2. ミッション機器の伝送特性と 塔載アンテナのパターン

2-1 ミッション機器の伝送特性

山本 稔[†], 正会員 五十嵐 通 保[†]
福地 一[†], 森下 洋 治^{††}
安永 啓 一^{††}, 正会員 矢沢 紀 彦^{††}

1. ま え が き

ミッション機器の伝送特性は、衛星が静止軌道上に安定した後初期チェックアウトとして測定され、設計値または打上げ前の地上における測定値に対して許容範囲に入っていることが確認され、その後も約6ヵ月毎に定期チェックとして測定された。

ミッション機器の伝送特性を測定する主な目的は、宇宙環境における衛星搭載中継器の伝送特性とその経年変化を把握し、FM テレビジョン衛星システムに対する適合性を確認することである。

衛星搭載中継器は信号伝送路の主要な一部分を占めており、搭載中継器に許容される伝送特性の規格は、一般に衛星回線の目的と回線の伝送特性を考慮して定められる。特に、BSのように直接受信を目的とした放送衛星システムでは各家庭の個別受信機の負担を軽くするために、搭載中継器および地上の送信設備におけるテレビ信号の品質劣化を極力抑えるように配慮されている。すなわち受信信号の信号対雑音比 (S/N) は衛星からの電波の強度に依在するが、波形ひずみ、非直線ひずみおよび混変調については受信機の特性が支配的であり、伝送路の影響は無視できるほど小さい。また、個別受信の標準的なレベルダイアグラムとして、99%の時間率に対して C/N 14 dB (無評価映像信号の S/N 38 dB) が確保できるように設定されているから、多少の受信レベルの変動があっても十分な S/N を維持できる。したがって、本節で述べる種々

の特性の測定値の多少の変化および数値の大小は受信信号の品質にほとんど影響を与えないが、宇宙環境における中継器の動作状態と経年変化を正確に把握することは、将来の衛星中継器の開発に大きな寄与をするものと考えられる。

以下に述べる諸特性は、性能の良い送受信設備と直径13 mの高利得アンテナを備えた茨城県鹿島町のBS主局において測定された¹⁾²⁾。

2. レベルダイアグラム

レベルダイアグラムは回線設計の最も基本的なパラメーターのひとつである。放送衛星の場合、特に下り回線のレベルダイアとその変化は、地上の受信機に要求される性能と受信信号の品質に直接影響するから、十分に調査する必要がある。BS主局では、常時、主局および衛星の送受信レベルの監視と測定を実施した。衛星のデータはテレメトリー回線を介して取得された。

表1にBS実験で得られたレベルダイアの主要な誤差および変動要因とそのおおよその大きさを示した。最も支配的な要素は、衛星の姿勢変動によって搭載アンテナのビームポインティングが変化することであ

表1 レベルダイアの主要な誤差および変動要因

衛星 (BS)	姿勢変動 { 日 周 短周期	$\pm 2.5 (\pm 3.5)^{1,2}$ dB
	終段TWT出力	$\pm 0.5 (\pm 0.7)$ dB
	受信レベル検出系	$< 0.2^{*3}$
	アンテナ利得 (給電部損失を含む)	$< 1^{*4}$
主局	送信出力	± 0.2 dB
	受信レベル検出系	± 0.3 dB
	アンテナ利得 (給電部損失を含む)	± 0.3 dB

*1 地上の送受信点に依存する。() は上り回線の値。

*2 搭載アンテナのビームポインティング誤差 $\pm 0.1^\circ$ に相当する。

*3 ある温度以上で電力センサーの感度が急激に低下しセンサーによる誤差が数dBに及ぶ。

*4 測定されたレベルダイアからの推定。

[†] 郵政省電波研究所

^{††} NHK 総合技術研究所

"2. Transmmission Characteristics of Mission Equipments and Antenna Pattern; 2-1 Transmission Characteristics of BSE Transponder" by Minoru Yamamoto, Michiyasu Igarashi, Hajime Fukuchi (Radio Research Laboratories, Ministry of Posts & Telecommunications, Tokyo), Yoji Morishita, Keiichi Yasunaga and Norihiko Yazawa (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

