

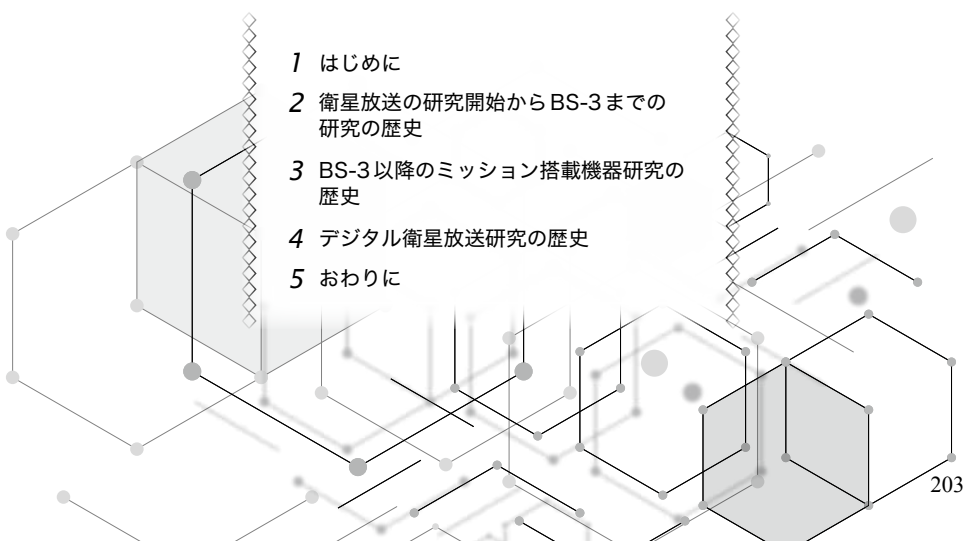
衛星放送の開発から 実現へ



正源 和義

(元NHK放送技術研究所)

- 1 はじめに
- 2 衛星放送の研究開始からBS-3までの研究の歴史
- 3 BS-3以降のミッション搭載機器研究の歴史
- 4 デジタル衛星放送研究の歴史
- 5 おわりに



1 はじめに

衛星放送のもととなった技術は1960年代の衛星国際中継であった¹⁾。1960(昭和35)年ローマオリンピックでは、コマ撮りした画像を低速走査で短波回線により東京へ伝送し、これを日本のテレビ方式に変換し放送に使用した。1964年東京オリンピックでは、静止衛星シンコム3号を使ってアメリカへテレビ画像が伝送された。1965年にはインテルサットI号衛星が打ち上げられ、衛星国際伝送は商用化された。

このような状況で1965年、NHKの前田義徳会長は衛星放送構想を発表した。なお、この前年1964年にABU（アジア太平洋放送連合）が設立されているが、当時のアジア加盟局の要望は開発途上国のための衛星の打ち上げと教育番組提供であった²⁾。ABUのための放送衛星システムの検討や国をあげての放送衛星の開発が、日本での衛星放送の開始やITU（国際電気通信連合）での放送衛星プランにつながっていった。

日本の衛星放送の歴史を図1に示す。実用放送衛星BS-2によって、1984年、日本の衛星放送が開始された³⁾。これが世界で最初の衛星放送

図1 日本の衛星放送の歴史

| 1960年 | 1970年 | 1980年 | 1990年 | 2000年 | 2010年 | 2020年 |
|--------------------|---------------------|---------------------------|--|---|--|------------------------|
| NHK研究開始 (1966年) | BS-E打ち上げ (1978年) | BS-2打ち上げ (1984年/1986年) | BS-3打ち上げ (1990年/1991年) BSAT-1打ち上げ (1997年/1998年) | BSAT-2打ち上げ (2001年/2003年) BSAT-3a打ち上げ (2007年) | BSAT-3b打ち上げ (2010年) BSAT-3c打ち上げ (2011年) BSAT-4a打ち上げ (2017年) | BSAT-4b打ち上げ (2020年) |
| | | 放送開始 (1984年) | | MUSE終了 (2007年) | 放送終了 (2011年) | |
| | | | アナログ放送 | | | |
| | | | | 放送開始 (2000年) | 新4K8K衛星放送開始 (2018年) | |
| | | | | デジタル放送 | | |

としてIEEEマイルストーンによって認められた⁴⁾。2000年12月BSデジタルハイビジョン（HDTV，2KTV）放送が開始され⁵⁾，2018年12月，新4K8K衛星放送（UHDTV，Ultra-High Definition TV）が開始された⁶⁾。

本稿では，1966年の衛星放送研究開始から現在に至るまでの衛星放送の研究の歴史について述べる。特に，BS-3以降，筆者が研究で取り組んできた放送衛星搭載用アンテナについても述べる⁷⁾。

2 衛星放送の研究開始からBS-3までの研究の歴史

(1) 日本における衛星放送の研究開始

1965年8月に衛星放送構想を発表したNHKの前田義徳会長は，翌月，新聞社とのインタビューで，以下のように述べている。



NHK 前田会長の衛星放送構想について伝える『電波タイムズ』記事（1965年9月2日）

- 1965年6月にヨーロッパ放送連合総会に出席した。アメリカのアーリーバードによる衛星中継放送の議論があり，ヨーロッパでは衛星中継放送を前提に議論されていた。人工衛星による放送もしくは世界的中継は時間の問題（実用化の時期）との印象を受けた。
- 欧米に遅れないように，衛星自体が放送のために造られた放送衛星を日本で早く打ち上げる必要がある。

