

福岡工業大学 機関リポジトリ

FITREPO

Title	超小型衛星FITSAT-1(にわか)の構造・機能と運用
Author(s)	田中卓史, 河村良行, 田中崇和
Citation	福岡工業大学研究論集 第46巻2号(通巻71号) P43-P61
Issue Date	2014-2
URI	http://hdl.handle.net/11478/1267
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	Publisher

Fukuoka Institute of Technology

超小型衛星 FITSAT-1 (にわか) の構造・機能と運用

田 中 卓 史 (情報工学科)
 河 村 良 行 (知能機械工学科)
 田 中 崇 和 ((株)ロジカルプロダクト)

Structure, Functions and Operations of CubeSat FITSAT-1 (NIWAKA)

Takushi TANAKA (Department of Computer Science and Engineering)
 Yoshiyuki KAWAMURA (Department of Intelligent Mechanical Engineering)
 Takakazu TANAKA (Logical Product Corp.)

Abstract

FITSAT-1 was deployed on 5th Oct. 2012 from ISS and it went around the earth 9 months, and decayed on 4th July 2013. The main mission of FITSAT-1 is actual proof experiments which perform 115.2 kbps high-speed communication with 5.8 GHz microwave. Each Jpeg-VGA picture taken at the time of deployment was received from 2 to 6 seconds. The 2nd mission is the experiment which shines a satellite by LED and investigates the possibility of the visible light communications between a satellite and the ground. The first light from the satellite was pictured in Kurashiki and the Seoul South Korea. In the following experiments, many pictures were taken in Ebina, Toyama, Kimizu, and Ehime Japan. Our FITSAT-team succeeded in extraction of a light signal using the photo-multiplier attached to the telescope. Moreover, we discovered that FITSAT-1 is increasing its rotation speed.

Key words: *cubesat, 5.8GHz, high-speed communication, LED, optical communication, FITSAT*

1. はじめに

FITSAT-1 (愛称：にわか) は福岡工業大学小型衛星プロジェクトが開発した 1 辺が 10cm のキューブサット (1 U) である。質量は 1 U キューブサットの最大質量 1.33kg より 10g 少ない 1.32kg である。2012 年 7 月 21 日に種子島より H-IIB ロケット 3 号機で国際宇宙ステーションへ運ばれ、同年 10 月 5 日 0 時 44 分 (JST) に国際宇宙ステーションから宇宙に放出された。9 ヶ月間、地球を 4300 回以上周回して 2013 年 7 月 4 日に落下した。FITSAT-1 の主ミッションは 5.84GHz のマイクロ波を用いて 115.2kbps の高速通信を行う実証実験である。放出時に撮影された 20 枚の Jpeg-VGA 画像は、1 枚当たり 2~6 秒で受信することができた。なお、5.84GHz の信号は福工大の地上局だけでなく、新潟市、上尾市、アメリカバーモント州バーリントンでも受信され、ドイツのボーフムでは AMSAT-DL チームが画像の復元にも成功された。副ミッションは衛星を LED で

光らせ、衛星地上間の可視光通信の可能性を調べる実験である。最初の衛星からの光は、倉敷市、韓国ソウルで撮影された。続く実験では海老名市、富山市 (ムービー)、君津市、愛媛県西予市、熊本県小国町で撮影された。また福工大チームは湯布院において望遠鏡に取り付けた光電子増倍管により電気信号の取り出しにも成功した。

2. FITSAT-1 の構造

2.1 外観

FITSAT-1 の上面には 5.84GHz、右旋円偏波のパッチアンテナと定格 3W の緑 LED を 2 直列、25 並列で 50 個を取り付けている (図 1, 図 3)。5.84GHz のパッチアンテナはテフロンシートで保護されている。他に前カメラのレンズ穴がある。50 個の LED は 200W 以上のパルスで光らせる。4 つの側面にはそれぞれ太陽電池セルを 2 枚、直列接続で取り付けている (図 5, 図 6)。底面には 1.26GHz のパッチアンテナと定格 3W の赤 LED を 4 直列、8 並列で 32 個を取り付けている (図 2, 図 4)。底面には他に後カメラのレンズ穴、437MHz のホイップアンテナが伸びて出て

くる穴がある。アンテナエレメントは衛星内部のアンテナエレメントケースに蓄えている(図6)。放出30分後にモーターのスイッチが入り、ローラーによりアンテナエレメントを引き出し展開する。底面の4隅は分離バネと分離スイッチを対角線上に配置している(図4)。図4の赤丸は分離バネ、赤の四角は分離スイッチを表す。2つの分離バネは同時に放出される衛星の相互の距離を離すための働きがある。2つの分離スイッチは放出時にスイッチが入る。

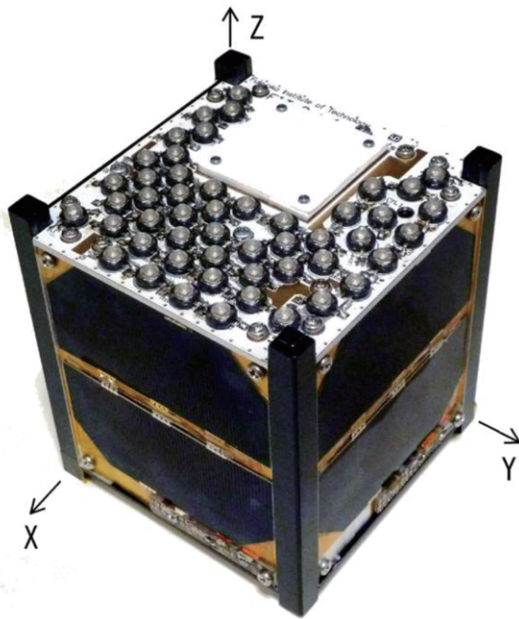


図1：上面 (+Z) から見た FITSAT-1

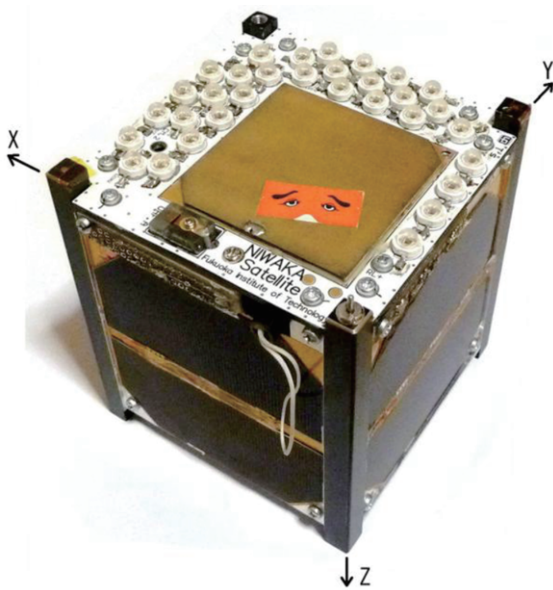


図2：底面 (-Z) から見た FITSAT-1

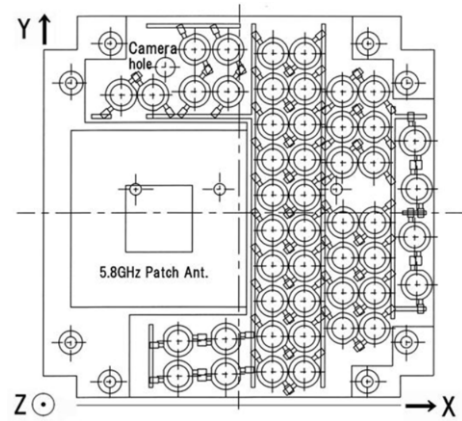


図3：上パネル (+Z)

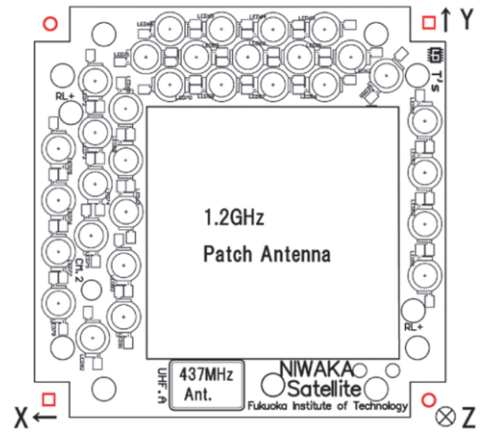


図4：底パネル (-Z)

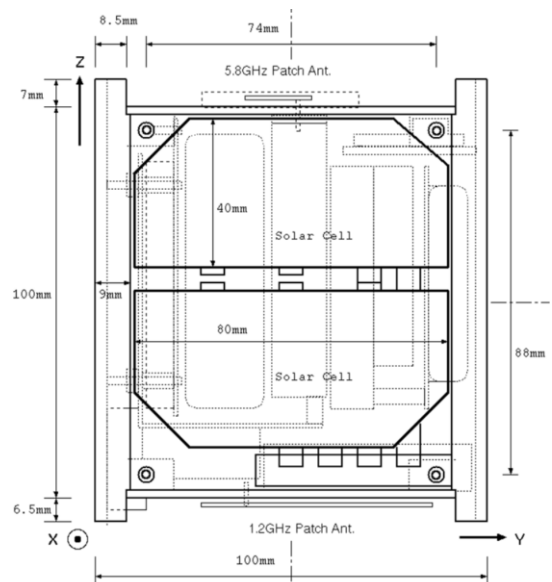


図5：側面 (±X, +Y)

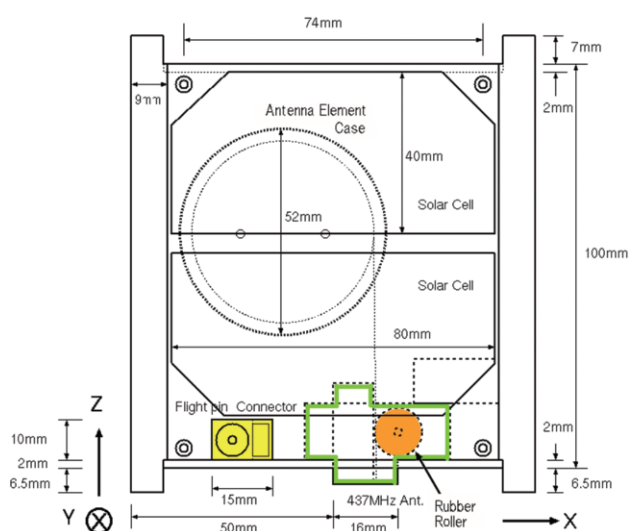


図6：側面（-Y）



図8：アルミ棒



図9：角パイプのコーナー

2.2 構体

衛星の構造は10cmのアルミ角パイプを約10cmで切断し、両端に蓋をする形に作っている(図7)。4本の柱にパネルを貼る方式と比べ、組み立て精度の問題がなくなり、放出機との間で不整合が起こらない。アルミ角パイプはアルミ合金A6063という材質でできている。これはJAXAの指定する材質A6061と異なっているが、熱膨張係数がほぼ同じであることと、組み立て精度の問題がなくなる利点を説き、A6063の使用許可を頂いた。アルミ角パイプは3mmの厚みがあったが、重量制限をクリアするために、太陽電池を貼る部分は1.5mm厚に薄くしている。衛星放出器との間で滑りを良くするために、黒アルマイト加工(MIL-A-8625 Type III Class 1)をしている。角パイプの四隅内側にはアルミの棒を取り付け(図8、図9)、これに上下の蓋を取り付ける。この棒は内部の機器を支持する働きも持つ。

