

# ETS-V 搭載中継器の設計

橋本 幸雄\*<sup>1</sup> 浜本 直和\*<sup>2</sup> 近藤喜美夫\*<sup>1</sup>

石出 明\*<sup>3</sup> 安齊 孝男\*<sup>4</sup>

(平成元年11月20日受理)

## DESIGN OF TRANSPONDER ON BOARD ETS-V

By

Yukio HASHIMOTO, Naokazu HAMAMOTO, Kimio KONDO

Akira ISHIDE, and Takao ANZAI

Engineering Test Satellite V (ETS-V) was launched by Japan in 1987. A communication transponder called AMEX (Aeronautical Maritime Experimental Transponder) is on board ETS-V and is to be used in mobile communication experiments. This article describes the design, functions and characteristics of AMEX/ETS-V. Sufficient performance and good adaptability for the ETS-V satellite bus has been confirmed.

### 1. はじめに

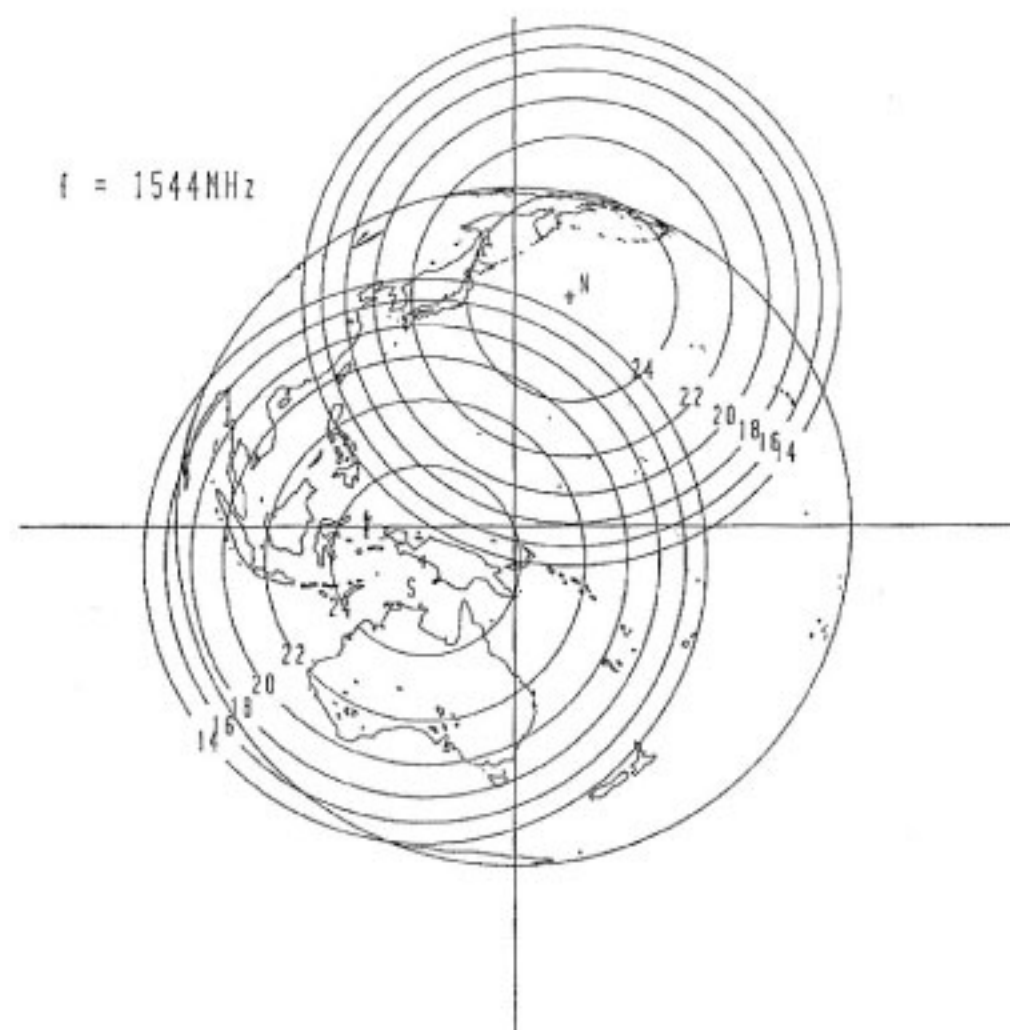
ETS-V に搭載された AMEX は、移動体衛星通信技術の開発、通信実験を目的とした日本で初めての移動体衛星通信専用の中継器として開発された<sup>(1)</sup>。

一般に、移動体局は簡易なアンテナを用い、実効放射電力も小さく、また広い範囲を移動する。このため、AMEX ではアンテナの高利得化、送信機の高出力化及び低雑音増幅器 (LNA) の一層の低雑音化を図っている。アンテナの高利得化は必然的にカバレッジの減少を伴うことから、所要のカバレッジを維持するため、2ビームによるマルチビームアンテナを国産衛星として初めて搭載した。また、移動体衛星通信は小容量の多数局による SCPC (Single Carrier Per Channel) 運用が基本となるため、AMEX は直線性の良い中継器とし、低速データ通信の特性劣化を防ぐため高安定の局部発振器を搭載した<sup>(2)(3)</sup>。

本論文では、これら新規技術を用いた AMEX 各部の設計とその性能試験について報告する。

### 2. AMEX の構成

AMEX は基地局向けのフィードリンクに C バンド、移動体向けのアクセスリンクに L バンドを使用している。アンテナは C バンド及び L バンドとも送受共用で、C バンドは茨城県鹿島を中心としたグローバルビームアンテナ、L バンドは北太平洋及びニューギニアを中心とする 2 ビーム構成のマルチビームアンテナを用いてい



