てれび
さろん

時代を創った技術

Epoch-making Technology

第28回

放送衛星搭載用TWTの研究開発

山本海三[†], 正会員 森下洋治, 正会員 佐々木誠^{††}

キーワード：進行波管，TWT，TWTA，中継器，熱真空試験，放送衛星

1. ま え が き

TWT (Traveling Wave Tube, 進行波管)といわれても、現在、エレクトロニクス技術者を含め、ほとんどの人は知らないであろう。TWTは1944年、Kompfnerによって発明された、分布定数回路型のマイクロ波増幅用真空管である。ブラウン管、トランジスタなどと並び称され、三大発明の一つともいわれた。

NHKでは1962年頃から、テレビ中継局用のUHF帯TWTの研究を行っていた。1966年頃には、大型アンテナをもつCATVヘッドエンドなどへの放送配信を目的とした衛星の構想が持ち上がり、衛星搭載用4GHz帯TWTの開発研究を開始した。1977年の世界無線主管庁会議(WARC-BS)などITUを中心とした電波法制が整い、12GHz帯を使った直接放送衛星の開発気運が高まっていった。わが国が目指す衛星システムの重要なポイントは、小型パラボラアンテナによる受信機の普及を目指し、チャンネル当たり約100Wと、通信衛星に比べ約1桁高い電力で衛星から送信することであった。当時からすでに、「もうTWTの時代ではない。これからは半導体だ」という声が聞こえてきたが、我々はこの要求に応えることができるのは、高効率化が期待できるTWT以外にはないという信念で、

細々と衛星搭載用TWTの研究を続けていた。

1976年に、12GHz、200WTWTを搭載したカナダの通信技術衛星CTSが打ち上げられ、その後、ヨーロッパでも大電力放送衛星の開発が進められた。1978年には、わが国初の実験用放送衛星(BSE)が打ち上げられた。この衛星の設計寿命は3年であった。これに搭載されたTWTは、CTSにおける開発競争の実績を持つヒューズエアークラフトが開発した。我々には、衛星に搭載できるTWTを提案できるだけの実績はなく、衛星の開発を進める宇宙開発事業団(NASDA)をサポートすることしかできなかった。

その後、1984年1月23日に実用放送衛星を目指したBS-2a(放送衛星2号a、ゆり2号a)が打ち上げられた。この衛星には、BSEの成果を最大限に活用するという、NASDAの基本方針があった。一方、ユーザであるNHKは設計寿命を5年とすることを要求した。そのためには、衛星に積み込む姿勢制御用燃料の増加を図らなければならなかった。これを実現するために、衛星1基当たり3本搭載されるTWTの軽量化が重要な課題となってきた。我々は、主なTWTメーカを調査した結果、トムソンCSFのTWTをNASDAに推奨した。このTWTの重量は、BSE用TWTの6.8kgに比べ、2.9kgであった。

BS-2aは3月23日に現用の送信系統が故障、5月3日に予備系統も故障し、5月12日からの衛星による2チャンネル本放送を行うという当初の計画は、1チャンネルによる試験放送への急

遽の変更を余儀なくされた。

このような事態を招いた原因はTWTにあった。この一連の不具合原因究明のために設置された宇宙開発委員会放送衛星対策特別委員会技術小委員会においては、膨大な資料と多数の関係者の大変な努力が積み重ねられた。新聞はこれら不具合関連記事をたびたび報道し、「もう1系統が生き返れば100億円を取り戻せる」と書いた記事が出る(朝日新聞1984年9月7日朝刊)、一般紙の記事見出しに「進行波管」の文字が躍る(朝日新聞1984年10月4日朝刊)というような状況となった。また、時期尚早論も出た。このような事態にいたり、TWTを生業とする者としては大変な苦痛を味わった。TWTの軽量化は、ろう付けヘリックス回路、パイログラファイトコレクタ電極などの採用という優れた技術によって達成されていた。TWTの不具合原因の究明では、原因がカソード側にあるとするトムソンCSFと、コレクタ側にあるとする我々の見解は、最後まで一致を見ることはなかった。厳しい宇宙環境での信頼性を確保するための、BS-2b用のTWTのスクリーニングのための熱真空試験では、我々は自らの判断基準をもってTWTの選定に臨んだ。BS-2bは、当初計画より遅れて1986年2月打ち上げられ、衛星が地球などによる食に入る期間の運用に問題があったが、その使命を全うした。