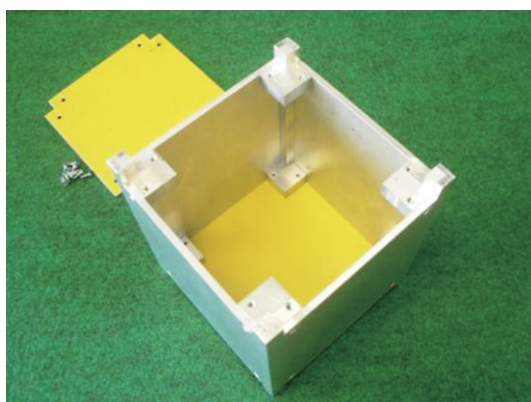


図7：アルミ角パイプと蓋

2.3 分離スイッチ

分離スイッチは図10に示すように、真鍮で造ったL型のレバーと小型のマイクロスイッチから構成される。放出器内部ではレバーが抑えられ、スイッチがOFFになっている。衛星が放出されると、マイクロスイッチ自体のバネの力でレバーが押し戻され、スイッチが入る

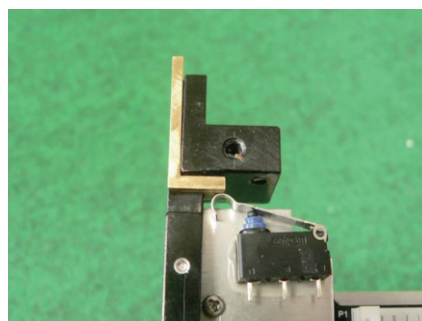


図10：分離スイッチ

2.4 430MHz帯アンテナ展開装置

430MHz帯のアンテナエレメントは長さ19cm、幅4mm、厚さ0.2mmのリン青銅板である。これを図11に示すように螺旋に巻いてアンテナ収納ケースに納めている。放出30分後にアンテナ展開装置の電源がONになり、シリコンゴムのローラーが回り、アンテナエレメントを収納ケースから引き出す。アンテナエレメントは衛星の外に17cm出される。アンテナの給電点はアンテナの下端ではなく、ローラーのすぐ上で、わずかなインダクタンス分を加えてインピーダンス整合を行っている。

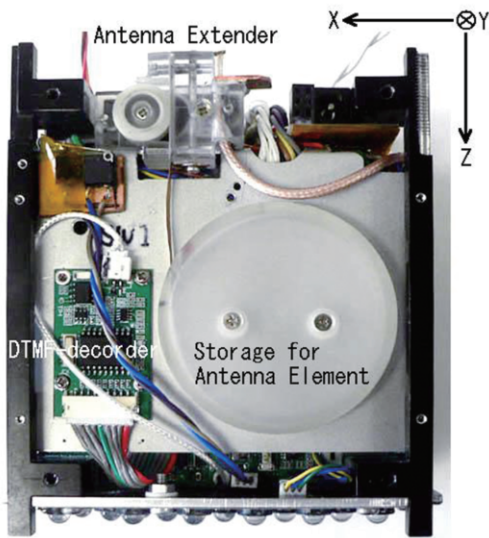


図11：430MHz帯のアンテナケースと展開装置

2.5 主な機器の配置

図12に FITSAT-1を構成する主な機器の配置を示す。左端に430MHz帯のアンテナケースがあり、次にアルミ板を挟んで主制御基板がある。主制御基板の裏側には4個のリチウムイオン電池を取り付けている。衛星の中央部分にもっとも質量の大きい5.84GHzの送信機、その隣に437MHzの送信機と受信機、右端にAX.25パケット用のTNCがある。5.84GHzの送信機は上面の5.84GHzパッチアンテナの直ぐ裏側に配置しており、アンテナと送信機は長さ6mmほどのリジッドケーブルで結ばれている。

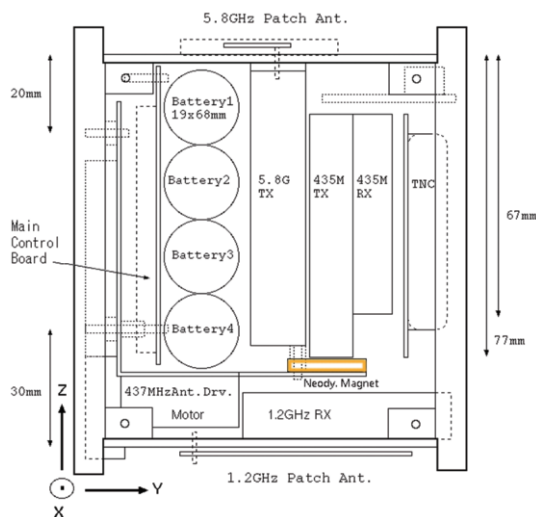


図12：機器の配置 (+X面から見た内部)



図13：+X面から見た写真

底面の1.26GHzパッチアンテナの直ぐ裏側に、1.26GHzの受信機を配置している(図12)。図14、図15は-Z面から見た図面と写真を示している。アンテナを引き出すローラー、ローラーを駆動するサーボモーター、後カメラが見える。左上に放出時に宇宙飛行士が引き抜くフライトピン、内部の状態をモニターするテスト用コネクタが見える。姿勢制御のためのネオジウム磁石は図12のオレンジ色の部分に配置している。図14の水色の部分は磁気ダンパー(ヒステリシスダンパー)として、1mm厚のパーマロイの鉄板を取り付けている(後述)。

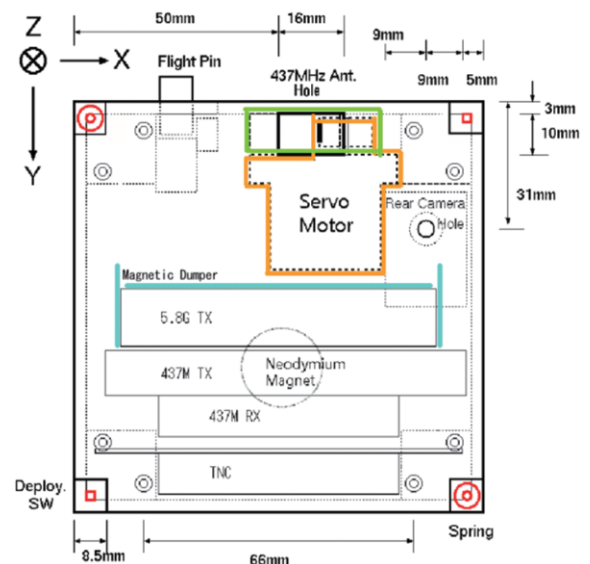


図14：機器の配置 (-Z面から見た内部)

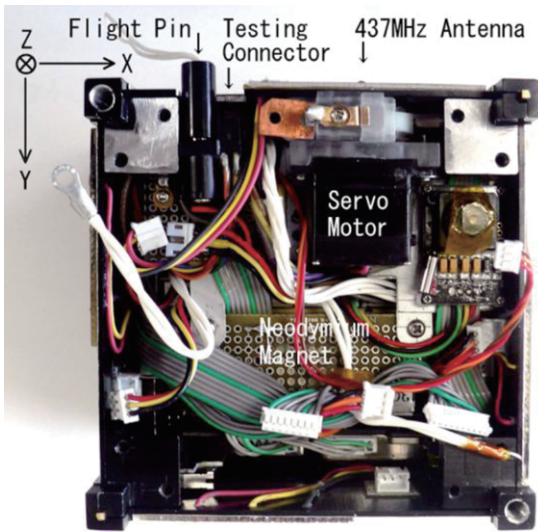


図15：-Z面から見た写真

3. FITSAT-1の軌道と姿勢

国際宇宙ステーション (ISS) の軌道は赤道に対して51.6度傾いている。従って、ISS から放出される FITSAT-1も北緯51.6度と南緯51.6度の間を行き来することになる。FITSAT-1は永久磁石を搭載しているので、方位磁針のように磁力線に沿って方向を変えると考えられる。日本では磁力線が伏角40度から60度で地中に入っており、日本の南側40度から60度を通過するときは、図16に示すように衛星の磁北を向く上面 (+Z面) が地上を向くことになる。衛星の上面には5.84GHzのパッチアンテナと緑のLED、前カメラのレンズ穴がある。図16に示す衛星正面の丸はパッチアンテナのビームパターン、LEDのビームもほぼパッチアンテナのビームパターンと同じである。コーナーは前カメラのレンズの画角を示している。437MHzのアンテナエレメントは尻尾のように底面 (-Z面) から伸びている。衛星が観測点の南側を通る3分間 (赤の線) は5.84GHzの高速通信の実験と、LED点灯の実験に良いが、437MHzのアンテナは軸方向から見る形になり、ゲインが下がる。一方、衛星が観測点の北側を通るときは、437MHzのアンテナは垂直に立つのでゲインが上がり、リモートコマンドの送信や衛星内に蓄えたテレメリーデータのダウンロードによい。バックアップシステムの1.26GHzパッチアンテナは日本上空では宇宙を向いてしまうが、ビームパターンがブロードなので、北側のパスではある程度のゲインが得られる。事実、北側のパスでは1.26GHzのDTMFコマンドが通ることを確認できた。

衛星には直径2cm厚さ5mmの円柱形ネオジウム磁石を搭載している。衛星を天井から糸で吊るし、南北を向く振動の周期を測ると90度の振れ角では約50秒であった。これは衛星の地球周回の周期90分より十分短い。この磁石の