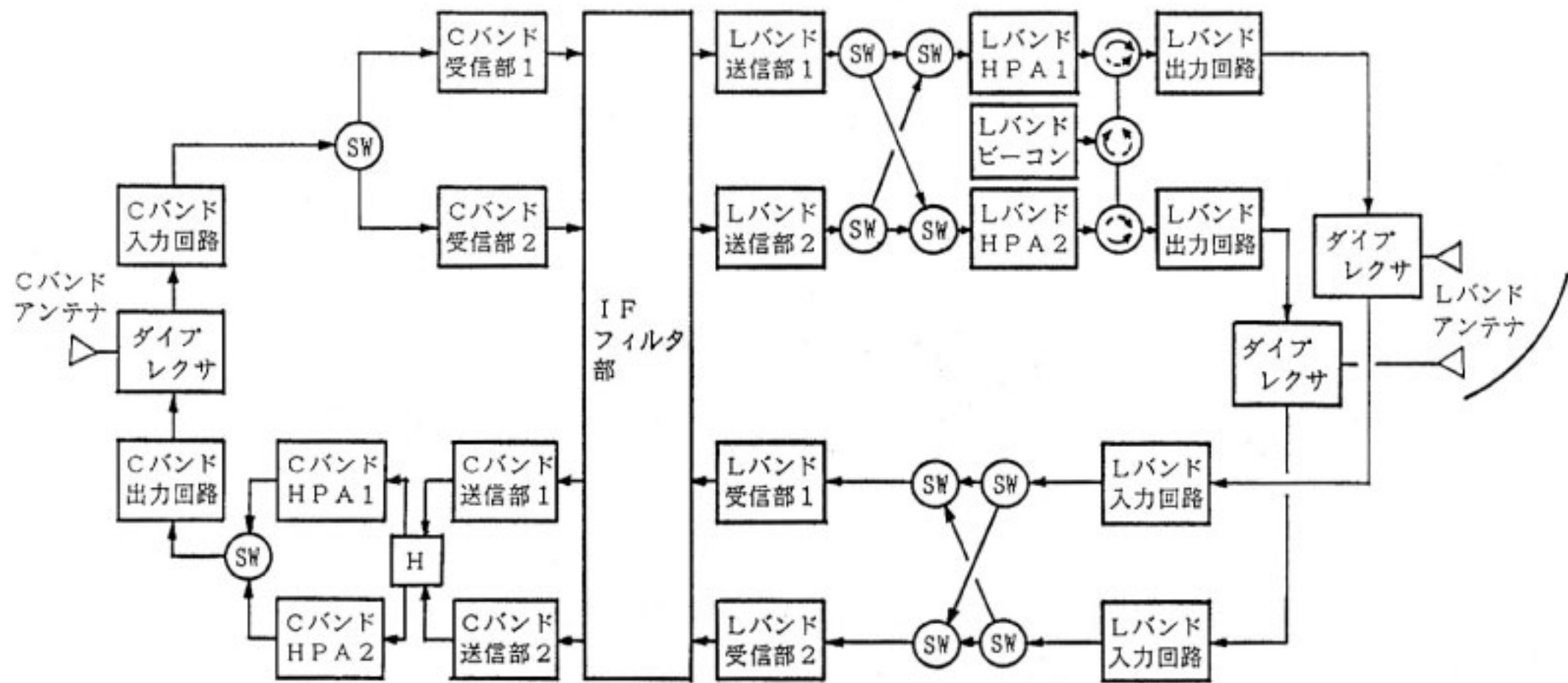
第1図 Lバンドアンテナパターン

\*<sup>1</sup> 宇宙通信部 移動体通信研究室

\*<sup>2</sup> 宇宙通信部 衛星通信研究室

\*<sup>3</sup> 運輸省 電子航法研究所

\*<sup>4</sup> 宇宙開発事業団



第2図 AMEX 構成図

る。第1図にLバンドアンテナのパターンを示す。Lバンド回線で使用可能な周波数帯域が狭いため、中継器はダブルコンバージョン方式とし、フィルタの比帯域が2%となり実現しやすい140 MHz帯を中間周波数としている。第2図にAMEXの構成図を示す。Cバンド部は現用・予備の完全冗長系とし、Lバンド部では各ビームに対応した現用2系統としている。また、必要な場合どちらか一方のビームにLバンドビーコンを出力できる。通信回線はC/L (Cバンド受信/Lバンド送信)、L/Cの他、L/L、C/Cの各回線からなり、IFフィルタ群を切り替えることにより航空バンドと、海事バンドの切替ができる。