- 衛星放送は、テレビ放送が経済的に全国を100%カバーするための解決策（難視聴解消）になる。
- アジア、アフリカとの結びつきを強固にできる。前年1964年のABU（アジア太平洋放送連合）の第1回総会（シドニー）で、テレビジョンの教育放送、日本からの番組提供、番組交換に人工衛星を使う要望を受けた⁸⁾。

NHKは放送法であまねく全国に放送波を送り届けることが義務づけられている。1961年3月末のNHK総合テレビ、教育テレビの局数はそれぞれ93局と24局、カバレッジは82%と51%であった。1969年3月末のNHK総合テレビ、教育テレビの局数はそれぞれ655局と644局、カバレッジはどちらも95.5%であった。この当時は、年間200局を超える置局の時代であった。このあとも置局は進められ、約3,500局まで達したが、カバー率の改善効果はだんだん低くなっていった。地上の送信所だけで、100%カバーすることが不可能なのは明らかである。このため、衛星放送によりあまねく放送を届けることを実現しようとした。こうしてNHKは会長による衛星放送構想の発表の翌年（1966年）から研究を開始した。NHK総合技術研究所（1971年）『研究史'60～'69』には以下の記述がある。ここには衛星放送の実現に向けて、放送衛星中継器からテレビ信号の伝送方式、さらに家庭用受信機まで、多様な取り組みがなされたことが記されている。

放送衛星の研究

当所としては、放送衛星の将来の利用形態についてのシステム工学的研究を軸に、衛星用テレビ中継器、アンテナなどの搭載機器の調査、素子、部品の宇宙環境における信頼性、太陽電池の能率改善、放送衛星に適した音声およびテレビ信号の伝送方式、衛星放送用の簡易受信機などの研究を進め、アジア放送連合の要請に応える衛星放送システムの提案をはじめアメリカNASAのATS-1号衛星を利用したカ

ラーテレビPCM音声多重伝送などの実験を行い、それぞれ所期の成果を収めて来た。また、衛星放送のための専用周波数帯については、地上放送との両立性、太陽雑音電波を利用した電波伝搬特性の調査結果などから12GHz帯が適当であるという結論に達しており、これは昭和46年に開催される、宇宙通信に関する世界無線主管庁会議に対するわが国の主要な提案内容の一つとなっている⁹⁾。

NHKは、ABU地域（アジア太平洋放送連合地域）のための放送衛星設計を1969年の第6回ABU総会に提案した。このときのABU-12001衛星の軌道位置は、アジアがよく見渡せることから東経110度選ばれた。周波数は4GHz帯、UHF帯、12GHz帯が検討された。

ABU地域のための放送衛星は結局実現しなかったが、東経110度の静止軌道位置は、日本から見ると春秋分の衛星の食¹⁰⁾が午前2時ごろに生じることから、1977年の12GHz帯を利用する放送衛星プランを決めた世界無線通信主管庁会議-放送衛星（WARC-BS）で、日本に割り当てられた。

（2）BS-3までの研究の歴史

日本では、図1に示すように、1978年4月、世界に先駆けて実験用中型放送衛星BS-Eを打ち上げて、1982年1月までの3年以上にわたって実験放送を実施した。

さらに、1984年1月、実用衛星BS-2aを打ち上げた。残念ながら3本搭載したTWTA（進行波管増幅器¹¹⁾のうち2本が軌道上で故障し、1チャンネルの放送となったが電波は定常的に発射され、放送は継続された。BS-2aに引き続いて打ち上げられる予定だったBS-2bは地上でTWTAの試験を念入りに行い、予定より約1年遅れて、1986年2月に打ち上げられ、同年12月からNHK 2チャンネルの定常放送が開始された。BS-2aが打ち上げられた1984年当時の各国の衛星放送導入の状況は以下のよう

なものであった¹²⁾。

アメリカでは、1980年代、衛星放送計画が多く立てられたが、放送衛星よりも送信電力が小さい通信衛星経由で多彩な番組が配信されることからCATVが急速に発展、普及したこと、通信衛星の映像を家庭で直接受信できることから、各社は相次いで撤退していった。衛星放送の実用化という点ではカナダの放送を含む多目的衛星ANIK-C2の低出力の電波（15W）を直径1.2m程度のパラボラアンテナで直接受信するものが世界で最初であった。しかし、契約世帯が伸びず、わずか1年半後に放送を中止した。アメリカで衛星放送が実現したのは、欧州や日本での衛星放送の普及が進行したあとの1990年代であった。

西ドイツ、フランスでは230W送信電力、3チャンネルで同じ仕様の衛星を使い、衛星放送を開始したが、欧州のアナログ衛星放送方式であるD2-MACの受信機が普及しなかった。他方、アストラやユーテルサットの通信衛星を使った低送信出力（50W程度）、多チャンネル衛星放送が成功を取めた。

欧米のこのような状況のなか、日本の衛星放送は、100W級の送信出力、2～4チャンネル、45cm受信アンテナ、低損失コンバーター¹³⁾ というシステムで1984年から継続して衛星放送電波を送出し、成功を取めたことは特筆すべきことである。アメリカの衛星放送は日本から学び、45cm受信アンテナでシステムをくみ上げたといわれる。