磁気モーメントの概算値を磁極の強さ (約300mT, 実測値) と磁極面積から算出し、さらに衛星内の質量分布を一様と仮定して衛星の慣性モーメントの概算値 ($2.2 \times 10^{-3} \text{kgm}^2$) を算出した。これ等の値を用いて、地磁気との相互作用により生じる固有振動の周期を計算すると、単振動と考えられる微小振動に対しては36秒、触れ角120度 (全角240度) に対しては非線形効果により周期が伸びて54秒となった。周期測定の実験は振れ角が90度 (全角180度) で行ったので、実験結果と理論計算はほぼ一致したと言える。

磁石が衛星を南北に向かせようとして振動が起こる場合、振動による磁気の変化で衛星表面に渦電流が流れダンパーとして働くと考えられる。ダンパーはできるだけ多くしたいので、他にキューブサットの制限重量まで、パラロイの1mm厚の板3枚 (5.8GHzTXの正面 (XZ面) に75mm x 70mmを1枚、同両側面 (YZ面) に20mm x 70mmを2枚) 計65gをヒステリシスダンパーとして搭載した (図14の水色)。しかし、短期の開発のためダンパーの効果を確かめる地上試験の時間が取れなかった。

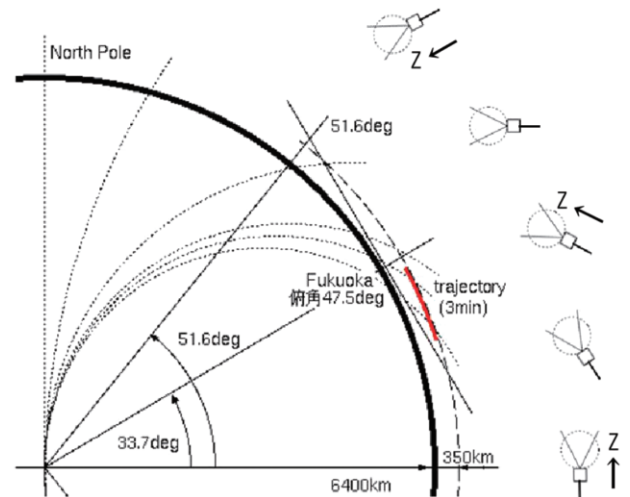


図16：FITSAT-1の軌道と姿勢

4. 電力供給システム

FITSAT-1の電力供給システムは太陽電池、最大電力トランサッカー、DCDCコンバータ、4個のリチウムイオン蓄電池 (Hitachi Maxell INR18650PB2, 1450mAh), リチウムイオン電池の充放電コントローラ、2個の分離スイッチ、フライトピン、ミッション終了ヒューズなどから構成される。太陽電池のセルは±X面, ±Y面の4面にそれぞれ2枚ずつ配置し、直列接続して各面、最大で2.3W (4.74V x 0.487A) を発電する。4個のリチウムイオン蓄電池は単セルと3セルに分けて使う。単セル電池は5V負荷に電力を供給する。5V負荷は常時動作している437MHzのピーコン用CW送信機、同コマンド用FM送受信機、1.26GHz FM受信機、これらをコントロールしているCPUからな

る。3セルの電池は直列に接続して大きなパワーを必要とする5.84GHz送信機とLEDの点灯に使う。

太陽電池で発生した電力は最大電力トラッカーを経て取り出し、5V負荷に供給すると共に単セル電池を充電する。単セル電池の電圧が3.8Vになると、充電電流を減少させ、3セル直列電池の充電を始める。3セル直列電池は電池制御IC (SII S-8233BAFT) により過充放電から保護されている。単セル電池は衛星が日陰に入ると、DCDCコンバータにより5V負荷に電力を供給する。単セル電池の電圧が3.5V以下になると、3セル直列電池が5V負荷に電力を供給し始める。すなわち、5V負荷に電力を供給する優先順位は①太陽電池、②単セル電池、③3セル直列電池の順となっている。

JAXAはすべての電源が直列に接続されたフライトピンと2個の分離スイッチで切られることを要求している。それも、これらのスイッチを電源のソース側とグラウンド側に配置することが要求されている。この条件を満たすため、電子スイッチを用いて図18に示す回路を構成した。これらの電子スイッチは3個の電源(太陽電池、単セル電池、3セル直列電池)と直列に入るので、フライトピンと2個

の分離スイッチがONにならない限り、どの電源も電力を供給しない。図19に使用したリチウムイオン蓄電池を示している。

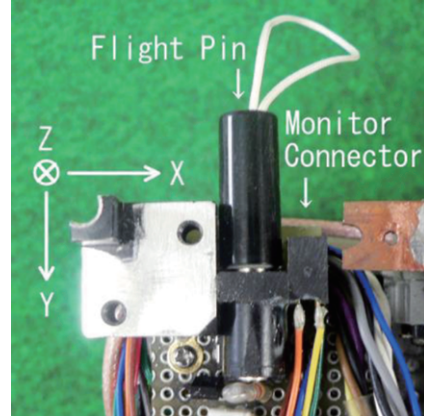


図17：フライトピン

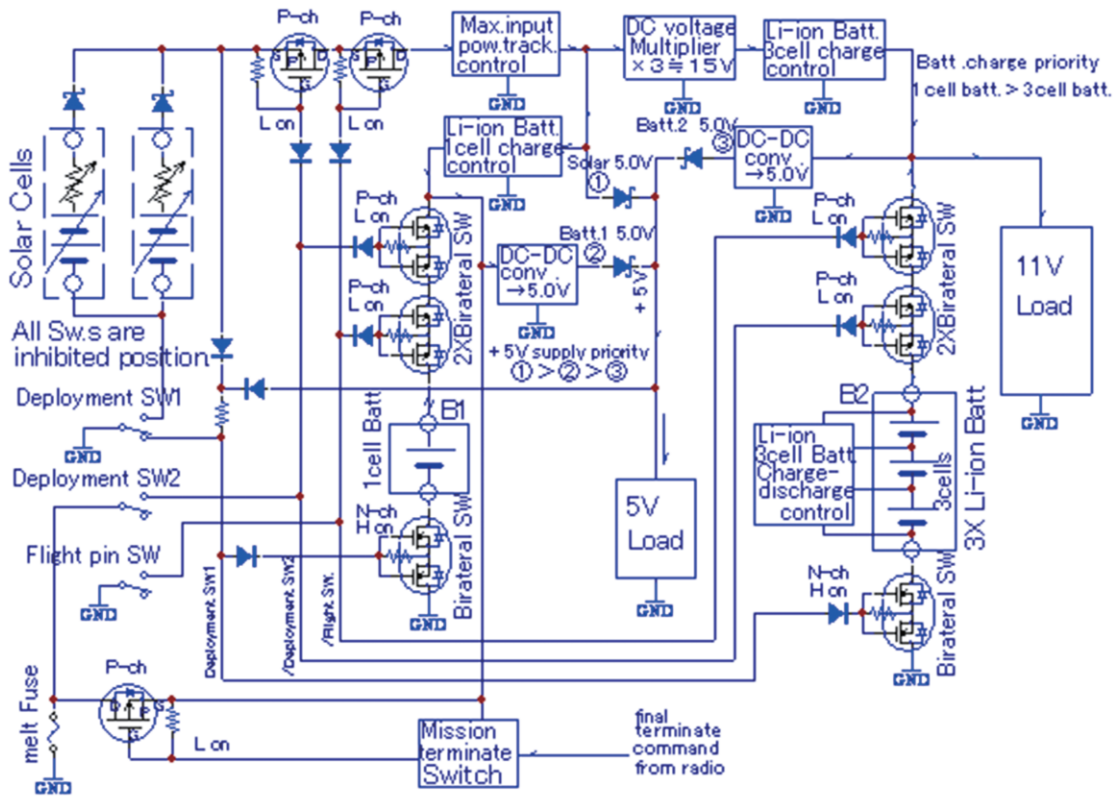


図18：電力供給システム

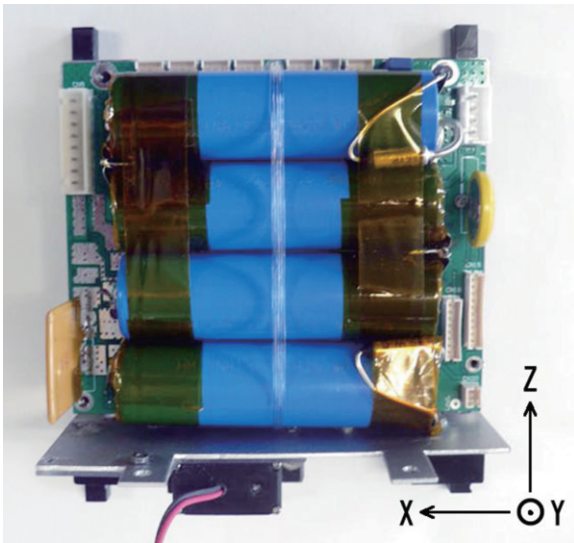


図19：リチウムイオン蓄電池

5. 通信システム

5.1 通信システムの構成

図20に FITSAT-1の通信システムを示す。コマンドのアップリンクは437MHz, 1200bps の AX.25パケットと 1.26GHz の DTMF の 2 系統を備えている。1.26GHz の DTMF は430MHz 帯のアンテナ展開に失敗したときを想定したもので、バックアップ用である。ダウンリンクは 437.250MHz のビーコン (CW), 蓄えたテレメトリデータのダウンロードに437.445MHz の1200bps, AX.25パケッ

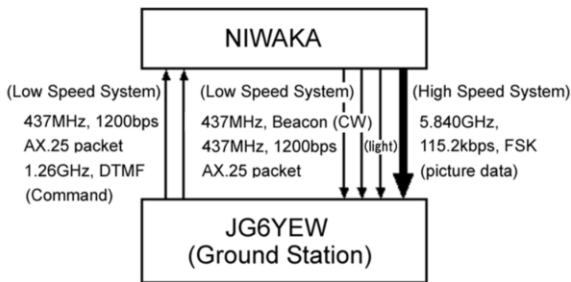


図20：通信システム

ト, 撮影した画像の送信に5.84GHz, 115.2kbps, FSK を用いている。光信号まで加えるとダウンリンクは 4 系統あることになる。表 1 に FITSAT-1に搭載した無線モジュールの一覧を示す。

