超小型衛星「Negai☆”」の開発と運用

黒木　聖司（創価大学）

Development and operation of a pico-satellite Negai☆”

Seiji Kuroki (Soka University)

A Soka University pico-satellite Negai☆” was launched on May 21st, 2010 at Tanegashima Space Center, Japan to decay on June 26th, 2010. The satellite is a CubeSat that measures just ten centimeters cubic and weighs a mere kilogram. Its orbit is 300km altitude with 30 degree inclination. At 300km altitude, the satellite plunges back into the atmosphere, creating an artificial “shooting star” after a few weeks. Hence it is named NEGAI or “Wish upon a shooting star.” In 30 degree inclination orbit, the satellite does not go beyond over 30 degrees latitude either north or south. In order to access better, three ground stations were constructed one in Soka University campus and others in two remote islands. Negai☆’s mission will be two-fold. It will serve as a test bed for a highly advanced information processing system with FPGA (Field Programmable Gate Array) that is extremely reliable and resistant to intense cosmic radiation. It also aims to spur interest in space exploration among children. Negai☆” contained on microfilm the names and dreams of children recruited through a public campaign. The most important aspect of this satellite is that it is hand-made by the students.

キーワード：人工衛星、超小型衛星、電子回路（satellite, CubeSat, electronic circuit, booster）

1．はじめに

創価大学大学院情報システム工学専攻黒木研究室では超小型衛星Negai☆”(「ねがい」と読む)を開発し、この衛星は2010年5月21日にH-IIAロケット17号機で種子島宇宙センターから宇宙へ成功裏に打ち上げられミッションも成功し6月26日に大気圏再突入した。この衛星はCubeSat(一辺10cmの立方体で質量は1kg以下の超小型衛星)とよばれる衛星に属する。

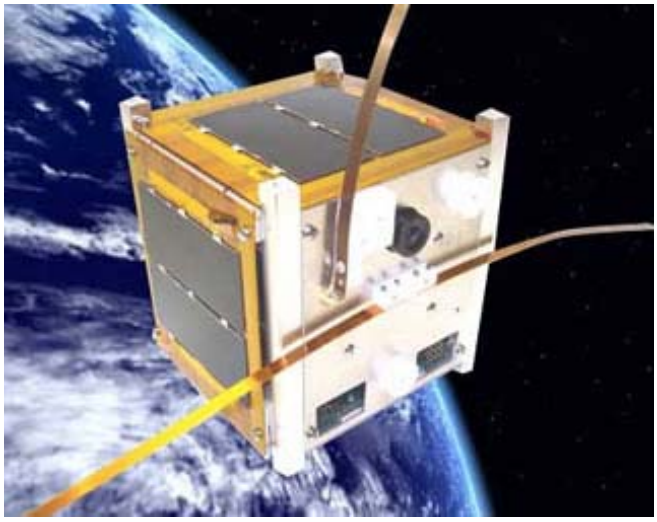

図1．pre-EMモデル

多くの人は人工衛星とロケットの違いを良く理解していないが、「ロケット」は人工衛星を頭部に搭載して宇宙空間まで運び放出する乗り物である。人工衛星を衛星軌道に投入するまでに原則的にロケットの全部品が地表面(海面または地面)へ落下する。「人工衛星」は軌道へ投入された後に宇宙空間を航行し地上と交信しながらそのミッションを遂行する。

Negai☆”の「技術ミッション」は、民生品FPGA(Field Programmable Gate Array)を用いた高機能情報処理装置の宇宙実証である。これは我々の専門が電子情報工学であることの強みを生かしたユニークなミッションである。

今回のH-IIAの主衛星は金星探査機PLANET-C「あかつき」で、金星へ行く軌道へ投入された。金星探査機PLANET-Cを搭載しても、ロケットの容積と質量に余裕があったため相乗り衛星が公募され、相乗り超小型衛星としてNegai☆”も選定された。PLANET-Cが金星軌道へ投入される前にロケットから超小型衛星は分離された。その軌道は円軌道で、(1)軌道傾斜角30°、(2)軌道高度300kmという特徴をもつ。(1)軌道傾斜角30°では衛星は赤道を中心として北緯30度と南緯30°の間を航行する。(2)高度300kmでは希薄な空気が存在し、この空気の影響で衛星は急速に高度を下げ落下していく。この高度での空気の濃さは、地上に比べて10^{-11}程度といわれているが衛星は約8km/秒という高速で航行しているので空気の影響が大きい。NASAのホームページで落下のシミュレーションを得ると質量1kgのNegai☆”の寿命は約20日と予測された。

