

超小型衛星 FITSAT-1 (にわか) の開発と運用

田中卓史^{1*}†、河村良行²、田中崇和³

福岡工業大学¹情報工学科, ²知能機械工学科

〒811-0295 福岡市東区和白東 3-30-1,

³ (株) ロジカルプロダクト

〒811-1314 福岡市南区的場 2 丁目 25-5 中原ビル 2F

概要

FITSAT-1 は 2012 年 10 月 5 日に国際宇宙ステーションから宇宙に放出され、9 ヶ月間、地球を周回して 2013 年 7 月 4 日に落下した。FITSAT-1 の主ミッションは 5.84GHz のマイクロ波で 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 Jpeg-VGA 画像は、1 枚当たり 2～6 秒で受信できた。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。衛星からの光は、倉敷市と韓国ソウル、海老名市、富山市 (ムービー)、君津市、愛媛県西予市などで撮影された。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成功した。また、衛星に蓄積したデータから衛星の自転が次第に上昇していることが判明した。

Development and Operations of CubeSat FITSAT-1 (NIWAKA)

Takushi TANAKA^{1*}†, Yoshiyuki KAWAMURA², Takakazu TANAKA³

¹Department of Computer Science and Engineering,

²Department of Intelligent Mechanical Engineering

Fukuoka Institute of Technology,

3-30-1 Wajiro-Higashi, Hikashi-ku Fukuoka 811-0295, Japan

³Logical Product Corp.

2F Nakahara-Bldg. 25-3 2chome Matoba, Minami-ku Fukuoka, 811-1314, Japan

SUMMARY

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 115.2k bps 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 light from the satellite was pictured in Kurashiki, Seoul Korea, Ebina, Toyama, Kimizu, and Ehime. 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; 115.2kbps; High-speed Communication; LED; Optical Communication

* Corresponding author. Professor, Member UNISEC.

† E-mail: tanaka@fit.ac.jp

Received and presented July 29th, 2013 in 4th UNISEC Space Takumi Conference, Tokyo, Japan.

Revised October 21st, 2013. Accepted October 31st, 2013.

1. はじめに

FITSAT-1 は 1 辺が 10cm のキューブサット(1U)である。質量は 1U キューブサットの最大質量 1.33 kg より 10 g 少ない 1.32 kg である。2012 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、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 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、5.84 GHz 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 5.84 GHz、右旋円偏波のパッチアンテナと定格 3 W 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)。5.84 GHz 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 200 W 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。底面には 1.26 GHz のパッチアンテナと定格 3 W 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と 437 MHz のフリ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に螺旋状に巻いて蓄えている (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。

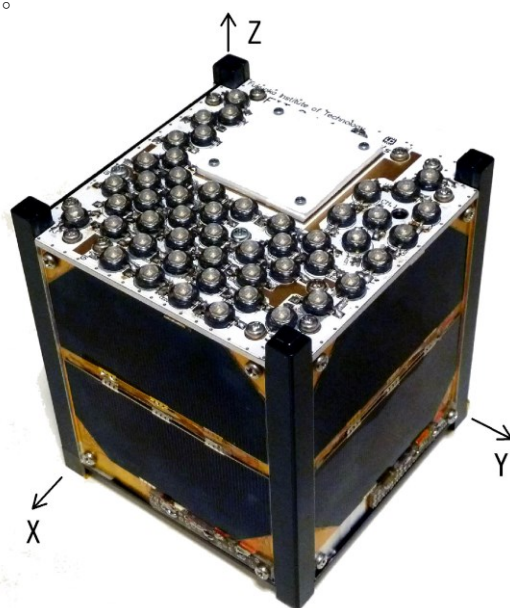


図 1 : 上面 (+Z) から見た FITSAT-1

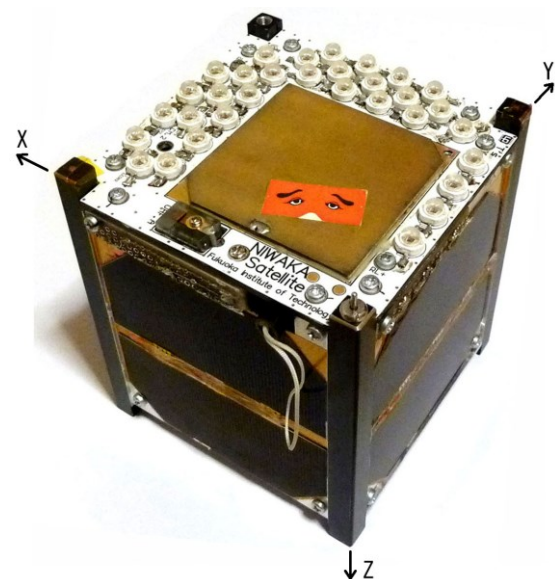


図 2 : 底面 (-Z) から見た FITSAT-1

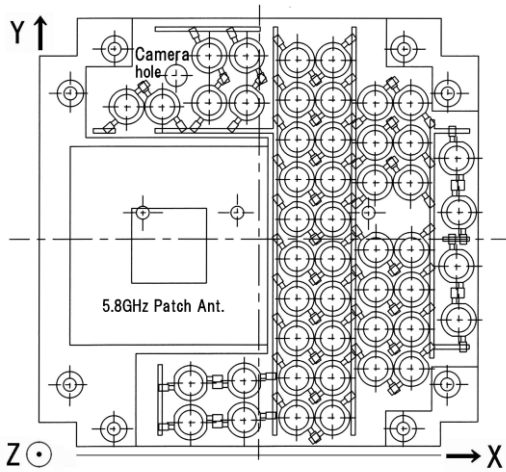


図 3: 上パネル 1 (+Z plane)

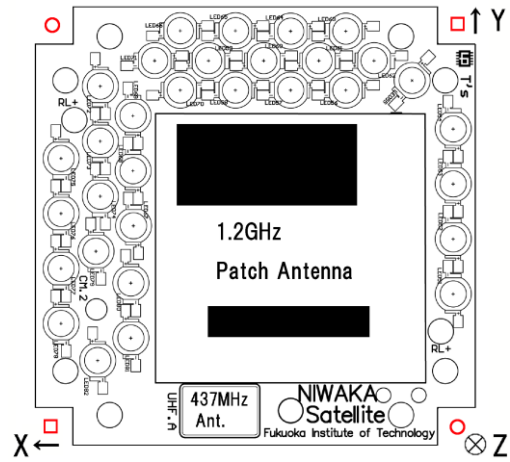


図 4: 底パネル 1 (-Z plane)

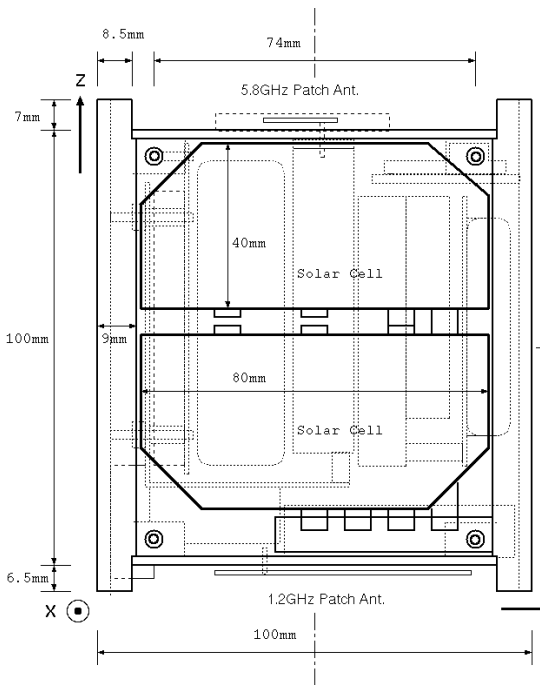


図 5: 側面 +X, -X, +Y

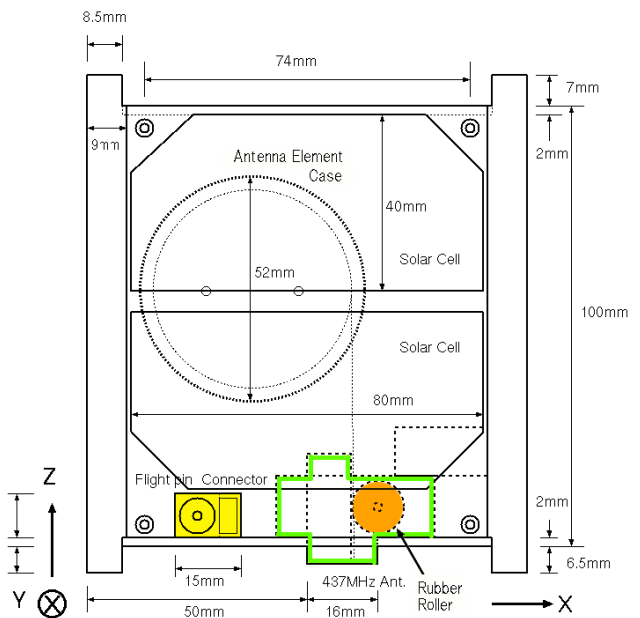


図 6: 側面 -Y

2.2 構体

衛星の構造は 10 cm のアルミ角パイプを約 10 cm で切断し、両端に蓋をする形に作っている。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 3 mm 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 1.5 mm 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図 8 のアルミの棒を取り付け、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

