

田中 俊輔
S. Tanaka

北原 弘志
H. Kitahara

稲田 陽一
Y. Inada

田中 康雄
Y. Tanaka

大型で高性能の実用衛星は、高度情報社会のニーズにこたえ、きたるべきニューメディア時代を切り開く大きな柱の一つである。技術試験衛星 VI 型 (ETS-VI) は、今後 21 世紀にかけて必要となる 2 t 級実用衛星の技術基盤を確立するため開発した衛星で、その規模、機能・性能は世界の大型衛星に十分比肩する。

プロトフライトモデル (PFM) は、約 3.5 年にわたる開発を終えて 1994 年 8 月 28 日に種子島宇宙センターから H-II ロケットで打ち上げられた。

ここでは、ETS-VI の PFM で採用した大型衛星としての開発の留意点と運用の概要を紹介する。特に、ETS-VI がアポジエンジンの動作不良のため、軌道傾斜角約 13 度の楕(だ)円軌道に投入された後の搭載実験機器の実験成功には軌道上再プログラミング機能が大きな役割を果たした。

Large-scale, high-performance operational satellites will be an indispensable element for the introduction and support of new media in the forthcoming information age. The Engineering Test Satellite-VI (ETS-VI) is targeted primarily at the establishment of fundamental technologies required for such operational satellites in the 21st century. The protoflight model was launched at the Tanegashima Space Center on August 28, 1994 on the H-II rocket, after about three-and-a-half years of system development.

This paper outlines the key issues of large-scale satellite development in relation to ETS-VI and its on-orbit operation. In particular, the important role of the on-orbit reprogramming capability of ETS-VI is described, as demonstrated at the successful operation of the experimental equipment after the satellite was unexpectedly placed in an elliptical orbit with an inclination of about 13 degrees.

1 まえがき

大型衛星バス技術確立を目的として開発された ETS-VI は、質量が打上げ時約 3.8 t / 静止軌道上約 2 t という世界最大級の衛星であり、高さ約 10 m、太陽電池パドル展開時幅は約 30 m のサイズをもつ。

1991 年 9 月のシステム詳細設計審査の後、約半年で PFM 組立 (インテグレーションという) を開始、1992 年 3 月～1994 年 3 月に筑波宇宙センターにおいてプロトフライト試験を実施した。環境試験においては、音響、正弦波振動試験の実施、宇宙環境と同等の環境にさらすために大型真空チェンバに入れて約 40 日間の長期熱真空試験を実施し、打上げ可能であることを検証した。その試験方法は、従来技術の最大限の活用とともに新たな要素技術の応用を組み合わせることで開発成果を上げることができた。1994 年 3 月末から種子島宇宙センターにおいて約 5 か月の射場作業の後 H-II ロケット 2 号機により打ち上げられた。

以下に、ETS-VI の PFM の開発の留意点と運用の概要について述べる (図 1)。

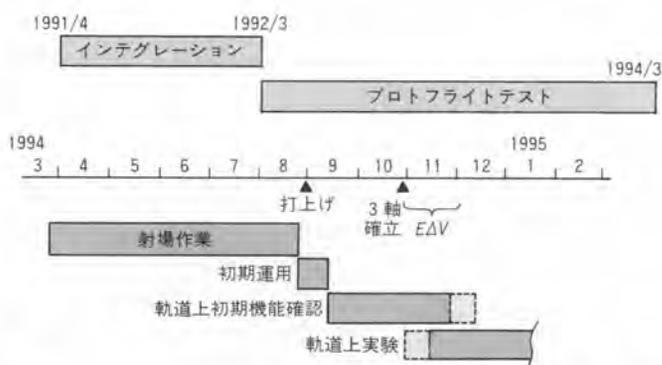


図 1. ETS-VI プロトフライトモデルの開発/運用スケジュール 開発/運用はインテグレーション、プロトフライトテスト、射場作業、初期運用、初期機能確認、軌道上実験に大別される。

System schedule of ETS-VI protoflight model development and orbital operation

2 ETS-VI にみる大型衛星開発の留意点

ETS-VI 衛星 PFM は組立ての後、質量特性を取得、環境試験として音響試験、正弦波振動試験、衝撃試験、熱真空試

験(熱平衡試験を含む)を実施し、その間で機能確認試験として電気性能試験、リーク試験、アライメント試験を行った。大型衛星であるため、取扱いには油圧駆動アクセススタンド(14 m高さ)、耐4 t級の衛星支持台車などを使用した。大型衛星であることでの開発留意事項は以下のとおりである。