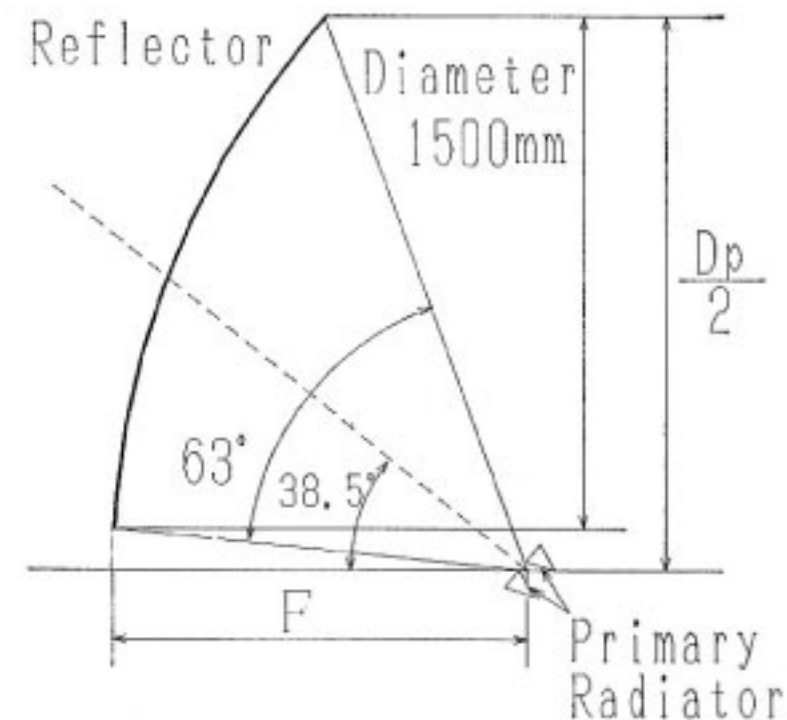
### 3. AMEX 主要部の設計

#### 3.1 マルチビーム系の設計

##### 3.1.1 アンテナ設計

Lバンドアンテナはオフセットパラボラ形式のデュアルビームアンテナであり、開口径1.5m相当のリフレクタと1次放射器からなる。Lバンドアンテナの設計では高利得化、耐高電力化及び軽量化に努めた。

パラボラアンテナの開口電磁界分布は、開口効率、サイドローブ特性等の点からエッジレベルを低くすることが必要である。ホーンアンテナは利得を上げるためホーン開口径を大きくすることが必要であるが、要求されるビーム中心の間隔が決められている場合限度がある。一方、ヘリカルアンテナは物理的寸法が小さく、巻線数の増加により狭ビーム化及び高利得化することができる。これにより、スピルオーバーを減少しアンテナ効率の増加を図ることが可能となる。さらに、ヘリカルアンテナでは円偏波生成用の特別な回路が不要なため軽量化でき



第3図 Lバンドアンテナの構成

る。そこで、AMEXでは1次放射器としてヘリカルアンテナを採用し、開発を行った。

ヘリカルアンテナの設計では、特に位相パターンを均一にして軸比を改善するため、ヘリカルの先端にテーパ部を付けてヘリカル上の電流を完全進行波に近づけている。さらに、反射器にリム付反射板を用い軸比を及び利得の改善を行い、軸比0.5 dB、利得11 dBを得た。

オフセットパラボラにおいて、1次放射器を離焦点させた場合、収差による利得の低下及びサイドローブレベルの上昇が生じるが、AMEXではロケットフェアリング内への収容、1次放射器マストに取り付ける衛星管用Sバンドアンテナの視野角の確保及びLバンドアンテナ1次放射器マストの剛性確保等の機械的制約条件を考慮し第3図の構成とした<sup>(4)</sup>。

リフレクタは炭素繊維強化プラスチックメッシュでアルミハニカムを挟むサンドイッチ構造とし、剛性、強度、軽量化を実現した。鏡面系(リフレクタ及びその支持サポート)の重量は2.7 kgであり、鏡面精度は0.5



mm rms 以下である。

アンテナ表面は太陽光吸収による温度上昇を避けるため白色塗装が施されることが多いが、ETS-V では接着

剤を新規に開発し予測温度140C°に耐えるように耐高温特性を高めて無塗装とした。なお、熱変形解析により、Lバンドでの熱歪及び熱変形で発生するビームシフト及び鏡面精度劣化による利得劣化は0.02 dB 以下である。

