

東工大・理工学試験衛星 Cute-1.7 + APD のフライト結果と次期衛星開発

東工大 藤原謙、松永三郎、尾曲邦之、榎本晋嗣、Thomas Iljic、上野泰平、根田康美、田中洋平、前野正樹、山中富夫、芦田宏樹、池田拓郎、西田淳一

Tokyo Tech Science and Engineering Test Satellite Cute-1.7 + APD Flight Results and the Succeeding Satellite Development

Ken Fujiwara, Saburo Matunaga, Kuniyuki Omagari, Shinji Masumoto, Thomas Iljic, Taihei Ueno, Yasumi Konda, Yohei Tanaka, Masaki Maeno, Tomio Yamanaka, Hiroki Ashida, Takuro Ikeda and Junichi Nishida.

Tokyo Institute of Technology, 2-12-1 Ookayama, Meguro, Tokyo 152-8552

E-Mail: fujiwara@lss.mes.titech.ac.jp

Abstract: Tokyo Tech had developed a nano-satellite Cute-1.7 + APD that was launched by JAXA M-V-8 rocket and conducted its initial missions. We also have developed the succeeding satellite that will be launched on Jun 2007.

Key words; Nano-satellite, Student satellite project

1. 背景

近年、大学における学生主導の衛星開発が盛んに行われる中で、東工大松永研究室は 1kg の超小型衛星 CUTE-I を開発した。CUTE-I は 2003 年 6 月に打ち上げられ、現在まで 3 年以上の軌道上運用を続けている。この衛星開発で培った基礎技術を基に、我々はより多機能・高性能である 3kg 衛星 Cute-1.7+APD の開発を行った。2006 年 2 月 22 日に Cute-1.7+APD は、JAXA の M-V ロケット 8 号機のサブペイロードとして打ち上げられ、テレメトリ送信・民生機器の軌道上利用・アマチュア無線サービス・姿勢決定などの初期運用に成功した。その後、衛星は地上からのコマンドを受け付けない状態に陥り、調査の結果放射線による SEL が原因であるとの結論に至った。我々は復旧作業を続けると同時に、Cute-1.7+APD に放射線対策を施した 2 号機の開発を行った。2 号機は 2007 年 6 月にインドの PSLV ロケットによって打ち上げられる予定である。本稿では、Cute-1.7+APD 1 号機のミッション、仕様、運用結果について報告し、続いて次期衛星である 2 号機の開発及び設計変更について報告する。

2. 衛星ミッション及び設計仕様

2.1 衛星ミッション

Cute-1.7+APD 1 号機のミッションを以下に示す。

- 1) 磁気トルカを使った姿勢制御実験
 - 2) アマチュア無線サービス
 - 3) APD センサ軌道上実証
 - 4) テザー放出実験
 - 5) 民生用機器の宇宙利用
 - 6) 超小型衛星用分離機構システムの軌道上実証
- 姿勢制御実験では、CubeSat として初めて 3 軸姿勢

制御を実施する。姿勢制御アルゴリズムをアップリンクにより更新可能にすることで、研究者に広く制御実験機会を提供する。アマチュア無線サービスでは、デジタルリピータを搭載し衛星利用機会を搭載すると共に、世界中のアマチュア無線家と協力し衛星データの効率的な回収を試みる。APD センサは東工大理学部河合研究室が開発したもので、次世代γ線天文衛星への搭載を目指している。テザー放出実験では衛星運用終了後、非デブリ化を目的とした軌道上離脱用導電性テザー放出の基礎実験を実施する。民生機器の宇宙利用では、民生機器を積極利用することにより、短期間・低コストによる超小型衛星開発を目指す。分離機構システムは、独自開発の超小型衛星用分離機構を打ち上げに使用し、信頼性の高い分離機構システムを確立するため動作実証を行う。この分離機構は MGLAB の無重量実験施設を使い動作試験し、設計検討を重ねてきたものである。

2.2 設計仕様

Table 1 に示すように、Cute-1.7+APD 1 号機は外形が CubeSat 2 つ分、重量は 3.5kg、発生電力は約 3W である。衛星の投入軌道高度が低いため、軌道寿命を延ばすために重りを付加してある。メイン MPU には PDA を 2 台冗長で使用している。ダウンリンクは CW ビーコンを常に送信し、GMSK9600bps のパケット通信がミッションデータの送信時に用いられる。1200MHz の受信機をアマチュア無線サービスのデジタルリピーターとして使用する。姿勢検出用センサとして、ジャイロ 3 軸、太陽センサ、磁気センサを、アクチュエータとして磁気トルカを搭載している。各機器の構成とし

て、図1に示すように、PDAをメイン演算器とし、I/FのUSBを介して各サブシステムを接続する。サブシステムにはカメラ、通信機、メモリーカード、USBハブなどに民生機器を積極利用している。

