

3 衛星システムの開発

3 Development of Satellite System

3-1 衛星全体構成

3-1 Overview of ETS-Ⅷ Satellite

米澤克雄* 本間正修* (*独立行政法人 宇宙航空研究開発機構)
YONEZAWA Katsuo and HOMMA Masanori

要旨

技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)の開発は、21世紀初頭にかなめとなる衛星通信の構築に不可欠な世界最大級の大型静止衛星バスについて技術開発を達成するとともに、大型展開アンテナを搭載し、通信、測位ミッション等の実証及び実験を実施する目的を持つ。ETS-Ⅷ衛星バスの主要な特徴は、軽量化された構体、大電力の100V電源、汎用的なデータバス及びパケット伝送、放熱に優れた南北連結ヒートパイプ、大型柔構造物を有する衛星の安定化姿勢制御、再プログラミング機能を持つ64ビットMPU搭載の衛星制御器等の開発成果をベースとしている。

Engineering Test Satellite Ⅷ (ETS-Ⅷ) has purposes of establishing 3-ton-class geostationary satellite bus technology in the world class, equipped with large deployable reflectors, answering to the emerging demands in mobile communications and global positioning necessary for the early 21-st century, and conducting the relevant experiments on orbit. ETS-Ⅷ satellite bus incorporates NASDA-developed technologies such as reduced-weight modular body structures, 7.5kw-class high power supply in 100 volts, multipurpose 1553B data bus and CCSDS-based packet transmission, attitude stabilization for the satellite with large flexible structures, unified satellite controller of 64-bit MPU with reprogramming capability.

【キーワード】

技術試験衛星Ⅷ型, 3トン級大型静止衛星バス, 大型展開アンテナ
ETS-Ⅷ, 3-ton-class geostationary satellite bus, Large deployable reflector

1 はじめに

技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)[1]は、技術試験衛星Ⅵ型(ETS-Ⅵ)、通信放送技術衛星(COMETS)、データ中継技術衛星(DRTS)等の開発で蓄積してきた衛星システム技術を継承するとともに、下記の技術開発及び実験・実証を行い、今後の宇宙活動に必要となる先端的な共通基盤技術及び衛星通信システム技術の構築を通じて、社会への貢献を図ることを目的としている。ETS-Ⅷの軌道上概観図を図1に、主要諸元を表1に示す。

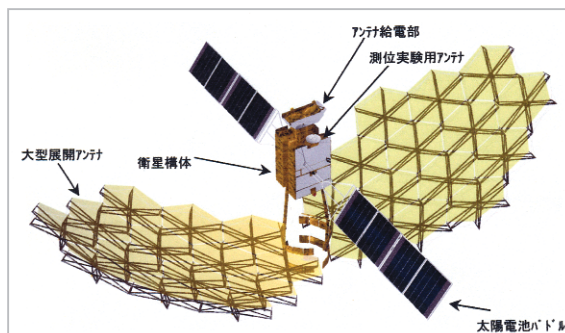


図1 技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)軌道上概念図

表1 技術試験衛星Ⅷ型(ETS-Ⅷ)主要諸元

項目	諸元
打上げ	平成16年度 ロケット: H-IIA204 射場: 種子島宇宙センター
設計寿命	10年(衛星バス) 3年(ミッション機器)
軌道	静止軌道(東経146度)
質量	約3,000kg(軌道上初期) 約1,200kg(ミッション機器)
発生電力	7,500W以上(3年後夏至)
姿勢安定方式	3軸姿勢制御方式
姿勢精度	±0.05°(ロール/ピッチ) ±0.15°(ヨー)
アンテナ ポインティング	総合精度 1度以内

- 21世紀初頭の宇宙活動に必要とされる多様なミッションに対応可能な世界最高水準の3トン級静止衛星バス技術
- 世界最大・最先端の大型展開アンテナ(LDR)技術(外径最大19m×17m)
- 携帯型端末による音声・データ通信が可能な静止衛星を用いた移動体通信システム技術
- コンパクトディスク(CD)並の高品質な音声や画像の伝送を可能とする移動体衛星デジタルマルチメディア放送システム技術
- 高精度時刻基準装置を用いた測位等に係る基盤技術