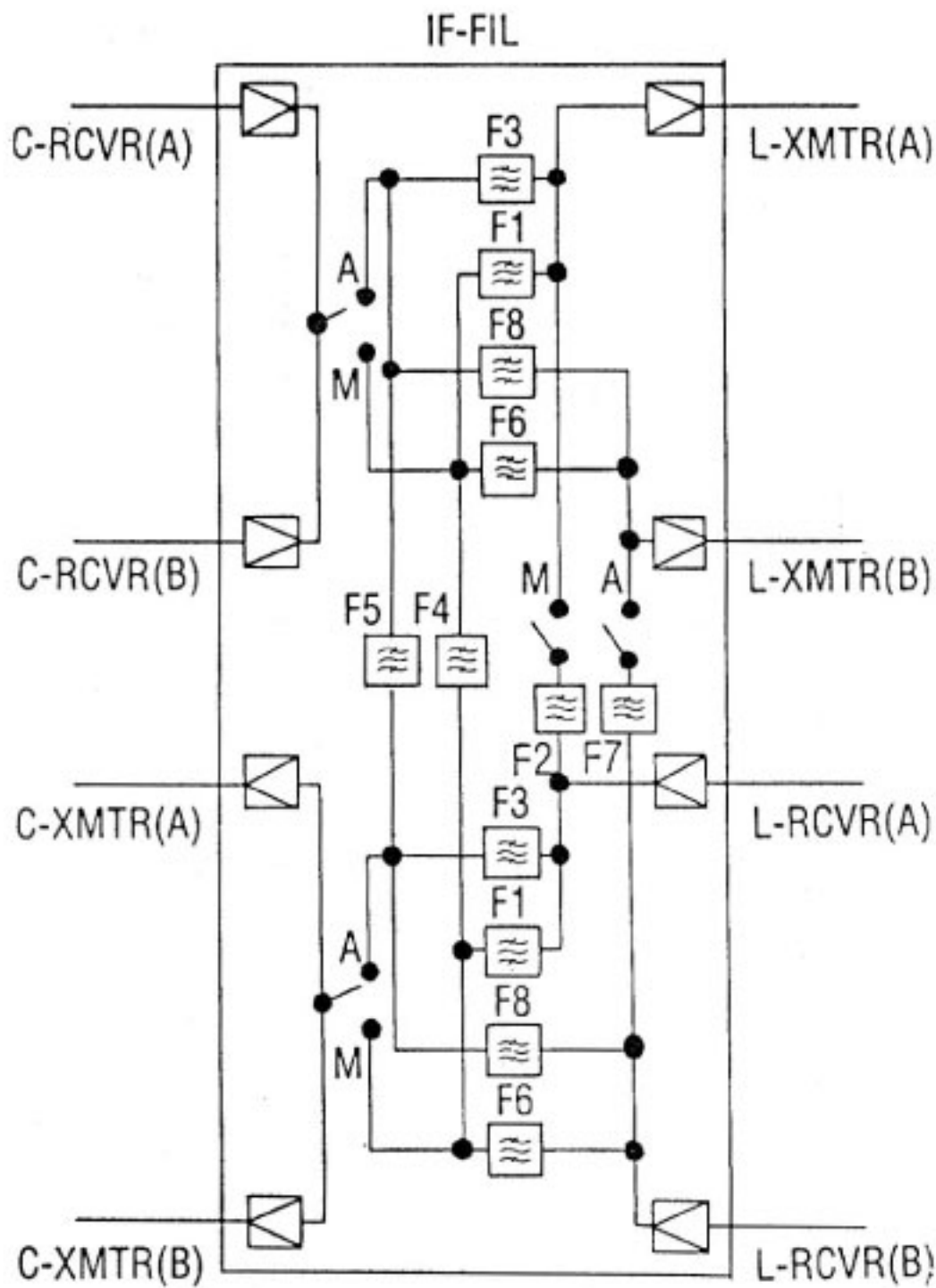
### 3.1.2 マルチビーム化にともなう設計

マルチビーム化にともなう設計、マルチビーム化にともなう設計、冗長系の確保、周波数配列の工夫に注意し設計を行った。

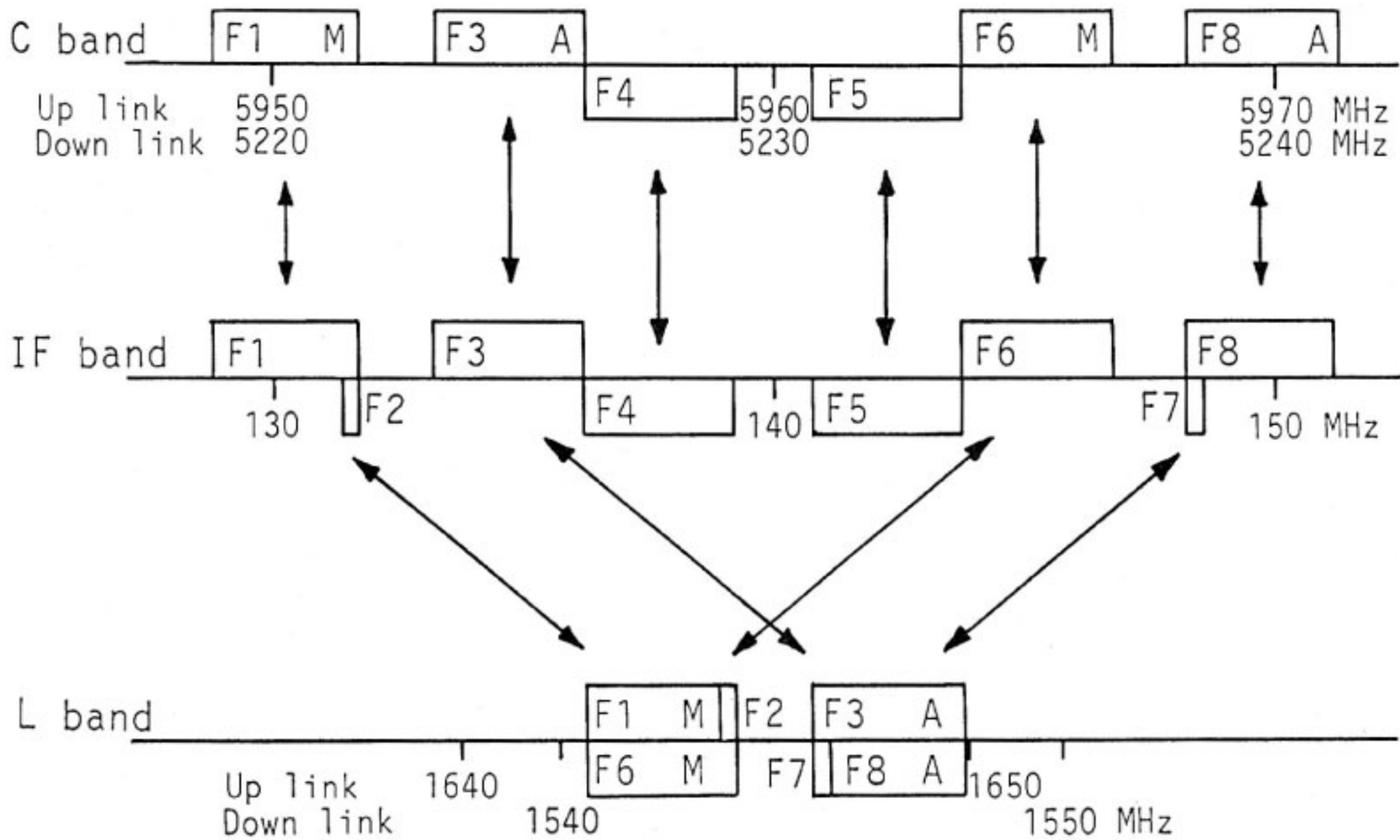
ビーム間干渉については、アンテナ及び切替え器におけるビーム間アイソレーションが問題となる。これらはいずれも、アンテナパターンの劣化及び他ビームからの干渉による劣化を生じるため、エンジニアリングモデル等のコンポーネントレベルのデータ等を用いた解析により設計を行った。この結果、アンテナでのビーム間アイソレーションは37 dB 以上であり、また切替え器でのビーム間アイソレーションはサーキュレータスイッチの実測値から40 dB 以上となった。これら漏れ込みによる利得の劣化はピーク利得に対する影響として0.1 dB 以下でありシステム上問題とはならない。