- (1) アクセシビリティの確保 大型の機器を搭載した状態でのアクセス空間の確保は、機器の取付け/取外し、試験ケーブルの接続時に必要になる。設計の初期段階からこれを考えた設計を行った。
- (2) 試験時の作業性確保 衛星構造は、運搬およびインテグレーションが容易で、かつ作業工程短縮化のためにモジュール化を図った。
- (3) 耐機械環境設計 搭載機器の機械環境(正弦波振動/音響)を適切に保つために振動応答倍率を可能な限り小さくし、局所的に振動応答倍率の大きい箇所は補強材や振動減衰材を使用する衛星構造設計とした。また、搭載される大型柔構造物(アンテナ主鏡など)の正弦波振動設計条件にロケットとの柔結合解析結果を適用し、過剰な条件を避け現実に即したレベルに対する設計がなされるように配慮した。衝撃に関しては、火工品(pyrotechnique)を衝撃緩和材を挟んで取り付ける対策を施し、搭載機器に対しての条件が適切となるようにした。
- (4) 耐熱環境設計 高発熱機器が多く搭載され、放熱面積を広くとることと搭載性を高めることの双方を満足させるために、ヒートパイプをパネルに埋め込んでパネル全体を等温化するようにした。
- (5) 軽量化/剛性設計 衛星本体は軽量構造であることおよびロケットからの剛性要求を満足させる必要がある。そのため各コンポーネントに対しては適切な剛性要求を行い、衛星構体自身は高剛性炭素繊維強化プラスチックを使用した。
- (6) 大型試験用ジグ・工具の開発 衛星の大型化に伴い大型パドル展開用ジグ、アンテナ展開用ジグ、14 mアクセススタンドなど大型の試験用ジグ・工具の開発が必須(す)である。特に熱真空試験用の衛星温度環境制御装置は、衛星の試験モードである至点/分点での軌道上衛星の日照方向に対応して変更できる構造とした。
- (7) 振動試験ノッチング 衛星を振動試験機にのせて加振するとき、振動台に衛星が剛固定されるため必要以上の負荷が衛星にかかる。そのため、ロケット/衛星との柔結合解析結果に基づき、低レベル加振のデータ解析から加振を抑えるレベルを決めて(ノッチングという)適切に試験を行えるようにした。
- (8) 試験項目のマトリックス管理 ETS-VIではミッション系で10サブシステム、バス系で9サブシステムあり、電気性能試験項目の数が多大なものとなった。これに冗長系組合せ、機能単位(例えばユニット基板)の組合せを

考えての試験実施に抜けがないようにする管理手法が求められた。環境試験後の各電気性能試験の試験項目との組合せをマトリックスで記述して試験仕様書にとり入れ、試験手順書を作成するガイドとした。

以上がETS-VIで採用した大型衛星開発の留意点である。もちろんこのなかには中型・小型衛星でも適用できるものもある。大型衛星にはこのような開発の留意点のコンビネーション適用が開発をうまく進めるうえで大きな役割を果たしてきたといえる。PFMは組立から打上げまで約3年半の開発期間を要したが、期間短縮は大型衛星開発の重要な課題として今後解決していかなければならない。

3 ETS-VI 軌道上運用

この章では打上げ後の軌道上の運用と軌道上実験の概要を報告する。特に、衛星間通信実験のうちでKSA(Kバンド衛星間通信実験機器)のなかに搭載されている東芝が設計・製造したアンテナ指向制御系(APS)の実運用成果についてフライトデータを紹介する。

3.1 軌道上運用概要

ETS-VIは1994年8月28日16時50分種子島宇宙センターから打ち上げられ、約28分後に計画どおり第2段ロケットから分離され“きく6号”と命名された。分離後、自動シーケンスにより、初期太陽捕捉、南北おのおの4枚のパドル面のうち1枚だけを90度開いて太陽光を受け発電する太陽電池パドルの部分展開、ロール軸(図2中のX軸)まわりに0.2(deg/s)の回転をしながら太陽方向に姿勢を保つクルージング状態にはいつていることを17時50分に確認できた。その後、アポジエンジンの動作不良のため遠地点高度約39,000

