

## 東工大超小型衛星 Cute-1.7 + APD の開発

○尾曲邦之, 此上一也, 宮下直己, 居相政史,  
今井勝俊, 宮本 径, 矢部秀幸, 藤原 謙, 榎本晋嗣, Thomas Iljic,  
根田康美, 杉田沙織, 山中富夫, 松永三郎 (東工大)

## Development of Tokyo Tech pico-satellite Cute-1.7 + APD

Kuniyuki Omagari, Kauzy Konoue, Naoki Miyashita, Masafumi Iai,  
Katsutoshi Imai, Kei Miyamoto, Hideyuki Yabe, Ken Fujiwara, Shinji Masumoto, Thomas Iljic,  
Yasumi Konda, Saori Sugita, Tomio Yamanaka, and Saburo Matunaga  
(Tokyo Institute of Technology)

Key Words: pico-satellite, CubeSat, student leading development, PDA, APD

## Abstract

Laboratory for Space Systems at Tokyo Institute of Technology is developing the second student-leading pico-satellite “Cute-1.7 + APD”. The objectives of this satellite are 1) to facilitate future micro-satellite development by demonstrating a new methodology and 2) to share experiment opportunities using satellite in orbit. To realize the first one, Cute-1.7 + APD is installed with PDA to control devices and to handle data. For the other, various devices are prepared, for example, magnetic torquers, high energy sensor called APD, and amateur radio transceivers. In the paper, outline of Cute-1.7 + APD system and missions are described.

## 1. Cute-1.7 + APD 概要

東京工業大学, 松永研究室は 2006 年初頭の打ち上げを目指して, 大学衛星 Cute-1.7 + APD を開発している. Cute-1.7 + APD は, 松永研究室が開発する 2 機目の小型衛星であり, その目的は以下のとおりである.

- ・超小型衛星の開発を容易にする設計手法を提案する.
- ・国内外の研究者・学生に宇宙での実験機会を提供する.

これらの目標は, 2003 年に本研究室が打ち上げた人工衛星 CUTE-I の目標をさらに先へと押し進めたものである.

CUTE-I は, 近年急速に小型軽量化が進んでいる民生用エレクトロニクスを駆使することで, 基本的な衛星機能を非常に小型化することが可能であり, この新しいコンセプトを取り入れた衛星がどのような可能性を持つかを調べるものであった. CUTE-I はそ

の成果として, 超小型衛星が様々な宇宙ミッションに有効であることを示唆した. [1]

先に示した目標のうち, 前者は衛星の小型高性能化をさらに追及するものであり, 主な方針は, メインコンピュータに民生用の PDA をそのまま搭載するというものである. また後者は, 超小型衛星が今後の宇宙開発においてどのようなあり方が考えられるかをさらに具体的に追求するものであり, 姿勢制御アルゴリズムの研究, 軌道離脱システム実現のための基礎研究, 高エネルギーセンサ APD の実証実験, 広域無線サービスなどの実験を予定している. [2]

## 2. Cute-1.7 + APD のシステム詳細

Cute-1.7 + APD では冗長のために 2 個の PDA が搭載されている. PDA を搭載していることを最大限に活かし, データの長期記憶には SD カードを利用する. また, コンパクトフラッシュ端子に接続可能な民生品カメラを搭載し, 衛星分離時にロケット, 地球画

像、軌道離脱システム基礎実験装置の動作の様子などを撮影する。PDA を使用する上でもっとも気をつけたい点として、耐放射線設計が挙げられる。これに関しては、陽子線を照射する試験を行い、正常に動作する事を確認した上で、ウォッチドッグタイマー(WDT)を用いた監視システム、および 2 重冗長系の切り替えシステムを開発した。各種機器との通信には USB を使用する。DAQ (データ収集装置)、太陽センサ、温度センサ、APD と PDA は、それぞれ USB 制御器を介して通信する。完成品である磁気センサ、および安全性を要求する通信系コントローラは、RS-232 シリアル通信を利用する。