冗長系については、搭載時の制約下で基本的な実験の可能性を確保できるよう、入出力回路と中間点にハイブリッド、スイッチを挿入して機能的な冗長系となるよう構成した。また、Lバンドではビーコンの送信も可能とした。

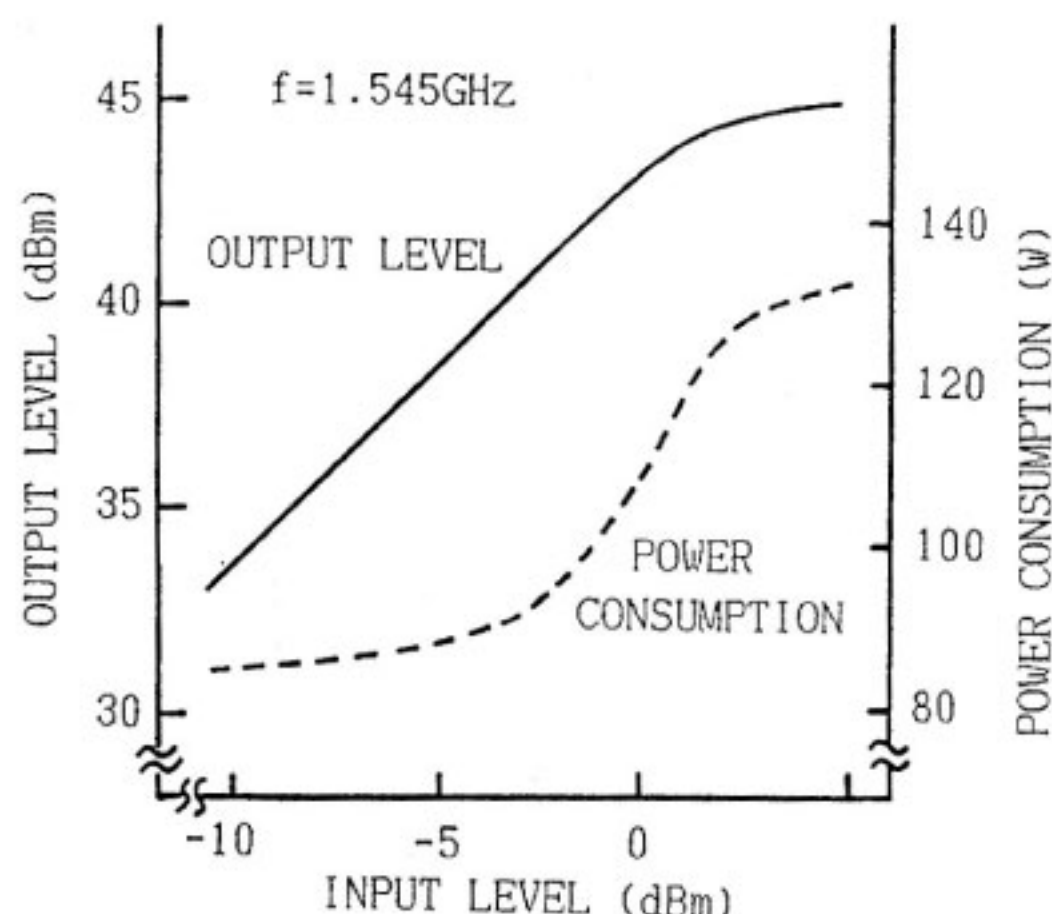
アクセスリンクは、航空、海事の各々の帯域について、ビーム間を移動しても同一周波数が使用できるよう



第4図 中間周波部フィルタの構成



第5図 AMEX の周波数配列



第6図 LバンドHPA入出力特性

にしているが、フィーダリンクは周波数の選択によるビーム識別が可能となるようにした。また、海事、航空の同時使用がないことを利用して第4図のように切替えスイッチ及び計12個の表面弾性波(SAW)フィルタを組み合わせ、それぞれの用途の周波数帯を第5図のように重ね合わせることでフィーダリンクでの使用帯域幅を22.5 MHzと縮小した。

### 3.2 中継器の高利得設計

#### 3.2.1 LバンドHPA設計

AMEXでは、高電圧を必要とし本質的に寿命部品であるTWTの使用を避け、固体化した高出力増幅器(HPA)とした。

高出力の固体素子としてSiバイポーラトランジスタを開発するとともにアダプティブバイアス法による相互変調雑音(IM)の改善を試みたが、効率が50%以上となる半面IM値が20 dB程度が限界であることが明らかとなったためGaAs FETを採用した。MOS-1搭載用の素子(8.5 GHz, 5W)を基本としてセル数を2倍とし、内部整合回路付で出力10 W(効率45%)となるFETを開発、4並列構成のHPAとして2 dB圧縮点で44.5 Wを得た。第6図にLバンドHPAの入出力特性を示す。なお、HPA入力段でPINアッテネータを利用した利得の温度補償を行い、利得変動を0.5 dB<sub>p-p</sub>以下(-20~50°C)に抑えている。