図 1 送受信レベルの長期安定度

る³⁾⁴⁾。ビームポインティングの変化による受信レベルの変化量は、搭載アンテナの利得パターンの等高線の密な部分では大きく、粗な部分では小さくなるから、地上受信局（上り回線の場合は送信局）の位置に依存する⁵⁾。BS 主局は搭載アンテナのビーム端（等高線の密な地域）に位置するため、表 1 に示したように姿勢変動による受信レベルの変化が相当大きい⁶⁾が、日本本土の大部分の地域では、この値の 1/2 以下、周辺部で 2/3 程度である。

図 1 に搭載中継器の寿命期間を A～I の 9 区間に分割して測定した送受信レベルの長期安定度を示す。図 1 の測定は、回線設定が標準状態^{6)*}であり、かつ降雨減衰のない日の 9 時 30 分～10 時 30 分(JST)に得られたデータを 1 日当たり 1 サンプル抽出して行った。測定時間を選択したのは、姿勢変動による受信レベルの日周変化および衛星送信出力のセンサー感度の温度による変化の影響を除去して経年変化を調査するためである。各グラフはその測定区間の平均値を、数字は標準偏差(dB)を、括弧内はデータ数を示す。搭載中継器の出力レベルは測定の全期間にわたってきわめて安定していることがわかる（詳細は本節の 4 項、終段増幅器の特性を参照のこと）。

測定区間 G および H は、衛星の姿勢制御系のピッチ

図 2 主局におけるビーコン波受信レベルの日周変化

およびロールの 2 軸のホイールが不具合⁷⁾によって停止し、この 2 軸の姿勢制御をスラスターで実施した時期に対応しており、衛星および主局の双方の受信レベルの低下とそのばらつきの増大をもたらした。図 2 に姿勢制御をホイールで行った場合とスラスターで行った場合のビーコン波の受信レベルの日周変化（レベルの変化量はテレビ信号の受信レベルと等しい）を示してある。

測定区間 G および H を除くと、計算値に対して主局の受信レベルは 1.5～2 dB、衛星の受信レベルは RA チャンネルを除いて 1～2.5 dB、それぞれ低くなっている。しかし、図 2 からわかるように、データの測定は受信レベルの比較的低い時間帯（9 時 30 分～10 時 30 分）に行われているから、これを 1 日の受信レベルの平均値で補正すると、主局の受信レベルはおおよそ 1～2 dB、衛星の受信レベルはおおよそ 1.5～3 dB、それぞれ高くなり、両者とも計算値に近い値になる。図 1 において、RA チャンネルの衛星の受信レベルが他のチャンネルにより 1～2 dB 高くなっている。推定の

* 主局 EIRP: 112 dBm, 送信波: FM テレビ信号または無変調波, 中継器終段 TWT の動作点: 規定の飽和出力点。

図3 受信レベルの短期変動

域を出ないが、原因として衛星における導波管部の損失の見積り誤差、受信レベル検出部の周波数に依存する固定的な誤差などが考えられる。

図3に示すように、姿勢の短周期微小変動による受信レベルの変動もある。各日の受信レベルの測定は単一のサンプルによって行ったから、図2に示した受信レベルの標準偏差は、上述の短周期変動によるばらつきを強く反映しているものと考えられる。

スラスタによる姿勢制御が行われた区間GおよびHを除くと、平均値で見たレベルダイアは全寿命区間にわたって安定しているが、測定区間DとEの間に、衛星および主局の両方の受信レベルに1 dB程度のギャップがあり、その向きは逆になっている。この原因は不明である。

搭載アンテナのビーム端の地域で姿勢変動による地上の受信レベルの日周変化が約 ± 2.5 dBに達する点を除くと、BS実験を通じて確認されたレベルダイアは実用放送衛星回線に充分適用できるであろう。姿勢変動に関しても詳細な解析³⁾が進められており、その成果は実用放送衛星に反映されるであろう。