Items	Descriptions	
Shape	226mm * 112mm * 133mm	
Weight	3.6kg	
Main MPU(PDA)	Hitach NPD-20WL (x2)	
Communication	Uplink (Command)	144MHz FM/AFSK (Ax.25, SRTL)
	Uplink (Public Service)	1.2GHz GMSK (Ax.25, SRTL)
	Downlink : Beacon	430MHz CW (Morse)
	Downlink : Packet	430MHz AFSK/GMSK (Ax.25, SRTL)
Sensors	Gyroscope (3 Axes)	
	Sun Sensor	
	APD (Avalanche Photo Diode)	
	Magnetresistive Sensor (3 Axes)	
Actuator	Thermo Sensor	
	Magnet Torquer (3 Axes)	
Camera	CMOS Camera (1.3M Pixel)	
Generating Power	3.0W(avg.)	
Battery	Lithium-Ion (Mn - anode)	
Solar Cell	GaAs	
Launch	22-Feb-06	

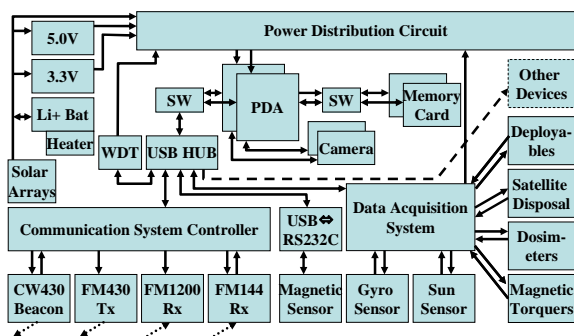


Fig.1 System Overview

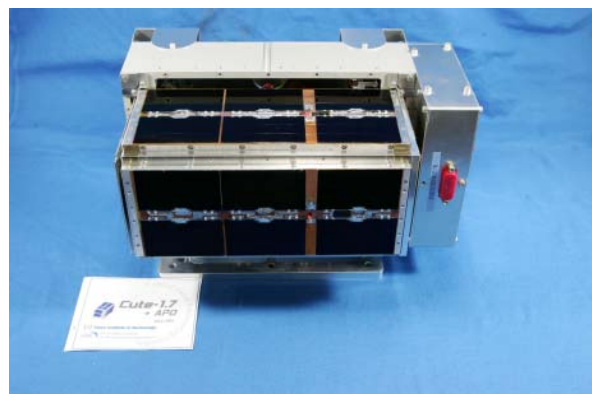


Fig.2 Cute-1.7+APD & Separation Mechanism

3. 軌道上実証

3.1 運用履歴

Cute-1.7+APD1号機はJAXA/ISAS M-V8号機ロケットのサブペイロードとして、我々の開発した衛星分離機構を介してロケット第3段部B3-PLに取り付けられ、打ち上げられた。ロケットから分離許可信号を受け取った後、衛星は軌道へ投入されハウスキーピングデータを含むCWビーコンの送信を開始した。東工大地上局にて電波を受信し、PDAの起動及び衛星の初期状態の確認に成功した。同時に世界中のアマチュア無線家からの受信報告を受けた。また、地上局からアップリンクコマンドを送信し、APDの起動、姿勢データの受信等に成功した。打ち上げから23日後、消費電力の異常な上昇が確認されたためミッションの遂行を中断し、状態把握のための運用を行ったが、同時に衛星がアップリンクを全く受け付けない状態に陥った。

コマンドを受け付けなくなる以前に実施したミッションをまとめると、まず民生機器の宇宙動作実証はPDA及びサブシステムの動作により達成された。APDは起動に成功し、APDセンサを含む周辺回路の動作確認を実施した。また、デジタルリピータ機能は動作できなかったが、アマチュア無線サービスとしてGMSKのダウンリンクを行い、受信報告を受けた。姿勢ミッションでは磁気トルカを使った3軸姿勢制御は実施できなかったが、ジャイロ及び太陽センサの正常動作を確認し、衛星の姿勢推定を行った。テザー放出実験は実施に至らなかった。

現在、衛星はデータを含まない連続波を送信し続けており、今後、軌道寿命として推定される1・2年間は復旧作業運用を続ける予定である。また、今回の異常動作の原因究明作業を実施し、SELが原因であるとの結論に至った。異常動作について詳しくは参考文献[1,2]に記載してある。