Negai☆”の技術ミッション「民生品FPGAを用いた高機能情報処理装置の宇宙実証システム」は専門家から高い評価を得たが、専門外の多くの人には理解できないようである。第一回のJAXA相乗り副衛星公募に応募した（2009年1月打ち上げた衛星GOSAT「いぶき」との相乗り）。この相乗りには応募衛星数が多かったためJAXAによる技術評価が行われ創大衛星は技術評価A（A、B、C評価の最高位）を受けミッションも高い評価を得たが選定審査会では不合格とされた。

今回JAXAのPLANET−C相乗り公募に際しては、一般の人にも良く理解してもらえるミッションを追加した。そのミッションは、小学6年生以下の子供の夢をはがきで募集し、これをマイクロフィルムに転写して衛星に搭載する。数週間後に大気圏再突入時に燃え尽きる衛星を人工の流れ星にみたてて「星に願いを託す」、というミッションである。このミッションをメインミッションとし、このことから衛星の愛称をNegai☆”とした。このミッションは八王子市内の小学校長たちが感銘してくれて八王子市教育委員会の後援を得た。国内と外国から約8,000通のハガキが集まった。

2. 衛星概要

（1）Negai☆”衛星の外観図を前頁の図1に示す。図1はpre-EM（PLANET-C相乗りではJAXA指定のEM(Engineering Model)の開発を要求されたが、その前に学内で開発したEMモデル）である。この図の中央にアンテナが2本見えるが、水平のアンテナがダウンリンク用ダイポールアンテナ（430MHz帯）、垂直のアンテナがアップリンク用モノポールアンテナ（144NHz帯）である。打ち上げ時には放出機構（JPOD：JAXA Picosatellite Oribiter Deployer）に収納できるようにアンテナは丸めてたたんで糸で縛ってある。JPODから宇宙空間へ放出されたのちに衛星搭載のタイマーが働き一定時間後にアンテナ面裏のヒータを加熱して、縛った糸を切り離し自律的に展開する。

（2）Negai☆”衛星の主要諸元を表1に示す。

（3）衛星の全体系統図を図2に示す。図2に示すように人工衛星に最低限必要な搭載機器は(a)アンテナ、(b)送受信機、(c)コンピュータ（メモリーを含む）、(d)電源系である。独自のミッションを遂行させたければ専用のミッション機器を搭載する。(a)アンテナ、(b)送受信機、(c)コンピュータ（メモリーを含む）、(d)電源系、を搭載している身近な機器は携帯電話である。つまり小型衛星と携帯電話とはよく似ていて電子情報工学系学生の研究テーマとしても同じように興味深い。

表1. Negai☆"主要緒元

ニックネーム	Negai☆"（ねがい）	
推定寿命	約20日	
寸法	約10cm×10cm×10cm	
質量	986g	
主要デバイス	SRAM FPGA	EP2C8
	Flash FPGA	APA150
	PIC	PIC16F873
CPU	Soft-core CPU	PIC16F877相当
通信系	Uplink (Command)	144MHz Mono-pole Antenna
		FSK Ax.25 1200bps
	Downlink (Beacon)	430MHz Di-pole Antenna
		CW 50WPM
	Downlink (packet)	430MHz Di-pole Antenna
		FSK Ax.25 1200bps
センサー	CMOS image sensor	
	Thermometers	
	Voltmeters	
	Ammeters	
太陽電池セル	GaAs	
電力系	1.5W 平均	
充電池	PPT	
	Ni-MH 2700mAh 1.2V ×6	
構造材	アルミニウム合金	

