



放送衛星搭載用TWTの研究開発

山本海三 森下洋治 佐々木誠

赤道上空 36,000km の静止軌道に打ち上げられた放送衛星を宇宙の放送所としてここから日本全国にくまなく放送電波を送り込むのが衛星放送です。衛星放送はこの衛星の特長を活かした全国放送として、今や約 1800 万世帯に視聴される準基幹メディアとして成長してきています。

この普及の陰には、放送衛星の研究開発から実用化、そして電波確保に向けた多くの衛星技術者たちの挑戦と奮闘の歴史があります。

今回は放送衛星用キーデバイスである衛星搭載用 TWT の研究開発について、当時 NHK 技研で研究開発を担当した山本海三氏、森下洋治氏、佐々木誠氏に、本誌編集委員の今井一夫が一問一答の形で取材し、当時のご苦勞を紹介していただきました。

.....

【衛星放送研究の幕開け】

—衛星放送のルーツは、1965年当時のNHK前田会長の記者会見における放送衛星打ち上げ構想発表に端を発していると伺います。当時の構想の背景や研究開発の状況はどのようなものだったのでしょうか？

○東京オリンピックを契機に、テレビ放送の普及が進む中で、辺地や離島に残る難視聴の解消が課題となり、地上にテレビ中継放送所を置局するのではなく、衛星電波でこれらの難視聴地域をカバーしようとする構想が掲げられました。これを受けてNHKの技術研究所では1966年頃から、UHF帯やマイクロ波帯放送衛星の研究開発に着手しましたが、衛星本体の研究開発は一研究機関の研究課題としてはあまりにも大きいことから、1968年頃からは衛星を利用する放送システムの研究に転換しました。

—当時のTWTの研究について？

○NHKでは、1962年頃からテレビ中継局用にUHF帯TWTの研究を、1966年頃にはCATVヘッドエンドへの放送配信を目的とした衛星搭載用に4GHz帯TWTの開発研究を開始しています。1977年には世界無線主管庁会議(WARC-BS)で、日本は東経110度の軌道位置と12GHz帯の8チャンネルの周波数割り当てを受けました。これを契機に、12GHz帯直接放送衛星の機運が高まっていきます。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家庭用受信機の普及を目指し、チャンネルあたり約100Wと、通信衛星に比べ約1桁高

い送信電力で衛星から送信することでありました。当時から既に「もう TWT の時代ではない。これからは半導体だ」との声が周囲から聞こえてきましたが、担当者としては「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 以外にない」という信念で衛星搭載用 TWT の研究を続けていました。1978 年には、搭載用 TWT を国産化するための開発研究を開始しています。

【TWT の動作原理】

－TWT の動作原理と、研究を進めていた衛星搭載用 TWT の特徴について教えてください。

○TWT の原理的な構造図を図 1 に示します。電子銃部のカソードを、ヒータにより約 1000K 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出力を得るものです。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ます。電源と組み合わせた TWT を TWTA (TWT 増幅器) と呼んでいます。衛星搭載用 TWT として、効率を高めるために以下の工夫がなされています。

ヘリックスのピッチを出力端付近で巻き縮めることにより、RF 波の速度を遅くし、出力端付近でも電子ビームとの相互作用を強くする速度テーパによる効率改善を図っています。また、コレクタを 4 段の電極で構成し、低速波回路から離れるにしたがって電極電圧を低くし、さらにコレクタ入り口にビーム再集束用の磁界を配置しコレクタの動作効率を改善しています。