5.2 通信システムとデータ処理システム

図21に通信システムとデータ処理システムの関係を示す。437MHz FM/CW-TX は常時437.250MHz でビーコン信号 (CW, 100mW) を出力している。ビーコン信号は TX-CPU によりコントロールされ, 現時点のテレメトリデータを送る。地上からのリモートコマンドは437MHz の FM-RX で受信され, TNC で1200bps の AX.25パケットとして解読され, RX-CPU に送られる。RX-CPU はリモートコマンドを実行し, 必要な信号を CPU 間や周辺機器を繋ぐコマンドバス上に出力する。コマンドの実行結果は TX-CPU によりモニターされ, TNC を経て FM-TX により 437.445MHz で1200bps, AX.25パケットの ACKノリッジを返す。

TX-CPU はリモートコマンドで指定されたテレメトリデータを蓄えている。RX-CPU がデータのダウンロードコマンドを受け取ると TX-CPU は蓄えたデータを AX.25パケットで送出する。リモートコマンドは DTMF 信号でも受け取ることができる。1.26GHz または347MHz で送られてきた DTMF 信号は Backup-CPU で解読実行され,

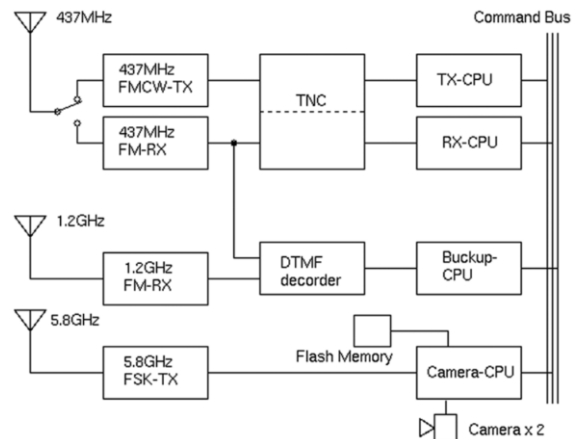


図21：通信システムとデータ処理システム

表 1：FITSAT-1の無線モジュール

Receiver	Freq.	Signal	
430MHzRX	436-438MHz	1200bps, AX.25- packet (AFSK) / DTMF	
1.26GHzRX	1260-1270MHz	DTMF	
Transmitter	Freq.	Signal	Power
430MHzCWTX	437.250MHz	CW	100mW
430MHzFMTX	437.445MHz	1200bps, AX.25-packet (AFSK)	800mW
5.8GHzTX	5.840GHz	115.2kbps (FSK)	2W

コマンドバス上に必要な信号を出力する。

Camera-CPU はコマンドバス上で送られてきたシャッターコマンドを受け取ると、前後のカメラのシャッターを5秒ごと交互に切り、それぞれ10枚、計20枚の画像を外部のフラッシュメモリに蓄える。Camera-CPU は画像ダウンロードコマンドを受け取ると、20枚の画像をフラッシュメモリから読み取り、5.84GHz FSK-TX により地上に送信する。

5.3 5.84GHz 高速送信モジュール

5.84GHz 高速通信モジュールは筆者らのグループにより新たに開発された(図22, 図23)。約15Wの直流入力で5.84GHz, 2Wの高周波出力を得ることができる。単純なFSK変調を採用し、115.2kbpsで通信を行うことができる。周波数の偏移は±50kHzであるが、99%のエネルギーは415kHzに広がっている。90%のエネルギーは300kHz以内に収まっている(図24)。

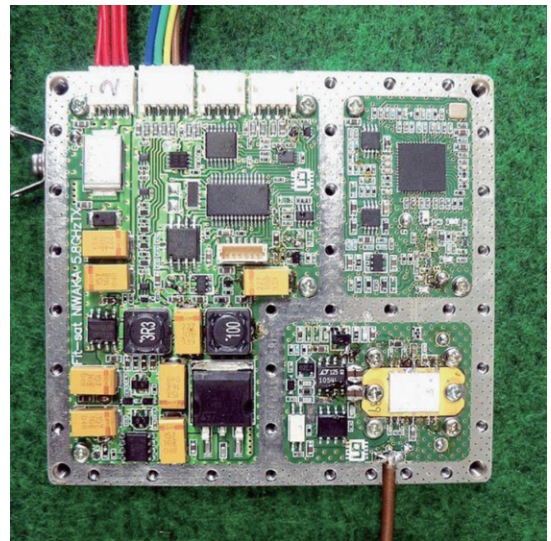


図22：5.84GHz 高速送信モジュール

☆FITSAT-1 5.84GHz TX Block Diagram (TX ,Mod & cont)

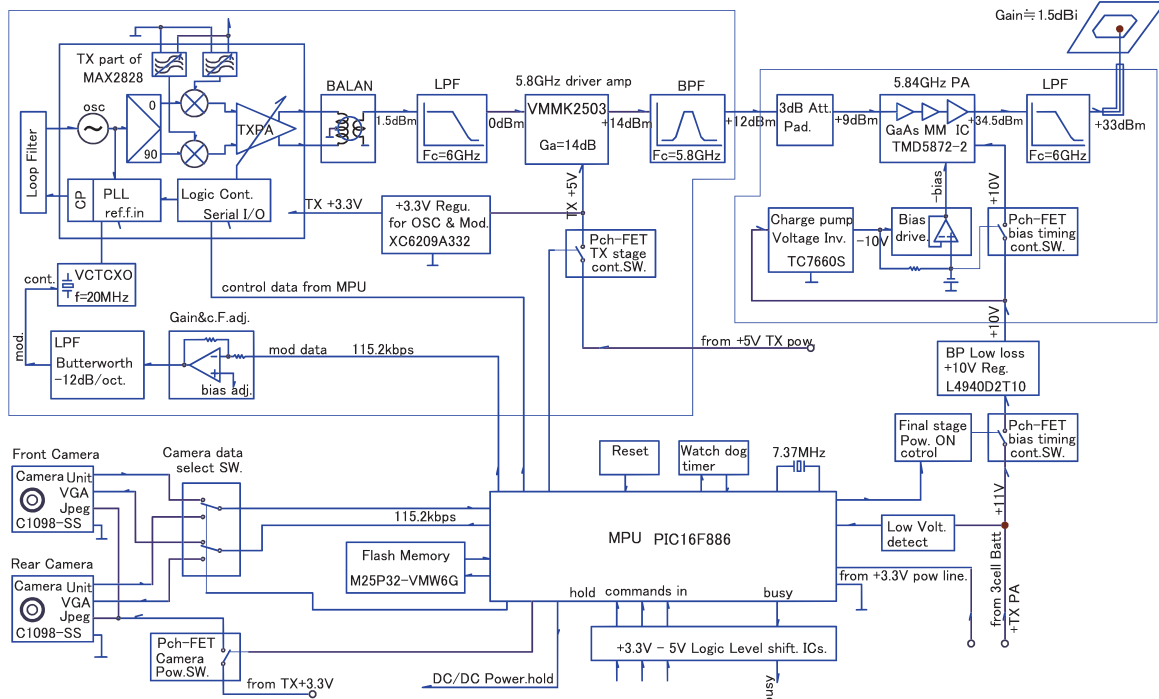


図23：5.84GHz 送信モジュールのブロック図



図24：5.84GHz, 115.2kbps FSK のスペクトル

5.4 LEDによる可視光通信

上面(+Z面)は定格3Wの緑LEDを2個直列に接続したものを25個並列に接続して、計50個取り付けられている(図25)。3直列にしたリチウムイオン電池でドライブするので20A以上の電流が流れ、200W以上のパルスでドライブしている。底面(-Z面)は定格3Wの赤LEDを4個直列に接続したものを8個並列に接続して、計32個取り付けられている(図26)。10A以上の電流が流れ、100W以上のパルスでドライブしている。8.5節の実験で明らかになるが、平均電力は緑パネルが30~40W、赤パネルはこの半分程度と予想される。

LEDの点灯は二つのモードを準備している。一つのモー

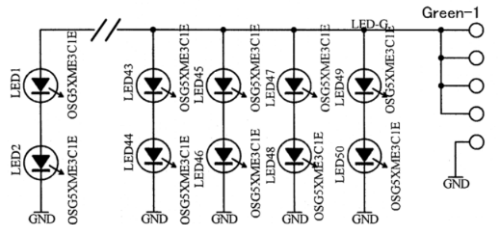


図25：緑LEDパネル

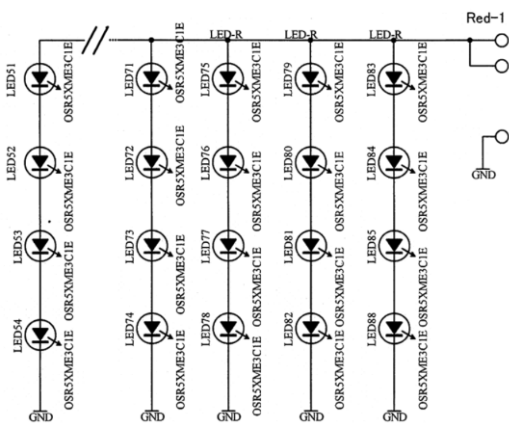


図26：赤LEDパネル

ドはモルスコードで点灯する。モルスコードはディューティ比15%、1kHzで変調しているので、光信号を光電子増倍管で電気信号に変換し、オーディオアンプをつなげばモルス音が得られる。もう一つのモードは微弱光検出モードである。ディューティ比30%、10Hzで点滅し、これをディューティ比50%、5kHzの信号で変調をかけている。10Hzの点滅は視認性が高い利点がある。また、光信号を光電子増倍管で電気信号に変換して5kHzのフィルターでノイズを除去し、信号だけを取り出すことを想定している。

6. 5.84GHz 高速通信の実験

6.1 画像データ

1枚のJpeg画像は図27に示す128byteの packets を単位として送られてくる。最初の2byteはpacketのID、次の2byteはデータサイズ、そのあと122byteの画像データが続く、最後の2byteがチェックサムとなっている。最後のpacket以外のデータ長はすべて同じ"7A 00" (Hex)=122となっている。1枚のJpeg画像は"FF D8"で始まり、"FF D9"で終わる。各packetの最初4byteと最後2byteを取り除き、データ部分を繋ぎ合わせるとJpeg画像が得られる。

Packet ID (2 byte)	Data Size (2 byte)	Photo Data (122 byte)	Verify (2 byte)
-----------------------	-----------------------	--------------------------	--------------------

(例) 00 00 7A 00 FF D8 FF E0 ...
 01 00 7A 00 09 0A 16 17 ...
 ...
 12 34 56 00 FF D9 ...