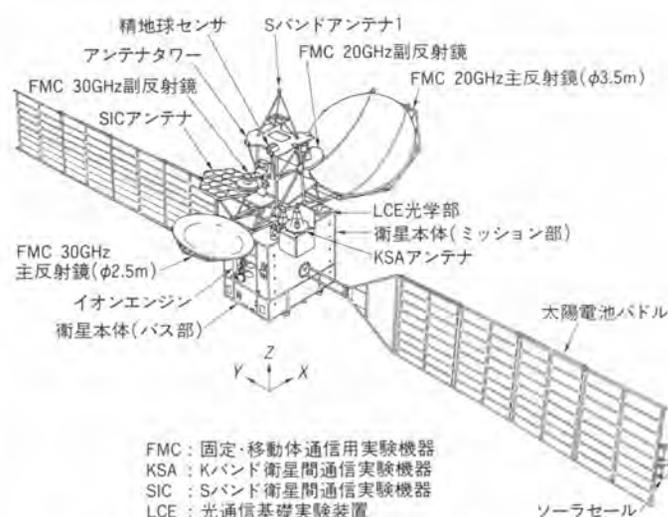


図2. ETS-VIの静止軌道上外観 衛星本体下部に取り付けられたアポジエンジンを分離し、太陽電池パドル、アンテナ類を展開したようすを示す。

Configuration of ETS-VI in geostationary orbit

km, 近地点高度約 7,800 km, 軌道傾斜角約 13 度, 周期約 14 時間の楕円軌道に投入されたため, 以下の新たな制御プログラム開発の必要性が生じた。

- (1) 地球センサのとらえる地球像が大きいため, センサデータが飽和する近地点近傍でも姿勢制御を行える地球指向 3 軸姿勢制御。
- (2) 地球指向を保ちながらの電力確保ができるような楕円軌道の角速度に合わせた太陽電池パドルの回転制御。
さらに二次的なものとして次のことを行わなければならなかった。
- (3) 軌道上の実験のしやすさを確保するための準回帰軌道への軌道変更。
- (4) 通信実験のリンク可能な時間を確保するため楕円軌道上での衛星姿勢を自動調整して地上通信実験局に指向させる機能の追加。

(1), (2), (4)の要求については, 姿勢制御系の軌道上再プログラミング機能を用いて静止軌道対応の姿勢制御機能にリンクさせて新たなプログラムを追加することで対処した。楕円軌道上での実験の成功はこの再プログラミング機能の成果といってもよい。実施例として図 3 に楕円軌道上の角速度に応じたパドル回転角制御が行われている状態を示す。(3)の軌道変更については, 太陽指向クルージングから 3 軸地球指向制御に移行したあと約 1 か月かけて 21 回に及ぶ軌道修正を実施してペリジ高度を約 700 km 引き上げ, 3 日ごと 5 周回で同一地点の上空を通過する準回帰軌道への移行を完了した。

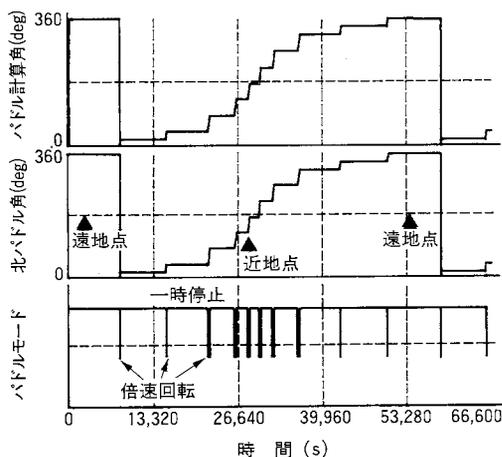


図 3. 楕円軌道対応の太陽電池パドル回転 軌道上再プログラミングにより楕円軌道の角速度に合わせてパドル角が制御されていることがわかる。

Adjustment of solar array paddle control to angular rate of unexpected elliptical orbit