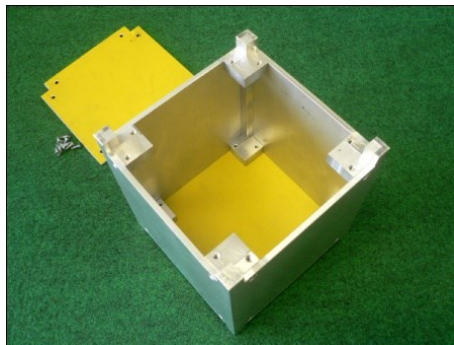


図 7: 切断した角パイプと蓋



図 8: アルミの棒



図 9: 角パイプのコーナー

2.2 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。

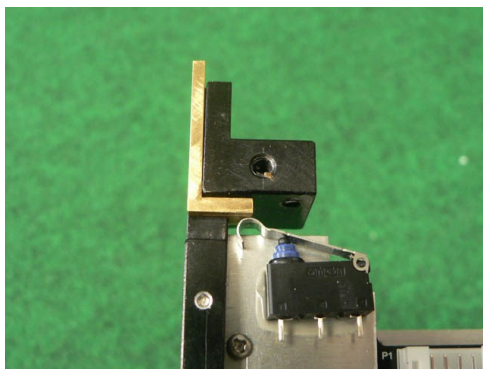


図 10 : 分離スイッチ

2.3 430MHz 帯アンテナ展開装置

430 MHz 帯のアンテナエレメントは長さ 19 cm、幅 4 mm、厚さ 0.2 mm 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。

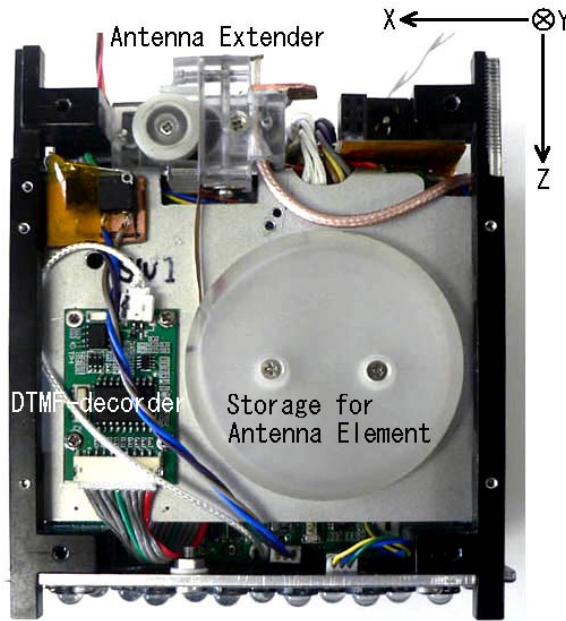
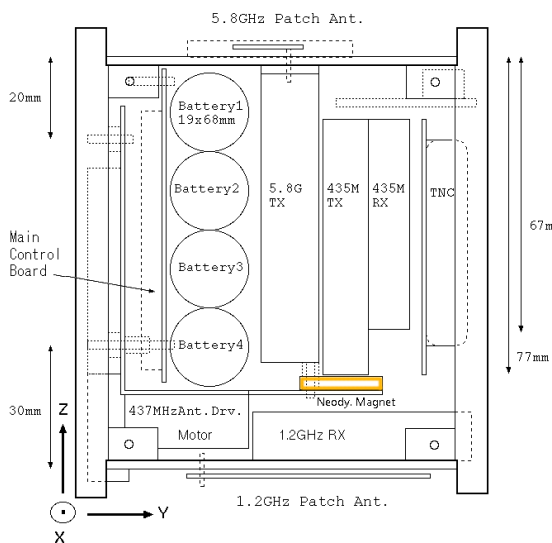


図 1 1 : 430MHz 帯のアンテナケースとアンテナ展開装置

2.4 おもな機器の配置

図 1 2 に FITSAT-1 を構成する主な機器の配置を示す。左端に 430 MHz 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 5.84 GHz の送信機、その隣に 437 MHz の送信機と受信機、右端に AX.25 パケット用の TNC がある。5.84 GHz の送信機は上面の 5.84 GHz 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 6 mm ほどのリジッドケーブルで結ばれている。



(a) 図面

(b) 写真

図 1 2 : 機器の配置 (+X 面から見た内部)

1.26 GHz の受信機は底面の 1.26 GHz パッチアンテナの直ぐ裏側に配置している (図 1 2 (a))。図 1 3 は -Z 面から見た内部を示している。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。ネオジウム磁石は補助プリント基板 (図 1 3 (b)、図 1 2 (a) のオレンジ色) の裏側で中央寄りに配置している。

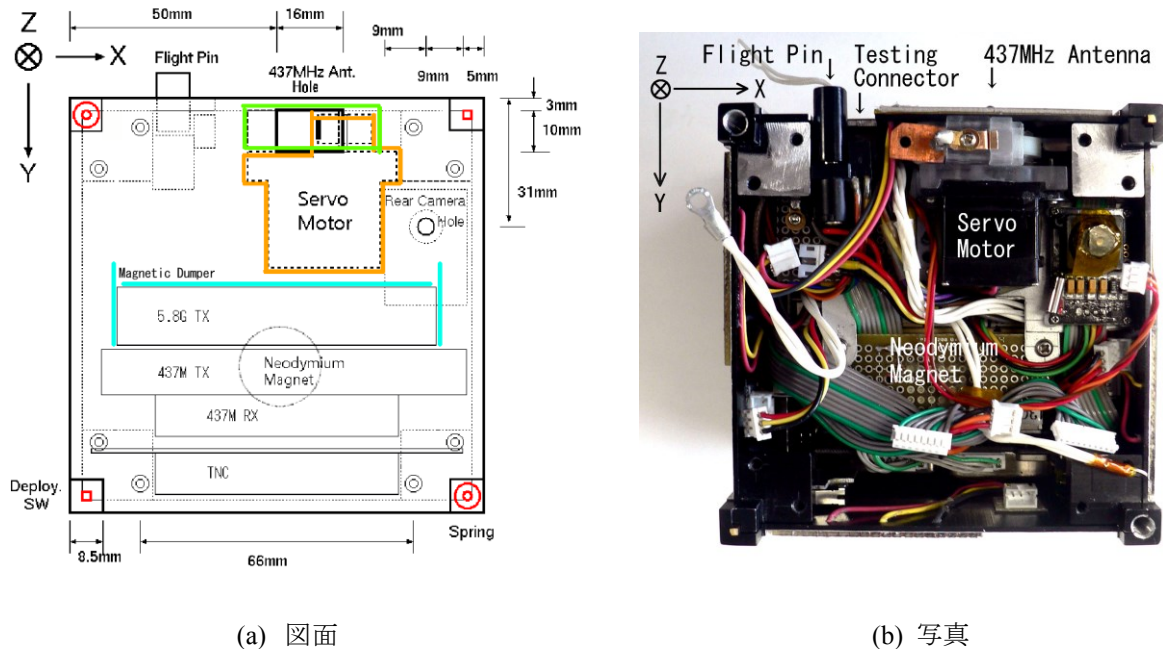


図 1 3 : : 機器の配置 (-Z 面から見た内部)