図27：画像データのpacket

1個のpacketは115.2kbpsでは約12msecで送られてくる。一方、フラッシュメモリから122byteのデータを読むのに8msecの時間がかかる。従って、1つのpacketは20msecごとに送られてくるので、FSK検波器の出力をスピーカにつなぐと、データ受信中は50ヘルツの音が聞こえる。衛星の重量制限から5.84GHz送信モジュールに十分なヒートシンクを取り付けられなかった。そこで、各画像送信の間に熱拡散のための5秒の送信休止時間を設けている。

6.2 画像受信システム

5.84GHz 帯受信システムは5.84GHz を440MHz に変換する LNB と受信機 AR8600, 受信機の間周波10.7MHz を取り出し画像データを復元する FSK 検波器, 画像データを画像に変換し表示するパソコンから構成される。図28 に示す LNB は望遠鏡用の経緯台に取り付けたパラボラアンテナの焦点の位置に取り付ける (図29)。望遠鏡用に作られた経緯台は精密に天空の一点をポイントすることができるが、高速で動かすことはできない。それで、少しだけ追尾できるが完全な追尾は行えない。

LNB は導波管, パッチアンテナ, 5.84GHz 増幅器, 5.4 GHz 局部発振器, 周波数変換器, 440MHz 中間周波増幅器から構成される。パッチアンテナは衛星に取り付けたものと同じものを裏向けに取り付ける。これはパラボラによる

反射で円偏波の旋回方向が反転することによる。5.84GHz 増幅器と周波数変換器は少しでもノイズを下げるためにペルチエ素子で冷却している。

AR8600受信機は10.7Mhz の中間周波の出力を持っている。この中間周波の出力を FSK 検波器に入力する。FSK 検波器は中心周波数を検出し、ドップラー効果による周波数のずれをランプで表示することができる。FSK 検波器の出力は直接 P C のシリアルポートに入力する (図30)。

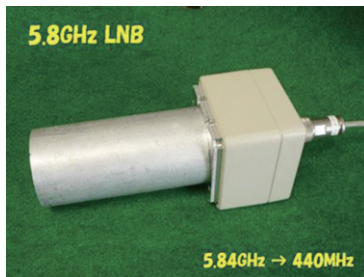


図28：LNB (周波数コンバータ)

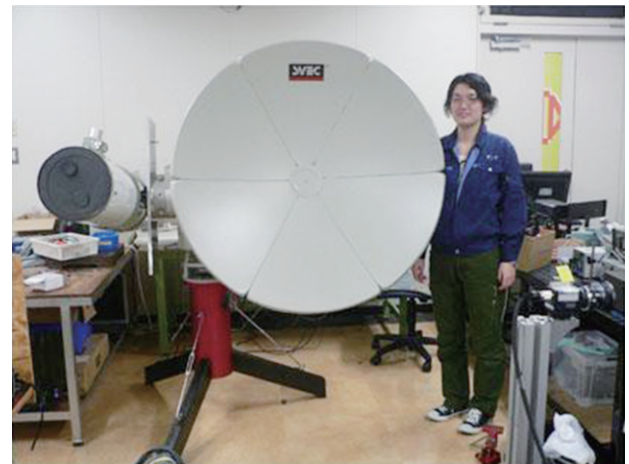


図29：経緯台に取り付けたパラボラアンテナ

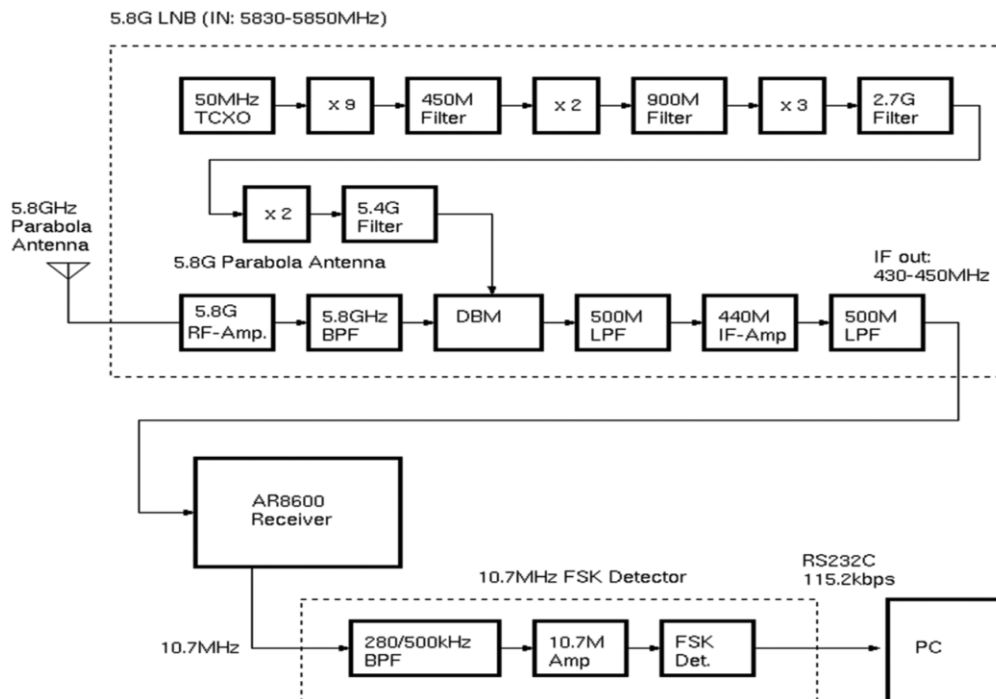


図30：5.84GHz 画像受信システム

6.3 受信された画像

FITSAT-1は2012年10月5日0時44分(JST)にハワイの沖合で国際宇宙ステーションから放出された。放出直後から5秒毎に前後2台のカメラのシャッターを切った。前カメラはおもに地表を写し、後カメラは国際宇宙ステーションや暗黒の宇宙などを写している。図31は後カメラが放出5秒後に写したもので放出機とロボットアーム、日本の実験棟「きぼう」の日の丸などが写っている

図32は放出10秒後に前カメラが写した地表の写真である。衛星は日陰から日照に変わる時点で放出されたので、地表に明るい部分と暗い部分がある。左上にわずかに暗黒の宇宙が写っている。

図33には左下に先に出たベトナムの衛星 F-1の一部が写っている。右側の白い弧は日陰と日照の境目の大気上層部と思われる。

図34は前カメラが地表を写したものである。図32より画角が下を向いている。

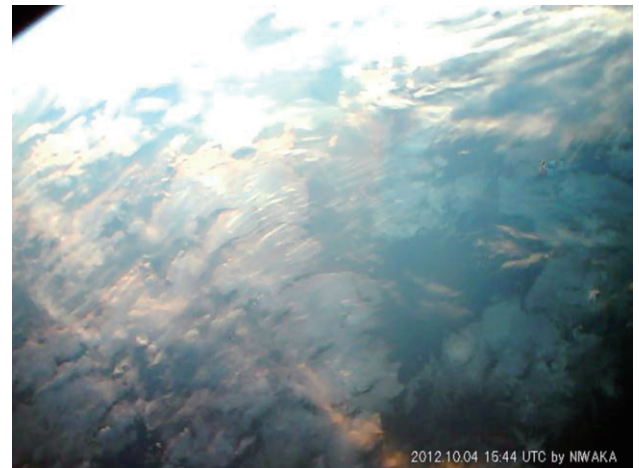


図32：地表1



図31：国際宇宙ステーション1



図33：ベトナム衛星 F-1の一部

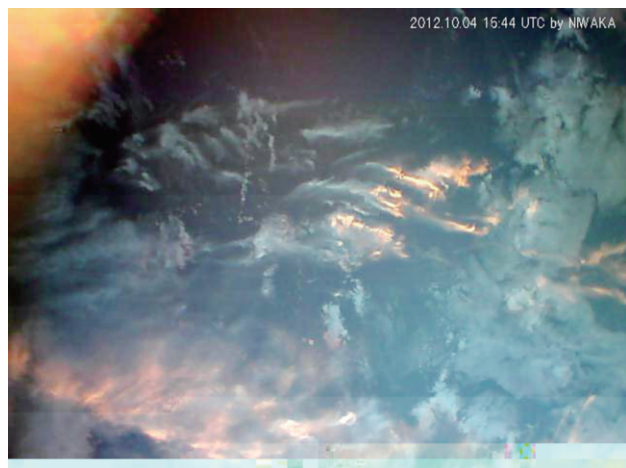


図36：地表 3

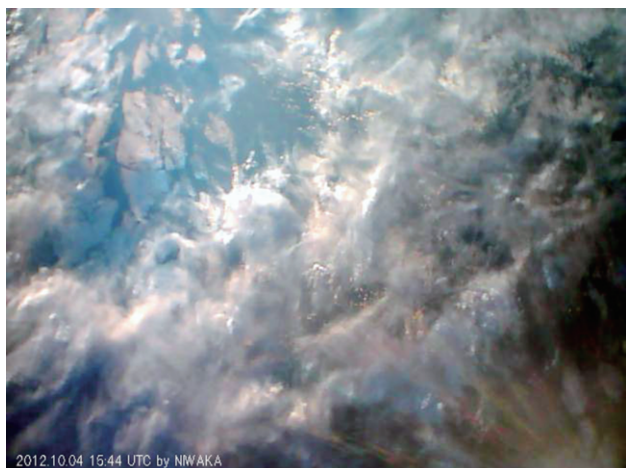


図34：地表 2



図37：国際宇宙ステーション 4

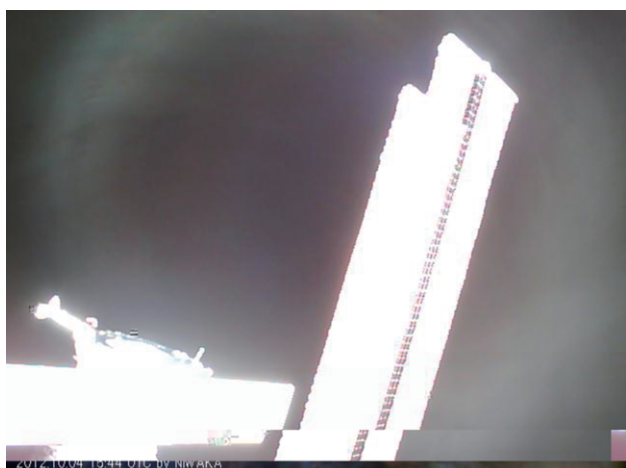


図35：国際宇宙ステーション 3

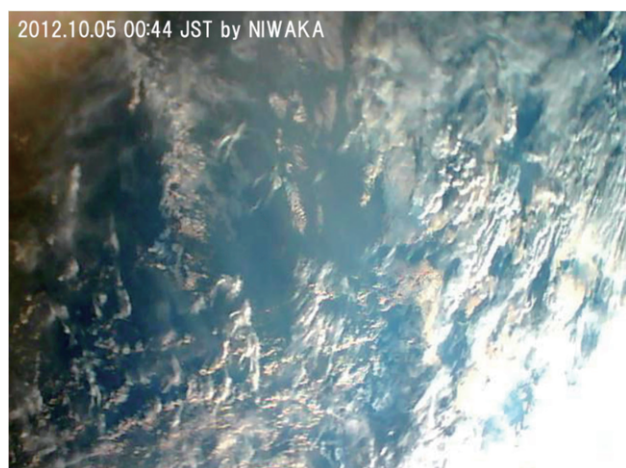


図38：地表 4

図35は国際宇宙ステーションの太陽電池パネルが太陽を反射したものと見られる。図36の地表の写真は日陰と日照の境目の夕焼け（朝焼け）を写したものと見られる。

図37の国際宇宙ステーションは図31と較べると、上下が反転している。また、図38の地表の写真も最初に取りられた図32の地表の写真と光の来る方向が逆になっている。図31、図32は5秒毎に切った20枚のシャッターの前半で撮られ、図37、図38は後半で撮られたものであり、衛星が80～90秒位でZ軸を中心にゆっくりと半回転したものと見られる。これらの写真以外にも放出直後に放出器内部でシャッターを切ったもの、太陽を写したと思われるもの、暗黒の宇宙を写したものなどが送られてきた。