宇宙開発事業団(NASDA:平成15年10月1日に宇宙科学研究所(ISAS)及び航空宇宙技術研究所(NAL)と統合し、宇宙航空研究開発機構(JAXA)となる。)は、通信総合研究所(CRL)、日本電信電話株式会社(NTT)、次世代衛星通信・放送システム研究所(ASC)と共にETS-Ⅷの開発を進めており、静止衛星バス(NASDA)には、ペイロードとして大型展開アンテナ(NASDA)をはじめ、400W級高出力フェーズドアレー給電部(ASC、CRL、NTT)、中継器部(ASC)、移動体通信用搭載交換機部(ASC、CRL)、高精度時刻基準装置(NASDA、CRL)、フィーダリンク装置(NASDA)などを搭載する。ETS-Ⅷのシステム構成について図2に示す。ETS-Ⅷフライトモ

デルの組立て作業風景(2003年8月)を図3に示す。

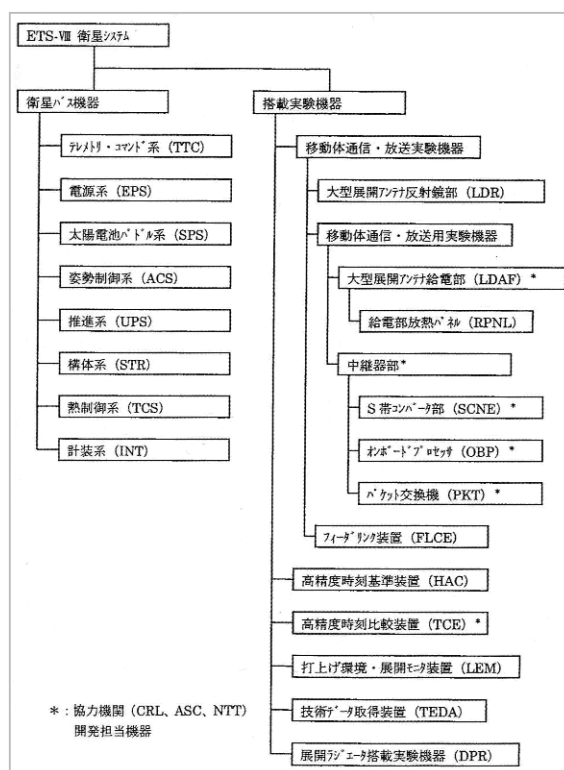


図2 ETS-Ⅷのシステム構成

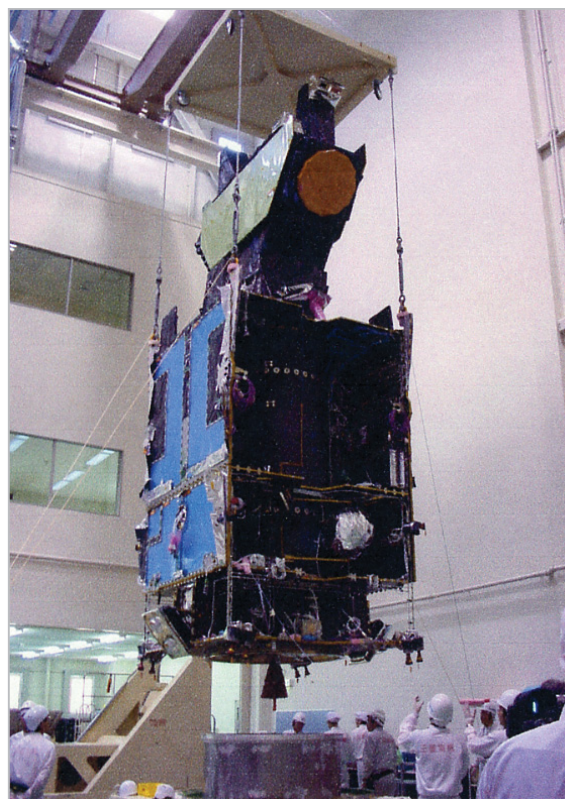


図3 ETS-Ⅷフライトモデルの組立て作業(2003年8月)

ETS-Ⅷのシステム全体設計においては、各機器について冗長構成をとるが、機能上では冗長構成を持ってない機器(シングルポイントと言われ、アンテナ、アポジエンジン、電源バスライン等が該当)については、万一故障が発生してもシステムの機能が失われることのないように代替機能を付加している。

なお、ETS-Ⅷのフライトモデルは、製作及び組立てを終えて本年夏より総合システム試験を実施中であり、来年春に開発の完了を迎える。ETS-Ⅷの開発スケジュールを図4に示す。ETS-Ⅷは、H-IIA204 ロケットにより種子島宇宙

センターから2004年末に打上げる運びにある。ETS-Ⅷのシステム運用シーケンスを図5に示す。

2 ETS-Ⅷバスシステム

ETS-Ⅷのミッション達成に必要なペイロード質量は約1.2トン、バスを含めた消費電力は約7kWとなる。これまでETS-VI、COMETSで開発した2トン級静止衛星のペイロード質量は約600kg、発生電力は約4～5kWであり、その能力を上回る要求であるため、ETS-Ⅷにおいて新たに3トン級静止衛星バスを開発する運びとなっ