地上との通信には 4 系統の通信回線を用いる。それぞれ、CW430, FM430, FM1200, FM144 と呼ぶ。CW430 はビーコンであり、430MHz の周波数帯を用いて連続波を送信する。これにモルス符合の変調をかけることで、基礎的な衛星状態を把握することもできる。FM430 はダウンリンク回線であり、GMSK 変調によるデータ・パケットを地上に送信する。FM1200, FM144 はともに地上から衛星へと送信するアップリンク回線であるが、1200MHz は一般用、144MHz は管制用として区別して用いる。一般用では世界中のアマチュア無線家が Cute-1.7 + APD にアクセスし、衛星データを取得したり、メッセージをアップロードしたりすることが可能となる。管制用は、衛星の運用モード切り替え、衛星機能のコントロールを行う。本衛星の広域無線サービス実験は、一般用アップリンク回線を用いて行う。

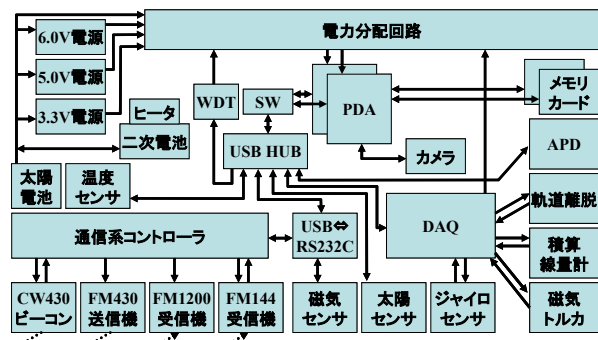


Fig. 1 Cute-1.7 + APD システム図

Fig. 2 に、衛星外観、および内部機器配置を示す。APD モジュールは、東工大理学部河合研究室が開発を担当するため、配置部分を明確に区別している。今回の設計では、およそ 2/3 をバス部分が占め、残りの 1/3 を APD モジュールが占める。

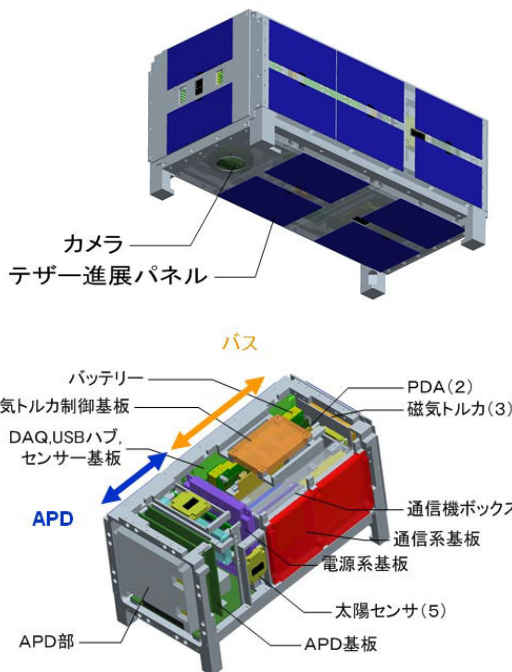


Fig. 2 Cute-1.7 + APD 構造

### 3. C&DH サブシステムの詳細

Cute-1.7 + APD のデータ処理は、市販の PDA で行う。これは、高度に集積化された大量生産品を使用することで、小型衛星システムの計算、処理能力を最低限のコストで大きく高める試みである。

搭載する PDA は、日立製 NPD-20JWL である。CPU には、インテル(R) PXA250 (400MHz)が搭載され、OS として、Microsoft(R) Windows(R) CE .NET 4.1 日本語版がインストールされている。インターフェースは、コンパクトフラッシュ、および USB 端子が利用できる。執筆時点では、コンパクトフラッシュ接続のカメラを接続し、軌道上での写真撮影を行う予定である。また、衛星内の各種コンポーネントとの接続には、USB を用いる。



Fig.2 日立 PDA NPD-20JWL

信頼性については、放射線耐性設計を行うとともに、改造の困難な PDA 内部については、放射線試験

を行い、運用に耐えうるものであるかどうかを確認した。

#### ・放射線耐性設計

放射線による機器の損傷の影響を軽減するため、2つの同型 PDA を搭載する。これらはともにウォッチドッグタイマー (WDT)により監視されている。PDA は、電力的な制限により常に 2 つを動作させることが不可能なため、どちらかの PDA の電源はオフになっている。PDA は、USB ハブを介して、定期的にタイマーをリセットする信号を送信する。この信号が途絶えたときは、PDA が正常に動作していないと判断し、ウォッチドッグタイマーは、自動的に PDA をシャットダウンする。同時に、もう一方の PDA に電力供給が自動的に切り替わる。

