

## 3-6 給電部

### 3-6 Feed System

#### 3-6-1 給電部の構成

##### 3-6-1 Configuration of the Feed System

上野健治 (北海道工業大学)  
UENO Kenji

###### 要旨

技術試験衛星Ⅷ(ETS-Ⅷ)は、静止軌道において移動体通信技術とマルチメディア放送技術を実験的に確立することを期待されている。ETS-Ⅷのキー技術のうち、ここでは大型展開アンテナを給電し、マルチビームを形成する給電部について述べる。給電部を構成する個別の機器の性能を明らかにするとともに、各機器を組み合わせた給電部の電気試験によるRF信号の振幅・位相制御機能の確認、マルチビームアンテナ放射パターンの実験的検証の結果を示す。また、環境試験により、衛星打ち上げ時及び宇宙空間における耐久性能を明らかにした。

Japanese Engineering Test Satellite Ⅷ (ETS-Ⅷ) is being developed and is scheduled to be launched into a geostationary Earth orbit to experimentally establish mobile communications and multimedia broadcasting services. Of the key technologies in ETS-Ⅷ, we focus on an array-feed system for making multiple beams and illuminating large, deployable reflectors. Assembled array-feed system have been tested, and their ability to control RF signals in amplitude and phase has been confirmed satisfactorily. Based on measured array-feed radiation patterns, we have derived reasonable secondary radiation patterns of ETS-Ⅷ S-band antennas. Environmental tests implemented to the feed units which are being placed outside the satellite body have certified sufficient durability in the launching period and space environment.

###### [キーワード]

衛星通信, 技術試験衛星Ⅷ, マルチビームアンテナ, 給電部, 給電ユニット

Satellite communication, Engineering Test Satellite Ⅷ, Multibeam antenna, Feed system, Feed unit

## 1 まえがき

ETS-Ⅷのミッションは、現実的な価格で衛星を使った移動体通信技術とマルチメディア放送技術を実験的に確立することである[1]。具体的には、S帯(2.5GHz帯)周波数において、衛星に搭載した交換機を通して手持ち端末機同士の通信や小型端末による放送波受信を可能とすることである。キーとなる技術としては、大口径の展開鏡面を持つマルチビームアンテナ、高出

力のトランスポンダ、搭載交換機、小型携帯端末の開発が必要である。本論では、これらの技術のうち、搭載用のマルチビームアンテナに注目する。アンテナへの要求は、高利得のマルチビーム、周波数再利用のための低サイドローブ、自由度の高いビーム指向方向制御及びビーム形状制御、送信ビーム間における任意の電力配分、冗長性のある高出力増幅器、RF電力の効率的な放射である。要求を満たすため、アレーアンテナを1次放射器とする反射鏡アンテナを採用し

た。この形式のアンテナは、アクティブフェーズドアレーと同様の働きをするものである[2]が、設計手法が十分に確立されているわけではない。ETS-Ⅷの照射領域に対応して、アンテナ開口直径、給電アレーの設置位置、アレー素子間隔を数値計算により決定した[3]。設計とともに、宇宙環境に耐えるアンテナ給電部を形成するためにアレー素子、固体電力増幅器、ビーム形成回路の開発を進めた。製作した各機器を組み合わせて給電部とし構成し、電気的な動作確認を行うとともにアンテナ全体としてのマルチビームパターンについても実験的な検証を行った。衛星搭載のための環境試験として熱、音響、振動の各試験を実施し、給電部が衛星搭載として十分機能することを確認するとともに今後の性能予測のための解析モデルの改修を図っている。

以下、**2**でETS-Ⅷ搭載の大型展開アンテナにおける給電部の位置付けとその構成を示し、**3**では給電部を構成する機器の個別の性能を明らかにし、**4**では給電部全体としての電気特性、アンテナ全体としての放射特性、環境試験結果について述べる。

## 2 アンテナと給電部

ETS-Ⅷの概観は図1に示すとおりで、送信及び受信に2枚のアレー給電反射鏡アンテナがある。この鏡面は展開型の金属メッシュからできたオフセットパラボラ鏡面で、開口径は内接円で13m、外接円で17mになる[4]。反射鏡を照射するのはアクティブフェーズドアレーの1次放射器で、これらは反射鏡の焦点位置ではなく、より鏡面寄りの位置つまり離焦点位置に配置されている。これは、アレー素子単独で反射鏡を照射した時の2次放射パターン(コンポーネントビームという)のビーム幅を拡大することになり、各アレー素子対応のコンポーネントビームの重なりを実現できるので、通常の鏡面のないフェーズドアレーアンテナのような動作を可能にするものである[5]。

給電部はアレー1次放射器をはじめ増幅器、ビーム形成回路などからなり、構成を図2に示す。図中の点線は給電部以外のサブシステムである。図において、送信給電ユニット(Tx unit)と受信