3. FITSAT-1 の軌道と姿勢

国際宇宙ステーション (ISS) は地上から約 400 km 上空をほぼ円軌道で飛行している。軌道面は赤道に対して 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 1 4 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 5.84 GHz 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 1 4 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。437 MHz 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、437 MHz 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、437 MHz 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トリーデータのダウンロードにより、バックアップシステムの 1.26 GHz 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 1.26 GHz の DTMF コマンドが通ることを確認できた。

衛星には直径 2 cm 厚さ 5 mm 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、パーマロイの1 mm厚の板3枚 (5.8 GHz TXの正面(XZ面) : 75 mm x 70 mm, 1枚、同両側面(YZ面) : 20 mm x 70 mm, 2枚) 計65 gをヒステリシスダンパーとして搭載した(図1 3(a)の水色)。しかし、短期の開発で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。

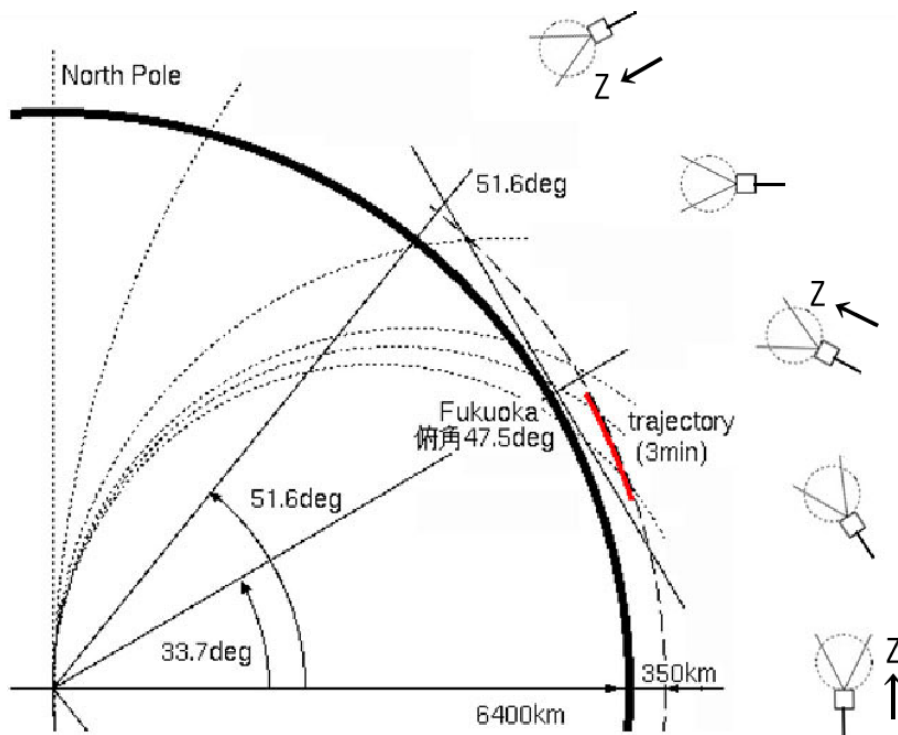


図 1 4 : FITSAT-1 の軌道と姿勢

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, 1450 mA H)、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2.3 W (4.74 V x 0.487 A)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437 MHzのビーコン用CW送信機、同コマンド用FM送受信機、1.26 GHz 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を要求している。この条件を満たすため、電子スイッチを用いて図1 5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。

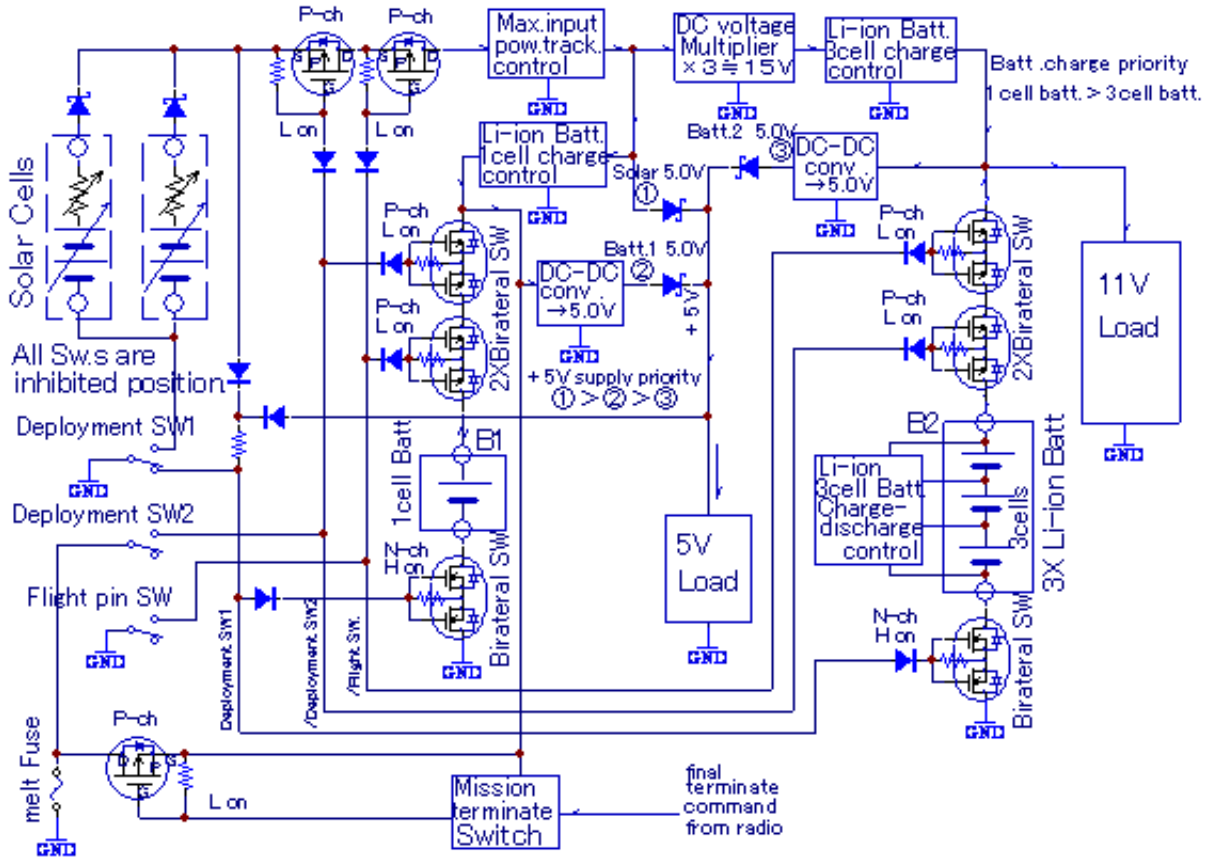


図 1 5 : 電力供給システム

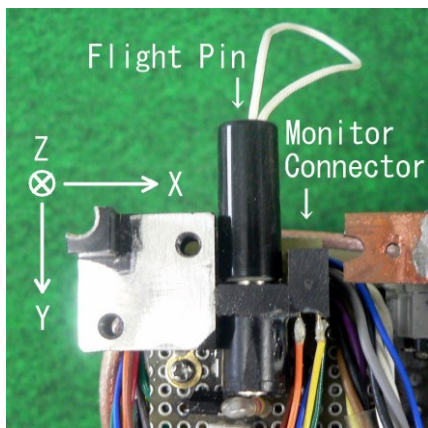


図 1 6 : フライトピン

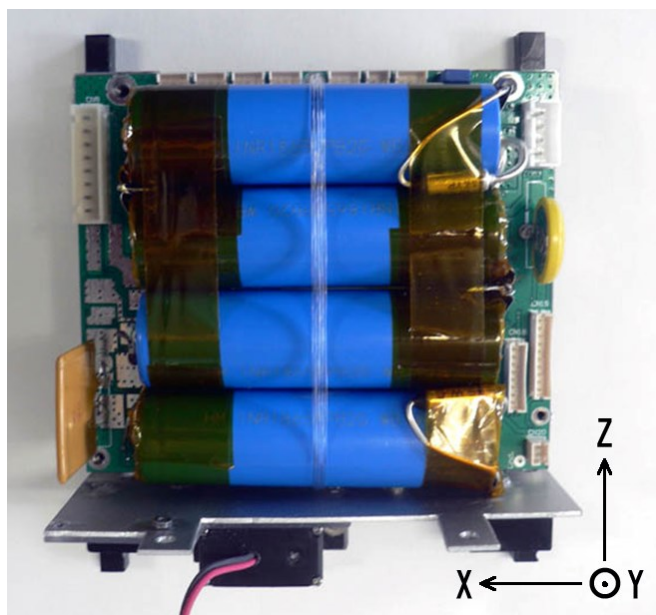


図 1 7 : リチウムイオン蓄電池

5. 通信システム

5.1 通信システムの構成

コマンドのアップリンクは 437 MHz, 1200 bps の AX.25 パケットと 1.26 GHz の DTMF の 2 系統を備えている。1.26 GHz 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 437.250 MHz のビーコン(CW)、蓄えたテレメトリーデータのダウンロードに 437.445 MHz の 1200 bps, AX.25 パケット、撮影した画像の送信に 5.84 GHz, 115.2 kbps, 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。