衛星は全国を一挙にカバーできるため、放送に最も適している。また、難視聴問題を一挙に解決することができた。当時の衛星放送のテレビ映像は走査線 525本の標準テレビジョンで、伝送方式もアナログで変調はFM（周波数変調）であった。これは、地上放送のAM（振幅変調）より雑音に強く、また電波の反射波による混信がないため、ゴーストのない鮮明な画像を直接家庭に送り届けることができた。なお、音声信号に関しては、デジタル（PCM）符号化したのち、数チャンネル分を時分割多重し、5.727272 MHzの副搬送波を デジタル変調（4相DPSK, Differential Phase Shift

Keying) して映像信号と周波数多重し、FM変調された。音声はすでに高品質な特長を先取りしていた。

放送衛星の電波は、赤道上空36,000kmの静止軌道から地球に向かって照射されるので、どうしても国境を越えて外国にも漏れてしまう。このため、外国衛星との有害な干渉を避けるため、国際的に決められた周波数と軌道を使い、電波の技術基準も国際的に統一したものとしなければならない。このような周波数の分配や、技術基準は国連の一機関である国際電気通信連合（ITU）が行っており、NHKは放送衛星関連の会合に初期の段階から参加し、寄与してきた。12GHz帯（11.7-12.2GHz）放送衛星の場合、プランによって、世界各国に平等に周波数と軌道を与えている。

1977年のWARC-BSで、第一地域（欧州、アフリカなど）と第三地域（アジア、オセアニア）のすべての国に、12GHz帯の周波数と軌道が割り当てられた。日本は、東経110度の軌道位置に、8つのチャンネルが割り当てられた。なお、フィーダリンク（地球から衛星への放送番組の伝送）については、1988年のWARC-ORBで17GHz帯（17.3-17.8GHz）の割り当てが行われた¹⁴⁾。

(3) 焦点となった送信アンテナの開発

次に、BS-2やBS-3に反映された衛星機器の開発技術について述べる。日本の放送・通信衛星の開発は、BS-2、BS-3までは、実験用衛星計画、次に、技術開発と実用の相乗りという形で、国の宇宙開発計画として進められてきた。ユーザー（NHK、NTT）は計画総開発費の60～65%を、国が技術開発費として残りを負担し、宇宙開発事業団が国内メーカーに衛星を発注する形態がとられた。

表1に国産放送衛星の変遷を示す。1990年、1991年打ち上げのBS-3a、BS-3bでは、83%の国産化率を達成した。

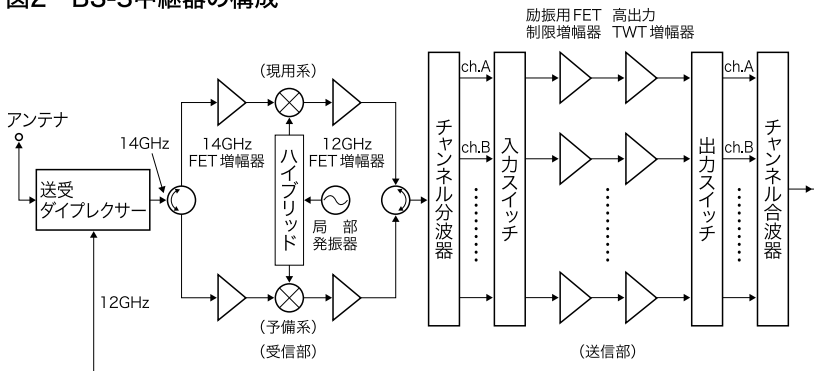
表1 国産放送衛星の変遷

| 名称 | 打ち上げ | | 衛星の概要 | 目的 |
|--------|-------|-------|-------------|---|
| 実験放送衛星 | BS-E | 1978年 | アメリカデルタロケット | <ul style="list-style-type: none"> 衛星放送システムの技術的条件の確立 制御、運用技術の確立 受信効果の確認 |
| 実用放送衛星 | BS-2a | 1984年 | 種子島N-IIロケット | <ul style="list-style-type: none"> テレビジョン放送難視聴の解消など 放送衛星に関する技術の開発 |
| | BS-2b | 1986年 | | |
| 実用放送衛星 | BS-3a | 1990年 | 種子島H-Iロケット | <ul style="list-style-type: none"> BS-2サービスの継承、沖縄、小笠原などの離島を含む日本全土への衛星放送サービス 増大かつ多様化する放送需要に対処 特色 <ul style="list-style-type: none"> (a)高出力化(120W) (b)多チャンネル化(3ch) (c)長寿命化(5→7年) (d)国産技術の採用(アンテナ, 中継器, AKMなど) |
| | BS-3b | 1991年 | | |

(NASDA NOTE 2000より作成)

放送衛星の中継器の例としてBS-3の構成を図2に示す。地球から送られてきた信号はアンテナで受信されたあと、14GHz帯から12GHz帯に周

図2 BS-3中継器の構成



波数変換されて、チャンネル分波器（入力マルチプレクサ）で各チャンネルに分離される。各チャンネルの信号は、各々、進行波管増幅器（TWTA）で増幅されて、チャンネル合波器（出力マルチプレクサ）ですべてのチャンネルがまとめられる。このあと、アンテナを通して日本へ電波が届けられる。