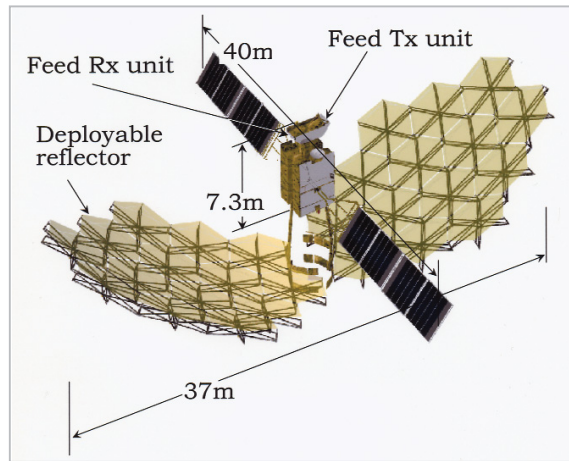


図1 ETS-Ⅷの概観

給電ユニット(Rx unit)とは、給電部のうちアレー1次放射器の近くに配置しなければならない機器を一つの筐体にまとめたもので、アンテナタワーの先端に取り付けられ、厳しい耐環境性が要求される。送信給電ユニットは、アレー素子、フィルタ、固体電力増幅器(SSPA)からなり、受信給電ユニットはアレー素子、フィルタ、低雑音増幅器(LNA)からなる。ビーム形成回路はビームごとのRF信号が所定の放射パターンに形成されるようにアレー素子ごとの励振振幅・位相を実現する機能を持つ。送信、受信ともにビーム形成回路が2台接続されているが、運用時にはどちらか1台のみが動作することになっている。また、2台を接続するために入力、出力端をハイブリッドにより常時並列接続している。ビーム形成回路とハイブリッドは衛星構体内に配置される。

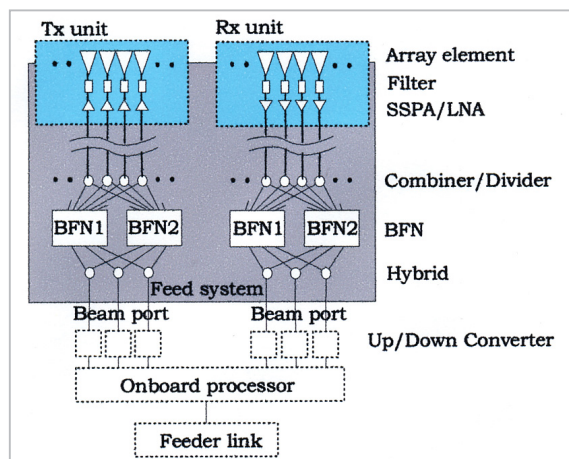


図2 給電部の構成

### 3 給電部を構成する機器

#### 3.1 アレー給電素子

図3に送信給電ユニットの外観を示す。1面に31個のカップ(金属円筒)つきマイクロストリップアンテナ[6]からなる平面アレーが配置されている。アレー素子であるマイクロストリップアンテナは、背面にハイブリッドの基板層を持ち、その出力を2点で給電し円偏波を放射する。また、給電はスロット結合による非接触の給電方式であり、パッシブインターモジュレーション(PIM)の抑圧や作業効率の向上を図っている。金属円筒は実験的検討により直径120mm、高さ40mmとした。送信周波数は、通信用として2500-2505MHz、放送用として2535-2540MHz、受信周波数は2655-2660MHzである。カップ付きマイクロストリップアンテナの特性は、帯域幅4%、利得8.9-9.8dBi(送信)、10.3-10.8dBi(受信)、半値幅60度、軸比1.5dB以下、隣接アレー素子との相互結合-40dB以下、重量180グラムである。

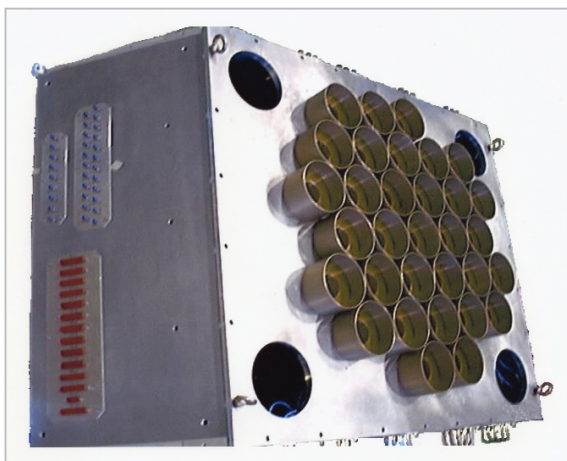


図3 送信給電ユニットの外観

#### 3.2 フィルタ

送信フィルタは、固体電力増幅器とアレー素子の間に挿入し、スプリアスや相互変調波を抑圧するが、特に受信周波数帯への漏れ込みを抑えることが主目的である。形式は誘電体共振器型で、挿入損失0.3dB以下、受信周波数帯での減衰量70dB以上、耐電力40W以上、設置面積100mm×100mm、重量300gである。受信フィルタは、大電力の送信波がアレー素子経由で低雑音増幅器に入って干渉を起こすのを防ぐため