初期に開発された TWT を図 2 に示します。

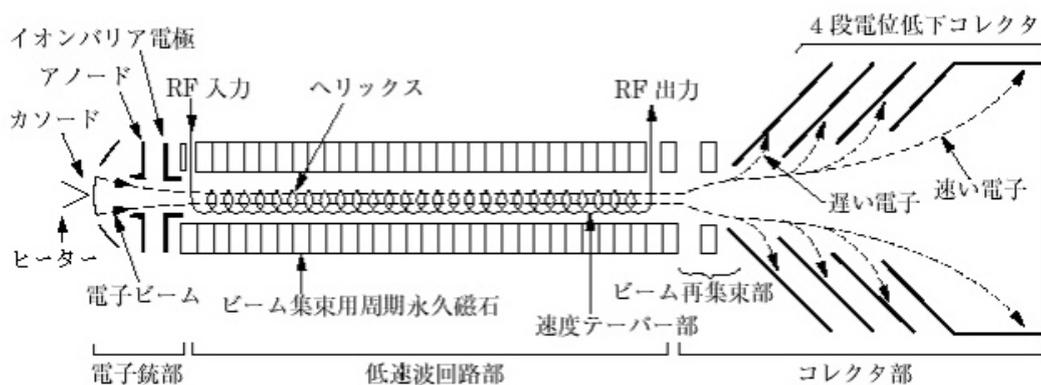


図 1 TWT の原理的な構造図

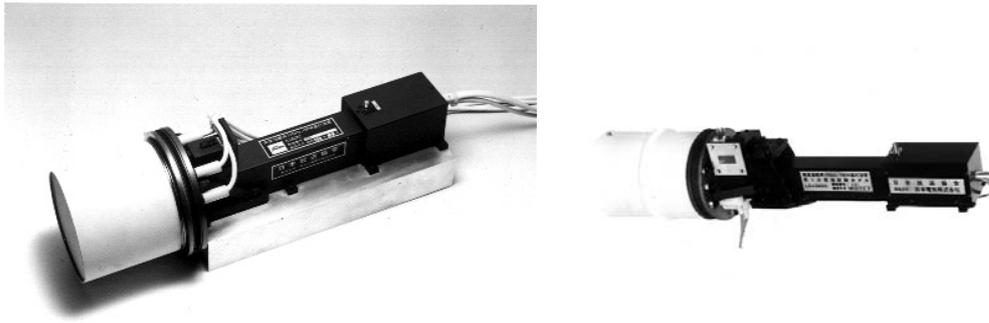


図2 放送衛星搭載用 TWT (左)東芝製、(右)日本電気製

【実験用放送衛星の打上げ】

—1978 年に、わが国初の実験用放送衛星(BSE)が打ち上げられましたが、この衛星との関わりについて？

○BSE は、NHK・NASDA・GE・東芝の業務提携の体制で開発が進められました。

NHK は開発仕様の作成、エンジニアリングモデル TWT の性能評価などを行い、メーカー選定に寄与しました。

BSE は重さ350kg、出力100W、2チャンネル、寿命3年の設計で製作され、1978年4月にアメリカ・フロリダ州ケープカナベラル基地から打ち上げられ、「ゆり」と命名されました。搭載された TWT はヒューズエアクラフト社製でした。

「ゆり」は打上げ1年2ヵ月後に1本の送信系統が、2年後には予備を含めた全ての送信系統が故障します。この故障が、その後の放送衛星の安定運用に向けた試練の始まりでもありました。

【BS-2の打上げ】

—1984年1月に打ち上げられたBS-2aと搭載TWTについて？

○この衛星について NASDA は、BSE の経験・成果を最大限に活かすという基本方針で臨みました。一方、ユーザーである NHK は運用コストを削減するため設計寿命を5年とすることを望みました。そのためには、姿勢制御用の燃料の増加を図る必要があり、これを実現するため衛星搭載用 TWT の軽量化が重要な課題となってきました。

主な TWT メーカーを調査した結果、フランス・トムソン CSF 社の TWT を NASDA に推奨しました。この TWT の重量は、BSE 用 TWT の6.8kgに比べて、2.9kgと半分以下でした。

—打上げ後に BS-2a 搭載のTWTも相次いで故障したと聞いていますが、当時の世間の反応や担当者としての心情などをお聞かせください。

○BS-2a 打ち上げ2ヶ月後の3月23日に現用の送信系統の、また5月3日には予備系統のTWTが故障しました。原因究明作業が続けられる中で、残りの1本のTWTにかけて NHK は5月12