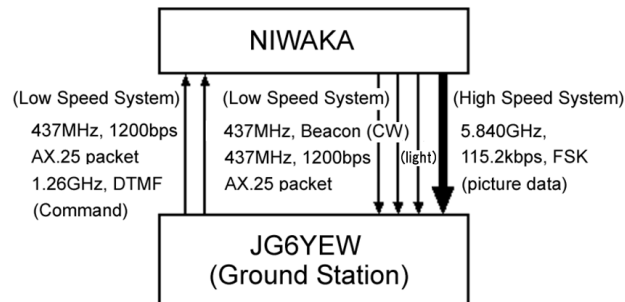


図 18 : 通信システム

表 1 : 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

5.2 データ処理システムとの関係

図 1 9 に通信システムとデータ処理システムの関係を示す。437 MHz FM/CW-TX は常時 437.250 MHz でビーコン信号 (CW, 100 mW) 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ーデータを送る。地上からのリモートコマンドは 437 MHz の FM-RX で受信され、TNC で 1200 bps 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 437.445 MHz で 1200 bps, 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ー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。1.26 GHz または 347 MHz で送られてきた DTMF 信号は Backup-CPU で解読実行され、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ーに蓄える。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ーから読み取り、5.84 GHz FSK-TX により地上に送信する。

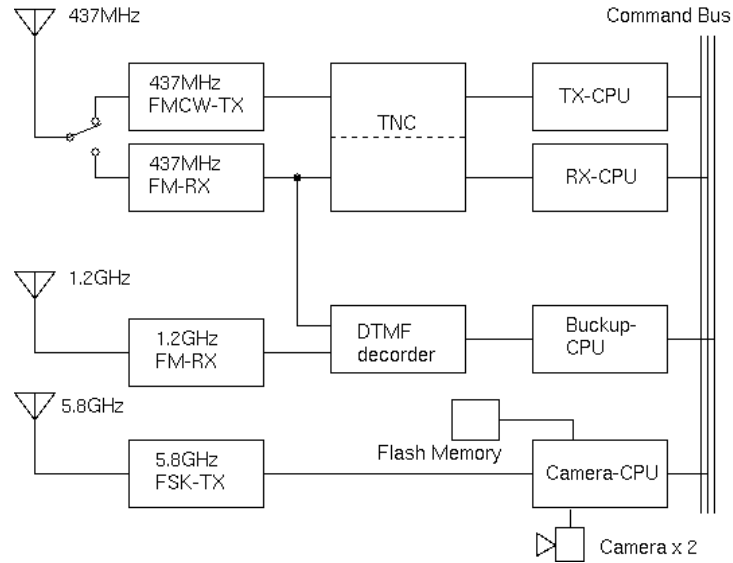


図 19 : 通信システムとデータ処理システム

5.3 5.84GHz 高速送信モジュール

5.84 GHz 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 20)。約 15 W の直流入力で 5.84 GHz, 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、115.2 kbps で通信を行うことができる。周波数の偏移は ± 50 kHz であるが、99%のエネルギーは 415 kHz に広がっている。90%のエネルギーは 300 kHz 以内に収まっている (図 21)。

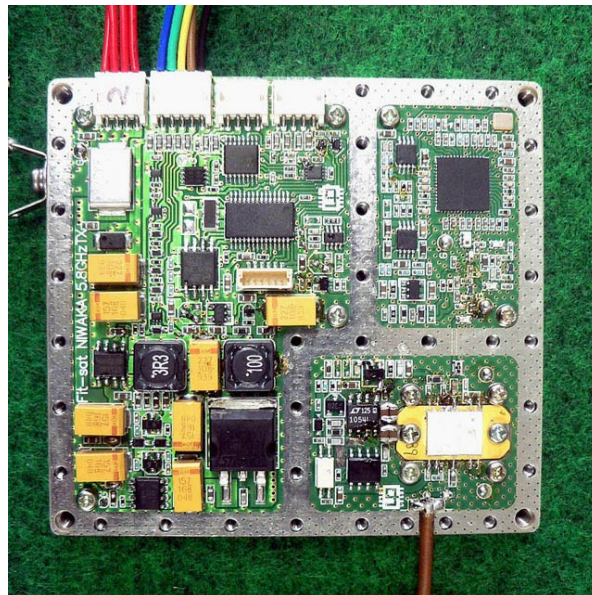


図 20 : 5.84GHz 送信モジュール

図 22 に 5.84 GHz 送信モジュールのブロック図を示している。回路を簡素化するために、発信部は

無線 LAN 用の IC (MAX2828) の VCO と PLL、アンプ部分を流用している。FSK 変調は水晶振動子が生成する基準信号を直接振る方式を採用している。この方式は直流まで変調を掛けることができる。MAX2828 からの平衡出力はバランで不平衡に変換し、LPF を経てドライバーアンプ(VMMK-2503)で増幅する。出力は BPF を通して東芝の MMIC (TMD5872-2)で増幅し、5.84 GHz, 2W の RF 出力を得ている。送信モジュールに内蔵した CPU (PIC16F886) は PLL の設定だけでなく、前後 2 台のカメラの制御、フラッシュメモリーへのデータの出し入れの制御も行っている。