#### ・放射線試験

最高 60MeV の陽子線を用いた放射線試験を、大阪大学核物理研究センターの協力のもとで行った。

陽子線を主に CPU、メモリ部分に照射し、14 回の計測を行った結果、ウォッチドッグタイマーによる監視システムを用いて、低軌道で動作させる上ではほとんど問題がないことが確認された。[3]

### 4. ミッション

#### 4-1. 姿勢制御実験

小型衛星が今後も重要な役割を担うために、姿勢決定、姿勢制御技術は不可欠である。現在のところ、日本において CubeSat クラスの超小型衛星が明らかな姿勢制御を行った例はない。そこで、Cute-1.7 + APD では、超小型衛星で実現可能な姿勢決定・制御システムを開発し、実装することを目指す。

設計基準は、唯一、小型であることである。そのため、姿勢決定システムは半導体の振動ジャイロに加え、一種類の姿勢センサといった、最小限のものとする。姿勢センサの候補としては、CUTE-I で開発したイメージ型の太陽センサ、市販カメラを利用した恒星センサなどのアイデアがあったが、前者は十分な動作実績が得られなかったこと、また後者は必要な技術レベルが高いと判断されたことで、入射角型の太陽センサを採用した。姿勢制御システムは、磁気トルカを三軸に配置することにした。その際、磁気センサも併せて必要になる。

磁気トルカは、必要な容積が小さくなるように、ロッド型ではなく図に示すような空芯型を採用した。

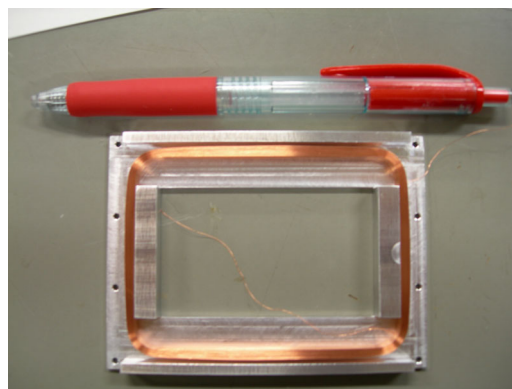


Fig. 3 磁気トルカ

姿勢制御については、他のミッションから特に重要な姿勢操作として要求されているものはない。したがって、ミッションにおいては、様々な制御アルゴリズムを軌道上で実証することに注力する。

Cute-1.7 + APD のひとつの特徴は、メインコンピュータに PDA を利用し、Windows OS が搭載されている点である。これは、磁気トルカの姿勢制御則を研究する研究者が、数値シミュレーションを行うために開発したコンピュータ・プログラムを、そのままの形で衛星に搭載することができることを意味する。この利点を最大限にいかすため、Cute-1.7 + APD では、磁気トルカの制御アルゴリズムを、軌道上で変更できるように通信系の設計を行う方針である。

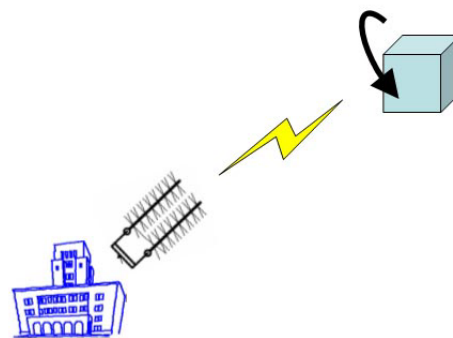


Fig. 4

プログラム更新のイメージ

#### 4-2. アマチュア通信実験

Cute-1.7 + APD では、CUTE-I で得たノウハウを元に、この衛星をアマチュア衛星としてより有効に利用していくためにはどのような方法がありうるかを検討し、一般のアマチュア無線ユーザ向けの実験機会を提供する。

CUTE-I は、常に連続波 (CW) をモールス符号で送信しているが、地上からのコマンドで、より高速な

データを送信することもできる。このモードは、市販の FM トランシーバに音声変調をかけたデータ通信方式を使用したものであり、アマチュア無線では AX.25 パケット通信という名前で広く世界中で普及している。CUTE-I は、多くの衛星データをこのパケット通信を使用してダウンリンクしている。しかし、コマンドに応じてダウンリンクするという仕組みであるため、基本的には日本上空通過時にしか、この FM 無線機を使用する機会はない。日本では多くのアマチュア無線愛好家が、CW に加えて、FM パケットの受信を試みているにも関わらず、海外から送られてくる受信レポートの中に、この FM パケットを受信したという報告はなかった。