長いトンネルと苦い経験を経て、ようやく国産TWTが日の目をみる時がきた。1990年に打ち上げられたBS-3aである。

† リーダー電子株式会社

†† 財団法人NHKエンジニアリングサービス
"Research and Development of Traveling Wave Tubes for Broadcasting Satellites" by Kaizo Yamamoto (Leader Electronics Corp., Yokohama), Yoji Morishita and Makoto Sasaki (NHK Engineering Service Inc., Tokyo)

2. 衛星搭載用TWTの研究開発¹⁾

放送衛星（以下BSと略称）搭載用TWTは、12GHz帯の放送信号を所要の数10～100W程度に増幅する機能をもつ。

TWTの原理的な構造図を図1に示す。電子銃部のカソードを、ヒータにより1,000K近くの高温に維持し、そこから熱電子放射によって得られる電子ビームを、磁石の集束作用により、直径1mm程度のヘリックスの中を通過させ、RF信号との相互作用によって所要のRF出力を得ている。コレクタ部は電子ビームを捕捉する部分で、効率を高めるために4分割し、熱損失を少なくするための設計がなされている。電源と組合せたTWTはTWTA（TWT増幅器）と呼ばれる。

TWTAは、BSに搭載されるミッション機器の中で最も電力消費が大きく、発熱も多い。地上約36,000kmの静止軌道上では、衛星に必要な電力はすべて太陽電池から供給され、また発生した熱は自由空間へ放散する必要がある。このためTWTは信頼性が高

く、高効率・軽量であることが要求される。このような理由により、TWTAはBSのキーコンポーネントの一つとして位置づけられている。

わが国初の実験放送衛星が打ち上げられた1978年に、NHK技術研究所では、「TWTは搭載中継器の性能、信頼性に密接に関係するばかりではなく、衛星開発のスケジュールにも影響を与える重要な機器であり、国産化が必要である」との観点から、すでに1975年から実施していたTWTの高効率化の研究成果等に基づいて、搭載用TWTを国産化するための開発研究を開始した。基本的にはNHK技研が計算機シミュレーションによる電気設計を行い、東芝、および日本電気が構造設計、熱設計等を担当した。初期に開発したTWTの外観写真を図2に示す。

3. BS-2aの故障

放送衛星BS-2は100W、2チャネル（A、B系）の送信が可能で、共通の予備（R）系を含めて合計3系統のTWTA（TWTはトムソン社製、電源とのインテグレーションは米国GE社）で構成する中継器を搭載し、同一構造の

BS-2aと2bの2機からなるシステムである。

BS-2aは1984年1月23日に種子島から打ち上げられ、3月6日から軌道上で各種試験が順調に行われていた。

衛星では、春分および秋分の日を中心にしてその前後にそれぞれ約3週間ずつ午前2時頃を中心に、最大で約70分にわたり太陽電池に太陽が当たらない地球による“食”が発生する。現在のBSでは、大容量バッテリーが搭載可能となったため、食期間中も運用が可能であるが、BS-3までは、食の時間帯で放送を休止する運用が行われていた。

食の継続時間が最も長くなる頃である3月23日、A系統のTWTの起動時に、過電流による保護回路の作動により起動不能となった。その後、原因を明らかにするためのテストも兼ねて数十回の起動が試みられたが、毎回ほぼ同じ状態が繰り返された。このため、4月16日からはA系統を休止させ、予備の系統であるR系統の連続動作が行われていた。

ところがこのR系統は5月3日、動作中に過大電流による保護回路が働いて、TWTを遮断する「トリップオフ」が発生した。その後R系統は再起動されたが、動作継続時間が次第に短くなり、熱容量の小さいヘリックスに流れる電流に増加傾向が現れたため、動作を停止した。