消費電力低減のため動作点はAB級近くに設定されているが、IM特性改善のため基本的には級動作とし、2波入力時の2 dB圧縮点でもC/IM<sub>3</sub>として22 dB以上を得た。

LバンドHPAの高出力化に対して、出力側切替え器は大型で重いが大電力が可能で摩耗部分がないサーキュレータ動作のラッチングスイッチを使用した。最も高発

第1表 AMEXのフィルタ

	機 器	使用フィルタ	最小減衰量
L バ ン ド	送信部	4次TS. BPF 3次TS. BPF	70 dB/受信帯 40 dB/受信帯
	出力回路	3次M. F. BRF 15次TS. LFP	40 dB/受信帯 60 dB /4.5~12.5 GHz
	ダイプレクサ 送信 受信	7次TS. BPF 8次TS. BPF	90 dB/受信帯 90 dB/送信帯
	受信部	4次TS. BPF 3次TS. BPF	70 dB/送信帯 40 dB/送信帯
C バ ン ド	送信部	6次TS. BPF 3次TS. BPF	60 dB/受信帯 40 dB/受信帯
	出力回路	9次TS. LFP	50 dB /9.5~17 GHz
	ダイプレクサ 送信 受信	4次TS. BPF 4次TS. BPF	70 dB/受信帯 70 dB/送信帯
	受信部	6次TS. BPF 3次TS. BPF	60 dB/送信帯 40 dB/送信帯
I F	中間周波部	SAW BPF	35 dB (4.5 MHz オフセ ット)

TS.: チェビシェフ M. F.: マキシマリフラット

熱機器となるHPAの搭載される衛星パネルに排熱のためヒートパイプを使用し、動作時でも60°C以下を保つように設計した。

出力側回路部品の耐電力40 W以上を確認するとともに、排熱を確保しパッシブIMの発生がないことを確認した。また、パッシブIMについて、2波入力時にAMEXの出力波によってアンテナを含む出力回路部品で生じるIMが受信系に回り込むことがないことを逆向きの回線の出力スペクトラムを観測し確認した。

#### 3.2.2 電磁適合性(EMC)の設計

AMEXではLバンドの送受信の周波数が1.5/1.6 GHzと接近しているほか、標準的な送信/受信レベルがCバンドで20/-93 dBm、Lバンドで40/-110 dBmと差が大きい。このため、送信波の受信系への回り込み(リングアラウンド)の防止、受信帯域の不要波の送信防止、コンポーネントからの不要な干渉雑音の発生防止及びコンポーネントへの不要な干渉雑音の混入防止に注意を払った<sup>(6)</sup>。

送信出力の回り込みによりLNAが飽和しないよう、例えばLバンドでは、ダイプレクサの減衰を90 dB以上として、LNA入力で-50 dBmまで減衰させるとともに、LNAの増幅率を31 dBと低く設定しLNA自信



の飽和レベルに対し余裕を持たせた。

また、送信出力の回り込みに対し受信信号に対する DU 比を 50 dB 以上確保するようフィルタ設計を行った。Cバンドについても同様な設計を行った。特にLバンドは送受の周波数が接近していることからLバンド出力回路へ帯域阻止フィルタを挿入した。第1表に AMEX で使用したフィルタを示す。

コンポーネントに対する放射干渉雑音及び放射干渉感度は MIL-STD-461 (1541) の RE, RS をベースとして仕様を設定した。ただしアンテナの開口面との干渉があることを考慮して放射干渉雑音はLバンド受信信号帯域では  $-12 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  以下、Cバンドでは  $19 \text{ dB}\mu\text{V/m}$  以下となるよう管理した。

周波数干渉解析によっても受信帯域に落ち込む成分がないことを確認しているが、さらに中継器の  $-30 \sim -40 \text{ dBm}$  以下のマイクロ波を扱う部分、また  $20 \sim 30 \text{ dBm}$  以上のマイクロ波を扱う部分はシャーンを2重カバーでシールドし、金属接触面にはマイクロ波シールドを行うほか、電源ラインには貫通フィルタ（貫通コンデンサ）を多段に用いて干渉雑音の規格を満足させた。

電源ラインの伝導干渉雑音は特に大電力のLバンド HPA についてチョップ雑音及び SCPC 波のビームによる雑音が問題となる。

HPA 電源は、衛星の非安定バス電圧 ( $21 \sim 29.5 \text{ V}$ ) を安定化するとともにリターンアイソレーションをもたせるため、トランスを用いたパルス幅制御の DC-DC コンバータ（チョップ周波数  $30 \text{ kHz}$ ）を用いている。このチョップ雑音を阻止するため電源用 LPF として大容量の2段 L, C フィルタを設け、伝導干渉雑音を  $40 \text{ mA}_{p-p}$  以下に抑えた。また、チョップ雑音の高調波による数 MHz 帯の同相成分の雑音に対してはハイブリッドトランスを挿入し、電源ラインからの干渉雑音を規格内に抑えた。

SCPC 運用時、AB 級に近い動作をするLバンド HPA に入力される複数波のビートにより RF 出力が変動するのにもない電源電流変動が起こる。この電源電流の伝導干渉雑音の抑圧のために、先のL, Cフィルタの遮断周波数は  $550 \text{ Hz}$ ,  $900 \text{ Hz}$  としている。