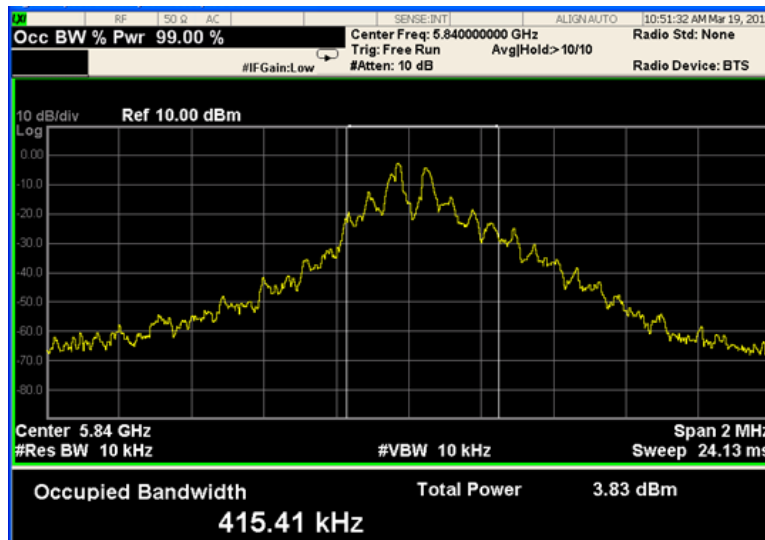


図 2 1 : 5.84GHz, 115.2kbps FSK 変調波のスペクトル

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

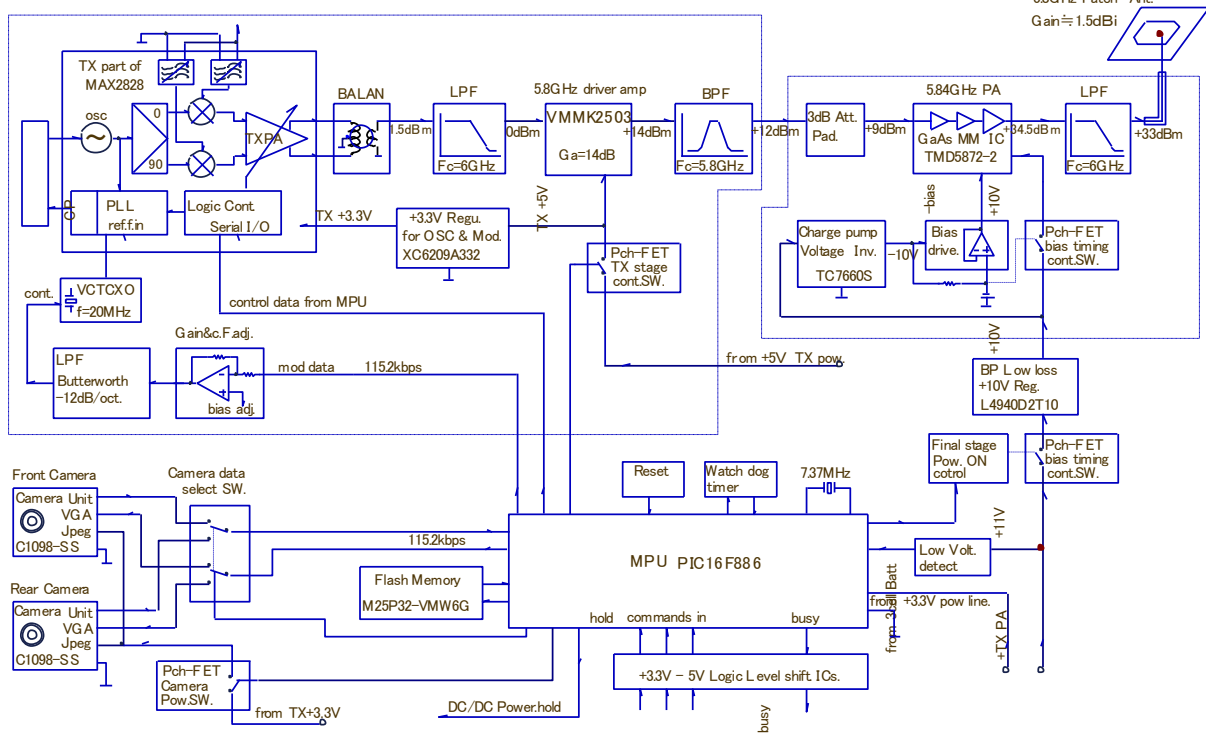


図 2 2 : 5.84GHz 送信モジュールのブロック図

5.4 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 個取り付けている。3 直列にしたリチウムイオン電池でドライブするので 20 A 以上の電流が流れ、200 W 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 個取り付けている。10 A 以上の電流が流れ、100 W 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 30~40 W、赤パネルはこの半分程度である。

LED の点灯は二つのモードを準備している。一つのモードはモールスコードで点灯する。モールスコードはデューティ比 15%、1 kHz 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ールス音が得られるはずである。もう一つのモードは微弱光検出モードである。デューティ比 30%、10 Hz で点滅し、これをデューティ比 50%、5 kHz の信号で変調をかけている。10 Hz 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 5 kHz 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。

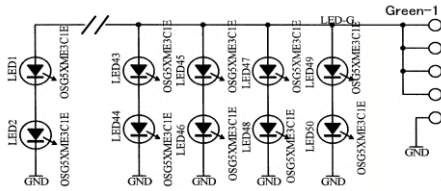


図 2 3 : 緑 LED パネル

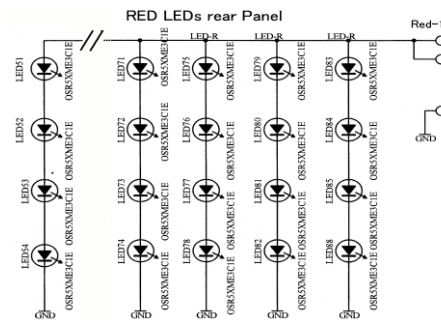


図 2 4 : 赤 LED パネル

6. 5.84 GHz 高速画像通信の実験

6.1 画像データ

1 枚の Jpeg 画像は図 2 5 に示す 128 byte のパケットを単位として送られてくる。最初の 2 byte はパケットの ID、次の 2 byte はデータサイズ、そのあと 122 byte の画像データが続き、最後の 2 byte がチェックサムとなっている。最後のパケット以外のデータ長はすべて "7A 00" (Hex) = 122 となっている。1 枚の Jpeg 画像は "FFD8" で始まり、"FFD9" で終わる。各パケットの最初 4 byte と最後 2 byte 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。

1 個のパケットは 115.2 kbps では約 12 msec で送られてくる。一方、フラッシュメモリーから 122 byte のデータを読むのに 8 msec の時間がかかる。従って、1 つのパケットは 20 msec ごとに送られてくるので、FSK 検波器の出力をスピーカーにつなぐと、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 5.84 GHz 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入れている。

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

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

図 2 5 : 画像データのパケット

6.2 画像受信システム

5.84 GHz帯受信システムは5.84 GHzを440 MHzに変換するLNBと受信機AR8600、受信機の間中周波10.7 MHz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2 8)。LNB(図2 6)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2 7)。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、5.84 GHz増幅器、5.4 GHz局部発振器、周波数変換器、440 MHz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。5.84 GHz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。



図2 6 : LNB (周波数コンバータ)

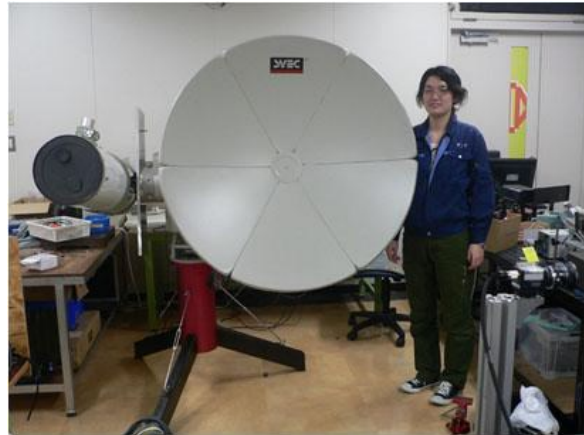


図2 7 : 経緯台に取り付けたパラボラアンテナ

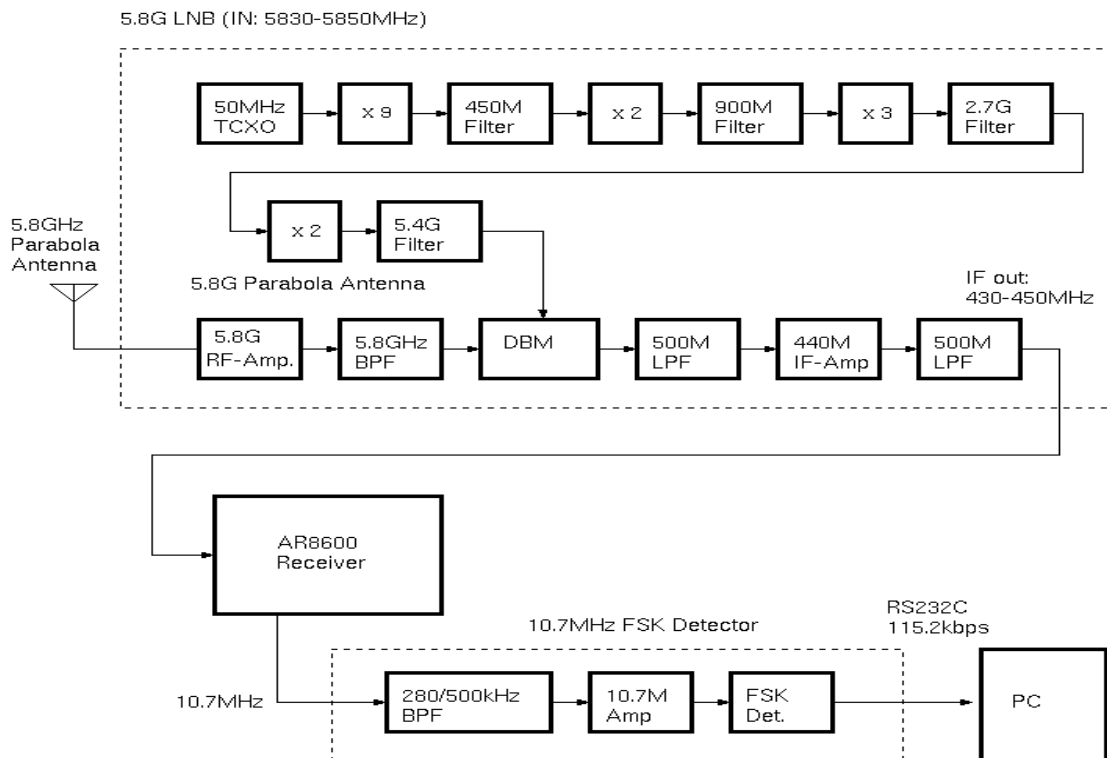


図2 8 : 5.84GHz受信システム

AR8600 受信機は 10.7 Mhz 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PCのシリアルポートに入力することができる。