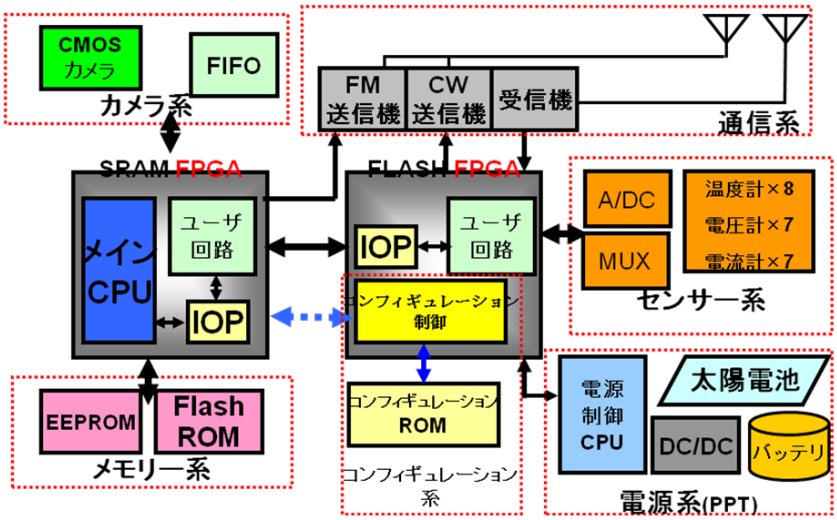

図2. Negai☆”の系統図

携帯電話と小型衛星の技術の比較を表2に示す。衛星ではキーボードやモニターは搭載しない。人間が衛星の付近にいないためである。キーボードやモニターに相当する機能は地上局に置く。キーボードに相当する機能はコマンドといい、モニターに相当する機能はテレメトリという。携帯電話は時々充電をするが衛星では近くにコンセントがないため、太陽電池を衛星に貼付してエネルギー源とする。この表に示すように電子技術的には両者はほとんど同じである。人工衛星技術の90%は電気工学、10%は機械工学といわれる。これは携帯電話でも同じで、携帯電話のメーカでも多くの機械エンジニアが採用され筐体の研究開発を行っている。

Negai☆”は地球の画像を撮影するカメラを搭載しているのでカメラ付き携帯電話といえる。人工衛星は非修理系であるため他の電子機器などとは大きく違うところがある。つまり一度打ち上げると修理することができない。打ち上げ直後が最良の状態でありその後は特性が劣化していく。

表2　携帯電話と人工衛星の主要技術は同じ

項目	携帯電話	人工衛星
アンテナ	○	○
送受信機	○	○
コンピュータ	○	○
メモリー	○	○
カメラ	○	○
電源	○	○
1．太陽電池	×（注）	○
2．充電器	○	×
キーボード	○	×
モニター	○	×
その他	おもに電子情報機器	姿勢制御系、機械機器（展開物）、電子機器（レーダ）、推進系など

（注）最近携帯電話用の太陽電池が発売された。

3．メインミッション：子どもの夢応援衛星

この人工衛星は軌道高度が300kmであるため、希薄大気の影響（エアードラッグ）により数週間で落下し大気圏へ再突入し燃え尽きる。この様子を人工の流れ星に見立て、「流れ星に願いを」託すことをメインミッションにした。小学6年年生以下の子どもの夢をハガキで募集し、これらを撮影しマイクロフィルム化して衛星に搭載した。八王子市教育委員会の後援を得て国内外から約8,000枚の応募を得た（図3）。米国政府機関による地球周辺飛行物体情報サービスSpace Trackによれば、Negai☆”は6月26日に「流れ星」になり約8,000人の子供の夢を宇宙へ届けた。