このように、打ち上げ後約2ヶ月（軌道上で起動後17日間）でA系統、起動後約3ヶ月でR系統と、全3系統の内2系統に不具合が発生した。

4. 原因究明と対策²⁾

不具合の原因究明のために同年7月から、衛星製造会社であるGE社で、同一構造の予備衛星BS-2b中継器の試験が開始された。現象が再現するかどうかを、軌道上と同じ環境条件で確認するために、内部を冷却した大きな真空チャンバに中継器を設置し、衛星中継器が食期間中に実際に置かれるのと同じ環境条件を模擬した。これは熱真空サイクル試験と呼ばれ、24時間周

図1 TWTの原理的な構造図

図2 東芝（左）、日本電気（右）

期で約40サイクルについて実施した。

この結果、9サイクル目にB系統のTWTAに、ペDESTAL現象と呼ばれる異常が発生した。これは、電子ビームを流すためのアノード電圧が印加される直前に、電子銃部の絶縁劣化に起因する漏洩電流によりアノードに電圧がかかり、電子ビームが流れ始め、この分だけ電流が底上げ(ペDESTAL)される現象である。同じ現象は、その後R系統の中継器にも発生した。このペDESTAL現象によって、BS-2aのA系統起動時の断現象も説明できることが明らかになった。

詳細な熱解析の結果、軌道上ではカソード温度が25度程度高くなり、カソードからのバリウム放射が多くなったためである。このため、BS-2bのすべてのTWTに、電子銃部外囲器に1.3mm厚の銅の熱シャントを取り付け、さらにヒータ電源電力を95%に切替え可能とした。

ペDESTAL現象が発生したTWTに替えて、大気中で安定に長時間連続動作試験を継続中(10,000時間以上)のTWTに取り替えて熱真空サイクル試験を再開したところ、6サイクル目以降、ヘリックス電流が増加し搭載不可能となった。このことから、高出力TWTAの試験環境がいかに重要であるかを知ることとなった。

5. 運用制限

このTWTは、コレクタ電極の材料としてカーボンが使用されていた。これは、軽量化と2次電子放射の抑制による効率向上のためである。TWTは、熱放射を効率よく行うために、コレクタ部を衛星の外側に突き出すように取り付けられている。このため、コレクタの外囲器および電極温度は、食の休止時に-50度近くまで下がり、食が終わった後の起動時には短時間で200度近くに上昇するため、コレクタ部の伸縮によってカーボン粒子が生成され、これが電子ビームに当たることによる微少放電等が原因でトリップオフすることも確かめられた。この放電は

TWTにダメージを与えるようなレベルではないということで、TWTメーカではマイクロ放電によるSSO(Spurious Switch Off)と呼んでいた。

さらに、無励振時には、熱容量の小さい第3番目のコレクタに電子ビームが集中するため、電極の温度分布の急激な変化に伴う微粒子やガスの放出が原因と考えられるトリップオフが発生し易く、無励振動作は禁止という運用制限が行われた。

以上のような故障は、これまで経験がない初めてのものであったため、「ペDESTAL現象」や「SSO」など聞き慣れない新しい用語が使われたことも特徴である。

6. BS-3への反映

原因究明試験で起きた不具合事項は、当時の通信衛星用TWTが10W程度であったのに比べ、1桁以上大きな出力であり、より高電圧、広動作温度範囲となることに対する精度の高い設計と試験が充分確立されていなかったために起きたものであり、この教訓はBS-3以降の衛星開発に反映されている。

7. BS-3搭載用TWTと中継器の開発

放送衛星3号の具体計画は、BS-2の不具合による曲折を経て、1985年8月の宇宙開発委員会の打ち上げ時期の決定に発している。同年10月7日、通信放送衛星機構(TSCJ)と宇宙開発事業団(NASDA)の間で「BS-3プロジェクトに関する基本協定ならびに「BS-3打ち上げ等委託契約」が締結され、さらに、11月5日、NASDAとNECの間で「BS-3の開発契約」が締結された。こうして、NHK/TSCJ、NASDA、NECの協力の下、国産化率100%の中継器の開発が本格化した。中継器の開発ではEM(Engineering Model)、PFM(Prototype Flight Model)、FM(Flight Model)の3段階方式が採られ、高出力・高発熱デバイスのTWTAについてはさらにPM

