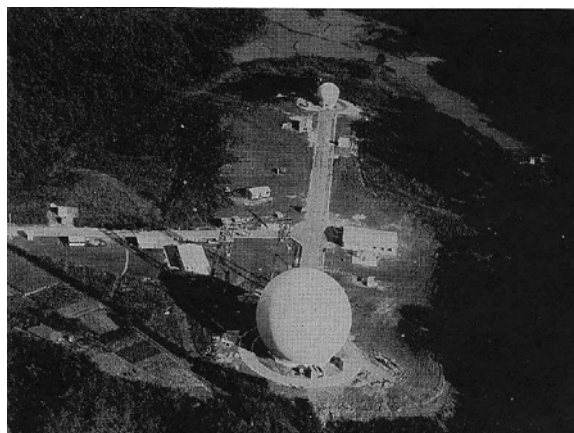


衛星通信地球局アンテナの開発小史

金沢工業大学 別段信一

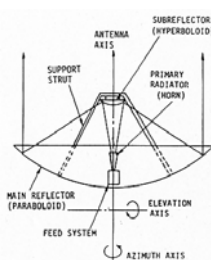
人 工衛星を中継局とした大陸間の遠距離通信、いわゆる、宇宙通信方式の実用化研究が 1960 年に始まり、周回衛星を追尾する機能が不可欠で、大口径の反射鏡を持った種々のアンテナが開発された。わが国は、カセグレンアンテナの開発を行い、1963 年に世界で始めて、KDD 茨城衛星通信実験所で実用化した。この写真はその時の実験所の全景写真で、手前の大きなレドームの中に直径 20m の通信用カセグレンアンテナが収納され、奥の小さなレドームに直径 6m の追尾用 4 ホーンモノパルスアンテナが収納されており、6m のアンテナで衛星を追尾し、その追尾データにスレーブして 20m アンテナが衛星を補足する方式である。下名は、1963 年に三菱電機に入社し、このアンテナの現地試験に参画し、以降の KDD の地球局アンテナのほとんど全ての開発・設計および製作に参画した。KDD 殿のリーダーシップのもと、開発・実用化したアンテナを概観します。



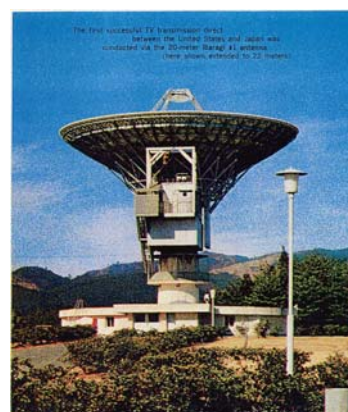
▲ 1963 年 KDD 茨城衛星通信実験所で実用化した直径 20 メートルの衛星通信用のカセグレンアンテナ

茨城第1アンテナの開発

このアンテナは 20m 通信用カセグレンアンテナで、幾何光学的に設計されたものであり、主反射鏡は回転放物面鏡、副反射鏡は主反射鏡の焦点と一次放射器の開口中心を焦点とする回転双曲面鏡である。一次放射器は円錐ホーンアンテナで、副反射鏡に大半の電波が受け渡されるような開口径の比較的小さなホーンを使用しており、いわゆる、ファーフイルド形設計で、アンテナ開口能率は 50% 前後で周波数特性が大きなものであった。カセグレンアンテナは、英国のパラボラアンテナに比べ低雑音特性が得やすく、送信機や受信機などを主反射鏡の頂点近くに低損失で設