7. 可視光通信の実験

7.1 LEDによる可視光通信

LEDを点滅させる可視光通信の実験は2012年11月21日から開始した。このとき倉敷科学センターの三島和久学芸員と、韓国科学技術院(KAIST)のJun-Ho Oh教授が同時に FITSAT-1からのLED光の撮影に成功された。Jun-Ho

Oh教授は追尾しながら撮影されたので、光が相対的に図39より明るく写っている。

また、三島学芸員らのグループにより天文ファンのための FITSAT 観測ガイドのウェブページが作られ、続く実験から多くの写真が寄せられることになった。



図40：韓国 Daejeon にて Jun-Ho Oh 教授撮影

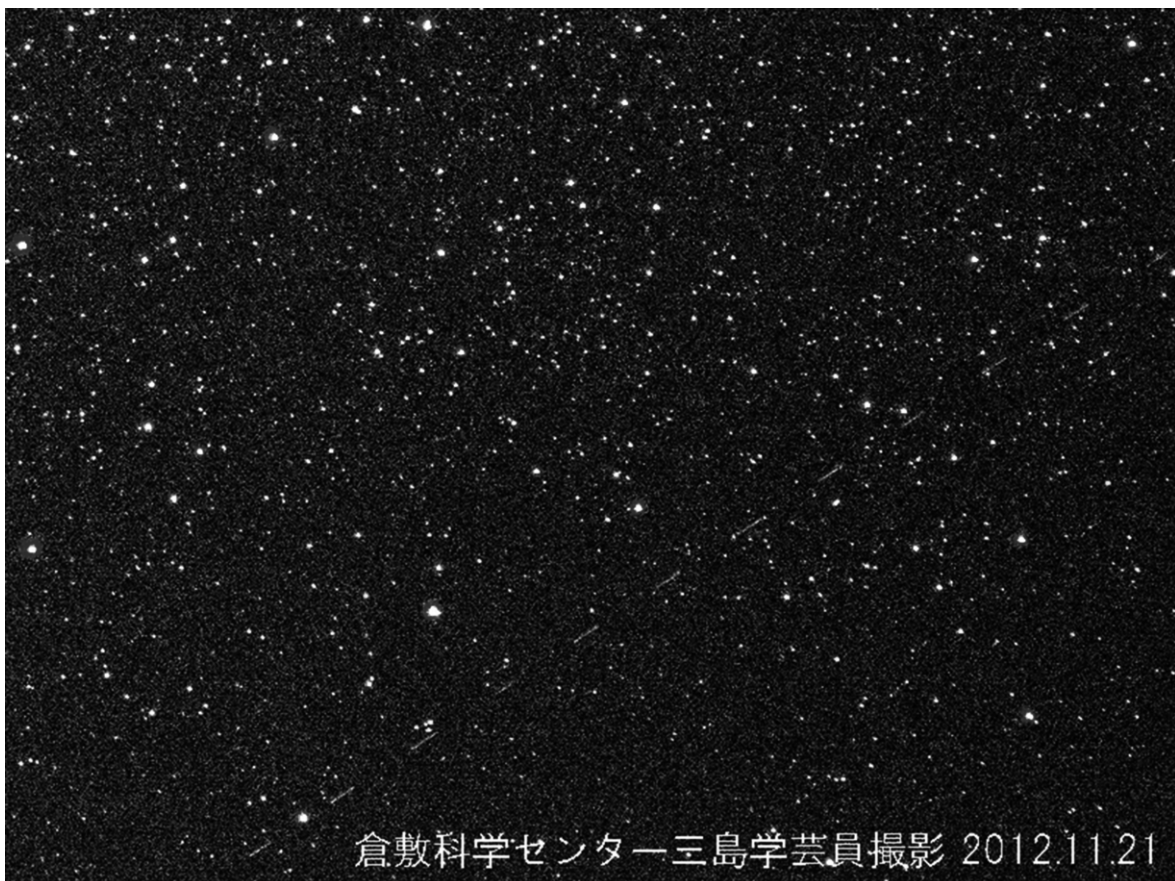


図39：倉敷科学センターの三島和久学芸員撮影

図41は同じく三島学芸員により12月11日にモールスコードモードでの点滅を写したものである。

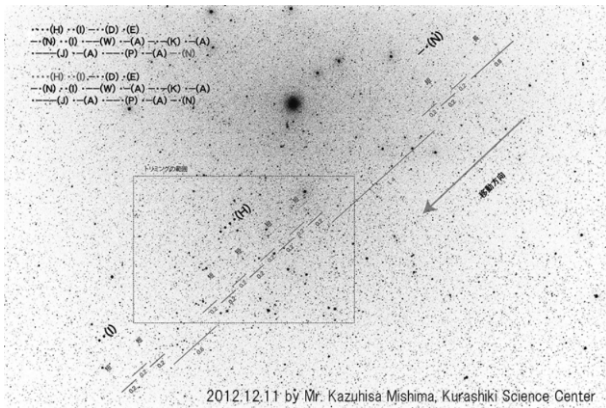


図41：倉敷科学センターにて撮影

図42は12月12日に海老名市の渡部剛氏により撮影された。シャッター速度が2秒なので、10Hzで点滅する20個の点が写っている。まだデューティー比が30%なので、点線の光跡が3対7となっていることが分かる。図43は富山市天文台の林忠史学芸員により撮影されたムービーの一コマである。図44は秦野市の山本憲行氏により撮影された。図45は愛媛県西予市の笹岡省三氏により撮影された。笹岡氏は他にも多数の FITSAT-1からのLED光の撮影に成功されている。ここに載せることができないが、他にも多数の写真が寄せられた。



図42：海老名市の渡部剛さん撮影

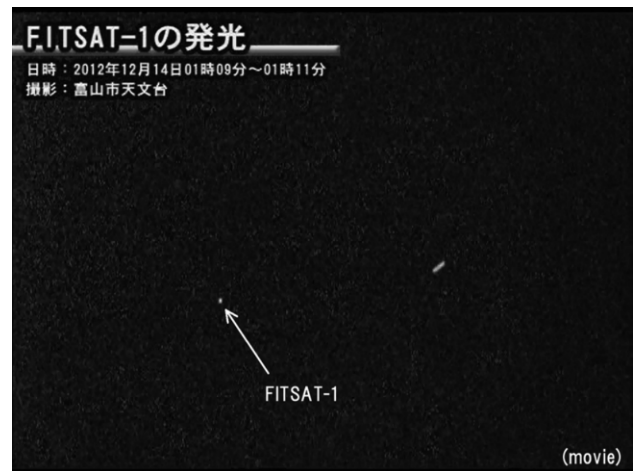


図43：富山市天文台の林忠史さん撮影



図44：秦野市の山本憲行さん撮影



図45：愛媛県西予市の笹岡省三さん撮影

7.2 光電子増倍管による光信号の受信

図46に微弱光検出モードでの光信号の波形を示している。デューティ比30%の10Hz信号をデューティ比50%の5kHzで変調している。すなわち、0.1msecの光のパルスが0.1msecの間隔を空けて30msec分150個並び、次に70msecの空白が来る。これが2分間繰り返される。

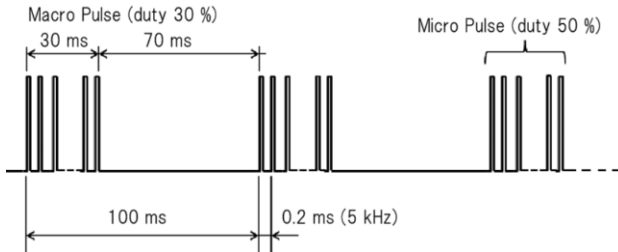


図46：微弱光検出モードでの光信号

図47に口径250mmの反射望遠鏡に取り付けた光電子増倍管の出力を示す。データローガーで100秒間取ったデータの中から、信号の存在する部分(衛星が望遠鏡に入った部分)の約1秒間を取り出した。観測は人工光の少ない大分県由布市の高度700mの別荘地にある福岡工業大学の研修センターで行った。都市の光や自然光の迷光によりノイズ成分が大きく、S/N比は0.1程度であったが、10Hzの光信号が確認できた。光電子増倍管の光電面の直径は46mmと大きく、これを小さくすることによりS/N比を向上させることができる。S/N比は光電面の面積に逆比例して向上するが、観測視野が狭くなることにより衛星を視野内に捉える確率が減るので、あえて狭くすることはしなかった。

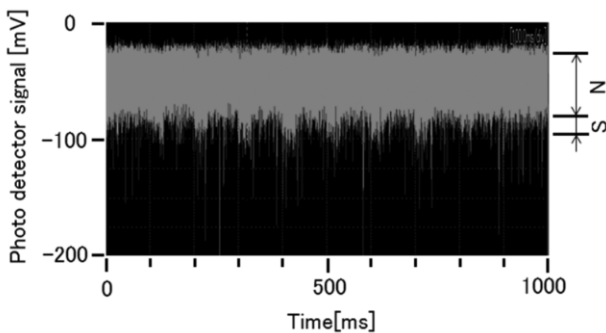


図47：光電子増倍管の出力

図48にこの信号をフーリエ変換した結果を示す。信号のある時間は衛星が望遠鏡の視野内を通り過ぎる時間であり、約1秒である。変調周波数の5kHzを中心にLED点灯のマクロの周波数である10Hz間隔でサイドバンドが現れている。スペクトルの微細構造のスペクトル幅の約1Hzは観測時間の約1秒の逆数に一致し、サイドバンドの包絡線のバンド幅の約30HzはLED光のマクロパルスの幅の30msの逆数に一致する。これにより、LED光の電気信号の時間構造が完全に同定された。