FM 送信機は、ミッションデータをダウンリンクする日本上空以外では、使用されない。したがって、この時間は、衛星送信機は自由に使用することが可能であり、遠隔地同士のメッセージ交換などに有効利用できる。

Cute-1.7+APD では、世界中のアマチュア無線ユーザが自由にメッセージを送受信できるように、衛星側の受信機を 1 台追加する。この受信機の周波数は公開し、アマチュア無線で一般的な通信方式を使って、メッセージを受け付ける。このメッセージに、軌道上環境データや、カメラが取得した画像、観測データなどを付加して、ミッション時間外であれば FM パケット送信機を利用して、自由に取り出すことができるようにする。これは、デジタル・リピータ（中継）機能であるので短縮して、ディジピータと呼んでいる。[4]

この実験は、世界中のアマチュア無線ユーザが自主的に観測データを取得することにもなるので、データをうまく管理できれば、全地球規模で観測データを取得できることになり、その可能性を検討する実験でもある。東工大では、インターネットを利用して、取得データを世界的に管理するシステムの検討も行っている。

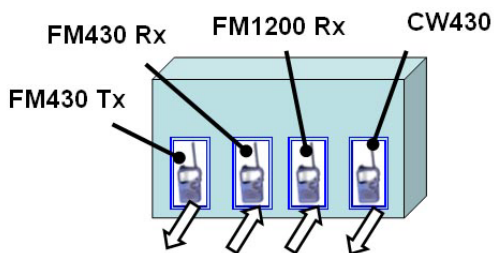


Fig. 5 無線機の構成

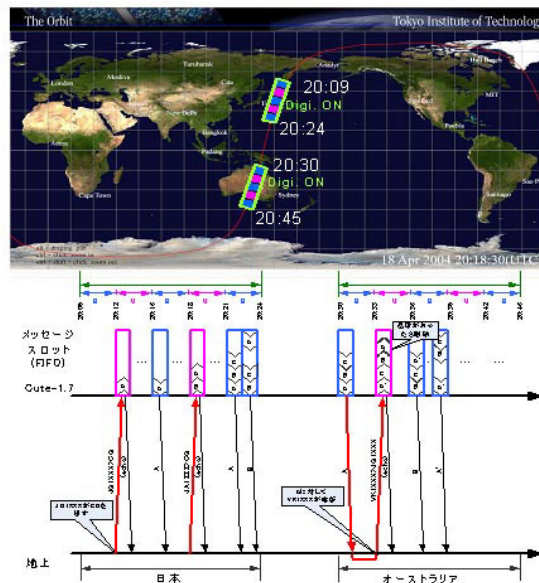


Fig. 6

ディジピータサービスのイメージ

#### 4-3. 軌道離脱システム実現を目指した、テザー放出実験

超小型衛星の打ち上げが活発になるにつれて、軌道上のデブリ問題は深刻になることが予想される。CubeSat の開発を今後も継続して行っていくためには、この問題は避けて通れない。東工大は、最初の CubeSat を打ち上げる以前からこの問題に真剣に取り組んでおり、軌道離脱システムについての検討を進めている。(例えば[5])

現在、超小型衛星の軌道離脱システムとして最も注目しているものは、ローレンツ力を利用して軌道速度を低下させる方法である。ミッションが終了した衛星は、Fig. 7 に示すような 2 つの部分に分割され、その間を導電性テザーで結ぶことにより、ローレンツ力を発生させる。電流は常に同一方向に流れる必要があるため、荷電粒子は真空中に放電させる必要があり、高い電圧が必要になる。[6]

技術課題は、荷電粒子を真空放電させるための材料研究、分離プレートという小さな面積で、高電圧を発生させる電子回路の研究、テザーを進展させ、適切な長さで停止させる技術、衛星の姿勢を高度に安定化させ、テザーを磁場に垂直に張る技術など、非常に多岐にわたり、実現には高度な技術が必要である。

そこで、Cute-1.7+APD では、導電性テザーを放出し、正しく分割し、衛星の姿勢を安定化させるところまでの試験にとどめ、姿勢制御技術としてこのことが可能であるということを検証する。