6.3 受信された画像

FTSAT-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29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29：国際宇宙ステーション1

図30は前カメラが放出10秒後に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31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32は前カメラが地表を写したものである。図30よりも下を向いている。図33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34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30：地表1

図35の国際宇宙ステーションは図29と較べると、上下が反転している。また、図36の地表の写真も最初に取りられた図30の地表の写真と光の来る方向が逆になっている。図29、図30は5秒毎に切った20枚のシャッターの前半で撮られ、図35、図36は後半で撮られたものであり、衛星が160～180秒位の周期でZ軸を中心にゆっくりと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。



図31：ベトナム衛星F-1の一部



図32：地表2



図33：国際宇宙ステーション2



図34：地表3



図35：国際宇宙ステーション3

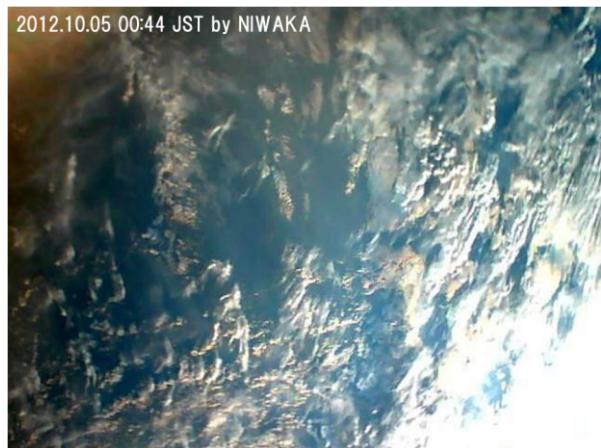


図36：地表4

7. 可視光通信の通信の実験

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。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撮影した写真が寄せられることになった。

図37は倉敷科学センターの三島学芸員により撮影されたもので、デューティ比30%（0.03秒点灯、0.07秒消灯）で点滅するLED光が写っている。



図37：最初に撮影されたLED光の写真

図38は韓国ソウルにあるKAIST（韓国科学技術院）のJun-Ho Oh教授により撮影されたものである。追尾しながら撮影されたので、衛星の光が相対的に図37より明るく写っている。図39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灯を写したものである。



図38：韓国ソウルにて撮影

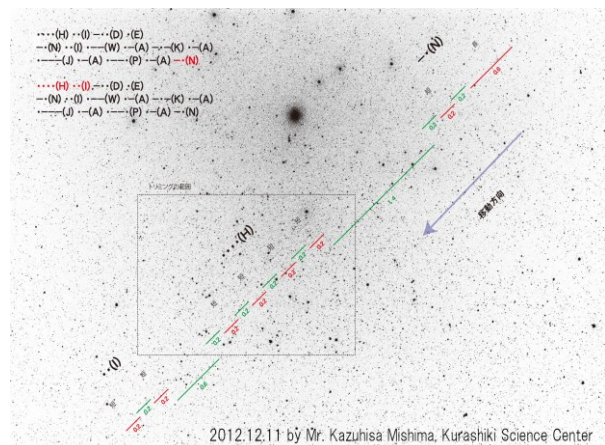


図39：倉敷科学センターにて撮影

図 4 0 は 12 月 12 日に海老名市の渡辺剛氏により撮影された。図 4 1 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 4 2 は秦野市の山本憲行氏により撮影された。図 4 3 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。ここで紹介した以外の他の方からも多数の写真が寄せられた。



図 4 0：神奈川県海老名市にて撮影



図 4 1：富山市天文台にて撮影（ムービー）



図 4 2：神奈川県秦野市にて撮影



図 4 3：愛媛県西予市にて撮影

7.2 光電子増倍管による光信号の受信

図 4 4 に微弱光検出モードでの光信号の波形を示している。デューティー比 30 % の 10 Hz 信号をデューティー比 50 % の 5 kHz で変調している。すなわち、0.1 msec の光のパルスが 0.1 msec の間隔を空けて 30 msec 分 150 個並び、次に 70 msec の空白が来る。これが 2 分間繰り返される。

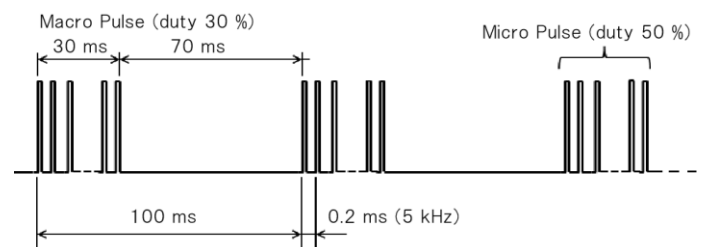


図 4 4：微弱光検出モードでの光信号

図 4 5 に口径 250 mm 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。しかし、町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。

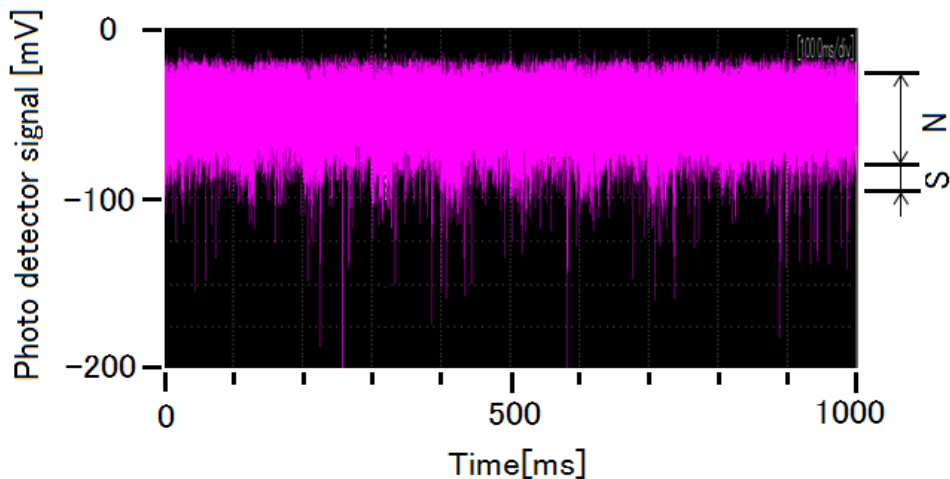


図 4 5 : 光電子増倍管の出力

図 4 6 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 5 kHz 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 1 Hz 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。

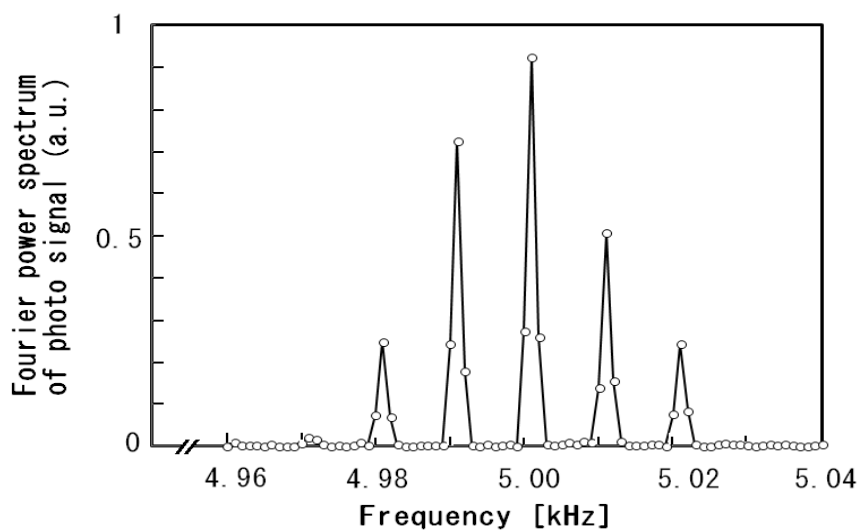


図 4 6 : 光電子増倍管の出力をフーリエ変換したもの

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 周する。

表 2 : ビーコンテレメトリーのフォーマット

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

4 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ールスコードで送信される。最初に 2 文字のモールスコードから 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 4 7 に示す。図 4 7 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。