に挿入する。図4に受信ユニット内に配置されている受信フィルタ群を示す。このフィルタは、同軸共振型で、挿入損失0.4dB以下、送信周波数帯(ただし通信用)での減衰量70dB以上、設置面積180×60mm<sup>2</sup>、重量190gである。



図4 受信ユニット内のフィルタ配置

#### 3.3 固体電力増幅器

送信アンテナのアレー1次放射器は、いかなるビームを形成する場合でも振幅については固定的な励振分布を採用し、位相のみを制御することにした。これはすべてのアレー素子に高出力の電力増幅器を配置して励振振幅の自由度を確保するよりは、アレー素子ごとに適切な電力増幅器を割り当て、電力消費の無駄を省き重量も軽減するという考えによる。アレー素子の励振振幅は図5に示すとおりで、0、-3、-6dBの3段階に設定している。固体電力増幅器は出力10Wと20Wの2種類を開発し、それぞれ23台と8台を使用している。3段階の励振振幅を得るのは、増幅器の入力レベルを2段階とすることにより実現している。これらの増幅器は、入力レベルや環境温度に対し利得と位相の安定性を確保するように設計されている[7]。図6は10W固体増幅器で、利得 $55.0 \pm 0.5\text{dB}$ 、温度変化 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ に対する利得温度偏差 $0.8\text{dBp-p}$ 以下、利得周波数偏差 $0.15\text{dBp-p}/5\text{MHz}$ 以下、位相温度偏差 $19\text{degp-p}$ 以下、位相周波数偏差 $13\text{degp-p}/5\text{MHz}$ 、雑音負荷電力特性 $17.4\text{dB}$ 以上、設置面積 $260 \times 60\text{mm}^2$ 、重量660gである。20W固体増幅器は、利得 $57.9 \pm 0.4\text{dB}$ 、利得周波数偏差 $0.14\text{dBp-p}/5\text{MHz}$ 以下、位相周波数偏差 $2\text{degp-p}/5\text{MHz}$ 、雑音負荷電力特性 $17.2\text{dB}$ 以上、設置面積 $220 \times 210\text{mm}^2$ 、

重量2500gである。

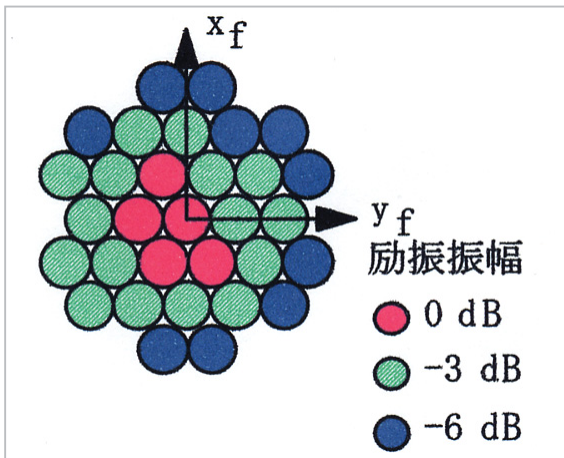


図5 アレー素子の励振振幅

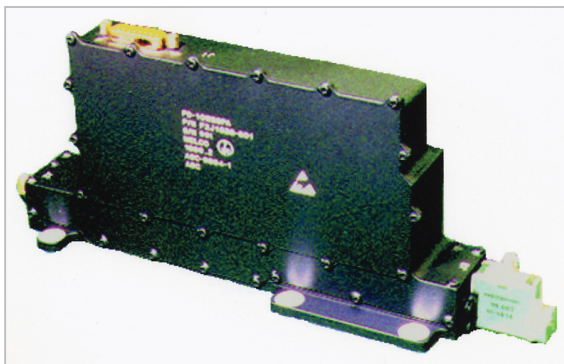


図6 10W固体増幅器

### 3.4 低雑音増幅器

図7に受信ユニット内に配置された低雑音増幅器を示す。低雑音増幅器は消費電力の小さいコンポーネントである。受信アンテナのアレー1次放射器としては、送信アンテナのような励振振幅の固定化を行っても消費電力の節約にはなら