3.2 軌道上初期チェックアウトおよび軌道上実験概要

初期チェックアウトを含む軌道上実験については, 図 4 に示すように, 3 軸地球指向制御の確立前にできるものについて

1994/9	技術データ取得装置 電源系サブシステム/計装系サブシステム ニッケル水素バッテリー実験装置 姿勢制御系サブシステム 熱制御系サブシステム テレメトリ/コマンド系サブシステム 打上げ環境測定装置 姿勢制御系実験装置/ソーラセール イオンエンジン
1994/10	固定・移動体通信用実験機器 Sバンド衛星間通信実験機器 光通信基礎実験装置 フィーダリンク装置 Kバンド衛星間通信実験機器/フィーダリンク装置 ガスジェット装置(3軸確立後) 電熱式ヒドラジンスラスタ
1994/11	イオンエンジン長時間噴射実験 光通信基礎実験装置 通信系リンク確認(SIC/KSA/FLCE/FMC)
1994/12	通信系リンク確認(SIC/KSA/FLCE/FMC) 電熱式ヒドラジンスラスタ 姿勢制御系実験装置/柔構造実験

図 4. 軌道上初期機能確認/軌道上実験項目 ここに見られるとおり, 機能確認・軌道上実験の予定されているものはほぼ終了した。

Initial checks and experiments accomplished in orbit

は 1994 年 9 月から順次開始し, 所期の成果を得た。3 軸確立後の 1994 年 10 月末からは, 主にイオンエンジン (IES) 長時間噴射実験, 光通信基礎実験装置 (LCE), 衛星間通信実験 (S バンド衛星間通信実験機器 (SIC), フィーダリンク装置 (FLCE), K バンド衛星間通信実験機器 (KSA)) / 固定・移動体通信用実験機器 (FMC), 電熱式ヒドラジンスラスタ (EHT) 噴射実験, 柔構造実験 (FLEX) など予定の実験項目を実施中である。

運用において重要となる事項は, ①衛星のヘルスチェックの自律化, ②異常部分の切離しの自律化, ③異常状態からの復帰の自律化, に集約できる。

この自律化 FDIR (Failure Detect, Isolation, and Reconfiguration) 機能により運用のルーチンワークの負担が軽くなり, ETS-VI は実験のためのコマンド運用 / 食ヒータ運用 / 軌道制御を除きほとんどのハウスキーピングが不要の運用実績をつくった。

ETS-VI の実運用の成果として, この自律化 FDIR 機能と先に述べた軌道上再プログラミング機能による制御パラメータ変更や新たな機能追加に対する柔軟性は, 今後の衛星の必須機能になると考えられる。

3.3 KSA アンテナ指向制御系軌道上実験概要

将来の衛星の衛星間通信技術として, アンテナを通信したい地上局やほかの衛星に向けて動かす技術は欠かすことのできないものである。東芝が開発・製造した KSA アンテナ指向制御系の軌道上実験は次の成果をあげた。

- (1) アンテナスルー 高度 800 km のユーザ局を捕捉・追尾するためには約 ±9.8 度のアンテナ駆動が必要となる。
これをコマンドでおおまかに指定した方向に動かす機能