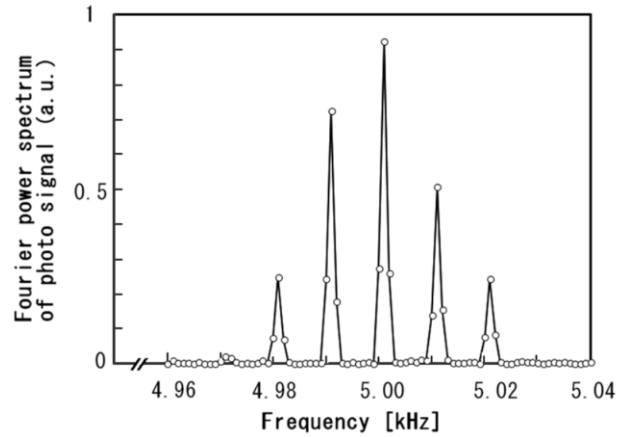


図48：光電子増倍管の出力をフーリエ変換したもの

8. テレメトリーデータ

8.1 ビーコン信号で送るテレメトリーデータ

ビーコン信号(437.250MHz, CW)は”HI DE NIWAKA JAPAN”に始まり,”S1”に続く4個のデータ,”S2”に続く4個のデータ,,,”S5”に続く4個のデータから構成される。6個の送信単位の間はそれぞれ14秒の休みを入れている。休みの期間は受信機が働き、地上からのコマンドを受け付ける。ほぼ、2分半で”HI DE …”から”S5”のデータまでが1巡する。

表2：ビーコンのフォーマット

HI DE NIWAKA JAPAN				
S1	s11	s12	s13	s14
S2	s21	s22	s23	s24
S3	s31	s32	s33	s34
S4	s41	s42	s43	s44
S5	s51	s52	s53	s54

16個のテレメトリーデータ s11~s54は1バイトのデータを16進表示したものである。16進表示されたデータは標準のモルスコードで送信される。最初に2文字のモルスコードから1バイトのデータを復元し、次に、以下の計算でテレメトリーデータを求める。

- s11: RSSI of 437RX
s11x(5/256) [V]
- s12: Total voltage of solar panel
s12x(5/256) [V]
- s13: Total current of solar panel
s13x(5/256)x0.4 [A]
- s14: Voltage of one cell battery
s14x(5/256) [V]
- s21: Current of one cell battery
(s21x(5/256)-2.5)x0.4 [A] (>0: discharge), (<0: charge)
- s22: Voltage of 3 cell series battery
s22x(5/256)x3 [V]
- s23: Current of 3 cell series battery
(s23x(5/256)-2.5)x10 [A] (>0: discharge), (s23x(5/256)-2.5)x0.1 [A] (<0: charge)
- s24: Standard voltage of 2.5v
s24x(5/256) [V]
- s31: Voltage of solar panel (+X)
s31x(4.5/256)*2 [V]
- s32: Voltage of solar panel (+Y)
s32x(4.5/256)*2 [V]
- s33: Voltage of solar panel (-X)
s33x(4.5/256)*2 [V]
- s34: Voltage of solar panel (-Y)
s34x(4.5/256)*2 [V]
- s41: Temperature of 3 cell series battery
s41x(4.5/256)-0.5/9.01 [°C]
- s42: Temperature of one cell battery
s42x(4.5/256)-0.5/9.01 [°C]
- s43: Temperature of +Z panel
s43x(4.5/256)-0.5/9.01 [°C]
- s44: Temperature of -Z panel
s44x(4.5/256)-0.5/9.01 [°C]
- s51: RSSI of 1.26GHz
s51x(4.5/256) [V]
- s52-s54: Time after last reset
s51x65536+s52x256+s53 [sec]

8.2 ビーコン信号で得られた温度変化

2013年1月4日前後に衛星の軌道面が最も太陽に向き、日陰が短く日照時間が非常に長くなる状態が起こった。このときの平均の温度変化を図49に示す。図47はオーストラリアのハム VK6HI, Colin Hurst さんから頂いたデータもとにグラフ化したものである。グラフを描くのに衛星の平均的な温度を表すものとして、なるべく日照、日陰の中央に近いデータを採用している。

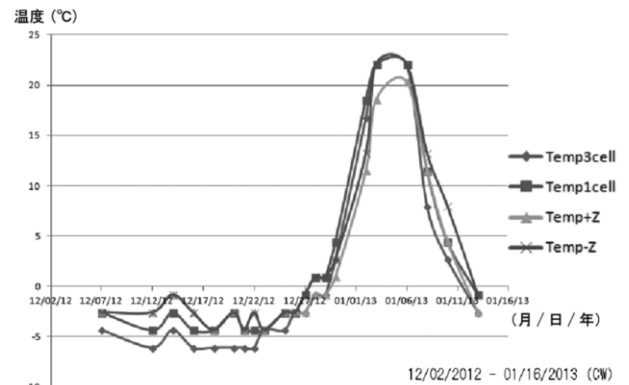


図49：全日照に近い状態

8.3 AX.25パケット信号で送るテレメトリデータ

衛星内には10種類の観測データを90個分蓄えることができる。観測データのサンプリング周期は秒サンプリングと分サンプリングの二つを用意している。秒サンプリングは太陽電池の電圧変化から衛星の運動を調べることを目的にしたもので、サンプリング周期を1秒から15秒まで変えることができる。すなわち、最短90秒から最長1350秒(22.5分)までの太陽電池各面のデータを保存できる。一方、分サンプリングは衛星の温度変化を調べることを目的にしたもので、1分から15分まで変えることができる。1分サンプリングでは1日、地球1周分のデータを蓄えることができる。15分サンプルでは地球15周分(1日弱)のデータを蓄えることができる。

表3：秒サンプリング 表4：分サンプリング

太陽電池電圧(+X)[V]	3セル電池温度[°C]
太陽電池電圧(+Y)[V]	1セル電池温度[°C]
太陽電池電圧(-X)[V]	温度(+Z面)[°C]
太陽電池電圧(-Y)[V]	温度(-Z面)[°C]
太陽電池合計電圧[V]	太陽電池合計電圧[V]
太陽電池合計電流[mA]	太陽電池合計電流[mA]
1セル電池電圧[V]	1セル電池電圧[V]
1セル電池電流[mA]	1セル電池電流[mA]
3セル電池電圧[V]	3セル電池電圧[V]
3セル電池電流[mA]	3セル電池電流[mA]

8.4 分サンプリングで得られた温度データ

図50は2012年10月13日の23時から450分間(約地球5周)を5分サンプルで温度変化を調べたものである。緑と紫の線はそれぞれ上面パネル(+Z)と底面パネル(-Z)の温度変化を表しており、-15°Cから+10°Cまで変化していることがわかる。赤と青の線はそれぞれ単セル電池と3セル直列電池の温度変化を示している。電池はパネルよりも熱容量が大きく、衛星の内部にあるので温度の変化の範囲が狭くなっている。3セル直列電池は5.84GHzの高速通信とLED点灯以外には使われないが、単セル電池はビーコン送受とコマンド受信のために常に充放電を行っているため、温度が常に1~2°C程、3セル直列電池より高くなっ

ている。

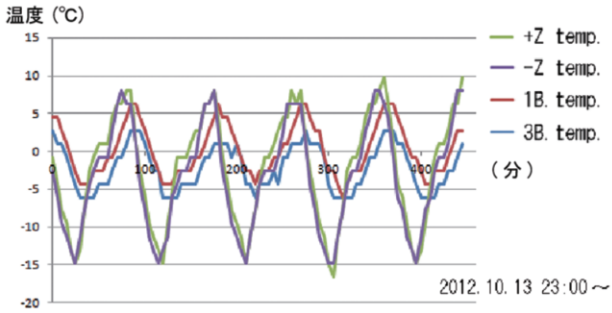


図50：地球5周の温度変化

図51は LED 点灯時の温度変化を調べたものである。衛星が日陰に入ってから約10分後の時点で点灯を行っている。緑 LED のパネルは2分間の点灯で16~17°C程上昇しているが熱容量が小さいのですぐ冷却している。熱伝導により反対側の赤 LED パネルの温度も3°Cほど上昇していることがわかる。3セル直列の電池も内部抵抗による発熱のため10°Cほど上昇しているが、熱容量が大きいので徐々に温度が下がっている。単セルの電池は3セル直列の電池と接触しているの熱伝導により3°Cほど上昇している。

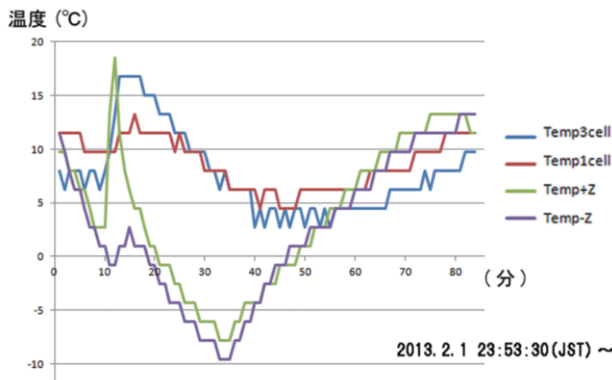


図51：LED 点灯時の温度変化

8.5 秒サンプリングで得られた LED 点灯時の電圧・電流

分サンプリングでは2分間の LED 点灯でサンプル点が2個となり、詳細な電流の変化が分からない。そこで、6秒サンプリングで LED 点灯時の3セル直列電池の電流・電圧変化を調べたものを図52、図53に示す。点灯の最初は3Aの平均電流が流れ、最後は5.5Aとなっている。一方、電池の電圧は最初は11.8V、最後は11.1Vとなっている。平均電力は点灯の初期は35W、最後は60Wほどになったことを示している。これは LED の発熱により LED の特性曲線が左に動いたこと、電池の発熱により電池自体が活性化したことによる。LED の電流は3直列の電子スイッチ(フライトピン、2個の分離スイッチ)と LED 点滅スイッチの計4個を通して流れるので、実際に LED に加わったエネルギーは30~50W程度と考えられる。