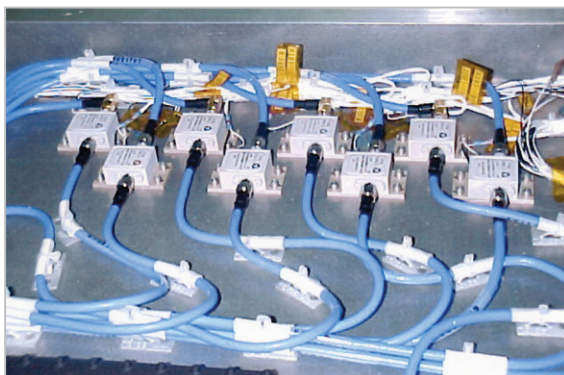


図7 G受信ユニット内に配置された低雑音増幅器

ないので、ビームごとに独立した励振振幅を与えている。低雑音増幅器は1種類のみで、利得 $44.8 \pm 0.5\text{dB}$ 、利得周波数特性 $0.5\text{dBp-p}/5\text{MHz}$ 以下、位相周波数特性 $0.6\text{degp-p}/5\text{MHz}$ 以下、位相変動 $5\text{degp-p}$ 、雑音指数 $1.4\text{dB}$ 以下、設置面積 $42 \times 40\text{mm}^2$ 、重量 $50\text{g}$ である。

### 3.5 ハイブリッド

本給電部では2台のビーム形成回路を併置するため、ビームポート側(中継器に接続する側)に3台のハイブリッド、エレメントポート側(アレー素子に接続する側)に31台のハイブリッドを配している。エレメントポート側のハイブリッドの実装に当たっては、設置面積の節約のために、8台のハイブリッドを2段重ねの一つの筐体に入れている。この合体したハイブリッドを送信用は結合器(Combiner)、受信用は分配器(Divider)という。図8にハイブリッドの外観を示す。挿入損失は $3.5\text{dB}$ 以下、通過振幅誤差 $0.2\text{dBp-p}$ 以下、通過位相誤差 $5\text{degp-p}$ 、設置面積 $200 \times 70\text{mm}^2$ 、重量 $360\text{g}$ である。

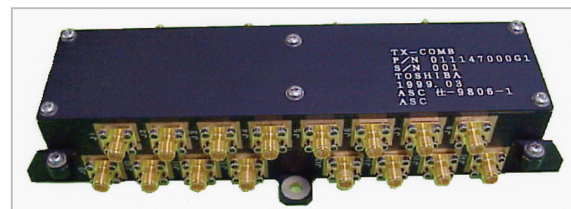


図8 ハイブリッド外観

## 4 給電部の総合特性

### 4.1 電気特性

3で述べた機器は給電部として組み立てられ、そのうち衛星構体内に設置した部分を図9に示す。給電部の電気試験において、ビーム形成回路で所定のビームを形成するための励振分布を与え、各アレー素子近傍での放射界を測定することにより要求される振幅・位相になっていることを確認した[8]。各ビームの振幅・位相の要求に対し、アレー素子、増幅器、接続ケーブルなどの利得、損失、位相の累積された誤差はすべてビーム形成回路で補正する。つまり、最終的な残留誤差はビーム形成回路の制御分解能と

測定誤差に依存する。図10にアレー素子近傍で測定した振幅・位相と要求値とを併せて示す。同図(a)は送信の#1ビーム(九州方向のビーム)、(b)は受信の#1ビームの場合である。要求値からの偏差は、送信、受信ともすべてのビームに対して0.5dB rms 及び4.2deg rmsであった。この結果は、当初の要求値である0.6dBと7.3degを満足している。すべての電力増幅器は線形領域で使用することになっており、そのRF出力を合計すると355Wであった。また、給電部全体の重量は235kgである。

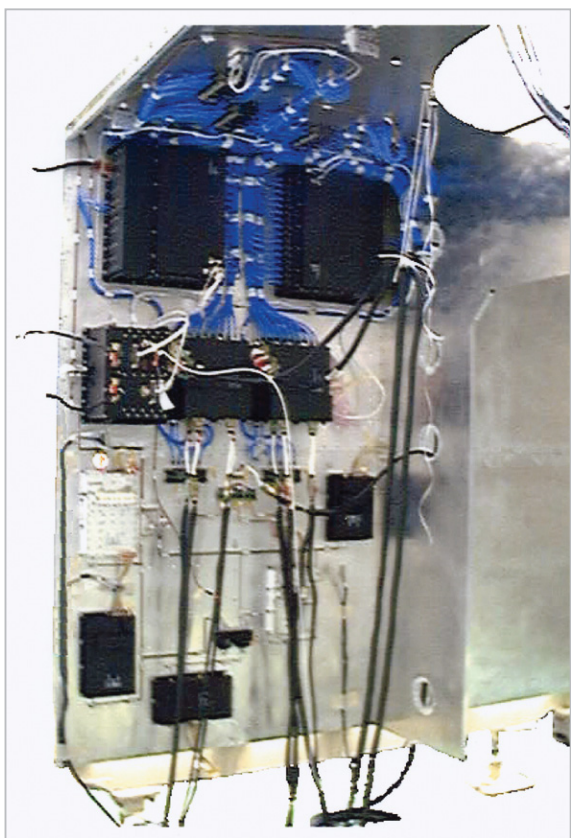


図9 衛星構体内の給電部

#### 4.2 放射特性

アレー1次放射器の放射パターンを平面ニアフィールド測定装置により測定した。この放射パターンは反射鏡を含むアンテナ全体の放射パターンの推定に用いる。各ビーム対応で測定した結果のうち、送信アンテナ#1ビームのアレー1次放射器の放射パターンを図11に示す。パターン測定とともに軸比も測定しており、1.5dB以下であった。