3.2 衛星テレメトリ

打ち上げ後の衛星の状態は、Fig.3に示す電池電圧及びメインバス電圧から読みとることが出来る。衛星テレメトリは、異常発生後も5月6日までのデータを受信している。履歴によると、消費電力の増加が確認された3月16日以降、電池電圧は徐々に減少を始めた。4月7日には電圧がCW送信機の動作電圧を下回ったため、衛星からの電波送信が停止した。4月15日に衛星は初めて食入りし衛星の全機器の電源が切れ、異常消費電力が解消されたため、衛星は再び充電を始め16日にテレメトリ送信を再開した。しかし、5月5日に再び急激な電圧低下が確認され、6日以降テレメトリの送信を停止した。

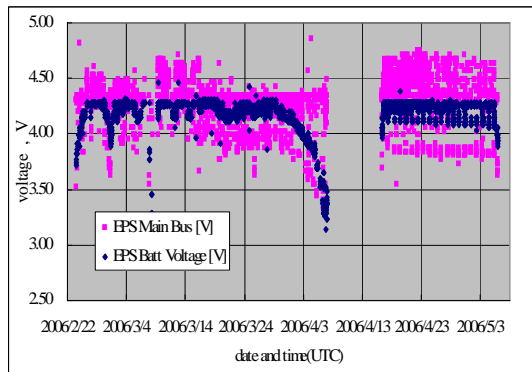


Fig.3 Battery Voltage and Main Bus Voltage Record

3.3 アマチュア無線との協力

Cute-1.7+APD の CW ダウンリンクは、世界中のアマチュア無線家によって受信された。受信報告の分布を図 4 に示す。AFSK ダウンリンクは、ミッションデータを送信し、アマチュア無線化の協力により効率的なデータ受信が可能になった。GMSK 変調による通信も、数回の受信協力を受けながら試験運用を行った。これらの交流を通じて、Cute-1.7+APD はアマチュア無線通信協会よりオスカーナンバーとして CUBESAT-OSCAR-56 (CO-56) を付与され、正式にアマチュア無線衛星として認められた。



Fig. 4 Reception reports from the world. (powered by google earth)

3.4 姿勢系ミッション

本衛星の姿勢系ミッションは、超小型衛星用姿勢制御・決定機器を開発し動作実証すること、及び姿勢制御実験の機会を広く提供することである。姿勢決定系は磁気センサ・太陽センサ・ジャイロで構成される。姿勢決定アルゴリズムとして、REQUEST 法と幾何学的決定法の 2 種を搭載している。姿勢制御装置には出力最大磁気ダイポール 0.045Am^2 の磁気トルカを 3 つ用いている。

図 11 は 2 月 27 日に受信した太陽センサ出力結果から衛星姿勢を求めた図である。図中球中心から延びた線は機体固定座標系での太陽方向を示す。これ

より、衛星は約 30 秒で x 軸まわりに 1 回転していることが分かった。また、図 12 は 3 月 7 日の衛星運用時に得られたジャイロセンサのデータであり、地上での計算によりクォータニオンを導出した。その結果、慣性モーメントが最も大きな z 軸まわりの回転が確認され、その平均値は 0.28rad/s であった。よって、衛星は 22.5s かけて 1 回転していることが分かった。