- ・カセグレンアンテナ（日本が初めて実用化）
- ・幾何光学的設計
- ・受信機アクセス良（Tx,Rx 共 EL-R.J. 使用）
- ・キングポストマウント



茨城第1アンテナ（20m）

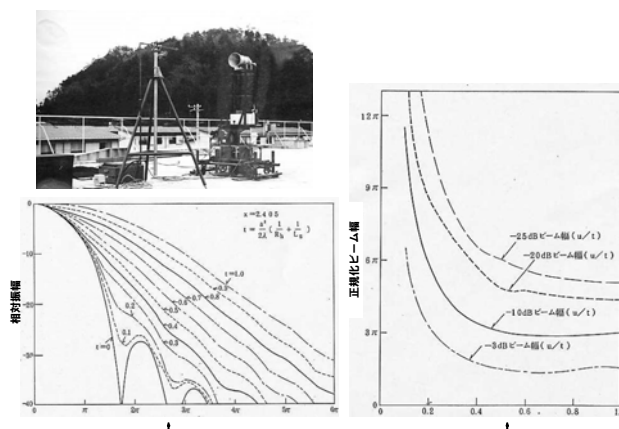
▲ 衛星通信用のカセグレンアンテナ
茨城第1アンテナ

置でき、米国のホーンリフレクタアンテナに比べ機械構造系が簡単で製作が容易であったので、大型アンテナの主流になり、わが国が世界のリーダーシップをとり続けきた。アンテナマウントは Az-EI 形でキングポスト形式、駆動方法は油圧駆動である。送信機と受信機は EI(仰角)ロータリージョイントを介して上部通信機室に設置され、保守・運用の利便が図られている。

受信性能 G/T と送信利得の最適設計法を確立

20m通信用カセグレインアンテナの特性

向上のために、直径を22mに拡大し、4GHz 帯と6GHz 帯の周波数特性を改善する設計法の確立が必要になった。まず、円錐ホーンからの放射パターンを、任意の副反射鏡位置で開口分布法を用いて解析し、ホーンの寸法・形状と観測位置及び波長で決まるtパラメータとu(角度)パラメータで現したユニバーサルパターン(振幅・位相)を求め、24/15 GHz 帯の模型実験で検証した。副反射鏡のエッジレベルを-10dB 程度にした場合、パラメータを0.4 以上にすれば、6/4GHz 帯の広い周波



▲ 円錐ホーンアンテナの特性

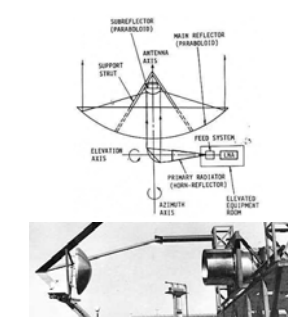
数範囲で位相パターンがあまり変化せず、カセグレインアンテナの広帯域化が可能なが判った。また、副反射鏡からの反射パターンも解析し、主反射鏡からの漏れ電力を定量的に計算できるようにして、受信 G/T 比と送信利得とをバランスよく設計する最適設計法が確立された。これらに基づき、22mアンテナはニャーフィールド形カセグレインアンテナとして設計された。この結果、ICSC(通信衛星暫定委員会)の標準地球局アンテナ規格:運用仰角で、G/T 比 $39.0 + 20\log(f/4)$ を満たした。

茨城第2アンテナの開発

茨城第2アンテナは、直径 27.5mのモディファイドカセグレインアンテナで、一次放射器に円錐ホーンレイフレクタを使用し、導波管形ロータリージョイント無しでアンテナの仰角回転を受けずに送信機・受信機を設置できるので、低損失化が図れ、保守・運用の利便が図れる方式のアンテナである。この施設は、ICSC が商業衛星通信局に対して新規に設定した規格を満たすものである。

円錐ホーンリフレクタのファーフイルドの放

射特性は解析されていたが、副反射鏡位置のようなニャーフィールドの特性解析は行われていなかった。等角写像によりその開口分布を求め、開口分布法を用いて放射特性を解析した。その結果を、24/15GHz の模型実験で検証すると共に、副反射鏡位置での振幅・位相パターンも測定した。



- モディファイドカセグレン
- ・24/16GHzで振幅・位相パターン測定
 - ・LNA等仰角回転無し
 - ・ヨーク・タワーマウント
 - ・油圧駆動



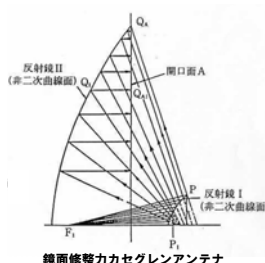
▲ 茨城第2アンテナ (27.5m)