図3．集まった約8,000枚の応募ハガキ

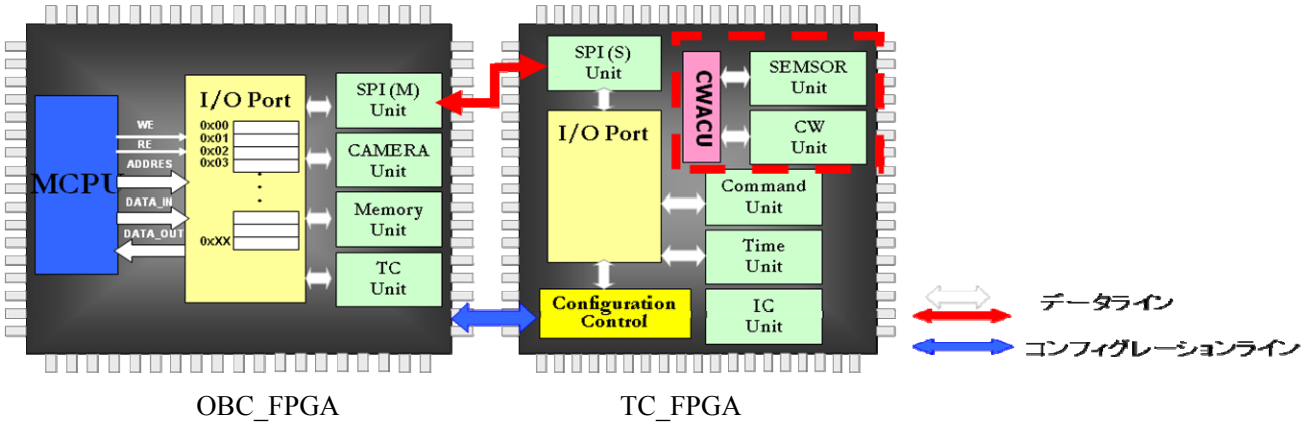

図4. 統合制御系

4. 技術ミッション

技術ミッションは「FPGAを用いた高機能情報処理装置の宇宙実証」である。FPGAはプロの衛星では必須の部品であるがアマチュア衛星ではいまだに多くは使用されていない。FPGAは他の半導体素子の機能をハードウェア記述言語(HDL:Hardware Description Language)を使用して書き込むことができる。このため数枚のプリント基板を必要とする電子回路を1枚のプリント基板に収めることも可能である。必要に応じてソフトウェアを使用して全体を制御することも可能で自分の希望通りの回路にカスタマイズできる。

統合制御系は図4に示すように2つのFPGAを使用している。図5に示すようにOBC_FPGAの中にCPUを構成した。衛星のシステム全体の統制は内部CPUで行い、ソフトウェアで管理している。ただしTC_FPGA(図4右)内の点線で囲った部分はCPUによらずにセンサー情報を獲得しCW(モールス符号)を送信することが可能である。

ソフトウェアは柔軟性があり、ハードウェアは高速処理が可能であるという特長がある。この衛星システムは両方のメリットを生かした効率の良いシステムであると専門家から評価されている。

(1) 宇宙空間には極めて強い放射線があるが、放射線によってレジスタ内の0と1が入れ替わる可能性がある。放射線による影響を阻止するためにCPU内の全レジスタを3重化している。同じ情報を処理するのに3つのレジスタで処理する。この結果を多数決論理で得る(図5左)。このようにして宇宙放射線によって起きたビットエラーを訂正できる。

(2) OBC_FPGAは比較的宇宙放射線に弱いので、放射線により内部コンフィギュレーションが壊される可能性がある。この時にはリ・コンフィギュレーションできるように、比較的宇宙放射線に強いTC_FPGAにコンフィギュレーションコントロール回路を構成し、必要に応じて宇宙空間でリ・コンフィギュレーションできるようにした。