反射鏡を含むアンテナ全体の放射パターンを

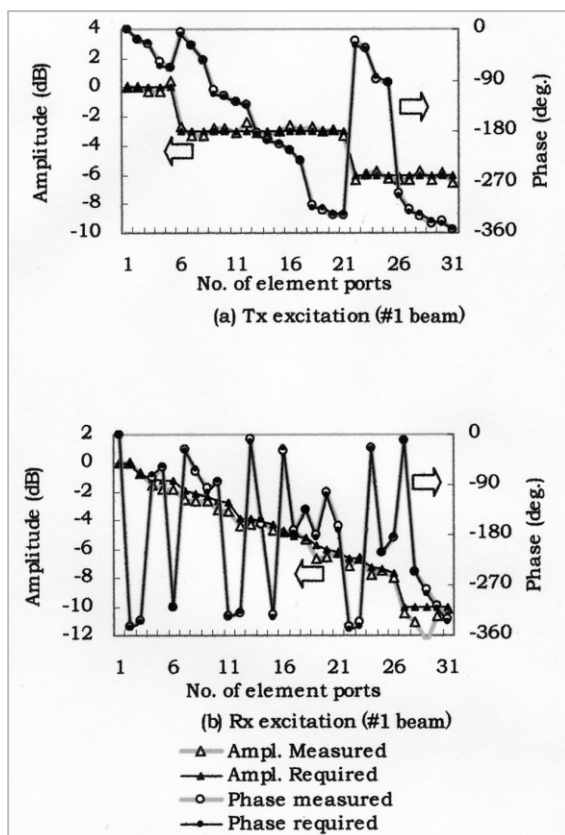


図10 励振振幅位相の測定値と要求値

得る手順としては、ニアフィールドデータ処理のバックプロジェクション機能によりアレー1次放射器での開口面分布を求め、この開口面分布より反射鏡面上に誘起されるRF電流を計算し、その放射界を積分して放射パターンを得る。反射鏡面は14個の六角形の金属メッシュによるモジュールから構成されるが、反射面を導体の金属面と考え、モジュール間の空隙についても考慮して放射パターンの解析を行った。1次放射器の測定結果に対してこの方法を適用して得た2次放射パターンと1次放射器について理論解析して得た2次パターンとを比較して図12に示す。図からメインローブ及びサイドローブの大部分については一致していること、 $-25\text{dB}$ (送信)あるいは $-30\text{dB}$ (受信)等高線で差が出ていることが分かる。差の原因は、アレー1次放射器の励振振幅・位相における残留誤差、ニアフィールド測定における解析誤差が考えられる。これらのアンテナの2次パターンをまとめ、周波数の再利用を行う次々隣接ビーム間のアイソレーションは送信で19dB以上、受信で25dB以上あることを確認した。また、軸比は送信、受信ともすべ

でのビームで2dB以下であった。

展開鏡面的一部分と給電部を使ったアンテナのニアフィールド放射特性測定も実施しており、展開鏡面の解析時のモデル化についても妥当性を確認している[9]。

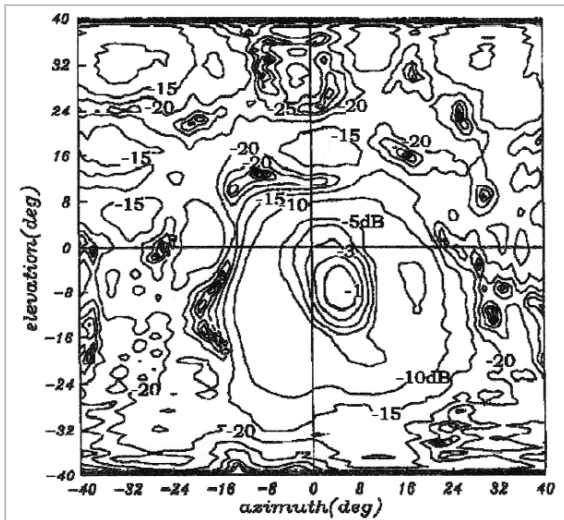
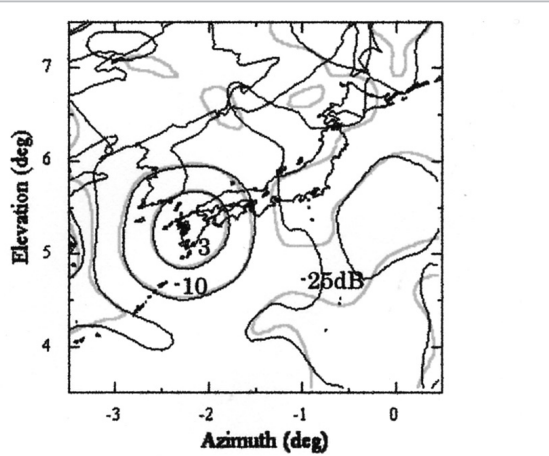