当時は、位相パターンは研究されていないので、位相パターン測定器は無く、導波管回路、可変減衰器と可変移相器を組み合わせブリッジ回路を組み、導波管プローブを回転させ、回転角度1点ずつ測定し、周波数特性も1点ずつ測定するため、24時間連続で3ヶ月の月日を要した。これらの研究結果に基づき、アンテナの最適設計を行った。なお、4GHz帯の副反射鏡からのスピルオーバー電力による雑音温度上昇を抑えるために、副反射鏡周縁にレイトレーシングで設計したスカートを追加した。衛星追尾は、円形導波管の高次モード(TM_{01} 、 TE_{01})波を追尾誤差信号にする高次モード追尾方式を開発して使用した。アンテナマウントは、Az-EI形で、円錐ホーンリフレクタの中心軸をEI回転軸に一致させられるヨーク&タワー方式を採用し、更に、Az(方位角)回転部の中心に導波管やケーブル類を通すために、中空に出来るコンバインドベアリング方式を使用した。アンテナの駆動は油圧駆動方式である。

メキシコオリンピックの国際中継で活躍

このアンテナは、KDD山口第1アンテナと同時開発された鏡面修整カセグレインアンテナで、メキシコオリンピックの国際中継を行った32mアンテナである。

カセグレインアンテナは、主・副反射鏡の2枚の反射鏡を有するので、それらの鏡面形状を2次曲面から変形してアンテナの開口分布を任意の分布に出来る。これはソ連のDr.B.Ye.Kinberがかなり一般的に提案したものであるが、その設計理論が示されていないかた。エネルギー保存則、スネルの法則および



- ・鏡面修整の実用化
- ・高能率・低雑音化
- ・電気サーボシステム実用化
- ・山口第1アンテナと同時開発



▲メキシコ納32mアンテナ

光路長一定の条件を用いて連立微分方程式を導き、主・副反射鏡の鏡面修整理論を作り、36/24GHz帯の模型実験で検証し、確立した。これにより、従来、開口能率が60%程度であったものを、75%台に向上させられ、4GHz帯の雑音温度も5K程度改善された。

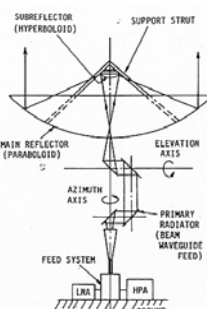
また、従来、油圧駆動方式で油にまみれて保守・運用していたが、サイリスタなどのパワー半導体の開発が進んだので、サイリスタを用いた電気駆動・サーボシステムを開発して使用した。これ以降、サイリスタやトランジスタを用いた電気駆動になった。

4回反射ビーム伝送給電カセグレインアンテナの実用化

従来のアンテナでは、給電装置、低雑音増幅器などはAz(方位角)回転を受ける通信機器室に收容されていたが、将来の通信需要増大に対処できる拡張性、保守・運用の利便と経済性向上などから、全ての電子機器を地上に固定した電子機器室にウエーブガイドラン無しで設置可能なアンテナ方式が要求された。この要求に対処するために、4回反射ビーム伝送給電カセグレインアンテナを開発し、直径29.6mの茨城第3アンテナに使用し、世界で始めて実用化した。アンテナペデスタルを大きく、将来拡張可能な電子機器室にするために、アンテナマウント方式としてレール(直径16.4m)車輪形マウントを開発した。

4回反射ビーム伝送系の伝送効率を高めるには、それを給電する円錐ホーンの放射パターンが回転対称でなければならない。この条件を満たすために、6/4GHz 帯のそれぞれの帯域 500MHz にわたる広帯域な特性を持つコルゲートホーンを開発する必要があり、リング装荷形コルゲートホーンを開発した。また、ビーム伝送系には、ビームを伝送軸近傍に集束させる非対称な反射鏡を使用するので、その非対称鏡面により発生する交差偏波成分を打ち消す必要がある。茨城第3アンテナでは、この交差偏波

成分が少し残留し、4GHz と 6GHz のビーム軸および追従誤差信号の NULL 方向が少しずれていた。この経験をふまえ、非対称鏡面の交差偏波成分を完全に相殺できるビーム伝送系を開発し、アンテナ開口能率を 75~80% まで向上させた。この形式のアンテナは、米国コムサット社がコンサルタントした世界の大型アンテナの標準仕様にした。