3. 周波数特性

周波数特性といえば、一般に振幅特性および遅延特性を指す。しかし、BSの搭載中継器のように終段のTWT増幅器が飽和領域で動作している場合、FMテレビ信号の伝送特性に直接影響を与える段階の線形動作部（中継器の受信機入力から励振用低電力TWTの出力まで）の振幅特性は、終段TWT増幅器の飽和特性にマスクされるため、衛星折返し信号を用いて通常の方法で地上で測定される中継器全体の振幅特性に反映されない。他方、周波数特性と密接に関係している微分利得および微分位相(DG, DP)は前述の飽和特性にマスクされないうえ、FMテレビ信号の伝送特性の良い評価基準のひとつになる。以上の理由でDG, DPも周波数特性の1項目として測定された⁶⁾。

3.1 振幅、遅延特性とDG, DP

図4にBS中継器のAチャンネル（帯域幅：50

図4 BS中継器の周波数特性

図5 RF帯とベースバンド帯のDG・DP特性

MHz)の周波数特性の測定結果を示す。これらは衛星折返しの測定値から主局送受信系の特性を差し引いて求めたものである。図中の遅延特性およびDGに見られる約9 MHz周期のリップルは、主局の送受信系で発生するリップルが補正されずに残ったものである。3回または4回の測定結果を比較して経年変化がほとんど認められないことがわかる。図4に示したように中

継器単体の遅延特性が湾曲しており、その結果、DP も同様の形状を示しているが、FM テレビ信号を伝送する場合は、伝送帯域内において遅延特性が平坦になるように地上送信局で遅延等化が行われる。図5は、上述の遅延等化を行った状態で、帯域幅 25 MHz の主局の FM 復調器の IF フィルターを含む RF 系全体で測定した DG・DP 特性 (RF 帯の特性) と、同一の系に FM 変復調器を含む映像端局を接続して測定した DG・DP 特性 (ベースバンド帯の特性) を比較したもので、両者がよく対応していることがわかる。また、RF 帯で測定した DG・DP 特性は帯域の端を除くと、ほぼ平坦になっている。実際に FM テレビ信号の放送を行うときは、プリアンファシスを行うため、映像信号の輝度信号レベルによる FM 変調波の周波数偏移は、プリアンファシスを行わないときの約 1/3 になる。これに対応して RF 帯域の特性に依存するベースバンド帯における DG, DP も小さくなる。エンファシスを行うことにより、映像信号による周波数偏移を 12, または 14 MHz_{ZP-P}, AFC を平均値形に設定した時の系全体 (主局送受信系, 端局系および搭載中継器) の DG・DP 特性は、定期チェックを通じて得られた約 80 の測定例の 9 割以上が、それぞれ 5%, 3° 以下であった。上述の数値に対する搭載中継器単体の寄与量は、中継器単体の DG, DP の測定結果から、それぞれ 2%, 1.5° 程度と推定される。これらの値はテレビ信号の特性としては充分満足できるものである。ちなみに、国際中継のためのテレビ擬似標準回線の規格では DG, DP はそれぞれ 10%, 5° 以下である⁸⁾。

3.2 2 信号法による振幅特性の測定

終段 TWT 増幅器によって線形動作部の振幅特性がマスクされる現象を避けるため 2 信号法による振幅特性の測定を試みた⁹⁾。2 信号法は中継器が周波数特性をもつ線形回路と周波数特性の平坦な非線形回路の縦続接続で表せることを前提としている。図6に A チャンネルの測定結果を示す。図には比較のために通常の方法 (1 信号法) で測定した結果もあわせて示して

図 6 BS 中継器の振幅特性

(a) DG

(b) DP

図 7 DG, DP の計算値と実測値

ある。中継の入力レベルを変えても 2 信号法による振幅特性はほぼ一定の形状を示しており、この測定結果は線形動作部の振幅特性を反映しているものと考えられる。さらに確認のために、この振幅特性の測定結果と 1 信号法によって測定された遅延特性を用いて DG, DP を計算で求め実測の DG, DP と比較したところ、図7に示すように、両者により対応が見られた。