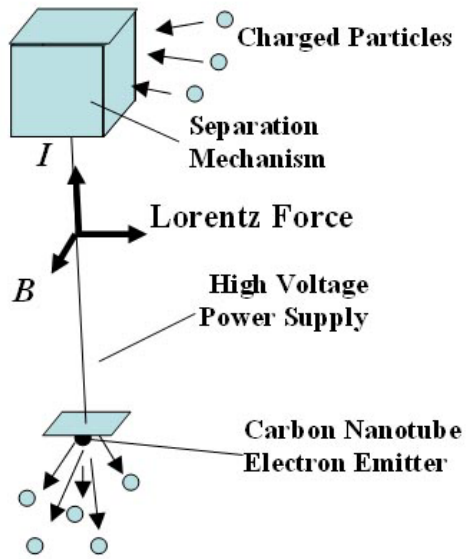


Fig. 7 提案する軌道離脱システム

本実験のイメージは、Fig. 8 に示すとおりである。荷電粒子放出材料には、カーボンナノチューブの利用が期待されており、本実験においてテザーの安定した放出技術が実現すれば、軌道離脱システムの実現可能性は非常に高まると期待される。



Fig. 8 テザー進展実験のイメージ

Fig. 9 には、実験装置を示す。左側が、実際に放出されるプレートであり、衛星とは導電性テザーで結合されている。テザーは右側の部分でまきとられており、プレートが分離されると進展する。

プレートの分離には、ニクロム線を通電加熱することにより、縛られたダイニマを溶断する装置を用いる。これは、東工大が CUTE-I の衛星分離機構に用いたものであり、Cute-1.7+APD の衛星分離機構でも同様の分離装置を利用している。

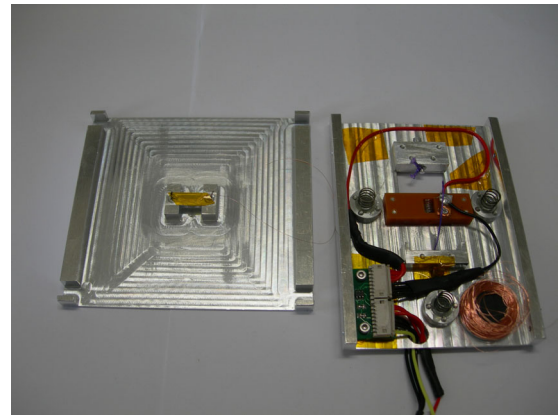


Fig. 9 テザー進展機構

#### 4.4. APD 実証実験

東工大理学部河合研究室は、Cute-1.7+APD の科学観測センサである APD を開発している。[7] Cute-1.7+APD の名称の後半部分は、このモジュールを搭載していることに由来している。

国内外の研究者・学生に宇宙での実験機会を提供することで、小型衛星の持つ可能性をさらに追求するという本衛星の目的をより具体的なものにするために、工学部松永研究室と、理学部河合研究室は、共同開発を開始した。

APD は、Fig. 10 に示すような小型のフォトダイオードであり、Cute-1.7+APD では、その実証試験を行う。このセンサは、光子の検出などへの使用が期待されているが、今回のミッションでは、高層大気の荷電粒子密度を測定することにより、機能を実証する。

荷電粒子は、軌道離脱システムにおいても重要な役割を果たし、またアマチュア無線の電波伝播状況の目安にもなるなど、Cute-1.7+APD のミッションに深く関連しているが、これらと APD 実証実験とはそれほど強い関連性はない。



Fig. 10 APD 素子

## 5. 打ち上げと分離機構

Cute-1.7 + APD は、2006 年に JAXA/ISAS の M-V ロケット 8 号機サブペイロードでの打ち上げを目指して開発中である。この打ち上げはまだ正式に決定しているわけではないが、すでに M-V ロケット 6 号機では、Cute-1.7+APD での利用を目標とした「M-V 打ち上げ用衛星分離機構」の実証実験を行っており、東工大としては、そのような方向で本衛星の開発を進めている。[8]

