開始した。衛星は全質量3kg、容積10cm×15cm×20cmと容積が1.5倍になったが、質量は軽量化を施している。8ヵ月経過した2007年1月現在、PFMレベルの開発にまで到達しており、全統合試験を鋭意行なっている。打ち上げは2007年6月30日にイ

ンドの4段ロケットPSLVを用いて行なう予定である。

東工大松永研では、この打ち上げに必要な分離機構についても自前で用意することになった。方式は前号機までに実績のある爪把持方式を採用することとした。放出速度の予測値は約0.5m/sにする予定である。打ち上げの契約により、分離機構自体の質量は2kg以下に抑えなければならないため、前号機よりも0.4kg以上、減量した。同時に、インドのロケットPSLVの電氣的・機械的インターフェイスを満足することはもちろん、機械環境試験にも耐えるように設計開発を行なっている。

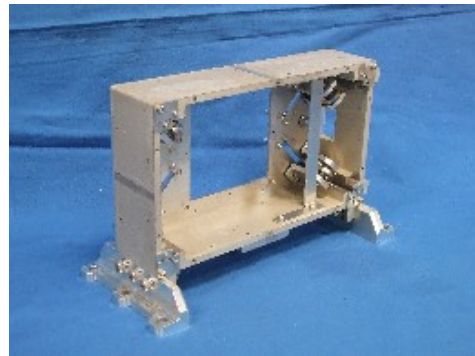


図11 Cute-1.7 + APD II 用の分離機構

6. おわりに

Cute-1.7 + APD用分離機構について簡単に紹介した。東工大・松永研では超小型衛星の分離機構について、今までに3回の軌道上実証を行い、全て成功できた。また、2007年度にはインドのロケットを用いて4回目の軌道上実証に臨む予定であり、是非、成功させたい。

なお、衛星および分離機構開発は文部科学省科学研究費、JAXAオープンラボ経費、落下塔を用いた微小重力実験はJSFの宇宙環境利用に関する地上研究、打ち上げについてはJAXA、そして、全般についてUNISECの支援を受けた。ここに記して感謝する。

参考文献

- [1] 此上, 他, "超小型衛星CUTE-Iの開発と軌道上運用評価," 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J88-B, No.1, 2005, pp.184-192.
- [2] 宮本, 他, "M-V-6ロケットサブペイロードによる超小型衛星用分離機構の軌道上実証実験" 第49回宇宙科学技術連合講演会講演集, 広島, 1A04, 2005年11月9日~11日, pp.1-6.
- [3] 尾曲, 他, "東工大超小型衛星Cute-1.7 + APDの開発," 第49回宇宙科学技術連合講演会講演集, 広島, 1A07, 2005年11月9日~11日, pp.1-6.
- [4] N.Miyashita, et al, "Development and Flight Report of Pico-Satellite Cute-1.7 + APD," 25th ISTS, Kanazawa, June 5-10, ISTS 2006-f-08, 2006.
- [5] <http://lss.mes.titech.ac.jp/ssp/cute1.7/index.php>