同様の測定と比較を RB チャンネルについても行ったが、2 信号法による振幅特性の形状が中継器の入力レベルによって異なり、そのいずれも 1 信号法の結果とは一致しなかった。また、いずれの振幅特性の測定結果を用いても、計算による DG と実測値との対応は良くなかった。この結果は、RB チャンネルの線形動作部が必ずしも線形動作をしているとは限らないことを示唆している。また、終段 TWT 増幅器の AM-PM 変換特性が影響していることも考えられる¹⁰⁾。

ここで述べた測定は、FM テレビ信号の伝送特性の評価よりも、中継器の特性をより詳細に把握することを目的として行ったものである。

4. 終段 TWT 増幅器の特性

終段電力増幅器として用いられている 100 W TWT は BS 中継器の心臓部であり、後で述べるように多くの特徴をもっている。終段 TWT 増幅器の主要な伝送特性である入出力特性、飽和特性および相互変調ひずみについてはすでに報告されており⁶⁾¹¹⁾、また、その後の測定によって有意な経年変化のないことも確認され

ている。

BS 中継器の3系統(Aチャンネル, Bチャンネルおよび冗長系〔Rチャンネル〕)の100 W TWT 増幅器は, 電力効率と発生熱の自由空間への輻射特性の改善のために工夫がなされているが, 高い出力電力を得るために, カソード電流が多く, かつ電極間電圧が高いこと, その結果として電極が高温になることなど, 過酷な環境での動作を要求される。これらの TWT 増幅器は次の特徴をもっている。

- (i) 低速波回路として結合空洞を用い, 効率を高めるために, 出力段付近で結合空洞内を伝わる電磁波の位相速度を遅くするための速度テーパを採用している。
- (ii) 効率を良くするために, コレクターを4段に分割し, その電位を低速波回路よりも低くする多段電位低下コレクターを採用している。
- (iii) 大きなカソード電流密度で, 長寿命が期待できる含浸形のカソードを採用している。

これまでに衛星に搭載されたことがある大電力の TWT は, BS の100 W TWT 以外に, CTS の200 W (打上後動作時間 20,000 時間)の例¹²⁾があるだけで, 宇宙環境における大電力 TWT の詳細な経年変化のデータは, ほとんど報告されていない。

そこで, ここでは BS に搭載した TWT の構造に由来する特徴が最も顕著に現れる入出力特性の測定結果に簡単に触れた後, 主に宇宙環境における100 W TWT の動作特性の経年変化について述べることにする。

4.1 入出力特性の測定

図8はアンバランス2トーン法によるAチャンネルの TWT 増幅器の入出力圧縮係数 C の測定結果である¹³⁾¹⁴⁾。横軸はおおよそその励振電力を示している。図から C が負となる領域が存在することがわかり, この領域では入出力特性(両軸とも dB 表示)の傾きが1より大きくなる。この傾向は, 図9に示すテレメトリデータを用いて直接測定した入出力特性によっても確

図8 BS 終段 TWT 増幅器の入出力圧縮係数

図9 終段 TWT 増幅器の入出力特性

認できる。このような例は CTS 搭載用に開発された200 W TWT 増幅器の入出力特性にも見られ, TWT の構造に由来するといわれている¹⁵⁾。

4.2 出力安定度

図10に, 実験開始から1981年6月17日までのA, BおよびRの各チャンネルの TWT 増幅器の, テレメトリデータによって得られた出力電力の変化を示す。各データは原則として9時30分(JST)頃のものである。Bチャンネルのデータのうち下線を引いたデータは, 電源投入直後(13時30分JST 前後)の値を, 同日の下線のないデータは前日から連続して動作している状態で9時30分頃測定した値を示している。

図10の出力レベルが図1に示した出力レベルの平均値よりも低くなっているのは, 図1の場合は TWT 出力部と電力センサー間の導波管路の損失を補正しているのに対して, 図10ではこの補正を行っていないからである。