Fig. 11 には、Cute-1.7 + APD とその分離機構を示す。

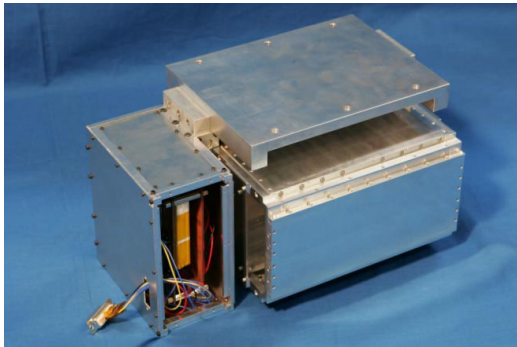


Fig. 11 衛星と衛星分離機構

## 6. まとめ

本稿では、東京工業大学松永研究室が 2006 年初頭の打ち上げを目標に開発している 2kg 級小型衛星について、その目標とミッションについて説明した。打ち上げ手段はいまだ未定であるが、執筆時点でフライトモデルの製作が行われており、早い段階での打ち上げ実証が行われることが期待されている。

民生品を利用することにより、小型衛星システムの計算、処理能力を最低限のコストで大きく高めるこの挑戦は、超小型衛星の特徴と適合しており、今後の発展がますます期待されるだろう。

しかしその一方で、民生品は生産終了とともに入手が著しく困難になったり、また元々過酷な環境での使用を想定していないものであるため、冗長性に対して余計に気を使う、もしくは大掛かりな環境試験が必要になったりするなど、必ずしもメリットばかりではない。

これは、実際に開発を行ってみてはじめて理解できることであり、全ミッション終了後には、これらの長所、短所について冷静に総括を行いたいと考えている。

## 参考文献

- [1] 尾曲 邦之, 此上 一也, 澤田 弘崇, 中谷 幸司, 宇井 恭一, 宮下 直己, 居相 政史, 占部 智之, 柏 宗孝, 山口 伸斉, 浅見 正, 宮澤 航, 東ヶ崎 優, 森田 幾太郎, 矢部 秀幸, 松永 三郎, “1kg ピコサテライト CUTE-I 軌道上データ解析の最新結果報告”, 3945, 2004 年度日本機械学会年次大会, 9月5-9日, 北海道大学, No.04-1, Vol.5, 2004, pp.471-472.
- [2] Masafumi Iai, Kazuya Konoue, Koji Nakaya, Kyoichi Ui, Naoki Miyashita, Masashi Asami, Wataru Miyazawa, Kuniyuki Omagari, Yusuke Funaki, Katsutoshi Imai, Kei Miyamoto, Hideyuki Yabe, Ken Fujiwara, Shinji Masumoto, Takeshi Usuda, "Tokyo Tech's second microsatellite, Cute-1.7," Mechanical Engineering Congress 2004 International Symposium, Hokkaido University, Sapporo, 6-7 September 2004, 212.
- [3] Masafumi Iai, Yusuke Funaki, Hideyuki Yabe, Ken Fujiwara, Shinji Masumoto, Takeshi Usuda, Saburo Matunaga, Jun Kataoka, Tatsushi Shima, "A PDA-Controlled Pico-Satellite, Cute-1.7, and its Radiation Protection," 18th AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC04-IX-8, Logan, USA, August 12, 2004.
- [4] 尾曲 邦之, 居相 政史, 宮下 直己, 此上 一也, 今井 勝俊, 杉田 沙織, 松永 三郎, “Cute-1.7+APD におけるアマチュア衛星サービス”, 2005 年度日本機械学会年次大会 (発表予定)
- [5] 宮澤航, 居相政史, 松永三郎, “弾性体を用いた膜面展開機構の試作および地上実験”, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会講演集 CD-ROM, 福井, 2C16, pp.807-812, 2004 年 11 月
- [6] 居相政史, 榎本晋嗣, 松永三郎, "宇宙デブリ対策のための超小型衛星用導電性テザーシステム," 日本機械学会第 13 回スペース・エンジニアリング・コンファレンス [SEC '04], 2005 年 1 月 21 日, 東京
- [7] J. Kotoku, J. Kataoka, Y. Kuramoto, Y. Yatsu, N. Kawai, T. Ikagawa, T. Saito, T. Shima, N. Miyashita, M. Iai, K. Omagari, K. Fujiwara, Y. Funaki, H. Yabe, S. Matunaga, “Design and development of Tokyo Tech pico-satellite Cute-1.7”, SPIE Conference Optics & Photonics ,San Diego, 31 July-4 August 2005
- [8] 宮本径, 宇井恭一, 宮下直己, 松永三郎, “M-V 6 号機サブペイロードを利用した超小型衛星用分離機構の軌道上実験システム”, 第 48 回宇宙科学技術連合講演会講演集 CD-ROM, 2F03, 福井, 2004 年 11 月