日に試験放送に踏み切りました。

新聞ではこれら不具合関連の記事がたびたび報じられ、「宇宙に消えた札束！1系統が生き返れば100億円を取り戻せる」など、一般紙の紙面に「進行波管」の文字が掲載されるような状況でした。また、時期尚早論も出るなど、TWTを生業とするものにとって心が痛む毎日を経験しました。

—BS-2a 不具合現象と原因は何だったのですか？

○BS-2 の送信系統は、現用 2 系統(A、B 系)と共通予備系統(R 系)で構成され、軌道上には同一構造の衛星 BS-2a と BS-2b の 2 機で冗長系を構成するシステムでした。

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週間ずつ約1ヵ月半の期間、午前2時ころを中心に、最大で約70分にわたり太陽電池に太陽の光が当たらない地球による食が発生します。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、食期間も運用が可能になりましたが、BS-3 までは、食の時間帯で放送を中止する運用が行われていました。

BS-2 搭載の TWT は放射冷却型 TWT で、熱放射を効率よく行うため、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ました。このため、コレクタ部の外圍器および電極温度は、食の休止時には -50°C 近くまで下がり、食が終わった後の起動時には短時間で $+200^{\circ}\text{C}$ 近くに上昇します。放送衛星の TWT は毎年春と秋の年 2 回、食期間の続く約 1 ヵ月半この厳しい動作環境に耐えることが要求されます。

[BS-2a の不具合現象]

BS-2a の最初の不具合が発生した 3 月 23 日は、食の継続時間が最も長くなる頃で、A 系統の TWT が過電流による保護回路の動作により起動不能になりました。その後数十回の起動を試みましたが、毎回ほぼ同じ状態が繰り返されました。このため、4 月 16 日からは A 系統を休止させ、予備の R 系統の連続動作を行っていましたが、R 系統も 5 月 3 日に、動作中に過大電流による保護回路が働いて、TWT 動作を遮断するトリップオフが発生しました。その後 R 系統は再起動するものの、動作継続時間が次第に短くなり、ヘリックス電流に増加傾向が現れたため動作を中止しました。

[BS-2a の不具合原因究明と対策]

不具合原因究明のため、衛星製造会社であるアメリカ GE 社において、同一構造の予備衛星 BS-2b の中継器で試験が開始されました。軌道上と同じ環境条件で不具合現象が再現するかを確認するため、内部を冷却した大きな真空チャンバに中継器を設置し、食期間を模擬した熱真空サイクル試験を24時間周期で40サイクル実施しました。この結果、TWTA にペDESTAL現象や SSO (Spurious Switch Off: 偶発的送信断)と呼ばれる異常が発生し、BS-2a の不具合原因を説明することができました。

ペDESTAL現象は、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)される現象です。詳細な熱解析の結果、軌道上では大気中よりもカソード温度が約 25 度高くなり、カソードからのバリウム放射が多くなり電極を支持する絶縁体に付着したためであると判明しました。このため BS-2b の全ての TWT には電子銃部外圍器に 1.3mm 厚の銅の熱シヤントを取り付け大気中の温度と同程度になるよう対策を行いました。

SSO は TWT の動作中に突然放電が起こり、高電圧保護回路が作動して中継器が断となる現象です。トムソン製の TWT は軽量化と 2 次電子放出を抑制し効率を向上させるため、コレクタ電極の材料としてカーボンが使用されていました。特に食明けの温度が急激に上昇するときには、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小放電等が起こりやすく、これが原因でトリップオフするものです。この放電は通信衛星用の TWT でもしばしば経験していたようで、TWT にダメージを与えるようなレベルでなく短時間の再起動で正常に復帰することから、通信衛星用中継器では自動電源再投入回路をつけて対策をしていたようです。

その後、ペDESTAL現象が発生した TWT に替えて、大気中で 10,000 時間以上の長時間連続動作試験を継続中の TWT に取り替えて熱真空サイクル試験を実施したところ、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りました。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思い知らされました。この教訓は BS-3 以降の衛星開発・調達においても反映されています。

さらに、熱真空サイクル試験を繰り返し行い不具合 TWT を取り除き、残った正常な TWT を BS-2b に搭載し、2 年後の 1986 年 2 月に BS-2b が打上げられました。