図 11 送信用の給電部放射パターン (#1 ビーム)

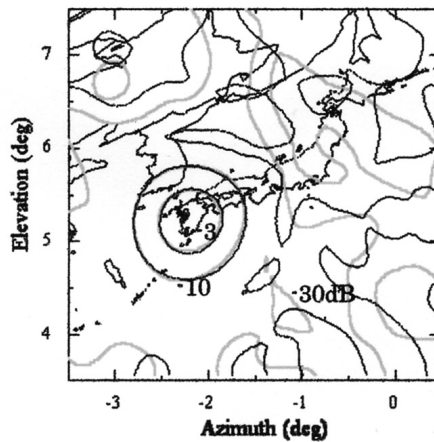
### 4.3 熱特性

送信給電ユニット、受信給電ユニットは衛星構体上のアンテナタワー東西面に搭載されるため、衛星システムとは独立に熱制御する必要がある。従来の静止衛星では SSPA のような高発熱機器は南北ミッションパネルに搭載して直接放熱面から排熱していたが、フェーズドアレー給電方式の場合 SSPA 出力の損失を低減するためアレー素子の近傍に SSPA を搭載する必要がある、かつアンテナフェアリングやアンテナタワー形状の制約から SSPA の搭載領域が大幅に制限されるため、合計 31 台の SSPA を高密度に搭載しなければならない。このため、送信ユニットでの発熱は最大約 1.4kW にもなるが、ヒートパイプによりアンテナタワー南北面に搭載した放熱パネルに熱輸送し排熱することにした。送信給電ユニット内の SSPA の配置とヒートパイプの配管を図 13 に示す。

図 14 に、アンテナタワーに給電ユニット熱モデル(熱モデルは熱試験終了後に改修しフライトモデルとなる。)を取り付けた状況の外観写真を示す。送信給電ユニットはタワー東面に取り付けられ(図右側)、給電ユニット内の発熱はアン



(a) 送信アンテナ 2 次パターン (#1 ビーム)



(b) 受信アンテナ 2 次パターン (#1 ビーム)

— 給電部測定結果を用いたパターン計算  
 — 給電部解析によるパターン計算

図 12 給電部測定結果による 2 次パターンと給電部解析による 2 次パターンの比較

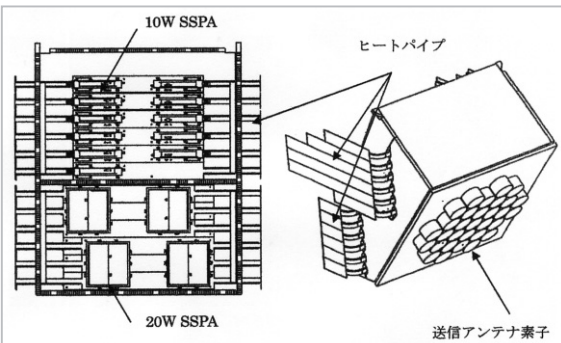


図 13 送信給電ユニット内の SSPA 配置とヒートパイプ

テナタワー南北面の放熱パネル(図中央)により排熱する。アレー1次放射器は給電ユニット内部と断熱にして外表面をテドラカプトンフィルムで覆い単独で熱制御する。受信給電ユニットはアンテナタワー西面に取り付けられ(図左側)、給電ユニット内部の発熱(LNA)はユニット上面の放熱面から排熱する。アレー1次放射器は送信給電ユニットと同様にユニット内部と断熱にして外表面をテドラカプトンフィルムで覆い単独で熱制御する。

熱平衡試験はアンテナタワー、高精度時刻基準装置用アンテナ、フィーダリンク用アンテナ及び地球指向面ダミーを組み合わせてスペースチェンバ内で実施した[10]。このように地球指向面のシステムの組合せで試験することにより、給電部の熱設計を検証すると同時にシステムとの熱的インタフェースを確認することができる。