(3) 衛星はカメラを地球方向へ向ける装置を搭載していないために、この画像に地球が映っているかどうかは不明である。

- 画像はQVGAである。QVGAはPCで良く使用されるVGA(PC用グラフィックシステムで標準として広く普

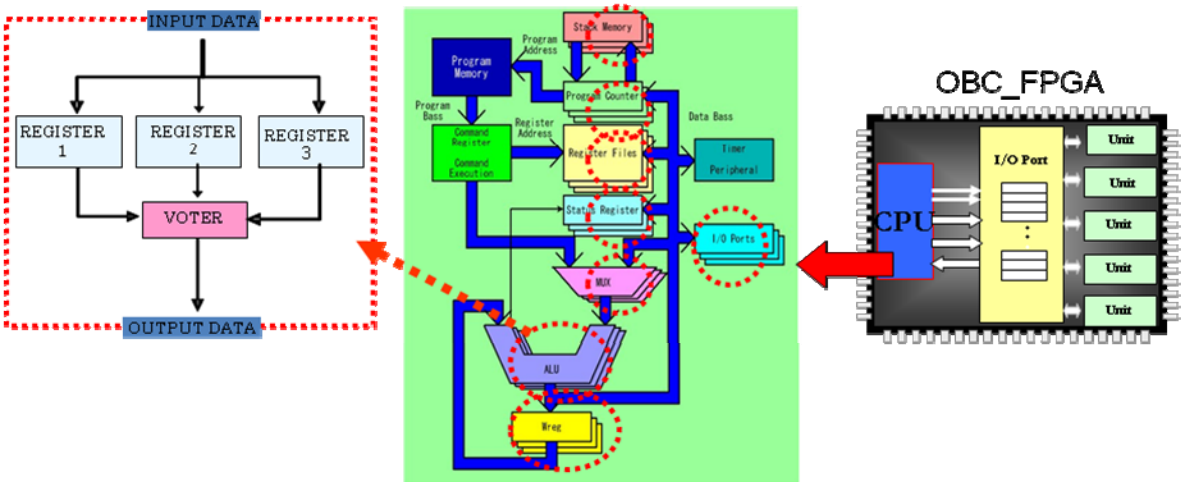

図5. 内部3重化

及しているシステム）の1/4の画素数（320×240pixel）である。しかしdownlink回線は1200bpsと小さいためQVGAを地上局へ伝送するには約４日間かかる。効率よく伝送するために以下のようなシステムを構成した。まず撮影した画像に地球が撮影されているかを確認するために、統合制御系内でQVGA画像をQ4VGA画像に圧縮する。Q4VGAはQVGAの1/4の容量(40×30pixel)で、そのデータ量は1200pixelで2400byteである。最初に地上局へQ4VGAを送信して、その画像の内容を確認してから必要に応じてQVGA画像を地上へ伝送する。

- 画像を衛星内で4分割し、各々の区画の中での明るさを数字化して地上へ送ることができる。地上局ではこの数字を見て、頭の中で画像を予想して地球画像が撮れているかどうかを判断する。地球画像が撮れていると判断したときにはQVGAを地上へ伝送する。

5. 衛星の構造体

衛星のシステムはロケットの激しい打ち上げ環境や宇宙環境に耐えねばならぬ。これらの激しい環境に耐えるように筐体設計と試験が必要である。環境試験といわれるそのテストは（i）振動試験、（ii）衝撃試験、（iii）真空試験、（iv）温度試験、などである。

構造部材を図6に示す。プリント基板類を図7に示す。すべて両面基板でありこれらによって図２の系統図を実現している。このほかに2次電池ボックスと送受信機がある。これらを組み立てて図8のような構造体になる。

図6. 構造部材

上記したように電子回路が人工衛星の主要な機器である。この電子回路を宇宙に打ち上げて、宇宙空間での環境に耐えねばならない。宇宙環境とは具体的には強い宇宙線、真空、熱環境である。このためには設計の当初から環境を考慮し、かつ環境試験で検証する。

ロケットの振動条件や衝撃条件に自衛星の電子回路が耐えうることを検証する必要がある。またロケット上昇時の激しい衝撃で、電気回路に電源が印加されて他の搭載機器やロケットに悪影響を与えないことを、これらの試験で実証する。

衛星の筐体材料には原則として鉄は使用できず通常はアルミニウム合金を使用する。地球周辺には磁場があるため、強磁性体である鉄が磁場に反応して姿勢が変化することを嫌うためである。pre-EMでは、超ジュラルミンと呼ばれるアルミ合金A2024を使用した。しかしEMとFMに対してはJAXAから厳しい注文がついた。アルミニウム合金の中で最高の強度を誇るA7075を使用することを要求された。これは超々ジュラルミンと呼ばれる。また支柱部分の材料としてはA7075を熱処理してさらに強度を強めた材料の使用を要求された。これはロケットの上昇中にJPODの蓋部分から衛星支柱に圧力がかかって、支柱が縮むことがないようにとのことであった。

図7.プリント基板類

図8. システムの内部

6. クリティカル部品への配慮

人工衛星は非修理系（一度打ち上げると修理できない）なのでどの部品が故障しても致命的である。どの系についても十二分な検討を行ったが、ここではアンテナ展開機構と2次電池の2例を説明する。