図3にBS-2（1984年打ち上げ）に搭載されたアンテナとその放射パターンを示す¹⁵⁾。

BS-2アンテナは3本の給電ホーンとオフセットパラボラ反射鏡との組み合わせであったが、図3のように、本土、沖縄、小笠原用に1本ずつ円形の給電ホーンを用いている。しかし、沖縄用ホーンをそのビームが沖縄に向くような場所に置こうとしても、本土用ホーンが邪魔するので、離し

図3 BS-2衛星搭載アンテナと放射パターン



(1) BS-2放送衛星の全体像

中央下側に見えているのがアンテナ部分。



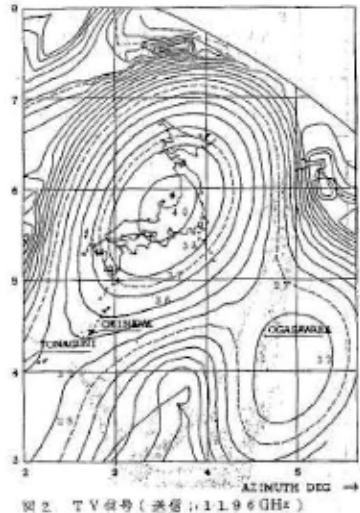
(2) BS-2放送衛星のアンテナ

白いパラボラ反射鏡と3本の給電ホーンの組み合わせ。反射鏡は放送電波を日本国内に集中させるという役割を持つ。



(3) 給電ホーン

給電ホーンとは、放送電波の放射器のことで、円形のホーンが用いられた。BS-2では、本土用、沖縄用、小笠原用の3本が使用された。



(4) BS-2の放射パターン

放射パターンは、衛星のアンテナからどこに電波が届くかを示したもの。この放射パターンからは、沖縄にうまく届いていない(利得値が低い)ことが見てとれる。

て置かざるをえない。その結果、沖縄用ビームは沖縄を外れてしまい、沖縄方向のアンテナ利得（放射電力）が低かった（32dBi程度）。このため、BS-3に向けて、沖縄方向のアンテナ利得をいかに上げるかが課題となった。そこでBS-2（図2）では本土用と沖縄用に分けていた2本の給電ホーンをひとつにまとめ、ホーン開口部の形状を円形から楕円形に変えることを考えた。NHK技研では、BS-3に用いることを目標に楕円開口コルゲートホーン（内側に溝を切った構造）の開発を進めた¹⁶⁾。

図4にBS-3（1990年打ち上げ）に搭載されたアンテナの放射パターンを示す¹⁷⁾。楕円コルゲートホーンが本土と沖縄をまとめてカバーするので、BS-2と比べて沖縄のアンテナ利得が4dB程度向上している（36dBi程度）。

放送衛星搭載用TWTAについては、BS-3で性能と信頼性を向上させた

図4 BS-3衛星搭載アンテナと放射パターン

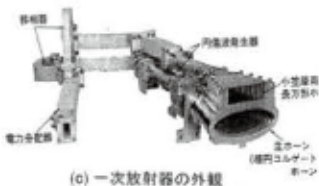


(1) BS-3放送衛星の全体像
中央に見えているのがアンテナ部分。



(2) BS-3放送衛星のアンテナ
パラボラ反射鏡と2本の給電ホーンの組み合わせ。

(b) アンテナの外観



(c) 一次放射器の外観

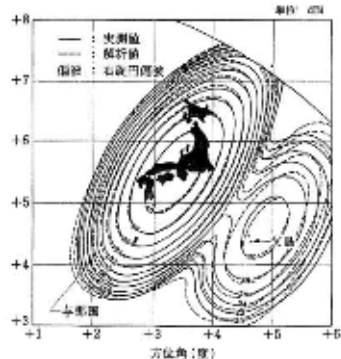


図1.5 BS-3搭載アンテナの放射パターン¹⁷⁾

(4) BS-3の放射パターン
この放射パターンから、本土、沖縄、小笠原に放送電波が効率的に届いていることが見てとれる。

(3) 給電ホーン
BS-3では、本土用と沖縄用に楕円形、小笠原用に長方形の2本が使用された。

TWTAの国産化を目標に、NHK技研で1978年からヘリックス型100W TWTAの開発を開始した(図5)¹⁸⁾。

TWTAは真空管であるため、ヒーターで電極を温めて電子を放出させる。この電子銃がヘリックス(金属の渦巻線)のなかを走行する。電波はヘリックスの線路に沿って伝搬し、電子銃の持つエネルギーが電波に乗り移ることで電波の増幅が行われる。

当時のTWTAの開発目標は、広帯域化(27MHzという帯域幅で動作)、低電圧動作(数キロボルトの電圧が必要)、小型・軽量化、効率の改善と信頼性の確保(故障しないこと)である。これらの目標を達成するためにヘリックスの巻き線のピッチを電子銃の走行速度に合わせて変えたり、ヘリックス内の走行を終えた用済みの電子を集めるコレクターを電子の速度に合わせて4段に分割したりした。試作した100W TWTAは出力141W、効率47%を得た(個体増幅器では20%程度である)。このTWTAについては予備的な振動試験、および、真空チャンバー内での試験を実施した。最も重要な信頼性確保のために、TWTAの連続動作試験を行い、1980年から1983年までで、累積動作時間は約8万時間に達し、それ以後も続けられた。