図3 BS-3搭載用12GHz 120W TWT
(JAXA提供)

(Prototype Model)を加え、耐環境性能が徹底的に確認された。また、設計寿命7年の確認を目的として、EMを用いたTWTA信頼性評価モデル46台が製作され各種の評価試験が実施された。ここでは120W TWTAを中心に振り返る。BS-3 TWTの外観写真を図3に示す。

BS-3搭載TWTA開発の最大の特徴は、BS-2bの開発と運用の経験を反映した信頼性確認試験である。具体的には、宇宙環境に対するスクリーニングとして、TWTAのみならず中継器に対して設定した1回の食期間に相当する44サイクルの熱真空試験である。NASDAでは熱・構造の板垣春昭、中継器の及川幸揮らが熱真空試験を中核に据えた開発計画を立案し、筆者(佐々木)は1987年12月に出向して中継器グループに加わり開発の推進に当たった。

EMについてはTWTAおよび中継器系の1食期間分44サイクルの運用環境試験、PM TWTAを用いた700サイクルの長期運用環境試験、TWTAを搭載したPFM中継器については認定試験に続けて44サイクルの熱真空試験を2回、1年分、FM中継器についても受入試験に続けて44サイクルを2回実施している。以上の経緯を図4に、また、44サイクル熱真空試験プロファイルの例を図5に示す。大気中の寿命試験は約3年、EM TWTA以降の熱真空試験は、真空チャンバを使いまわし、約2年に亘って間断なく続けられた。

試験の結果から見ると、PFM中継器の運用環境試験から異常と判断した現象が2件、システム認定試験のヘリッ

図4 TWTA・中継器開発の経緯 (JAXA提供)

図5 PFM中継器運用環境試験 (JAXA提供)

クス電流異常によるものが1件、合計3台のTWTAが交換されている。中継器に組み込まれた後に不具合となったTWTAの交換は、評価試験の有効性と継続性の観点から、信頼性確認レベルが同等な代替品を当てることが必須の条件であった。各種・各レベルの試験を抱えたタイトなスケジュールの中で、これらの交換が完全に行われたこ

とを思い起こすとき、メーカーの努力に改めて感動する。また、衛星システム側やGE関係部門との緊密な連携が奏効し、スケジュールインパクトが最小に抑えられ、BS-3のミッション達成に繋がったと思っている。

8. む す び

今日の衛星放送の定着は、BS-3の

成功なくしてはありえなかったといっても過言ではないであろう。BS-3搭載用TWTAの開発は二昔前のことになってしまった。この開発に多大のご尽力をいただいたNECの北爪進氏、本田光氏、小池達也氏、久保英一氏ほか大勢の皆様を、私どもはいつまでも忘れないであろう。

(2005年7月28日受付)

【文 献】

- 1) 森下, 佐々木, 山本: “衛星搭載を目指した12GHz 100W進行波管の開発”, NHK技研月報, 24, 6, pp.222-227 (1981)
- 2) 斎藤成文: “日本宇宙開発物語”, pp.208-229, 三田出版会 (1992)

やまもと かいじょう
山本 海三

1958年、大阪大学工学部通信工学科卒業。同年、NHK入局。UHFおよびマイクロ波電子管の開発研究に従事。1991年、退職。同年、日本電気(株)入社。1997年、退社。1998年、リーダー電子(株)顧問。工学博士。

もりした ようじ
森下 洋治

1966年、大阪大学大学院電子工学科修士課程修了。同年、NHK入局。放送衛星搭載用TWTAの開発研究に従事。1999年、退職。同年より、通信・放送機構横須賀成層圏プラットフォームリサーチセンターにおいて成層圏プラットフォームによる放送システムの研究開発に従事。2005年、退職。正会員。

ささき まこと
佐々木 誠

1972年、東北大学工学部電子工学科卒業。同年、NHK入局。放送衛星搭載用進行波管の研究を経て、1987年、宇宙開発事業団に転出。放送衛星3号中継器の開発を担当。1981年、技研に戻り、ISDB-T伝送方式の研究に従事。ARIBデジタル放送システム開発部会委員長などを務め、現在、(財)NHKエンジニアリングサービス勤務。正会員。