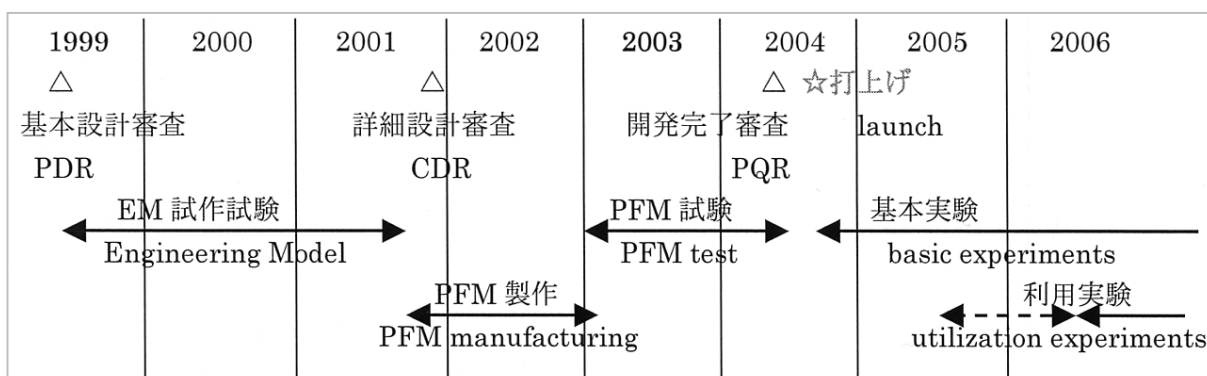


図4 ETS-Ⅷの開発スケジュール

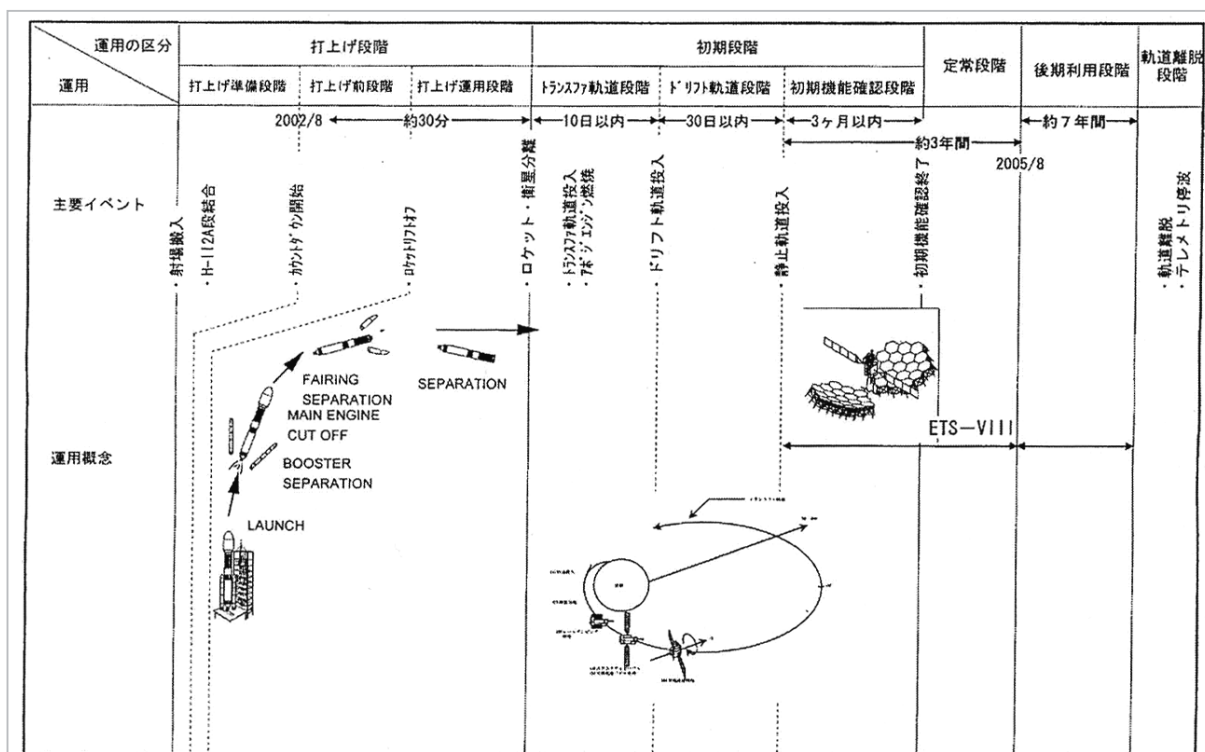


図5 ETS-Ⅷのシステム運用シーケンス

た。また、海外においても同様に通信・放送ミッションの大容量、高機能化の要求が高まり、静止衛星バス技術に大型化、大電力化、長寿命化、ペイロード比率増等が求められており、3トン級静止衛星バスの開発が進められている。ETS-Ⅷでは、このような動向も踏まえ3トン級静止衛星バス技術の開発に対して、質量、電力