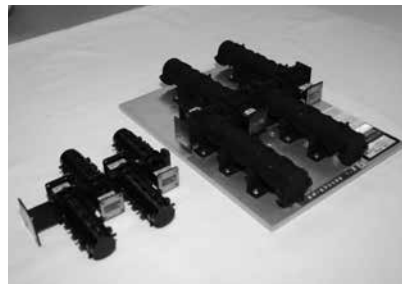
2つ以上のチャンネル信号をまとめたり、逆に、分離したりするマルチプレクサーについては、NHK技研は当時日本に割り当てられた8チャンネル用の開発を進めた(図6)。

地球から放送衛星に送られてく

図5 ヘリックス型100W TWTA



図6 マルチプレクサー



る電波はこの8チャンネルがまとまって受信され、12GHz帯に変換される。こののち、個々の8つのチャンネルに分波し（入力マルチプレクサー）、各チャンネルをTWTAで増幅し、再度8つのチャンネルを1つの電波にまとめている（出力マルチプレクサー）。従来のマルチプレクサー技術では次隣接チャンネル（チャンネル1と3など、奇数番号チャンネル間隔）での干渉量を抑制する必要があった。この目標達成のため、従来実用化されていなかった楕円関数型2重モードフィルタという特性のよい新しい技術を用いたマルチプレクサーの研究開発を進めた。

所要特性を検討した結果、次隣接チャンネルでの最小減衰量を55dBとし、分波器（入力マルチプレクサー）に40dB、合波器（出力マルチプレクサー）に15dBを割り当てた。分波器用として6～8段の、合波器用は4段の楕円関数型フィルタが適していることを明らかにし、従来のチェビシェフ型と比べ段数の低減と帯域内伝送特性の改善を図った。開発したフィルタの特性をもとにマルチプレクサーの設計仕様を定め、BS-3の開発に反映させた¹⁹⁾。

3 BS-3以降のミッション搭載機器研究の歴史

(1) 日米衛星合意の影響

1980年代末ごろから、アメリカはスーパー301条をもとにスーパーコンピューター、木材加工品とともに、人工衛星問題を取り上げ、1990年6月の「日米衛星合意」によって、日本の研究開発衛星以外の政府および政府関係機関の人工衛星の調達については、オープン、透明かつ内外無差別の手続きによって行われることになった。

この「日米衛星合意」は日本の宇宙産業（衛星メーカー）にとって大打撃になったといわれている²⁰⁾。国産実用衛星の開発中断によって、メーカーは実験衛星（開発衛星）を造るか、外国衛星メーカーとの競争に打

ち勝って国内外の実用衛星の受注を目指すことになった。しかし、実験衛星（開発衛星）の場合、実験衛星との位置づけから3年や5年程度の短いミッションを実証すればプロジェクトは終了し、長期運用による宇宙実証技術が獲得できなくなり、また、毎回リスクの高いチャレンジングな目標を掲げる実験衛星の開発に傾注しなければならなくなったのである。

通信衛星、放送衛星はCS-3、BS-3の後継機としてのCS-4、BS-4の計画がなくなり、オープン、透明かつ内外無差別の手続きによって行われることになった。このような背景のもと、1993年4月、BS-3後継機の調達法人として、NHK、日本衛星放送(株)、民間放送局などを株主とする、「株式会社 放送衛星システム (B-SAT)」が設立された。事業内容は、放送衛星の調達、中継器の譲渡またはリース、管制および管理、そのほか付帯・関連する一切の事業（アップリンクなど）である。B-SATは4チャンネル衛星（BSAT-1）を1997年4月までに打ち上げることとされた。

日本では、BS-2、BS-3まではフィードリンクに14GHz帯を、固定衛星業務と調整を行うという条件で使用してきた。BSAT-1からは、17GHz帯のみを使っている。

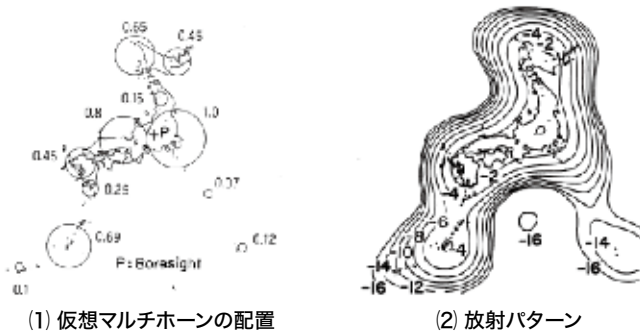
(2) 日本の地形に合わせた成形ビームアンテナの開発

BS-3アンテナは楕円ビームで日本をカバーしているため、海上に放射される電波が多い。このため、衛星から見た日本の地形に合わせた高度な成形ビームを実現するという課題が残されていた。このようなアンテナが実現できると日本向けの衛星放送サービスの改善になるばかりでなく、近隣諸国への干渉電波の強さも弱めることができ、近隣諸国との周波数共用が容易になるという利点もある。NHK技研では、BS-3以降の放送衛星に搭載することを目的に、日本の地形に極めてよく合う高精度な成形ビームを放射する鏡面修整アンテナの研究を行った²¹⁾。