1986 年 12 月から、BS-2b を使った 2 チャンネルの試験放送が始まり、衛星放送の目的を難視聴解消とともに、新しい放送サービスのメディアとしても活用していくこととなります。1989 年 6 月には衛星放送は本放送となり、ハイビジョンの定時実験放送もこの衛星を利用して毎日行われるようになりました。

【BS-3 の打上げ】

—その後、BS-2 を引き継ぐ衛星として放送衛星 3 号(BS-3)の打ち上げ計画が具体化します。

BS-3a は 1990 年 8 月、BS-3b は 1991 年 9 月に打ち上げられますが、この衛星には、NHK の研究開発成果が活かされた国産の TWT が搭載されることになりましたね。

○NHK、通信放送衛星機構(TSCJ)、宇宙開発事業団(NASDA)、NEC の協力のもと、国産化率 100%の中継器の開発が本格化しました。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(Prototype Model)を加えて、耐環境性能が徹底的に確認されました。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ました。BS-3 用 TWT の外観を図 3 に示します。



図3 BS-3 搭載用 12GHz 120W TWT (JAXA 提供)

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す。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ります。

EM については TWTA 及び中継器系の 1 食期間分 44 サイクルの運用環境試験、PM TWTA を用いた 700 サイクルの長期間運用環境試験、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け入れ試験に続けて 44 サイクルを 2 回実施しています。

以上の経緯と熱真空試験プロファイルをそれぞれ図4と図5に示します。

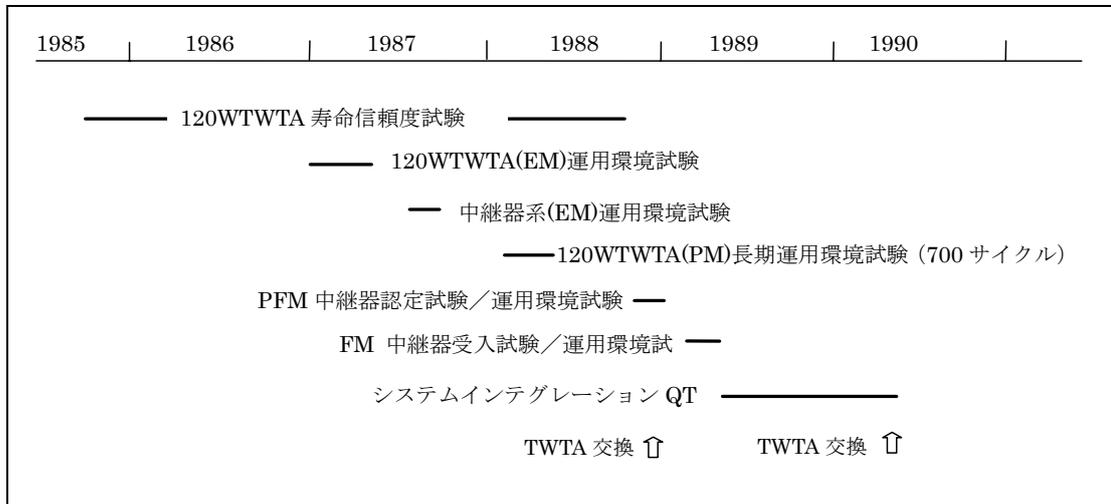


図4 TWTA・中継器開発の経緯 (JAXA 提供)