等に対する柔軟性、拡張性も考慮した設計を実施している。ETS-Ⅷ機能系統図(バス機器)を図6に示す。ETS-Ⅷ機能系統図(搭載実験機器)を図7に示す。ETS-Ⅷでの3トン級大型衛星バスとして開発した主要技術を以下に示す。

●3トン級バスに対応、ペイロード搭載能力の向上〔衛星バス技術の指標となるペイロード重

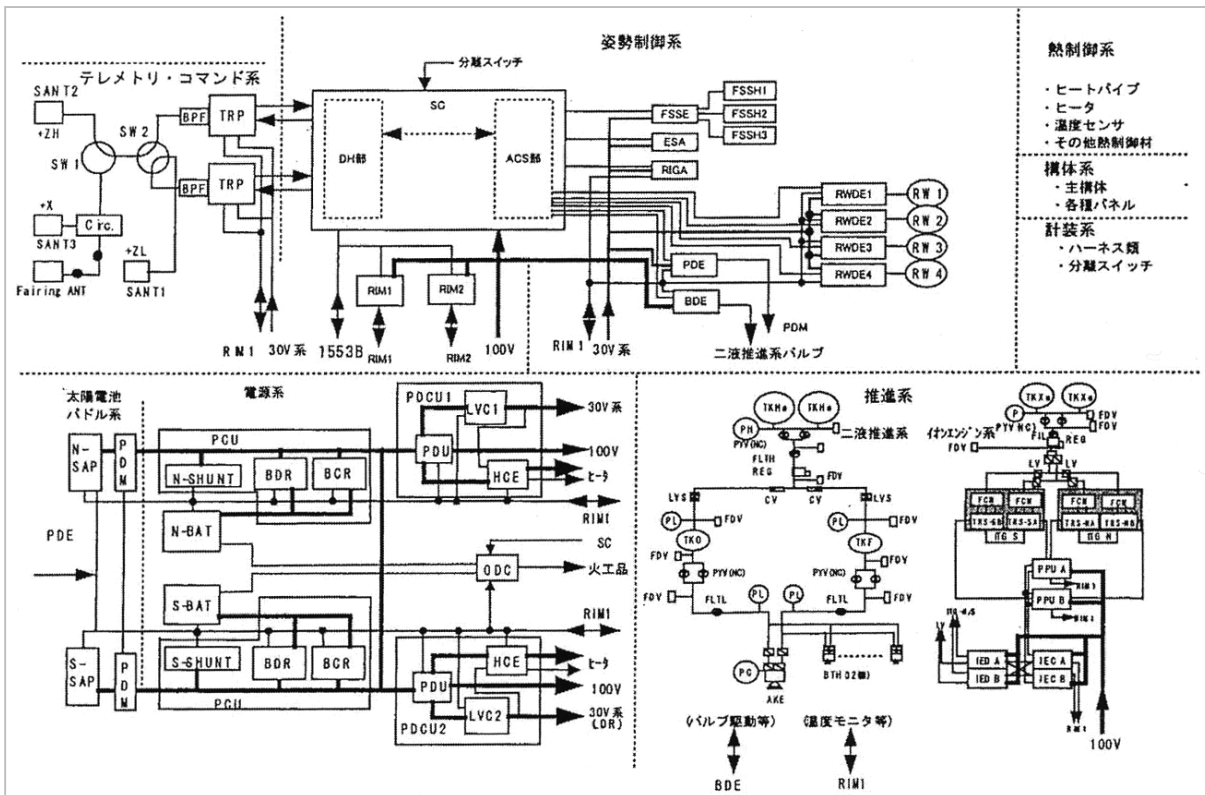


図6 ETS-Ⅷ機能系統図(バス機器)