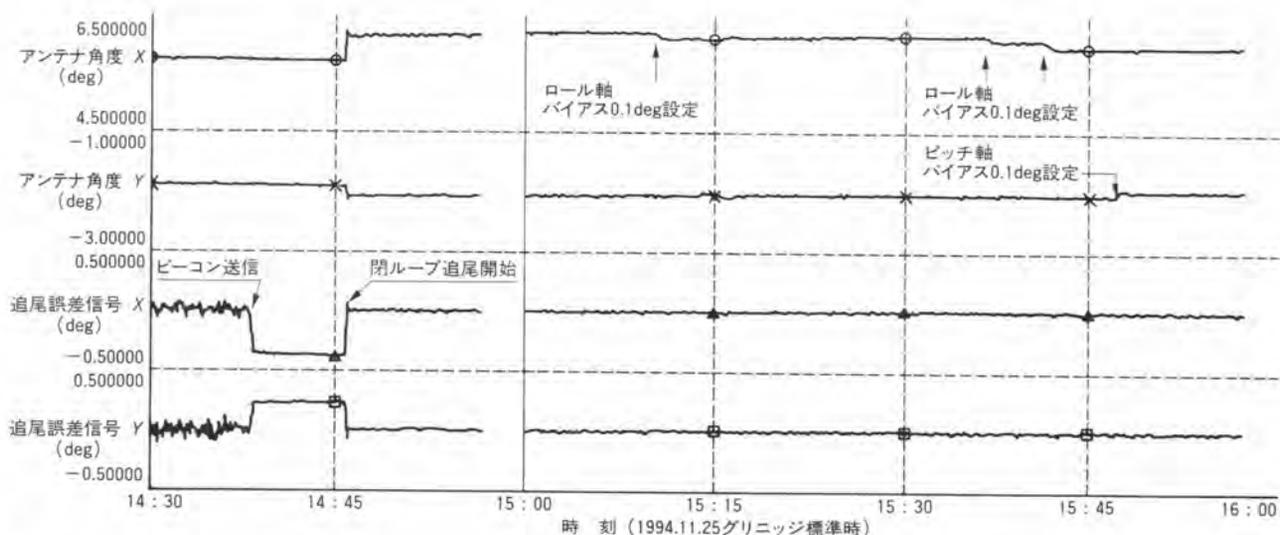


図5. KSA APS 追尾フライトデータ ビーコン照射による追尾誤差データ検出後、コマンドにより追尾を開始し、誤差0.005度以内を保持している。

KSA APS flight data demonstrating excellent beacon-tracking characteristics

の試験に成功した。

(2) アンテナ閉ループ追尾 ユーザが発する無線周波ビーコン波から検出した追尾誤差信号を使い、アンテナの指向方向をフィードバック制御する機能である。

この制御モードにより通信時に連続してユーザ局を追尾し、データ通信が途切れないうにできる。軌道上実験は、先のアンテナスルーの後、地上の模擬衛星局からビーコンを上げて閉ループ追尾を実施させた。フライトデータを図5に示す。この実験において、閉ループ追尾についての次の機能・性能を達成した。

- (a) 14:38 模擬地上局からのビーコン照射と同時に追尾誤差信号を検出した。
- (b) 14:46 地上からの指令で安定した閉ループ追尾を開始した。
- (c) 追尾誤差は、X/Y軸とも最大0.005度であり通信回線からの要求0.2度を十分クリアした。
- (d) 衛星姿勢を0.1度ごとのステップ状に変化させた場合も、姿勢変動の影響をAPSにより補償し上述の精度で安定して閉ループ追尾した。とくに衛星姿勢の変動より追尾制御が速いため、追尾誤差信号にはほとんど誤差変化がないほど十分な追尾が行われていることが注目すべき成果である。

(X軸衛星姿勢変更時刻=15:10, 15:36, 15:47
Y軸衛星姿勢変更時刻=15:47)

上述のように、フライトデータが示すとおり ETS-VI搭載APSは衛星間通信に要求される基本的な追尾系としての機能・性能を満たしており、将来のデータ中継衛星の基礎部分を確立した。今後は、地上指令によらず搭載機器により軌道計算を行って自動ユーザ捕捉からその後の自動追尾機能までを連続して実施する試験を行う予定である。

4 あとがき

世界でも最大級の静止衛星として開発された ETS-VIの開発と衛星の運用状況について述べた。

ここで取り上げた大型衛星開発の留意事項、および自律化 FDIR 方式や機能付加に対する柔軟性(軌道上再プログラミング機能)、アンテナ追尾系は今後の衛星機能の基本となることを示し、他の軌道上実験とともに大きな開発成果を上げた。

謝辞

ETS-VI軌道上実験は今後も多くの成果が期待されている。開発、および実運用/実験成功にご尽力いただいた各方面、機関の方々にここで深く感謝の意を表する。



田中 俊輔 Shunsuke Tanaka

1972年宇宙開発事業団入社。ロケット、人工衛星の開発に従事。現在、技術試験衛星グループ主任開発部員。
National Space Development Agency of Japan



北原 弘志 Hiroshi Kitahara

1971年宇宙開発事業団入社。ロケット、人工衛星の開発に従事。現在、技術試験衛星グループ主任開発部員。
National Space Development Agency of Japan



稲田 陽一 Youichi Inada

1963年入社。ETS-IIIのシステムおよびETS-VIのプログラム取りまとめに従事。現在、小向工場宇宙プログラム担当部長。
Komukai Works



田中 康雄 Yasuo Tanaka

1973年入社。ETS-VIの機器開発、システム試験取りまとめに従事。現在、小向工場宇宙プログラム担当主査。
Komukai Works