アンテナの放射パターンはアンテナ鏡面に励起される電流の振幅と位相

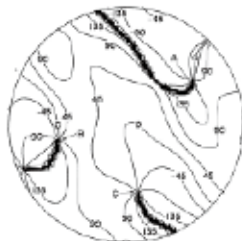
分布の形で決まる。例えば、図7(2)のような放射パターンが欲しいとき、それに対応するアンテナの電流分布をどう求めるか（パラボラアンテナの鏡面に電流をどのように分布させるか）といういわば逆問題の解決が課題であった。筆者らは、パラボラ反射鏡の給電部に、図7(1)のように、仮想的に複数のホーンを並べ、その給電電力を変えることで、図7(2)のように、日本の形に合う成形ビームを得た。仮想マルチホーンの意味は、計算上はこのようなホーンの配置は可能だが、物理的にはホーン同士がぶつかり合うため、そのようなホーンの並びは実現できないことを意味している。このとき、仮想マルチホーンのビームがパラボラ鏡面上にあたってできる電流の位相分布を図7(3)に示す。このあとは、給電ホーンを1本にし、鏡面に凹凸をつけることで、図7(3)の位相分布を実現している。

図7 仮想マルチホーンを用いた鏡面修整アンテナ（反射鏡2枚）

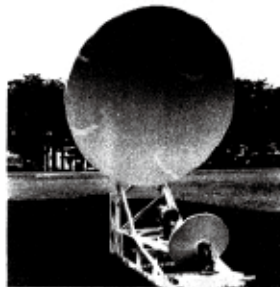


(1) 仮想マルチホーンの配置

(2) 放射パターン



(3) パラボラ鏡面上にできる電流の位相分布

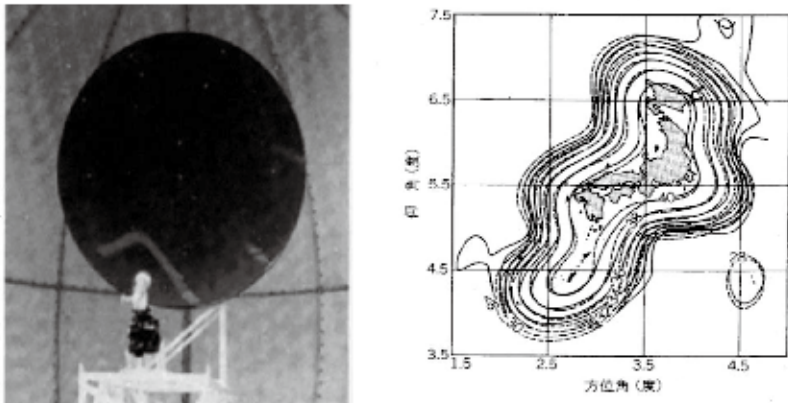


(4) 試作したアンテナ

試作したアンテナを図7(4)に示す。この設計法で、任意形状で、かつ、日本の地形に忠実に沿う複雑な形状の放射パターンを得ることができたことは、画期的なことであった。しかし、図7(3)には3か所、等位相線が密集している部分がある。これらの場所では位相が180度から-180度に変化しており、位相的には連続であるが、実際に鏡面を削るときは不連続な段差になり、加工上の難しさがあった。図7(4)のアンテナを製造したメーカーの方もこの段差のある鏡面の加工にとっても苦労したと、あとになって伺った。

鏡面段差を解消する鏡面修整高度成形ビームアンテナの設計法として、日本の地形に合った放射パターン上に多数の利得拘束点を設け、アンテナ鏡面を細かく分け初めに設定した目標利得に近づけられるように、各点に誘起される電流の位相を順次変えて、位相分布を求めた。この計算量は膨大であり、コンピューターの力を借りて初めて可能となるものであった。このようにして、日本の地形に合った放射パターンを実現する12GHz帯放送衛星用に設計試作した鏡面修整アンテナ（反射鏡1枚）と放射パターンを図8に示す²²⁾。

図8 鏡面修整アンテナ（反射鏡1枚）と放射パターン



破線：計算値，実線：測定値

鏡面修整アンテナは、給電ホーンが1本で構造が簡便であり、かつ、サービスエリアの形に忠実な成形ビームを作ることが可能である。従って、鏡面修整アンテナは放送衛星に最も適した方式であるといえる。鏡面修整技術が開発され、ほぼ任意の自由な形状の成形ビームアンテナが実現できるようになったが、アンテナ技術の発展ばかりでなく、大型の衛星が打ち上げられるようになったこと、膨大な計算を処理できるコンピューターが出現したことが背景にある。日本の放送衛星BSATは1997年打ち上げのBSAT-1以降、今日まで、すべて鏡面修整アンテナが使われている。

4 デジタル衛星放送研究の歴史

(1) BSデジタル放送

2000年12月に開始されたBSデジタルハイビジョン（HDTV、2KTV）放送には、日本が開発したISDB-S（Integrated Services Digital Broadcasting for Satellite）伝送方式が採用されている²³⁾。特徴は以下のとおりである。

1つの中継器でより効率的に情報を伝えるために、トレリス符号化8相位相変調（TC-8PSK）というデジタル変調方式を採用し、周波数帯域幅をアナログ衛星放送の27MHzよりも広い34.5MHzと設定し、ロールオフ率0.35、シンボルレート28.86Mbaudを使い、正味約52Mbpsの情報レートを実現した。ロールオフ率は、誤りなく情報を伝送するための条件を満たすフィルタの減衰特性を表すもので、この値が小さいほど情報はたくさん送れるが、それだけ回路が複雑になる。シンボルレートは、本方式の場合、3ビットのデジタル信号をまとめて送る繰り返し周波数を表し、この数値が大きいくほど情報はたくさん送れるが、電波の帯域幅が決められた値になるように制限される。34.5MHzという帯域幅は世界でも例がないものである。MPEG-2の画像符号化と組み合わせると、放送衛星の1つの