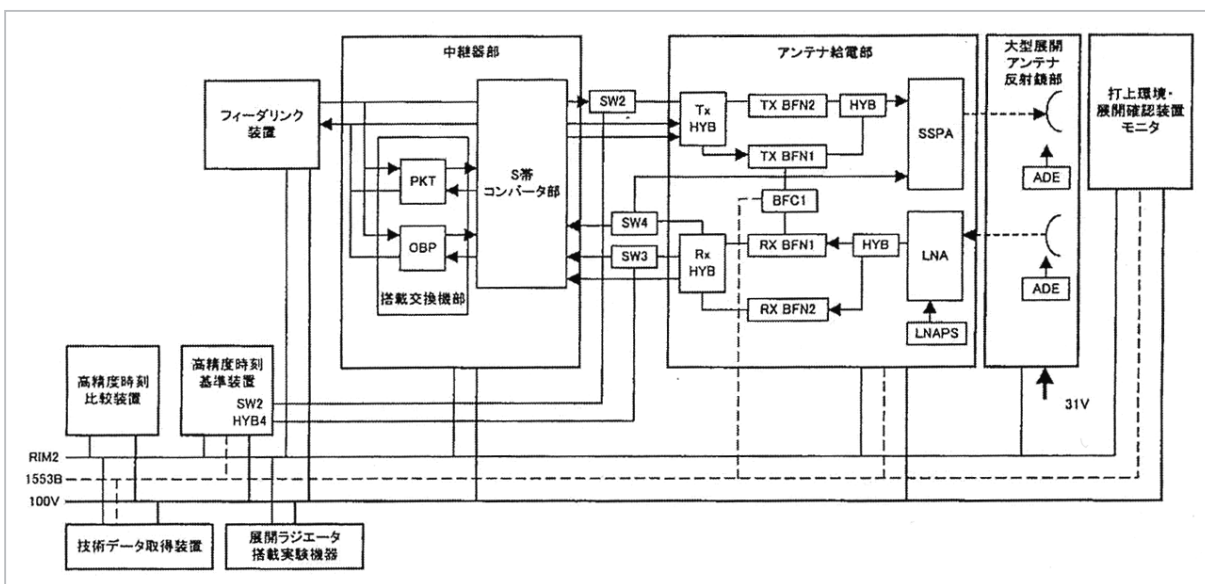


図7 ETS-Ⅷ機能系統図(搭載実験機器)

量比40%の達成（従来30%）]

- 開発スケジュールの短縮化を可能とする大型軽量構体技術 [モジュール化により組立て作業の並行化の実現]
- 大電力化への対応及びそれに伴う高排熱技術 [南北連結ヒートパイプによる実効的な放熱面の拡大]
- システム汎用性・拡張性・運用性の向上 [1553B データバスによる汎用化、CCSDS 準拠パケット伝送による国際的相互運用性の確保]、運用自動化、コンポーネント数の削減を可能とするデータハンドリング技術
- 大型柔軟構造物 (大型展開アンテナ2面、大型太陽電池パドル2翼) を有する衛星の高安定、高精度な姿勢制御技術
- 姿勢制御、データ処理、衛星管理の各機能を衛星制御器 (64ビット MPU 搭載) に統合化
- 故障に強いフォールトトレラント機能と、搭載ソフトウェアを地上から書き直せる再プログラミング機能の付加

これらの主要技術開発項目を中心に ETS-VIII 衛星バスの各サブシステムの設計内容について以下に説明する。

2.1 テレメトリ・コマンド系

ETS-VIII のテレメトリ・コマンドのデータ伝送方式 (多重化方式) は、USB (United S-Band) 帯域を用いた、CCSDS (Consultative Committee for Space Data System : 宇宙データシステム諮問委員会) 勧告準拠のパケット伝送方式を採用している。その特徴は、下記のとおりである。

- NASA、ESA でも採用され、将来的な国際規格としての相互運用性
- 出力フォーマットや出力頻度を柔軟に変更可能
- 高度なエラー訂正機能を有し、画像やソフトウェア等の多量のデータ伝送に有利
- 衛星搭載各サブシステムとのインタフェース調整の簡略化が可能

CCSDS パケット方式は、ETS-VII の成果を継承するとともに、ETS-VIII では更に小型・高機能化を図り、搭載用 CCSDS 処理装置を LSI 化している。データバス方式としては、リモートインタフェースユニット (RIU) を介してデータバスに接続する従来方式に加えて、国際的にみて標準

インタフェース (汎用) であり拡張性もある MIL-STD-1553B データバスを採用している。1553B 採用により、搭載機器がデータバスに直接接続となり、可変長パケットでのテレメトリ・コマンドのインタフェースをとることが可能となり、搭載機器のデータ伝送についての自由度が増している。