### 3.2.3 Lバンド LNA 設計

Lバンド LNA は、GaAs FET を用いてアンプ自体の低雑音化をはかり、雑音指数  $1.7 \text{ dB}$  を実現した。また、Lバンドでは大型となり挿入損失の大きいアイソレータを使用せず、消費電力は2倍になるが  $0.2 \sim 0.3 \text{ dB}$  と低損失で小型化が可能であるハイブリッド方式を用いて入力回路をバランス化する方式を採用し、インピーダンスの改善を図った。

## 3.3 その他の設計

### 3.3.1 狭帯域フィルタの設計

フィーダリンクの占有帯域を小さくするため帯域間のギャップを小さくする必要があり、また特にリターン系では不都合な熱雑音をカットする必要がある。このため狭帯域で、方形特性が得られる  $140 \text{ MHz}$  帯の SAW フィルタの開発を行った。帯域幅はLバンドからLバンドへの回線が  $300 \text{ kHz}$  で、他は  $3 \text{ MHz}$  である。SAW フィルタは水晶基板にパターンを蒸着したため特性が安定で、温度変化に対しても周波数の変化は  $1 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  であるが、耐振動特性に注意を払う必要がある。特に  $300 \text{ kHz}$  の帯域用では基板が大型であるため熱歪及び振動の影響を避けるよう基板の接着位置等固定方法の検討を行い加振評価により  $150 \text{ Grms}$  以上のランダム振動に耐えることを確認した。

### 3.3.2 局部発振器

移動体通信では回線設計上低速度のデータ通信が行われることが多いが、この場合衛星系での周波数変動が受信系での特性劣化につながりやすい。このため、AMEX ではヒータを用いた  $60 \text{ MHz}$  帯恒温槽付水晶発振器を採用して従来の通信衛星に比べ周波数の高安定化を図り実測値として  $\pm 2 \times 10^{-7} / -20 \sim 50^\circ\text{C}$  以内の安定度を実現した。