中継器で2番組のデジタル高精細度（デジタルHDTV）放送を可能とした。なお、現在はMPEG-2の性能向上で、1中継器で3あるいは4番組の伝送を行っているチャンネルもある。この際、1つの衛星中継器を共用する複数の事業者が独立にサービスを提供可能とした。また、同一の放送事業者の番組でハイビジョンと標準テレビの混在編成を可能とした。

これにより、例えばスポーツ番組が予定より延伸しても、スポーツ番組と予定されていた番組を混成して放送できるようになった。EPG（電子番組ガイド）や各種データ放送（BML, Broadcast Markup Language）が可能となった。また、強い雨により電波が減衰したとき、画質を落として放送の遮断時間を短くする伝送方式を開発した。

音声についても高能率符号化方式（MPEG-2 AAC）を採用することで、従来の半分の128kbps程度でCD並みの高品質ステレオ放送を実現した。

BSデジタル放送の周波数は、それまでのアナログ放送用の8チャンネルのほかに、WRC-2000の再プランで新たに追加された4チャンネルも使えることになった。WRC-2000ではBSデジタル放送用に34.5MHzのチャンネル帯域幅を日本のプラン割り当ての12チャンネルすべてに適用することが承認された。

(2) 新4K8K衛星放送

2018年12月に開始された新4K8K衛星放送には、日本が開発したISDB-S3（Integrated Services Digital Broadcasting for Satellite-3）伝送方式が採用されている²⁴⁾。特徴は以下のとおりである。

ISDB-Sよりさらに伝送効率を上げるために、ロールオフ率0.03（ISDB-Sでは0.35）、シンボルレート33.7561Mbaud、変調方式を16APSK（16値の振幅位相信号点をとるデジタル変調）、高効率な誤り訂正LDPC（低密度パリティチェックコード）の誤り訂正符号化率7/9とすることにより1中継器当たりの伝送容量約100Mbit/sを実現した。このように、ISDB-S

の伝送容量約52Mbpsと比べて約2倍になったことにより、1中継器で8KTV 1番組、あるいは、4KTV 3番組の伝送を可能としたのは画期的なことである。

新4K8K衛星放送の周波数は、プランの右旋円偏波（電波の進行に伴い電界の向きが右回りに回転する偏波）に加え、11.7-12.2GHzの左旋円偏波（左回りに回転する偏波）も使っている。左旋円偏波は、国際的な取り決めである無線通信規則に定められた調整手続きで日本が獲得したもので、BSAT-4a、BSAT-4bの放送衛星には、右旋円偏波用中継器が12チャンネル、左旋円偏波用中継器が12チャンネル、合計24チャンネルの中継器が搭載されている。

5 おわりに

日本の衛星放送の技術の進展や変遷、歴史を概観した。日本は世界に先駆けて、衛星放送の実現に取り組み、実用化の面でも成功を取めた。これは、いち早く衛星の将来性に気付いた先見の明、キーとなる技術である受信コンバーターなどの研究に取り組んだこと、その結果として小型受信アンテナの使用が可能になったこと、さらには、番組面、サービス開発面での貢献が大きい。

筆者が専門とする放送衛星搭載用アンテナについては、鏡面修整アンテナという新しい技術を導入することで、日本の地形によく合う成形ビームを実現させることができた。これによって、固定ビームについては一定の成果を見た。衛星は放送が最も適したアプリケーションであり、複雑な地形に合わせて日本の国土の隅々まで放送電波を届けるには、構造が簡単で高度な成形ビームが得られる鏡面修整アンテナが最も適している。実際、東経110度の放送衛星には、BSAT-1からBSAT-4シリーズまですべて鏡面修整アンテナが採用されている。なお、今後、12GHz帯より高い周波

数を放送衛星に使用しようとした場合、降雨減衰が大きくなるという問題がある。しかし降雨量は場所によって時間とともに変化する性質があるので、降雨量、降雨減衰量に応じて、地域によって放射電力を時々刻々変えられるような放送衛星が望まれる。このような軌道上でビーム形状を変えられるアンテナが今後の開発課題である。

放送衛星の開発は当初、国策として進められ、日本の技術力の向上に寄与してきた、他方、1990年の実用衛星調達に関する「日米衛星合意」によって、日本のメーカーは、不利な立場に立たされた。しかし、それを克服して、外国から実用衛星製造やロケット打ち上げを受注する例も見られるようになった。今後、日本の技術がより発展し、ますます放送衛星が発展するような取り組みが望まれる。