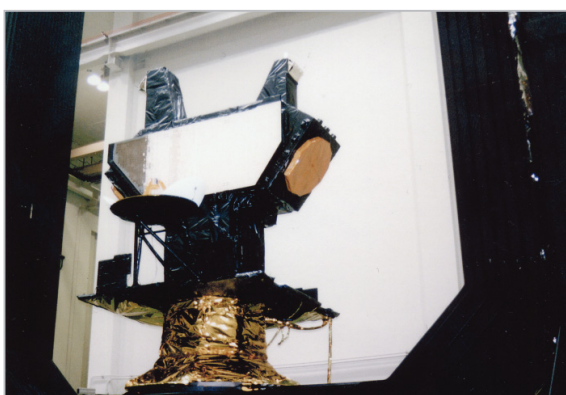


図14 アンテナタワーと給電部熱モデルの外観

試験は定常ケースを4ケース(冬至、夏至、分点1、分点2)、非常ケースを2ケース(食、トランスファ)設定した。外部熱入力ソーラシミュレータにより模擬した。定常ケースは熱数学モデルコリレーションのためのデータ取得を目的としており、異なる軌道上熱環境での熱バランスデータを取得した。非常ケースは食及びトランスファ軌道上での温度挙動を確認することを目的としており非常温度データを取得した。

試験結果はアレー素子、LNA及び受信フィルタで実測温度と試験前予測温度に差があり、熱数学モデルをコリレーションした。この結果、コリレーションしたモデルによる試験後解析ではすべての試験ケースで予測温度との差が10℃

以内となり、軌道上温度予測をするのに十分な精度を有することを確認した。特にキーコンポーネントであるSSPAについては5℃以内の精度で温度予測することができた。コリレーションしたモデルを用いて軌道上温度予測解析を実施し、打上げからミッション末期までの期間を通してすべての搭載機器を所定の温度範囲内に維持できることを確認した。表1に解析結果を示す。

表1 軌道上温度予測結果

機器	仕様と予測		予測温度 (℃)
	動作時許容温度 仕様値(℃)	非動作時許容温度 仕様値(℃)	
SSPA	-10~55	-30~60	-13~45
TX-FIL	-35~85	-35~85	-20~38
送信アンテナ素子部	-100~110	-100~110	-80~93
LNA	-20~60	-30~60	-14~44
RX-FIL	-35~85	-35~85	-20~36
受信アンテナ素子部	-100~100	-100~100	-77~63

#### 4.4 音響試験特性

音響試験は給電ユニットが打上げ時の音響による振動環境に耐え得る設計であることを検証するために実施する。給電ユニット構造モデルの音響試験状況写真を図15に示す。試験を実施した結果、次の3点を明らかにした。

- (1) 送信給電ユニット及び受信給電ユニットの試験後外観検査の結果、供試体の変形等の異常は見受けられず問題ないことを確認し、タワー搭載給電部構造モデルが音響QTレベルに耐え得ることが実証できた。
- (2) 搭載機器のうち、アレー素子、フィルタ、10WSSPA、LNAについてPSD (Power Spectrum Density) レベルのランダム振動環境超過が見られたが、機器レベルでの調査により、超過している周波数帯では問題がないことを確認した。
- (3) 試験治具は使用上問題がなく、音響試験での音響応答も実効値で2Grms以下と十分低かった。よって、PFTも本試験治具を使用して進めることができることが確認できた。

#### 4.5 振動試験特性

振動試験は給電ユニットが打上げ時の振動環境に耐え得る設計であることを検証するために実施する。給電ユニット構造モデルの振動試験

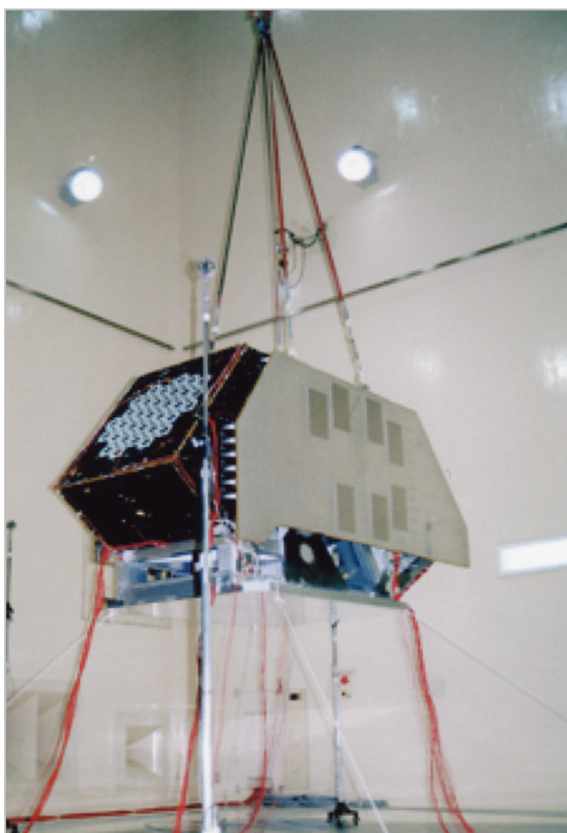


図15 給電ユニット構造モデルの音響試験状況

状況写真を図16に示す。試験の結果分かったことは次のとおりである。

- (1) 給電ユニット構造モデルが正弦波振動環境に耐え得ることを実証できた。
- (2) 給電ユニット構造モデルが固有振動数の要求値である50Hz以上を満たしていることを確認した。
- (3) 給電ユニット構造モデルの搭載機器の正弦波振動環境を確認した。
- (4) 正弦波振動試験結果により構造解析モデルの改修を行い、固有振動数が数Hz以内で一致するようになった。
- (5) 試験治具については、Z軸に関しては150Hz以下に共振点はなく、X,Y軸に関しては100Hz以上に共振点はあるものの共