図10から, 電源投入直後の出力レベルは連続動作時の出力レベルに比べて0.3 dB 前後低いことがわかる。Bチャンネルの出力が1979年2月以降多少下がっている点を除くと, 各 TWT 増幅器の出力は, それぞれの TWT の運用期間にわたって安定していると

図10 BS TWT 増幅器出力電力の経年変化

いえる。

4.3 動作特性の経年変化

TWT の動作特性の経年変化は、コマンドサマリーによって、TWT の累積動作時間、および起動・停止 (ON/OFF) 回数を調べ、累積動作時間に対するテレメトリーデータの変化に基づいて整理した。TWT は 1 週間を単位として使用されることが多いので、安定した状態のデータを得るために、原則として、毎週水曜日の午前 11 時 (JST) のテレメトリーデータを収集した。

図 11 に TWT の累積動作時間 (打上前の地上での

表 2 累積動作時間と打上後の ON/OFF 回数の最終値

TWT	使用中止期日	累積動作時間* (時間)	ON/OFF 回数
A	1980 年 6 月 17 日	3277 (791)	533
B	1979 年 6 月 8 日	3541 (920)	321
R	1980 年 5 月 19 日	5989 (1109)	273

* 打上前の動作時間を含む。() 内は打上前の動作時間。

図 11 BS TWT 増幅器の累積動作時間 (打上前の動作時間を含む) と打上後の ON/OFF 回数

図 12 BS TWT 増幅器の動作特性の経年変化

動作時間を含む), および打上後の ON/OFF 回数を示す。表 2 に、最終の累積動作時間、および ON/OFF 回数を示す。

累積動作時間に対するテレメトリーデータの変化を図 12 に示す。図 10 の場合と同様、データは TWT が飽和点で動作しているときの値で、導波管路の損失の補正を行っていない。ボディー電流 (I_b) は、カソード (I_k) から熱放射される電子ビーム、つまりカソード電流の一部がコレクターに到達するまえに低速波回路に捕らえられる電流のことであり、第 1 コレクター電流 (I_{c1}) は、4 段に分割したコレクターのうち、低速波回路に一番近いコレクターの電流である。また R チャンネルの TWT は A・B 両チャンネルの使用状態があり、出力電力および $I_b + I_{c1}$ は周波数特性をもつが、カソード電流は共通であるため 1 本のカーブで示している。なお、カソード電圧 (TWT によって異なり、約 8.1~8.2kV) は、各 TWT に対して、全期間ほぼ ±0.6% 以下の変化であり、TWT 内の真空度の目安であるイオンポンプ電流は、B チャンネルで励振を下げた状態で、やや増加した一時的な例外を除いて、ほぼ一定であったため、図面は省略している。

図 12 から、各 TWT に対しては次のような経年変化が見られる。A チャンネルの TWT は、出力電力、カソード電流ともに変わらず、 $I_b + I_{c1}$ もほぼ一定であり、全期間、安定に動作していた。B チャンネルの TWT は、累積動作時間が約 2,500 時間以降、カソード電流が約 2.4% 減少し、出力電力および $I_b + I_{c1}$ の低下が認められる。R チャンネルの TWT は 2,500 時間前後で出力およびカソード電流がやや低下し、 $I_b + I_{c1}$ が増加している。

以上のように B・R チャンネルでは、カソード電流の低下および、これに起因すると推定される出力の低下現象が見られる。カソード電流の減少の原因として、

- (i) カソードのエミッション能力の低下
- (ii) 高圧電源電圧の低下
- (iii) ヒーター電圧の低下

が考えられる。しかし、カソード電流が低下した時点でもカソード電圧はほとんど変化はなく、(ii) が原因とは考えられない。また (iii) は、ヒーター電圧のテレメトリーデータがないので断定はできないが、TWT を起動した直後にカソード電流が電圧よりも平衡するのが遅いことから判断して、(iii) ではなく、(i) が原因であると推定できる。