注

- 1) 遠藤敬二編 (1994) 『NHKにおける宇宙中継に関する技術開発史』兼六館出版
- 2) 野村達治 (1974) 「放送衛星問題の行方」『国際電気通信連合と日本』日本ITU協会
- 3) 日本放送協会 (1984) 「放送衛星2号システムの概要 (放送衛星特集)」『技研月報』Vol.27、遠藤敬二・泉武博・森下洋治・金原晃・高尾廣・今西正徳 (2001) 『放送衛星の基礎知識～BSデジタル放送を中心として～』兼六館出版、横山正基 (2015) 「衛星放送実用化の道のりー安定な衛星放送システム実現までの苦難の道一」『通信ソサイエティマガジン』No.32
- 4) IEEE (1984) "Milestones First Direct Broadcast Satellite Service" https://ethw.org/Milestones:First_Direct_Broadcast_Satellite_Service_1984
- 5) NHK 「テレビ放送の歴史」(NHKアーカイブス)
<https://www2.nhk.or.jp/archives/articles/?id=C0010507>
- 6) 総務省 「衛星放送の現状」(2023年4月)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000730686.pdf
- 7) 正源和義 (2011) 「放送アンテナ技術の変遷」『映像情報メディア学会技術報告』Vol.35 No.41 pp.23-28
- 8) 1964年、前田義徳NHK会長は初代のABU会長に就任した。
- 9) NHK 総合技術研究所 (1971) 『研究史 '60～'69』
- 10) 食の間は放送衛星が地球の影に入るため、太陽電池での電力供給ができなくなる。現在では高機能なバッテリーが搭載されて食期間も衛星放送は継続できるが、当時は食が起きている時間帯は衛星放送を停止していた。
- 11) TWTAは受信した微弱な電波を高出力に増幅する真空管型の機器で、固体増幅器に比べて高出力、高効率なので、今でも12GHz帯放送衛星の増幅器として使われている。しかし、当時はTWTAの製造技術が確立しておらず、世界中で故障事故が相次いだ。
- 12) 正源和義 (2014) 「日本の衛星放送の歴史」電気技術史研究会、HEE-14-04, 2014.1.
- 13) 内海要三 (2007) 「衛星放送受信技術」MWE2007.
- 14) 正源和義 (2020) 「日本の衛星放送 (BS) の周波数～アナログBSから新4K8K衛星放送まで～」『電波技術協会報』No.335
<https://www.b-sat.co.jp/wp/wp-content/themes/b-sat/img/page/broadcasting-satellite/frequency.pdf>

- 15) 日本放送協会 (1984)「放送衛星2号システムの概要 (放送衛星特集)」『技研月報』Vol.27, 梶川実他 (1983)「放送衛星2号搭載用アンテナ (PFM) の開発」『昭和58年電子情報通信学会総合全国大会講演論文集』S7-S8
- 16) 正源和義 (1991)「だ円コルゲートホーンの溝の深さの設計と速度分散特性」『電子情報通信学会論文誌』Vol.J74-B2, No.5, pp.309-316
- 17) 外山昇・正源和義 (1984)「コルゲートホーン～放送衛星搭載用アンテナへの応用～」『技研月報』Vol.27 pp.54-58
- 18) 山本海三・矢沢紀彦・森下洋二・佐々木誠・野本俊裕 (1990)「放送衛星3号の開発に反映された TWTA およびマルチプレクサーの研究」『NHK 技研R&D』No.11 pp.1-7
- 19) 同上
- 20) 高松秀男 (2011)「スーパー 301 条と日米衛星合意」『RFワールド』No.15
- 21) 正源和義・王丸謙治 (1990)「鏡面修整オフセット複反射鏡による放送衛星搭載用成形ビームアンテナ」『電子情報通信学会論文誌』Vol.J73-2, No.10, pp.528-535), 正源和義・西田勇人 (1992)「鏡面段差をなくした放送衛星搭載用鏡面修整複反射鏡成形ビームアンテナ」『電子情報通信学会論文誌』Vol. J75-B2, No7, pp.447-4556
- 22) K. Shogen, H. Nishida, N. Toyama "Single Shaped Reflector Antennas for Broadcasting Satellites", IEEE Trans. Antennas & Propag., Vol.40, No.2, pp.178-187 (1992), 正源和義・西田勇人・外山昇 (1992)「放送衛星搭載用1枚鏡面修整アンテナ」『NHK 技研R&D』No.22, pp.15-26, 正源和義 (2012)「放送アンテナ技術の発展とスーパーハイビジョン時代への課題」電子情報通信学会アンテナ・伝播研究会報告 (2012年1月18日)
<https://www.ieice.org/cs/ap/wpdata/history/lecture/rekishi201201.pdf>
- 23) ARIB:「衛星デジタル放送の伝送方式」, ARIB STD-B20, 2001.5, ITU-R: "RECOMMENDATION ITU-R BO.1408-1, Transmission system for advanced multimedia services provided by integrated services digital broadcasting in a broadcasting satellite channel", 2002.
- 24) ARIB:「高度広帯域衛星デジタル放送の伝送方式 (ISDB-S3)」, ARIB STD-B44 2.1版, 2016.3, ITU-R: "RECOMMENDATION ITU-R BO.2098, Transmission system for UHDTV satellite broadcasting", 2016.



正源和義 (しょうげん・かずよし)

東北大学 工学研究科情報工学専攻修士課程修了。博士 (工学)。
NHK放送技術研究所にて、放送衛星システム、アンテナ伝搬技術、伝送技術の研究に従事し、特に放送衛星搭載用成形ビームアンテナ実用化に貢献。NHK技術局、B-SATなどで、ITU-R (国際電気通信連合 無線通信部門)、ABU (アジア太平洋放送連合) などの国際対応に従事。WRC-2000 (世界無線通信会議) の12GHz帯放送衛星再プランに寄与。