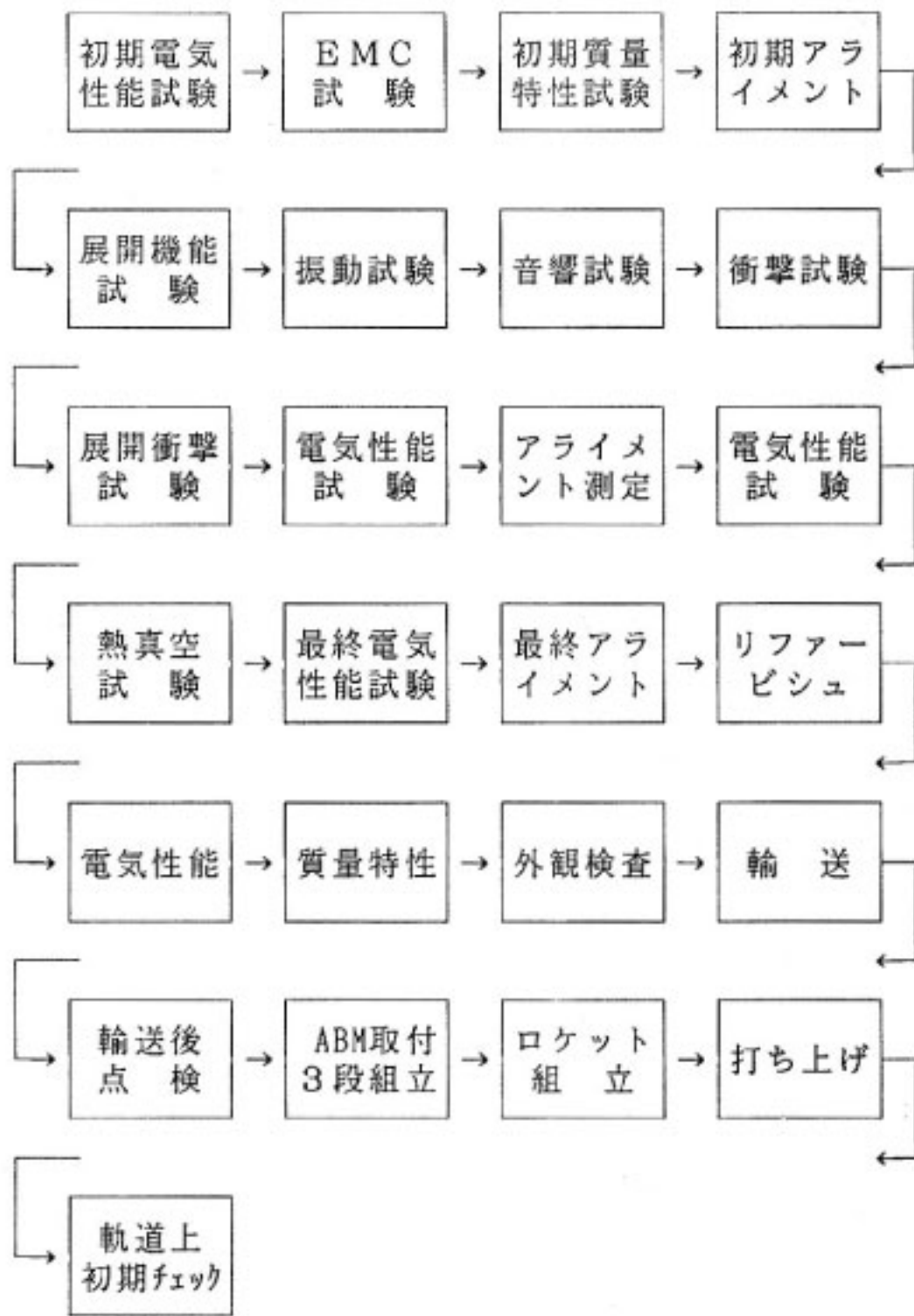
## 4. AMEX の性能試験

AMEX の性能試験は、衛星の組み立て手順に従い各第2表 AMEX 中継器主要試験項目

測定項目	初期電気性能	電磁適合性	温度	最終電気性能
消費電力	○		○	○
ピーク電流	○			
一次電源トランジェント	○			
信号周波数	○		○	○
振幅周波数特性	○		○	○
入出力特性	○		○	○
利得変化幅	○		○	
雑音特性	○			
入出力端 VSWR	○			
群遅延特性	○		○	
帯域外減衰量	○		○	
スプリアス出力	○		○	○
スプリアス感度	○			
不要波出力	○			
2波 IM 特性	○			
総合スプリアス出力	○			
一次電源 EMC*1		○		
コマンド EMC*1		○		
テレメトリ EMC*1		○		
放射 EMC*1		○		

\*1 伝導干渉雑音/感度 \*2 放射干渉雑音/感度





第7図 ETS-V プロトフライト試験フロー

第3表 AMEX 主要チェックアウト結果

	中継器 最終電気性能	衛星搭載 最終電気性能	打上後 チェックアウト
標準出力レベル (dCm)	M/A	M/A	M/A
C/L M1/A1	30. 9/31.58	31.13/31.79	29. 5/30. 5
入力 M1'/	30.42/ —	30.61/ —	29. 4/ —
- 91.5 M2/A2	31.07/03.68	31.39/31.25	30. 8/30. 7
C/C M/A	14. 8/15.59	15.72/16.52	14. 5/15. 4
L/C M1/A1	15.41/15.49	16.26/16.18	15. 1/16. 0
-108 /A1'	— /15.71	— /16.10	— /16. 3
M2/A2	14.98/14.95	15.80/15.66	14. 7/14. 9
L/L M1/A2	31.40/30.88	31.74/31.42	31. 3/30. 6
飽和出力レベル*			
C/L M1/A1	40.44/ —	40. 7/ —	40. 5/ —
M1'/	40.46/ —	40. 8/ —	40. 6/ —
M2/A2	41.55/ —	41. 9/ —	42. 1/ —
L/L M1/	40.41/ —	40. 8/ —	40. 4/ —

\* 2dB 圧縮点出力レベル

段階において実施された。サブシステムレベルでは第2表に示す各種試験及びアンテナ系の電気・機械試験、熱真空試験、正弦波振動試験等が行われた。なお、中継器の振動、熱真空等の環境試験はコンポーネントレベルで実施された。各種性能試験の結果、AMEX に関する設計が良好であることが確認された。各コンポーネントを

組込後、システムレベルの性能試験である ETS-V プロトフライトモデル (PFM) 試験を実施した。この試験ではフライトに耐え初期の性能を有することを確認するため初期電気性能試験から始る各種試験が行われた。第7図に AMEX に着目した PFM 試験の主な試験経過を示す。なお、AMEX に関する試験項目はサブシステムレベルの最終電気性能試験と同様の項目とした。AMEX は衛星搭載後の衛星本体との適合性も良好で、ETS-V PFM 試験においてその特性を維持し、また打ち上げ後の軌道チェックアウトにおいてもその良好な特性が確認された<sup>(6)</sup>。第3表に AMEX 特性について主なチェックアウトの結果を示す。

### 5. む す び

ETS-V 搭載の中継器 AMEX は我が国初の移動体衛星通信専用の中継器であり、本論文で述べたような多くの新規技術を採用して開発された。これら設計、開発の成果は衛星搭載、打ち上げ、静止化後の運用により示された良好な機能、性能として確認された。AMEX の開発の課程で確立された多くの技術は、今後の移動体衛星通信システム検討のベースラインを与えるものとして意義が大きい。今後、AMEX を用いた多様な移動体衛星通信の実験による多くのデータ蓄積が期待される。

### 謝 辞

AMEX について検討、調整、開発に携われた、郵政省、運輸、科学技術庁、CRL、ENRI、NASDA 及び関連メーカーの諸先輩、関係各位に感謝します。

### 参 考 文 献

- (1) 小坂克彦, 石出 明, 近藤喜美夫, “技術試験衛星 V型を用いた移動体衛星通信実験計画”, 信学誌, 6, 9, 8, pp. 808-811 (昭61-08)
- (2) K. Kondo, S. Yamada, S. Miura, S. Nishi A. Ishide, K. Kosaka, and K. Ishizawa, “Development of aeronautical maritime experimental transponder on engineering test Satellite-V”, AIAA 11th CSSC, San Diego (1986).
- (3) 近藤喜美夫, 浜本直和, 石出 明, 星野尾一明, 山田重雄, 二川憲夫, 玉井保男, “ETS-V 搭載移動体通信実験用トランスポンダの設計と特性”, 信学論, B-II, J72-B-II, 7, pp. 343-350, 1989年7月.
- (4) 近藤喜美夫, 山田重雄, 赤石 明, “技術試験衛星 V型搭載用 Lバンドアンテナの開発”, 昭61信学総全大, 688.
- (5) 近藤喜美夫, 山田重雄, 石出 明, 小坂克彦, 永島

敬一郎, 二川憲夫, “ETS-V における電磁適合性”,  
信学技報, SANE87-59 (1988-02).

美夫, “ETS-V 搭載移動体通信機器の基本伝送特性”,  
信学技報, SAT87-55(1988-01).

(9) 浜本直和, 長谷良裕, 山本 稔, 石出 明, 近藤喜