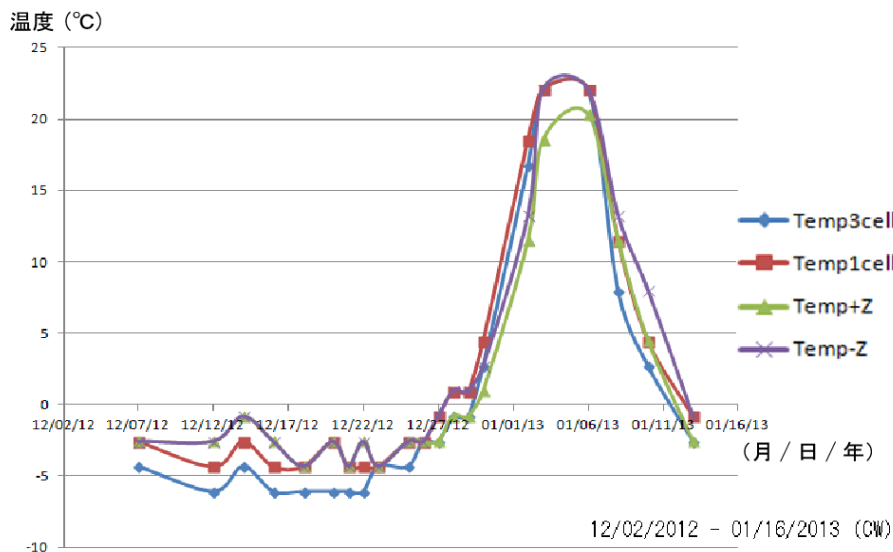


図 4 7 : 全日照前後の温度変化

8.3 AX.25 パケット信号で送るテレメトリーデータ

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 秒まで可変することができる。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 分まで可変することができる。1 分サンプリングでは丁度、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

太陽電池電圧(+X)[V]
太陽電池電圧(+Y)[V]
太陽電池電圧(-X)[V]
太陽電池電圧(-Y)[V]
太陽電池合計電圧[V]
太陽電池合計電流[mA]
1セル電池電圧[V]
1セル電池電流[mA]
3セル電池電圧[V]
3セル電池電流[mA]

表 4 : 分サンプリング

3セル電池温度[°C]
1セル電池温度[°C]
温度(+Z面)[°C]
温度(-Z面)[°C]
太陽電池合計電圧[V]
太陽電池合計電流[mA]
1セル電池電圧[V]
1セル電池電流[mA]
3セル電池電圧[V]
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 4 8 は 2012 年 10 月 13 日の 23 時から 450 分間 (約地球 5 周)、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 $+10^{\circ}\text{C}$ 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。

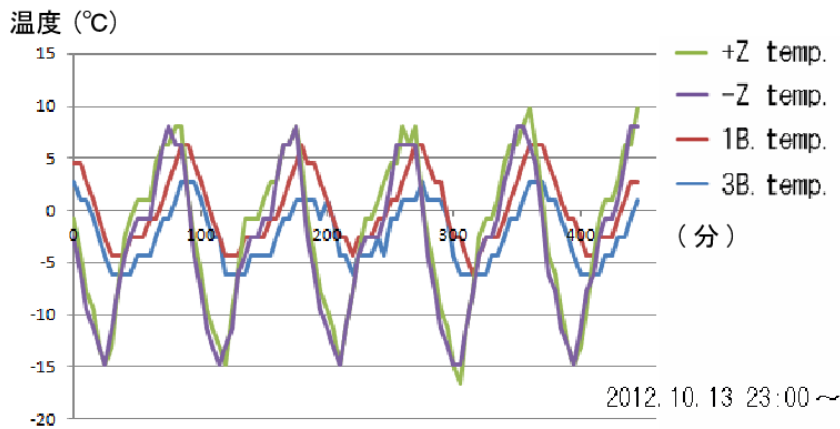


図 4 8 : 地球 5 周の温度変化

図 4 9 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、熱容量が大きいため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ため熱伝導により 3°C ほど上昇している。

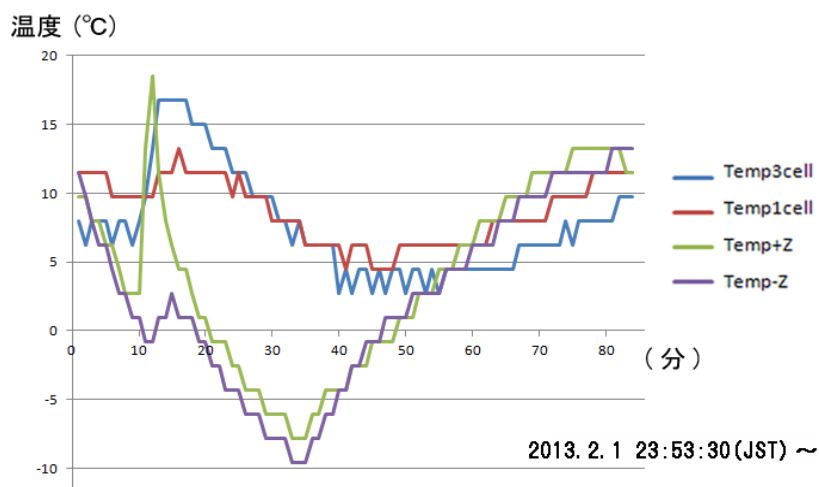


図 4 9 : LED 点灯時の温度変化

8.5 秒サンプリングにより得られた 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 5 0、図 5 1 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。電力的には点灯の初期は 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 5 0 : LED 点灯時 3 セル直列電池の電流

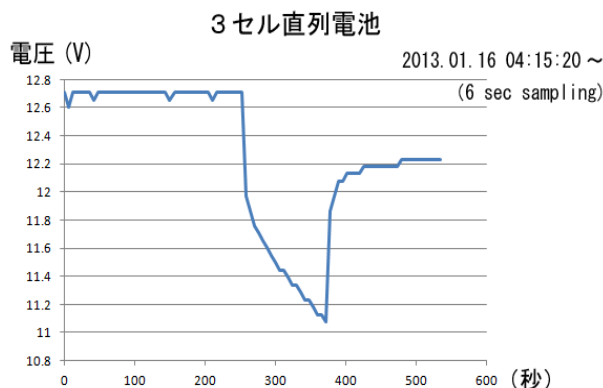


図 5 1 : LED 点灯時 3 セル直列電池の電圧

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 5 2 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。

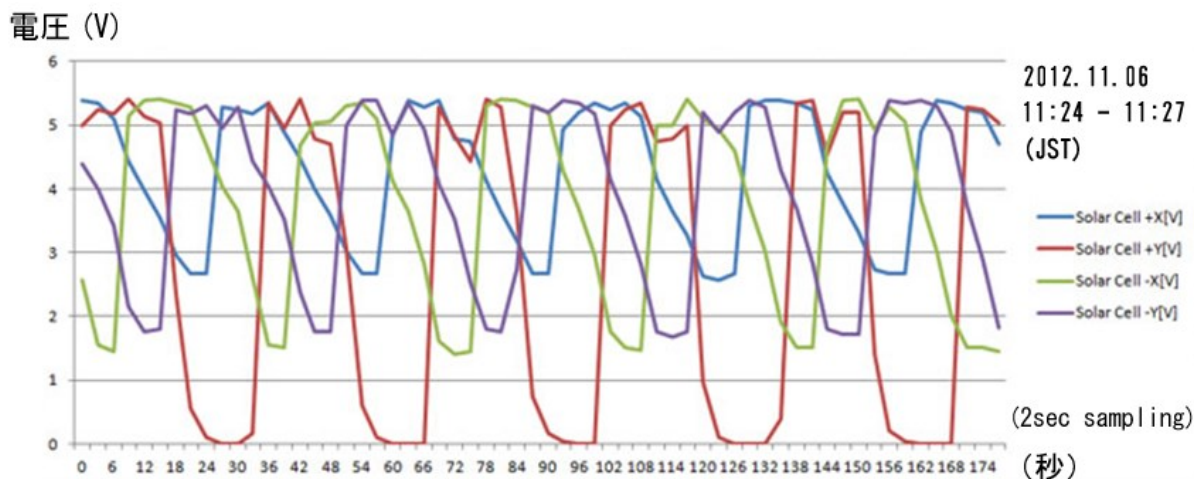


図 5 2 : 太陽電池の電圧変化-1

図 5 3 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ので、地球からの反射が次第に弱くなって行くのが分かる。