2.2 電源系

ETS-VIII の電源系では、100V 安定化電源バスを採用している。ETS-VI 以降の NASDA 衛星では 50V 非安定化バスを使用してきたが、ETS-VIII の電力規模 (6kW 以上)、さらには将来の衛星に必要とされる大電力化 (10 ~ 15kW) に対応可能な方式という観点から 100V 安定化電源バスを選定している。100V 安定化電源バスの利点としては、第一に電力伝送ロスの低減によるシステム全体の電力効率が上げられる。ETS-VIII の規模における 100V 安定化電源バスと 50V 非安定化バスのシステム要求電力の差は約 400W ~ 500W になる。その他にも 100V 安定化電源バスのメリットとして次が挙げられる。

- ハーネス本数の半減によるシステム質量軽減、信頼性向上
- 太陽電池パネル面積 (0.7 枚相当) 及びパドル質量の軽減
- 太陽電池パネル面積軽減による姿勢外乱の軽減、すなわち搭載推薬量の軽減
- バッテリ段数選択の自由度が大きく、将来の大電力拡張性の確保

一方、100V 化に伴い設計上特に考慮すべき点として、放電対策、部品選定が上げられるが、十分な設計余裕の確保及び要素試験の実施により検証を行っている。バッテリーについては、DRTS 搭載の 50AH 級ニッケル水素 (NiH₂) バッテリーを発展させた 100AH 級 NiH₂ バッテリーを採用している。

2.3 太陽電池パドル系

太陽電池パドルは一翼当たり 13.5 m × 2.5 m (パネル 4 枚) で南北 2 翼からなり太陽を追尾して回転し、7500 w (3 年後夏至) の電力を発生する。太陽電池パドルの方式は、将来の大電力化に際してパドルの拡大に伴う質量増の影響が少なく、

コスト的にも有利な軽量リジッド方式を採用している。この方式は、高弾性の炭素繊維強化プラスチック(CFRP)表皮のアルミハニカム・リジッド・パネルをサブストレートに用いたものであり、薄型で高剛性のため、ハニカムコアのセルサイズに比較的粗いものが使用でき、軽量化を可能にしている。太陽電池セルは、太陽電池パドルの軽量化・小型化・低価格を考慮して高効率Si太陽電池セル(Si-NRS/BSF)を使用している。電圧の100V化に伴い絶縁破壊の対策として、太陽電池セルの実装設計においても隣接セルアレイの電位差の低減、隣接セルアレイ間空隙の絶縁物による埋設等の配慮を行っている。

2.4 姿勢制御系

ETS-Ⅷの姿勢制御系は、COMETS、DRTSをベースに発展した方式を採用している[2]。姿勢決定の方式は、ジャイロを基準に姿勢を安定化し地球センサでロール角及びピッチ角、精太陽センサでヨー角をアップデートする。ETS-Ⅷの大型展開アンテナにより発生する太陽輻射圧による外乱量は従来衛星の数10倍程度であり、このため、姿勢安定の方式としてゼロモーメントを採用し、大容量の50Nms級リアクションホイール4個(4スキュー配置)により外乱を吸収し蓄積分はスラスト噴射によりアンローディング(除去)する。ただし、搭載ジャイロが故障した場合に備えて、外乱推定等によりバイアスモーメント方式でも制御可能なシステムとしている。地上試験において大型展開アンテナ全系の構造試験は困難であるため、姿勢制御に使用する柔構造パラメータの特定には若干の不確定さが含まれると予想される。そのため、ETS-Ⅷでは、衛星制御器(SC)の高速演算により計算遅れを緩和し、可能な限り制御帯域を広く取り、位相安定化を図り、パラメータの変動に対応しやすい設計としている。また、柔構造物のモード周波数については軌道上で同定(加速度計13個を搭載し必要なデータを取得)し、SCの再プログラム機能を用いて制御系のチューニングを可能としている。

2.5 構体系

ETS-Ⅷ構体系は中央円筒方式を採用し、アンテ

ナ給電部を搭載するアンテナタワー(屋上)、搭載実験機器を搭載するペイロードモジュール(上段)、バス機器を搭載するバスモジュール(中段)、推進系サブシステムを搭載する推進モジュール(下段)で構成される。中央円筒内には、燃料タンク及び酸化剤タンクを上下に配置している。構体系の構成を図8に示す。荷重支持能力はETS-Ⅷの打上げ質量5.8トンをサポートするとともに、6トンの場合でも設計変更なしに支持可能である。また、ペイロード搭載能力は、ETS-Ⅵ、COMETSの2トン級衛星では約30%に対して40%を達成している。構体系質量は、CFRPを使用し部材・部品・結合点数を極力減らす等の軽量化を行い、約340kg以下となっている。ペイロードモジュール、バスモジュールは、南北面を各々一枚のウェブで区画されているだけであるため、東西側のアクセスパネルを外して、内部まで容易にアクセスが可能である。また、衛星構体系は、2軸回転ドーリーに設置した状態で保持可能であるため、衛星構体系を回転させることで内部搭載機器及び外部搭載機器との良好なアクセス性を確保している。また、モジュール単位での組立て、分解及び試験が並列に実施可能であり、作業の高効率化、期間の短縮を図ることができる。