(1) アンテナ展開

ロケット打上げ中の振動や衝撃で展開機構が、意図しないのにロケット内で展開すると他の衛星やロケットに被害を及ぼす。このためすべての展開機構はJAXAの強い監督下に置かれる。Negai☆”の展開機構は最初からアンテナだけに限定した。Negai☆”に与えられた包絡域は約10cm立方内である。VHFアンテナとUHFアンテナは10cmより大幅に長いのでアンテナを巻きつけてその先端をダイニーマ（超高強力ポリエチレン繊維）で縛った（図9）。アンテナの展開機構は、ロケットに搭載中は展開してはならない。JAXA安全審査から「ロケット搭載中にアンテナが絶対展開しないこと」を理論的説明と振動試験・衝撃試験の両方から要求された。この目的のためヒータ起動回路を3 inhibit 回路で構成した。3 inhibitとは独立した3つの系統が働いて初めてヒータが稼働するように設計されたものである。衛星がJPODから放出されたことを感知するために支柱の先端にマイクロスイッチを付けてある。もう一つのピンスイッチで電源系が働き初め、タイマーを介してFETが駆動を開始するように設計した。

図9. アンテナ面
（アンテナを巻いてある）

ロケットから放出後は内蔵タイマーが放出を検知し300秒後にアンテナの端を縛り付けたダイニーマをヒータで焼き切り、自律的にアンテナが展開する仕組みである。アンテナ展開と送信機ONとはインターロックされているので、アンテナが展開しないとCW信号も送信されない。アンテナが展開しないときには衛星は全損になる。アンテナの展開は真空槽の中でも行い、真空中でもニクロム線がダイニーマ線を焼き切り、しっかり展開することを複数回確認した。さらにしっかり展開することの確認のために、振動試験各軸（X, Y、Z軸）後の電気性能試験では、必ずアンテナを展開して後にワイヤレスで電気性能試験をした。この方法は時間がかかるため、JAXA監督員からの提案で最終的には衛星筐体面のアンテナ面を開いて内側にある同軸コネクタと無線機をつなぐワイヤー方式で行った。フライト認定されるFM(Flight Model)のビスを外し、表面パネルを開くには再現性にリスクを伴う。このためJAXA審査会に申請し了解を得て、試験を行った。結果は5月21日のロケット打ち上げ後に無事にCW信号が送られてきた。このことはアンテナの展開とその後の送信機ONが見事に成功したことを示している。

(2) 2次電池

2次電池もJAXAが特別な関心をもつ部品である。コールドロンチ（ロケット内にあるときに、衛星の電源は常にOFFであること）とはいえ、衛星内で唯一エネルギーを電気の形で蓄積している部品である。このエネルギーが衛星の中で暴れると自衛星のみならずロケットの全損にもつながる。昨今人気のあるリチウムイオン電池は、JAXA相乗り衛星では、実質的に使えない。この電池は爆発する可能性があるためという。ロケット内で爆発するとロケットの全損になる。我々は当初からNiMH（ニッケルメタル水素）電池を採用した。Pre-EM開発のときに電池を全短絡した。全エネルギーが解放され図10に示すように、各電池は膨張したがケース内に収まっており、2次電池が全短絡した場合にも他の部品への影響が無いことが示されJAXA安全審査のための論拠にできた。

図10. 電池の全短絡試験

超小型衛星では、2次電池の異常でミッションに不具合が発生することが多いという。衛星の中は電気製品の塊なので、電池の異常は致命的である。民生品電池は試験データが添付されないため信頼性に難が残る部品のように思える。ロットの同じ電池を購入したいが一般にはそのようなことはできない。

NiMH電池を十数本購入し、これらの電池からFM搭載用6本を選別した。1本ずつ（1）充電特性と（2）放電特性を測定した。充電特性測定には約8時間かかり、放電特性測定は約3時間かかる。このように長時間かけて、全部の電池の放電特性と充電特性を比較した。この試験でわかったのは市販の電池では

活性化されていないものも含まれていたことである。活性化されていない電池を衛星に搭載するのは恐ろしい。全電池の特性を比較して、良好な特性であると認められた電池の中から、性能がそろっている電池を6本選び出し1組とした。選別試験の様子を図11に示す。選別した1組につき充電特性と放電特性を測定し、さらには温度槽内に入れて温度特性も測定した。電池端子間の接続は、JAXA要求では「溶接はダメ、半田付けをすべし」とのことであった。熟練の技を求めて業者さんに半田付けをお願いした。業者さんの話では「溶接と半田付けの間に区別はない」とのことだったがとにかく「半田付け」をお願いした。