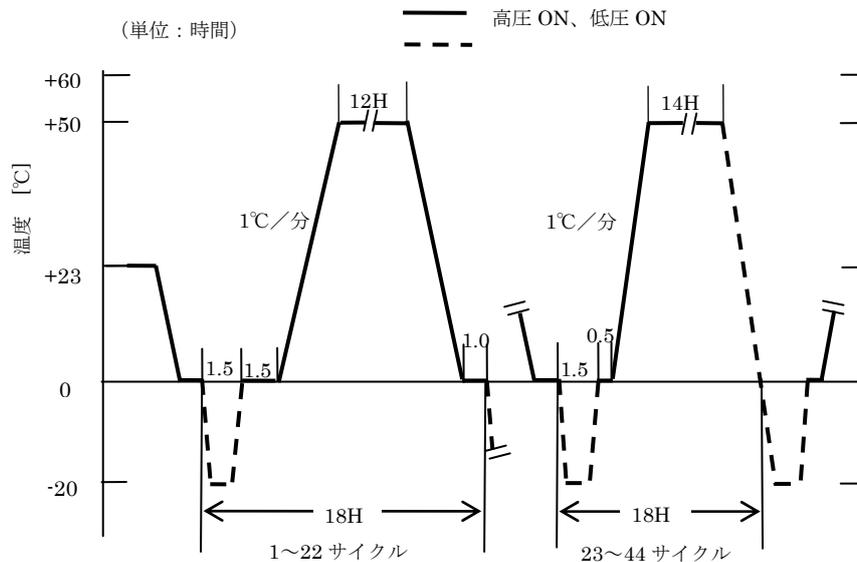


図5 PFM中継器運用環境試験(JAXA提供)

大気中の寿命試験は約3年、EM TWTA以降の熱真空試験は約2年間続けましたが、この結果3台のTWTAが交換されています。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した。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出す時、当時のメーカーの努力に改めて頭が下がる思いです。

—BS-3aを用いて、1990年11月からNHKとWOWOWが放送を始めます。また、1991年11月にはハイビジョンの試験放送も始まりました。

○BS-3は1997年、1998年に打ち上げられたBSAT-1a、BSAT-1bに引き継がれます。アメリカの「スーパー301条」の絡みもあり、BS-3が最後の国産放送衛星となりました。

BS-3aは太陽電池の発生電力が低下し、BS-2bをバックアップに使いながらBS-3b打上げまでの間の放送を確保するなど、担当者としては肝を冷やされましたが、今日の衛星放送の普及はBS-3の成功なくしてはあり得なかったと思っています。



図6 BS-3a イメージ(JAXA 提供)

—放送衛星搭載用 TWT の開発に関わられた、思い出の深い方々を挙げていただくとすると？

○NEC では、GEと縦横に渡り合って指導力を発揮されプロジェクトを推進された北爪進さん。中継器とTWTA を担当された本田光さん、小池達也さん。TWT を開発された牧野紀元さん、久保英一さん。多大なご尽力をいただきました。

実験衛星に始まり、実験・実用相乗りから実用衛星へと舵が切られたNASDAの放送衛星開発の中でご苦労された理事の立野敏さん、BS-3プロジェクトマネジャーの三浦秀一さん、BS-2不具合の経験から熱真空試験のプロセスを組み込んだ板垣春明さん、及川幸揮さんなど多くの方々にお世話になりました。

—最後に、放送衛星搭載用 TWT の研究開発に携わられた感想をお願いします。

○国際的な枠組みの中で、大きなプロジェクトに参加できたことは幸せだったと思っています。

—放送衛星搭載用 TWT 開発にまつわる貴重なお話をいただきありがとうございました。

企画：北爪 進(本誌編集特別顧問)

編集：今井一夫(本誌編集委員)

[山本海三氏、森下洋治氏、佐々木誠氏の紹介]



やまもとかいぞう

山本海三:1958年,大阪大学工学部通信工学科卒業.同年日本放送協会入局.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終了.同年日本放送協会入局,放送衛星搭載用TWT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.



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,日本放送協会入局.放送衛星搭載用進行波管の研究を経て,1987年,宇宙開発事業団に出向し,放送衛星第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.

[参考文献]

- 1) 山本, 森下, 佐々木;“放送衛星搭載用 TWT の研究開発”, 映像情報メディア学会誌, 59, 10, pp. 1424-1427 (2005)
- 2) 森下, 佐々木, 山本;“衛星搭載を目指した 12GHz100W 進行波管の開発”, NHK 技研月報, 24, 6, pp. 222-227 (1981)
- 3) 齊藤成文;“日本宇宙開発物語”, pp.208-229, 三田出版会 (1992)