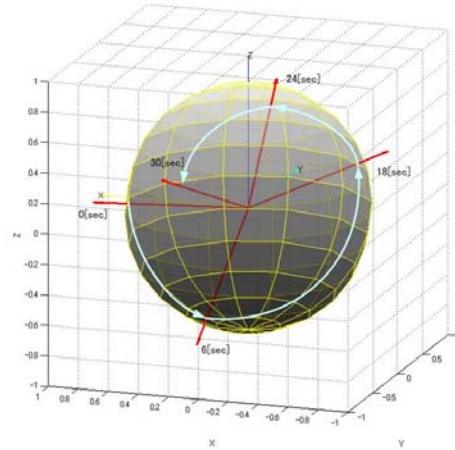


Fig. 5 Direction of the sun in body fixed coordinate system

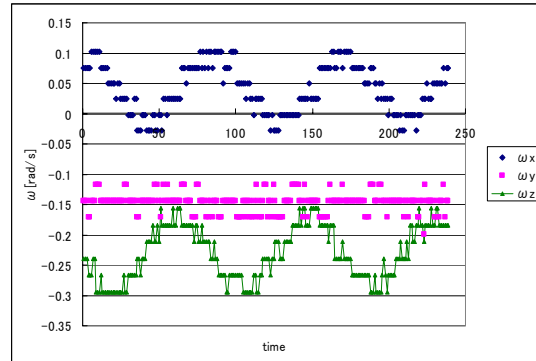


Fig.6 Gyro Data

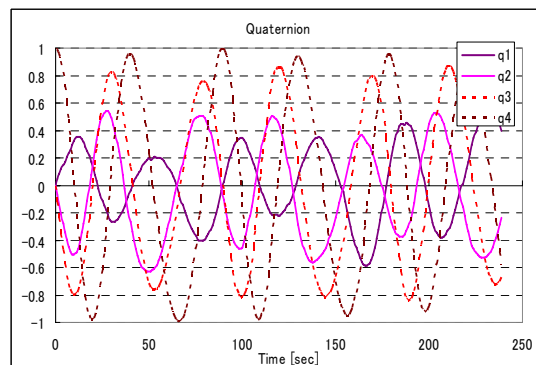


Fig.7 Quaternion

4. Cute-1.7+APD2 号機

1号機の軌道寿命が短いことが予想されていたので、2号機の打ち上げを1号機の開発時より検討していた。2号機はカナダのトロント大の UTIAS の仲介で、2007年6月にインドの PSLV ロケットによる打ち上げが予定されている。2号機のミッションは1号機とほぼ同じであるが、1号機の不具合を考慮し幾つか変更箇所がある。

衛星の放射線耐性を向上させるため、1号機で SEL が発生したと推測されるマイコンに対して、過電流検出回路を追加した。マイコンに SEL が発生し過電流を検出すると自動的に回路を1度遮断し、自動再起動する構成になっている。この対策の有効性は放射線試験を通じて確認した。さらに1号機に比べ衛星サイズ要求に余裕があったため、内部回路の配置・接続方法を変更することにより、衛星内部のアクセス性を向上した。また、1号機では発生電力の制約が全機器運用の妨げになっていたため、外形を 220×180×115mm にサイズアップし、太陽電池セルの貼り付け面積を拡大した。1号機の運用で実施出来なかった姿勢制御ミッションについてさらなる検討を行い、衛星の残留磁場計測を行った結果、0.07Am²程度であることが分かった。残留磁場は1号機で検討していた値よりも大きかったため、確実に姿勢制御を実施できるように駆動磁気トルカの出力を向上させた。また、テザー放出実験については、2号機では実施しないことにした。これらの仕様を Table2 に、衛星外観を Fig.9 に示す。

現在、衛星構造及び内部回路の改良はほぼ終了し、各種環境試験及び運用試験を実施している。今後は、振動試験、真空試験、最終残留磁場測定などを随時実施していく。また、PSLV ロケットとのインターフェース調整を2月末に予定している。

Table.2 Specification of Cute-1.7 + APD#2

Item	Description
Size	220x180x115mm
Weight	3kg
Power Generation	6.6W
Mission	COTS devices demonstration
	Attitude control
	Amateur radio service
Sensor	APD sensor demonstration
	Magnet:3axis
	Gyro:3axis
Actuator	Sun Sensor:6
	Magnet torquer
C&DH	PDA:2

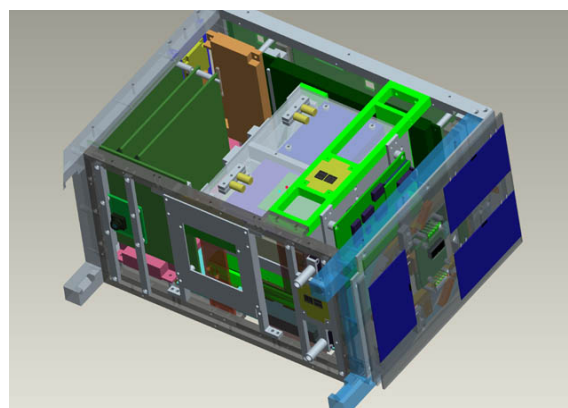


Fig. 8 Cute-1.7 + APD#2 CAD Model



Fig. 9 Cute-1.7 + APD#2 under development

参考文献

- [1] Naoki Miyashita, Masafumi Iai, Kuniyuki Omagari, Katsutoshi Imai, Hideyuki Yabe, Kei Miyamoto, Thomas Iljic, Takeshi Usuda, Ken Fujiwara, Shinji Masumoto, Yasumi Konda, Saori Sugita, Tomio Yamanaka, Kazuya Konoue, Hiroki Ashida and Saburo Matunaga, "DEVELOPMENT AND FLIGHT REPORT OF PICO-SATELLITE Cute-1.7 + APD", 25th International Symposium on Space Technology and Science, Kanazawa, June 4-11, 2006, 2006-f-08
- [2] Kazuya Konoue, Naoki Miyashita, Masafumi Iai, Hideyuki Yabe, Katsutoshi Imai, Kei Miyamoto, Shinji Masumoto, Thomas Iljic, Ken Fujiwara, Takeshi Usuda, Yasumi Konda, Saori Sugita, Tomio Yamanaka, Saburo Matunaga, "Tokyo Tech Second Nano-Satellite Cute-1.7 + APD and its Flight Operation Results", The 57th International Astronautical Congress, Valencia, October 2-6, 2006.