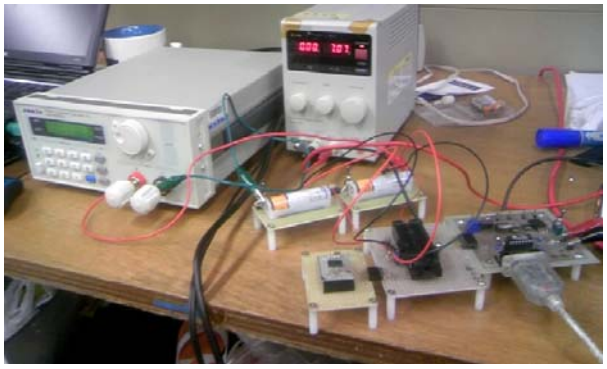

図11. バッテリ選別試験

衛星は2010年4月16日にJAXAに納入してから2010年5月21日の打ち上げまで一切充電はしなかったが、打ち上げ後も1ヶ月間無事に働いてくれた。

この結論は衛星からのテレメトリが教えてくれた。打ち上げ当初から大気圏再突入して「流れ星」になるまで充電も放電も問題はなく電池はとても元気に働いた。

7. 地上局

衛星のコマンド受信周波数は144MHz、テレメトリ送信周波数は430MHzであり両方ともアマチュア無線帯である。衛星軌道は高度300kmで軌道傾斜角は30°である。このため衛星は北緯30°より北には上がってこない。創価大学は東京都八王子市にあり、北緯35.78°である。創大局では衛星とアクセスするチャンスは少なく、かつ衛星までの距離は遠いので、沖縄県石垣島（北緯24.33°）と八丈島（北緯33.11°）に地上局を設置した。石垣島は北緯30°より南にあるので衛星が天頂を通過する可能性もある。

図12. 地上局の配置図（衛星は北緯30度より北には上がらない）

3局（八王子、八丈島、石垣島）の位置と種子島の位置を図12に示す。赤い線は北緯約30°を示す。石垣島と台湾・中国大陸が近いため人工ノイズが多いことや、八丈島は海で囲まれているためノイズが少ない様子がわかる。結果的には、この2局の設置は大成功であった。衛星は石垣局からのコマンドしか受け付けなかった。衛星からのテレメトリが圧倒的に良く受信できたのは八丈局であった。

8. 衛星の運用管制

H-IIA 17号機は2010年5月21日午前6時58分22秒に金星探査機PLANET-Cほかを打ち上げた。Negai☆”は午前7時11分01秒にロケットから分離された。Negai☆”はコールドロンチ（ロケット搭載中には電源をOFFにしておく）であり、分離信号を出してタイマーで300秒後にヒータを点火し、アンテナの先端を縛ったダイニーマを切断する予定である。ダイニーマが切断されてアンテナが展開されれば、衛星搭載送信機がONになりCW（モールス符号）が地上に送られてくる。

衛星が約1時間半かけて地球を一周してきたときに最初のCW受信（First AOS (Acquisition Of Signal)という）ができれば、アンテナが無事展開され送信機がONになったことを確認できる。Negai☆”は午前8時35分に石垣局でCWを確認し、その後午前8時39分に八丈局と八王子局でCWの受信を確認した。Negai☆”が宇宙空

間で人工衛星として誕生した瞬間であった。アマチュア無線家も1局がこの時間にCWを受信している。

定常運用に入るとNORAD（北アメリカ航空宇宙防衛司令部）の提供するTLE（2行要素）を衛星軌道解析ソフトに入力することによって衛星のケプラー方程式を計算する。つまり地上局からみてどの時刻にどの仰角、方位角から出てくるかがわかる。その時刻にその方角に指向性アンテナを向けて追尾することで衛星からの電波を捕捉できる。しかし打ち上げ直後はこのTLE情報は得られない。打ち上げ直後の軌道計算は、ロケットメーカが提供する打ち上げ投入情報を自分たちで解釈してPCに入力せねばならない。このような意味で最初の信号受信（First AOS）を得るのはかなり困難である。

その後連続してCW信号が受信できたことで、衛星内の2次電池と太陽電池の電圧・電流・温度データからすべてが正常に働いていることを確認した。またこのことはFPGAを使用する高機能情報処理装置が正常に働いている証左であると考えられた。