しかし、A チャンネルの TWT には、カソード電流の減少が認められなかったため、この原因はカソード

を含浸形にしたことによるものではなく、カソードそのものあるいは製造上のばらつきによるものと考えられる。

以上に述べた TWT の動作特性の多少の経年変化が TWT の寿命に直接関連する兆候とは考えられない。しかし、これらの結果は今後の衛星搭載用大電力 TWT の開発にとって貴重なデータとなるであろう。

5. む す び

以上に述べた諸特性の他に、回線の C/N 、衛星中継器の雑音指数、相互変調ひずみ、LCE* の入出力特性⁶⁾¹⁰⁾および局部発振器の周波数偏差¹⁶⁾などの測定を定期的に実施した。いずれの測定においても許容規格に納まる十分な結果が得られており、経年変化もほとんど見られない。

各チャンネルの TWT 増幅器の運用期間にわたって実施した一連の中継器の伝送特性の測定によって、搭載アンテナのビーム端の受信レベル変動が大きいこと、および高圧電源モジュールの内部放電と推定される不具合によって TWT 増幅器が寿命半ばで送信機能を失った点を除くと、BS ミッション機器の性能と信頼性は実用化に充分耐え得ることが確認された。

一連の実験成果が将来の放送衛星の開発、設計に反映され、より高性能、高安定な放送衛星システムの実

現に寄与することを期待する。

終りに、終始、御指導と御協力をいただいた電波研究所、日本放送協会および宇宙開発事業団の関係各位に深く感謝致します。
(昭和 56 年 12 月 10 日受付)

【参 考 文 献】

- 1) 梶川, 保科ほか: 放送衛星特集 4. 実験用地上施設・設備, テレビ誌, **33**, 10 (1979) 798-804
- 2) 塚本ほか: BS 実験用主送受信局兼運用管制局, 電波研究所季報, **24**, 131 (1978) 855-960
- 3) 下世古, 望月ほか: 衛星に起因するテレビジョン信号受信レベルの変動, 本特集号
- 4) 古津, 野村ほか: Kバンドアンテナパターン, 本特集号
- 5) 福地ほか: 日本全国における 12 GHz 帯高仰角伝搬特性の検討, 信学会技術報告書, AP 79-88 (1979)
- 6) 今井, 小川ほか: 放送衛星特集号 6. 衛星放送実験実施経過と中間報告, テレビ誌, **33**, 10 (1979) 827-830
- 7) 梶川ほか: 衛星の運用と動作特性, 本特集号
- 8) CCIR Rec. 567
- 9) 竹内ほか: BS 搭載中継器振幅特性の測定, 昭和 55 年度信学総合全大予, 2182, 8-209 (1980)
- 10) 森本ほか: 遅延ひずみと AM-PM 変換作用により生じる等価振幅ひずみ, 信学誌, **46**, 9 (1963)
- 11) 山本, 安永: 衛星ミッション機器の伝送特性, 放送技術, **32**, 9 (1979) 61-67
- 12) R. W. Huck, J. W. B. Day: Experience in Satellite Broadcasting Applications with CTS/HERMES, XIth International TV Symposium, Montreux (1979)
- 13) J. P. Laico, et al.: A Medium Power Traveling-Wave Tube for 6000 Mc Radio Relay, BSTJ, **35** (1956) 1285
- 14) 福地ほか: BS 搭載中継器の入出力特性, 昭和 55 年度信学総合全大予, 2183, 8-210 (1980)
- 15) J. A. Christensen, et al.: Development of a 200 W CW High Efficiency Traveling-Wave Tube at 12 GHz, NASA Rep. NASA-CR-134734 (1974)
- 16) 大内, 安永ほか: BS ミッション機器特性の経年変化, 昭和 56 年度信学総合全大予, 2055 (1980)

* Level Control Electronics の略で、衛星中継器の入力レベルの変動を吸収して終段 TWT 増幅器の励振電力を一定に保つための自動レベル制御回路。