振点のすそ野で既に加速度応答が大きく

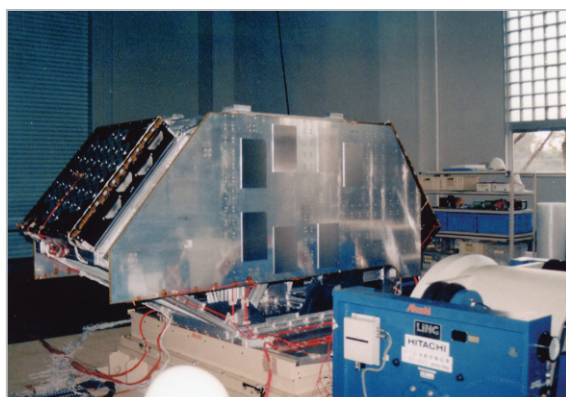


図16 給電ユニット構造モデルの振動試験状況

なっていた。このため、試験治具上での応答加速度をリミッタ制御することにより、PFTでも本試験治具及び振動試験設備を使用できることを明らかにした。

## 5 むすび

ETS-Ⅷ開発のキー技術として、大型展開アンテナ鏡面を給電しマルチビームを形成する31素子のアレー1次放射器を持つ給電部を取り上げ、詳しく述べた。給電部の主要機器であるアレー素子、フィルタ、固体電力増幅器、ビーム形成回路、ハイブリッド等は製造を完了し、電気特性・環境特性が衛星での使用に耐えることを確認した。給電部全体としての試験を実施し、マルチビーム形成のためのRF信号の制御が十分な精度で可能であること、給電部の放射パターンの測定によりアンテナ全体としてのマルチビームパターンについても設計どおりの特性が得られていることを確認した。また、環境試験として熱、音響、振動の各試験を実施し、給電部が衛星搭載として機能することを確認するとともに解析モデルの改修を行い、今後の試験遂行及び性能予測のためのデータ蓄積を図った。



## 参考文献

- 1 Y. Kawakami, S. Yoshimoto, Y. Matsumoto, T. Ohira, and N. Hamamoto, "S-band mobile satellite communications and sound broadcasting systems in ETS-VIII", 21st Int. Symp. on Space Tech. and Science, 98-h-02, pp.1362-1367, May 1998.
- 2 R. Lo. Forti, "Advanced imaging antenna for satellite application at L-band", IEEE AP-S Int. Symp., pp.1618-1621, 1989.
- 3 K. Tokunaga, H. Tsunoda, H. Shoki, and M. Okumura, "Design optimization of phased-array-fed reflector antennas for mobile communication satellites", AIAA Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.36, No.1, pp.105-108, Jan.-Feb. 1999.
- 4 K. Yonezawa, M. Homma, S. Yoshimoto, S. Hama, T. Ohira, N. Natori, and Y. Tsutsumi, "Outline of Engineering Test Satellite-VIII (ETS-VIII)", 21st Int. Symp. on Space Tech. and Science, 98-h-01V, pp.1356-1361, May 1998.
- 5 K. Ueno, "Multibeam antenna using a phased array fed reflector", IEEE AP-S Int. Symp., pp.840-843, 1997.
- 6 M. Tanaka, "Effect of the height and diameter of the cup on cup microstrip antennas", IEICE Trans. Commun., Vol.E81-B, No.8, Aug. 1998.
- 7 H. Ishida, Y. Kawakami, H. Hirose, and M. Shigaki, "Solid-state power amplifiers for the Japanese Engineering Test Satellite-VIII", Sixth Int. Mobile Satellite Conf., pp.258-261, June 1999.
- 8 跡部, 上野, 奥村, 徳永, 山佐, "技術試験衛星VIII型フェーズドアレーアンテナ給電部の電気特性", 2000 信学総全大, B-3-29, p.285, Mar. 2000.
- 9 上野, 跡部, 宮坂, 織笠, 奥村, "ETS-VIII搭載アレー給電反射鏡アンテナの部分鏡面を用いた実証試験", 信学技法, AP2000-155, Jan. 2001.
- 10 田中, 斉藤, 奥村, 浅賀, 跡部, 上野, 辻畑, "技術試験衛星VIII型大型展開アンテナ給電部熱制御系の開発試験", 44回 宇科技連合講演, 00-1F15, Oct. 2000.



上野健治

北海道工業大学情報ネットワーク工学  
科教授 工学博士  
衛星通信及びアンテナ工学