5月24日に、地上各局からuplinkコマンド（命令信号）を発信した。しかし衛星はこの信号を受信しなかった。衛星は修理できないので、創大局（八王子）に専門家たちを招いて地上局を徹底的に調べたが送信機の電気特性に問題は見当たらなかった。石垣局のアンテナ周りを調べ調整したところ、6月5日23:52のパスからuplinkコマンドが通った。この結果として衛星からFMHKデータ（FM:周波数変調波、HKデータ:システム管理データ）が送られてくるようになり多くの衛星内情報がわかるようになった。その後の調査では、uplinkコマンドを成功させるのにはコツがあるとわかった。

uplinkコマンドが通るのは石垣局からのみであった。Downlinkを良く受信できるのは八丈局である。この実例を示す。6月10日21時台のパスでFM・HKデータを受信した各局データが解析可能であったかを分類すると下記のようになる。

石垣局: 受信データ数約300回、解析できたデータ63回
八丈局: 受信データ数124回、解析できたデータ96回
創大局（八王子）: 受信データ数34回、解析できたデータ1回

石垣局からのみ送信可能なのは衛星からの距離が近いためと思われる。八丈局での解析データが多いのは、八丈島が海に囲まれていて人工雑音が他に比べて少ないためと思われる。軌道傾斜角30度の衛星に対して石垣局と八丈局の2離島局を設置したことが正しかったことが証明された。

十分なFMHKデータを取得したのち、高機能情報処理装置による写真撮影を開始した。6月15日午後7時のパスで画像をメモリーに収容した。この画像はQVGAである。QVGAは320×240pixelと大きい。QVGAを地上局へ伝送するには約4日間かかるが、衛星はカメラを地球方向へ向ける装置を搭載していないために、この画像に地球が映っているかどうかは不明である。伝送時間の無駄を省くために、衛星に搭載した高機能情報処理装置でこのQVGA画像をQ4VGA画像に圧縮した。Q4VGA(40×30pixel)のデータ量は1200pixelで2400byteである。Downlink伝送では1パケット48byte中40byteは画像データなので、60パケット分取得できれば1枚のQ4VGA写真である。この60パケットをdownlinkで地上へ伝送したところ

石垣島: 8 パケット取得
八丈島: 36 パケット取得
創大局: 0 パケット取得

できた。Q4VGAは容量が少ないため1パスで受信可能であった。これらのパケットを用いて写真を合成する。これに地球が映っていれば「4分割の画像判定機能」を用いて判定して、いよいよuplink コマンドを通してQVGA（320×240pixel)の画像を下ろそうと考えていた。しかしこのQ4VGAの画像には明らかに地球は映っていなかった。

6月16日、17日には、石垣局から今までよくuplinkが通っている仰角40～70度のパスが現れないので、次のuplinkコマンドは18日以降になると見込まれた。しかし17日に石垣局の送信機が故障した。無線機を八王子から送るように手配したが到着したのは21日であった。

一方衛星は18日に降下を始め、19日には急降下した。衛星は、軌道解析ソフトが予測するより早く現れるようになり、最後には約30分も前に衛星が現れることが観測された。NORADによるTLEを使用した軌道解析では追いつかなかった。衛星のLast voiceは 石垣局で観測され6月19日16時24分（CW解析できたもの）の信号であった。

米政府機関Space Track によれば、Negai☆”は6月26日に大気圏再突入を果たし「流れ星」になり、子どもたちの夢を宇宙に届けた。

9. むすび

Negai☆”搭載機器は何らの問題なく寿命をまっとうし、技術ミッションとメインミッションを果たしミッションは成功した。

10. 謝辞

ご協力を頂いた多くの方に感謝したします。工学院大学の「夢づくり工房」の住野先生にご指導を頂きました。アマチュア無線協会とアマチュア無線家のみなさまには、アマチュア無線周波数帯を使用させて頂くと同時に受信協力していただきました。JAXAには衛星打ち上げとロケット搭載のための安全審査その他でご指導いただきました。その他多くの方のご指導を得ましたことをここに記して感謝いたします。■

文献

(1) 黒木聖司・長尾剛司:「超小型衛星の時代」, 情報処理, Vol.46, No.7, pp.792-798 (2005)