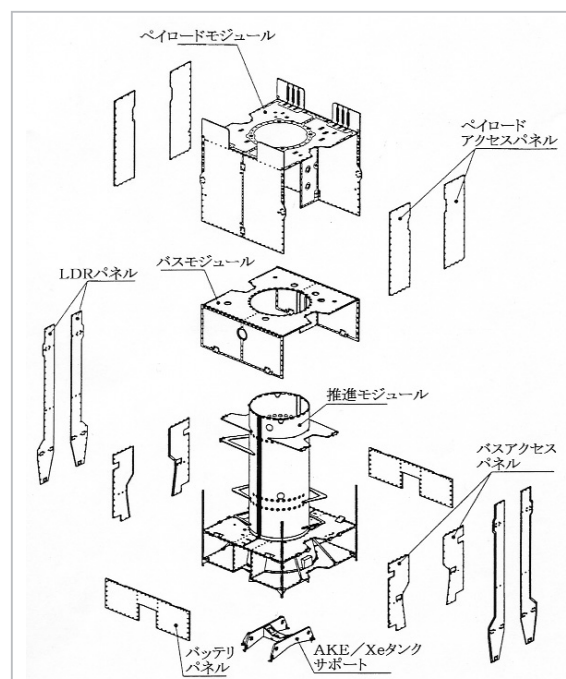


図8 ETS-Ⅷ構体系の構成

2.6 熱制御系

熱制御系は、実績のある能動型／受動型併用熱制御方式を採用し、搭載機器の許容温度に対して15℃以上のマージンを全ミッション期間を通じて確保するように制御する。ETS-Ⅷの熱制御における特徴は、ペイロードモジュールの地球指向面（アースパネル）へのCFRP表皮南北連結ヒートパイプパネルの採用（将来の衛星の大電力化に対応した高排熱能力の実現、発熱機器搭載位置に対する制約の緩和、アースパネルの有効活用）、搭載計算機を用いた熱制御の自動化（衛星構体に取り付けられたセンサから温度を読み取り、ヒータのオン／オフをオンボードで自動的に実行、これにより、地上からの運用負荷の軽減、温度制御の軌道上再設定、運用モードに対応した詳細な温度制御が可能）が挙げられる。南北連結ヒートパイプは地球指向面に埋め込まれており、これによりペイロードの主搭載面である南北面を熱的に結合させることで、太陽光のある面とない面、あるいは発熱機器の大きな面と小さな面との等温化を図ることができ、排熱能力を向上させることができる。さらに、熱伝導特性を改善したCFRP表皮化により、CFRPの持つ高強度・高剛性、熱による低歪みといった利点が生かされ、軌道上においてアルミ表皮に比べアライメントの安定性を実現している。また、ETS-Ⅷでは軌道上実験実証を目的として展開ラジエータを搭載しており、宇宙空間に放熱パドルを展開し動作特性、排熱能力を検証する。

2.7 推進系

ETS-Ⅷの推進系は、静止衛星軌道投入用の500N級二液式アポジエンジン（AKE）、姿勢制御及び東西軌道制御用の20N級二液式スラスタ（BTH）、南北軌道制御用の20mN級キセノン（Xe）イオンエンジン装置で構成されている。静止軌道への投入はアポジエンジンの噴射を4回に分けて行う。姿勢制御及び東西軌道制御用スラスタの個数については簡素化を図り、ETS-VI、COMETSの20本から12本まで削減している。

なお、アポジエンジンと姿勢制御及び東西軌道制御用スラスタは、燃料及び酸化剤タンクの共用化を行っている。東西軌道制御はスラスタを2台同時噴射する。

南北軌道制御は、イオンエンジンを昇交点と降交点で各1本を噴射して行う。イオンエンジンは、ETS-VI、COMETSの成果をベースに、長寿命化、簡素化、運用面の容易化の改良を行っている。搭載位置についても、ETS-VI、COMETSの東西面配置から、反地球指向面の南北端へ変更し、運用も2台同時運用から、ピーク電力低減の1台運用に変更し、推力ベクトル調整のためのジンバル機構を新たに追加した。