図52：LED 点灯時の電流変化

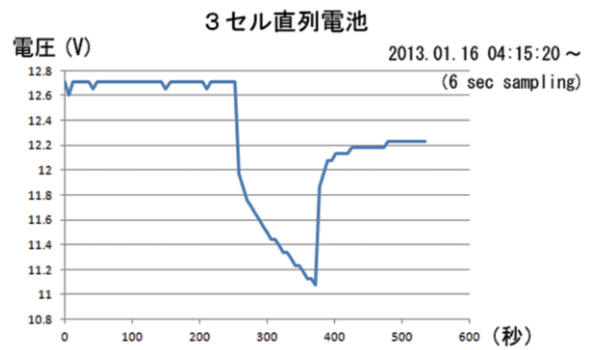


図53：LED 点灯時の電圧変化

8.6 秒サンプリングにより得られた太陽電池の電圧変化

図54は2012年11月6日11時24分から27分までの±X面, ±Y面に貼られた太陽電池の発電電圧の変化を2秒サンプリングで示している。この時刻は地上は夕暮れとなり、地表は暗いが衛星にはまだ陽が当たっている時刻を選んでいる。地上が明るいとき地表からの反射で太陽電池が発電し、電圧の変化が少なくなる。電圧は青(+X), 赤(+Y), 緑(-X), 紫(-Y)の順に変化している。すなわち, +X→+Y→-X→-Yの順にZ軸を中心に左周りに周期34秒で回転していることが分かる。

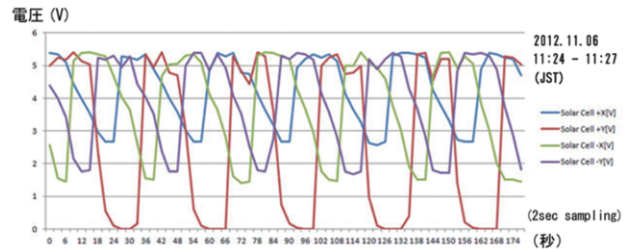


図54：太陽電池の電圧変化-1

図55は2012年11月19日、3時36分から3秒サンプリングで調べたもので、回転の方向は同じであるが、回転の周期が約23秒と速くなっている。衛星は日照から日陰の部分へと動いたため、地球からの反射が次第に弱くなって行くのが分かる。

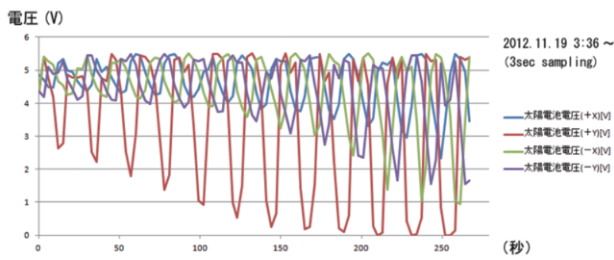


図55：太陽電池の電圧変化－2

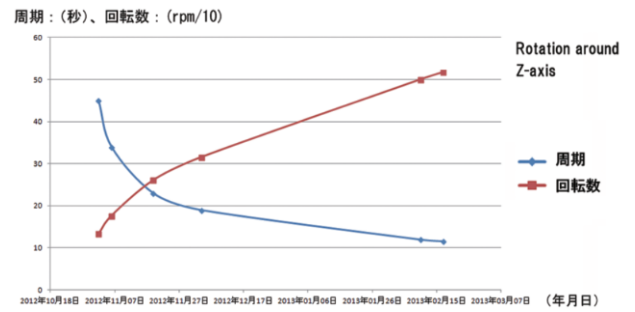


図58：Z軸周りの回転数の変化

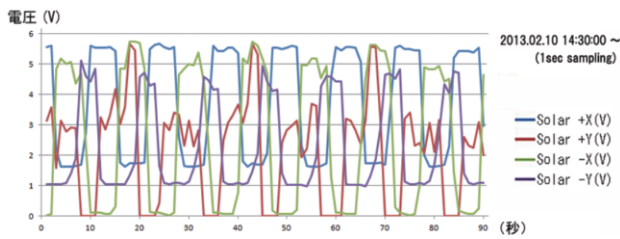


図56：太陽電池の電圧変化－3

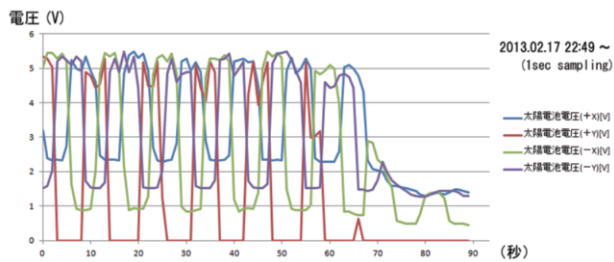


図57：太陽電池の電圧変化－4

図56は2013年2月10日の22時30分からの電圧変化を1秒サンプリングで調べたものである。+X面以外は電圧が低めに出ている。周期は12秒程になっている。

図57は2013年2月17日、22時49分から1秒サンプリングで調べたものである。測定70秒以降はほとんど電圧が出ていないので日陰に入ったものと見られる。周期を調べると11.6秒となっている。

FITSAT-1は磁石を搭載しているのですが、Z軸は常に磁北を指すが、Z軸周りは回転することができる。図58に2012年11月2日から2013年2月17日までの回転数の変化を示す。周期と回転数を同じグラフに描いたので、周期は表示通りの秒数、回転数 (rpm) は値を10分の1にして読む。回転数は予想に反して上昇しており、現在、この現象をうまく説明できるモデルの構築を進めている。

9. おわりに

FITSAT-1（にわか）は2011年3月10日のJAXAによるISS放出衛星の公募に応募したことに始まった。同年6月に8件の応募の中から3件が選定された。1年後の2012年6月にJAXAに引き渡したので、設計、製造、試験まで含めて1年の開発期間であった。同年7月に種子島よりH2Bロケット3号機で国際宇宙ステーション (ISS) に運ばれ、同年10月5日0時44分にISSから宇宙へと放出された。

FITSAT-1の主ミッションは「5.84GHzを用いた115.2 kbps 高速通信の実証実験」である。衛星放出時に撮影した20枚のJpeg-VGA画像は1枚当たり2～6秒で転送することができた。5.84GHzによる115.2kbpsの高速通信は1Uのキューブサットでは世界初めての試みであり、超小型衛星の利用価値を飛躍的に高めることになる。

また、副ミッションである「衛星地上間の可視光通信の可能性を調べる実験」では衛星に搭載したLEDを光らせ、地上で観測することに成功した。だれでも参加できる実験なので、多くの人々の関心を集め、衛星からの光は多くの天文ファンにより写真やムービーに撮られた。また、福岡工業大学の地上局チームは望遠鏡に取り付けた光電子増倍管により電気信号として取り出すことにも成功し、電波以外の方法で衛星・地上間の通信が可能であることを示した。

謝辞

FITSAT-1は当初の予定の100日以内にすべてのミッションを達成することができた。これは多くの方々の支援の賜物である。JAXAの有人宇宙技術センター、産業連携センターの皆さまからは多大のご指導を頂き、衛星を完成させることができた。九州工業大学小型人工衛星試験センターでは各種試験機器を使用させて頂き、宇宙環境に耐える衛星を作ることができた。先端技術研究所の杉本様からは宇宙用の太陽電池を提供して頂いた。日立マクセルエナジー社からは衛星に搭載したリチウムイオン電池の提供を受けた。(株)ロジカルプロダクト社は5.8GHz送受信機はじめ、FITSAT-1の主要な回路の設計・製作をして頂いた。

福岡工業大学の工作センターの方々には衛星の精密加工をして頂いた。卒研究生、大学院生の諸君は熱心に衛星の開発と運用を行ってくれた。

衛星の通信にアマチュア無線帯 (ハムバンド) を使ったことは思いがけなく日本中・世界中のハムからサポートを受けることになった。437MHz のビーコンのレポートは世界中から頂いた。レポートの数は最初の 2 ヶ月間で 500 通、総数 1500 通以上に上る。特に日本のハム JA6PL 井地義智さん、オーストラリアのハム VK5HI, Colin Hurst さんからはほとんどのパスのテレメトリデータを頂いた。また 5.84GHz の実験も日本のハム JA1OGZ 局, JA0CAW 局, JE9PEL 局, アメリカバーモント州の N1JEZ 局が参加され、信号の受信に成功された。ドイツの AMSAT-DL チームはポーランドにある直径 20m のパラボラで 5.84GHz の信号を受信され、一度に 20 枚中 14 枚の画像の復元に成功された。

LED 点灯の実験は多くの天文ファンからサポートを受けることになった。倉敷科学センターの三島学芸員は昨年 11 月に行った最初の LED 点灯実験の光を写真にとられただけでなく、FITSAT-1 観測ガイドのウェブページを作られ、多くの方が衛星の光を写真に撮られるきっかけになった。「今夜はパリ上空で光らせます」とか「今夜はローマ上空で光らせます」など海外での点灯をアナウンスすると、トリノ工科大学の Simone Corbellini 先生は光の見える範囲、ビームのポイントする軌跡、自分の観測地点をセットすると星座のどこに見えるかのウェブページを作られた。このウェブページは海外からのリクエストを大幅に増やす原因になった。

参考文献

- 1) 田中卓史, 田中崇和: 「小型衛星のための 5.8GHz 帯高速通信無線モジュールの開発」, 福岡工業大学情報科学研究会所報, 第 20 巻, pp.1-6, 2009.
- 2) 河村良行, 田中卓史: 「超小型人工衛星からの高輝度 LED 発光(2), (輝く人工の星の実現と宇宙一地上間 LED 光通信の検証)」レーザー学会 432 回研究会予稿集, 2012.
- 3) 田中卓史, 河村良行, 田中崇和: 「FITSAT-1 (にわか) のミッション」, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会, 2013.
- 4) 田中崇和, 田中卓史: 「超小型衛星 FITSAT-1 「にわか」と無線システム」, RF ワールド, No.22, CQ 出版, pp.77-103, 2013.
- 5) Takushi Tanaka, Yoshiyuki Kawamura, Takakazu Tanaka: “Overview and Operations of FITSAT-1 (NIWAKA)”, Proc. of RAST2013, Istanbul, pp.887-892, 2013. 6.
- 6) Y. Kawamura and T. Tanaka: Transmission of the LED light from the space to the ground, AIP Advances 3, 102110, 2013.