図 5 4 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。

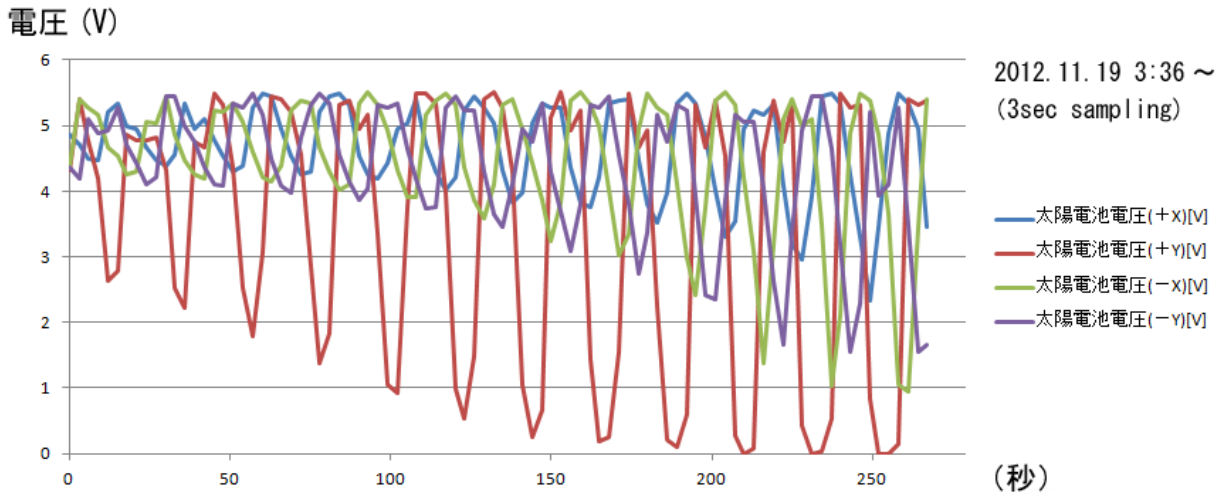


図 5 3 : 太陽電池の電圧変化 - 2

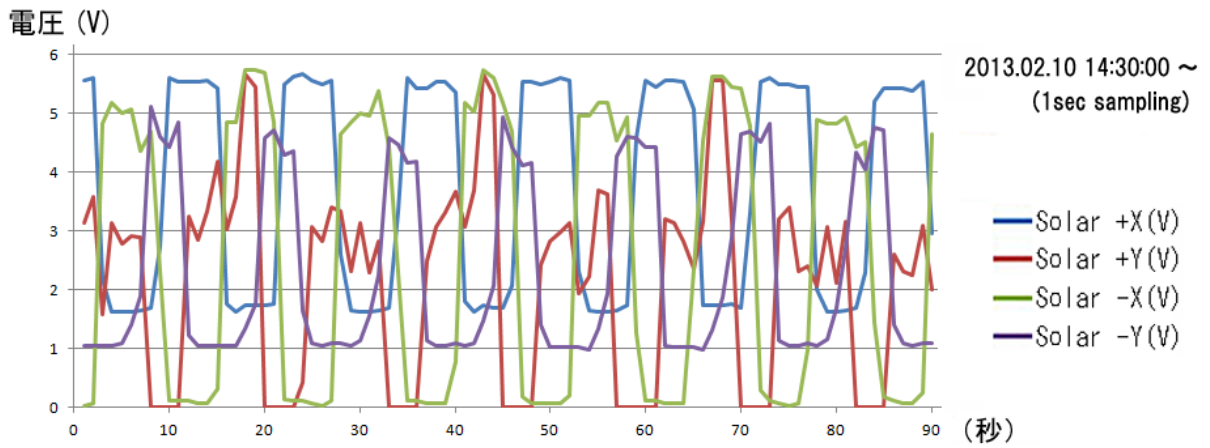


図 5 4 : 太陽電池の電圧変化 - 3

図 5 5 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。

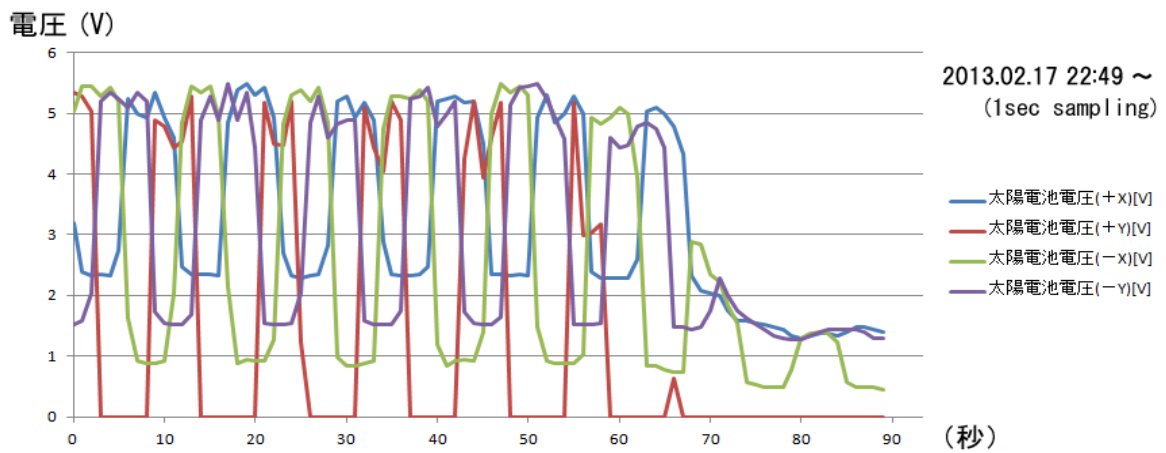


図 5 5 : 太陽電池の電圧変化 - 4

FITSAT-1 は磁石を搭載しているため、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 5 6 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。

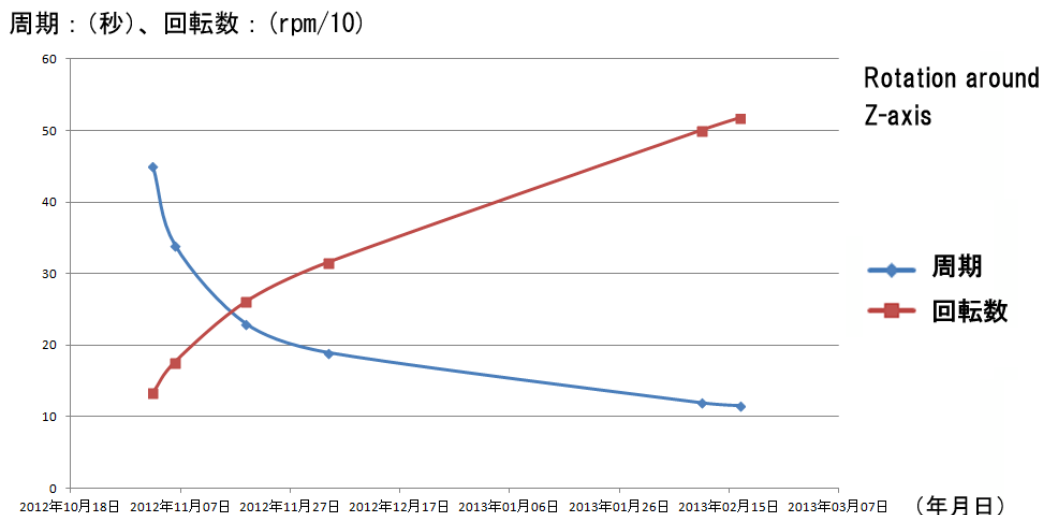


図 5 6 : FITSAT-1 の Z 軸周りの回転数の変化

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 115.2kbps 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。5.84 GHz 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 5.8 GHz 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。卒業生、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。437 MHz のビーコンのレポートは世界中から 9 ヶ月間に千二百件以上頂いた。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ーデータを頂いた。また 5.84 GHz の実験も日本のハム JA1OGZ 局、JA0CAW 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 5.84 GHz 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所所報、第 20 巻、pp.1-6、2009 年。
- [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-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 年 9 月。
- [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 年 10 月。
- [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 年 4 月。
- [5] Takushi Tanaka, Yoshiyuki Kawamura, Takakazu Tanaka: "Overview and Operations of FITSAT-1 (NIWAKA)", Proc. of RAST2013, Istanbul, pp.887-892, 2013. 6.