2.8 統合化設計

ETS-Ⅷではテレメトリ・コマンド系のデータ処理、姿勢制御系の高速演算処理、更にはヒータ制御やバッテリー管理等の衛星管理という、三つのタスクを衛星制御器（SC）で時分割で実施する統合化方式を採用している。統合化のメリットには搭載コンポーネント数の削減や衛星運用の柔軟化に加えて、FDIR（故障検知、分離、処置）や再プログラム機能の充実がある。SCの計算機部にはNASDAが新たに開発した宇宙用64bit MPUを使用している。

FDIR機能としては、姿勢制御系のセンサやアクチュエータからのデータ等を定周期で診断し、不具合を検知したら、故障部分を判別・分離し、冗長系に切り換える等の処置を系統的にSCの自動処理により行う。故障の自動処理は3段階で行われ、レベル1は、SCが正常で故障部分の分離と冗長系への切り換えで自動再構成でき、姿勢再捕捉の必要のないもの、レベル2は、SCが異常で冗長系への切替えと共に姿勢再捕捉が必要となるもの、レベル3は、SC切替えでは対応できない、もしくは姿勢再捕捉に失敗する不具合であり、緊急に電力確保の太陽捕捉に移行し地上の指令を待つもの、に大別される。FDIR機能で解消できない不具合に対して再プログラミング機能が設けてある。再プログラムは地上で設計／検証した上で、プログラム内容をマグニチュードコマンドで送信しSCのRAM再プログラム領域（128KB程度）に書き込み実行される。

3 搭載実験機器

ETS-Ⅷ機能系統図（搭載実験機器）を図7に示す。

大型展開アンテナ(LDR)は、Sバンド移動体通信・放送実験のアンテナであり、送受別に2面搭載している。1面当たり六角形のモジュール14個で構成され、外形寸法は約19m×17mであり世界最大級となる。LDRは収納状態で打上げられ、静止軌道投入後に展開する。展開作業はクリティカルなイベントであると同時に、従来の経験を超える未踏技術であるため、設計、製造、試験検証に当たり展開解析、環境試験、微小重力試験等を活用して実証的に技術の蓄積を図り着実な開発を行っている[3]。

フィーダリンク装置(FLCE)は、移動体通信・放送実験を行うために、FLアンテナを介してKaバンドにて地上基地局と移動体通信機器(S帯コンバータ、オンボードプロセッサ、パケット交換機)との間の信号の送受中継を行う。

高精度時刻基準装置(HAC)は、セシウム原子時計を搭載し時刻基準を発生し、GPSデータと組み合わせ、HACアンテナを介してSバンドとLバンドでの測位実験を実施し、静止衛星を用いた測位システムの基礎技術を構築する。また、移動体通信機器とのインタフェースを有し、

LDRの異常時にSバンド系のバックアップとして移動体通信・放送実験のための信号を送受信できる。

4 まとめ

我が国が、移動体通信や測位等の将来の宇宙活動を自在に展開していくためには、大型展開アンテナを開発するとともに、ペイロード搭載能力の高い大型軽量バス技術の確立が不可欠である。ETS-Ⅷは、世界に比肩できる3トン級まで対応可能な柔軟性のある大型静止衛星バスの技術開発を進めて、通信容量の増大、ペイロード比率の増加、大電力化、長寿命化等を実現している。

謝辞

ETS-Ⅷの開発作業に携われた宇宙開発事業団、三菱電機(衛星バス等のシステム全般)、NEC東芝スペース(LDR、測位等のミッション全般)の関係各位に感謝します。

参考文献

- 1 K. Yonezawa, M. Homma, S. Yoshimoto, S. Hama, T. Ohira, N. Natori and Y. Tsutsumi, "Outline of Engineering Test Satellite-VIII (ETS-VIII)", ISTS 98-h-01V, 21th International Symposium on Space Technology and Science, 1998.
- 2 K. Yonezawa and M. Homma, "Attitude Control on ETS-VIII Mobile Communication Satellite with Large Deployable Antennas," 21-st AIAA/ICSSC, Yokohama, April 2003, Paper # AIAA-2003-2216.
- 3 H. Homma, S. Hama, H. Kohata, M. Hamamoto and M. Tanaka, "Experiment Plan of ETS-8 in Orbit: Mobile Communications and Navigation," Acta Astroautica 53 ,477-484, 2003.

よねざわ かつお
米澤克雄

独立行政法人宇宙航空研究開発機構
博士(工学)
最適システム制御及び推定

ほん まさのり
本間正修

独立行政法人宇宙航空研究開発機構
工学博士
誘導制御