- ・4回反射ビーム伝送給電の実用化（世界標準）
- ・LNA・HPAを地上に固定
- ・コルゲートホーン開発
- ・レール車輪形マウント
- ・電気サーボシステム使用



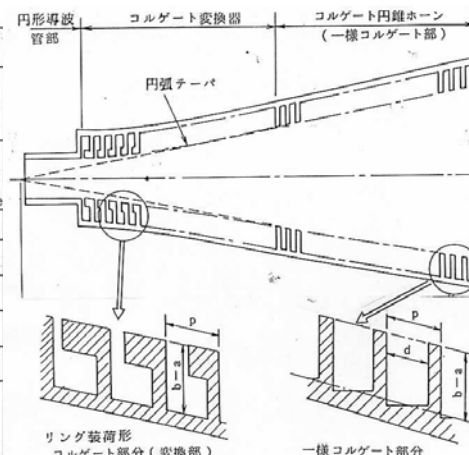
▲茨城第3アンテナ

リング装荷コルゲートホーンアンテナ

回転対称な放射ビームを有する円錐ホーンとして、複モードホーン、誘電体装荷ホーンおよびコルゲートホーンがあるが、最も広帯域な特性を持つものはコルゲートホーンであるが構造が複雑で重たい。複モードホーンと誘電体装荷ホーンは帯域は少し狭いが軽量にできるので、両者ともインテルサット衛星のグローバルビーム用アンテナとして使用された。円錐導波管とコルゲートホーンとの接続部で導波管伝送モードからハイブリッドモードに広帯域にわたり変換するために、コルゲートホーンの鰭にリングを追加し、コルゲート溝の呈するインピーダンスが広帯域にわたり容量性になるようにしたもののがリング装荷コルゲートである。これにより約1オクターブにわたり -30 dB 以下の交差偏波特性を実現した。

	円錐ホーン	複モードホーン	コルゲートホーン
形状			
分布			
帯域	広帯域	約 5 %	1 オクターブ
対称性	劣る	良い	優れている
サイドローブ	劣る	良い	優れている
交差偏波	-18~20 dB	-25 dB 以下	-30 dB 以下
ビーム内電力	劣る	良い	優れている
備考		誘電体装荷ホーン、フレーヤアイリスホーン	

▲ホーンアンテナの特徴



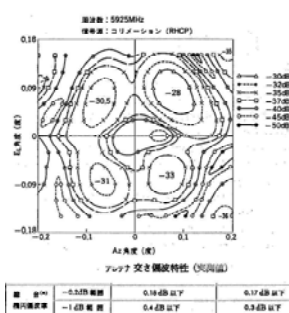
▲コルゲート円錐ホーンアンテナ

直交2偏波による周波数再利用

インテルサットは増大する衛星通信の需要に対処する為に、直交2偏波による周波数の再利用方式を導入した V 号系衛星を打ち上げ、その衛星系の追跡・管制、軌道上衛星試験およびそれにアクセスする地球局の性能試験に使用する管制局を整備した。この局のアンテナの仕様条件は極めて厳しく、標準 A 地球局の条件に加え、6/4GHz 帯の各 500MHz の帯域にわたり楕円偏波率 0.2dB 以下、任意直線偏波と円偏波で任意の周波数で自動追尾でき、それらを瞬時に変更できることが要求された。

この TTC & M 局アンテナは直径32mで、茨城第 3 アンテナの改良形で、3 枚の非対称鏡面と 1 枚の平面鏡を用いて交差偏波成分を相殺できるビーム伝送給電・鏡面修整カセグレンアンテナであり、酸性雨対策としてアンテナの構造部材を従来の H 型鋼に代えて全てパイプにしている。このアンテナの送・受信ビームと追尾用 NULL 方向のビームアライメントは任意の偏波に対して 0.002 度以内、アンテナ開口率率は 6/4GHz 帯の各 500MHz にわたり 78%/80%以上であり、広角度放射パターンも CCIR Rec.465 の勧告レベルを十分満たしている。

楕円偏波率 0.2dB 以内の要求を満たすために、OMJ(直交モード結合器)を用いて、送信波と受信波とを分離して偏波変換し、偏分波器で直交2偏波成分を取り出す方式の給電装置を開発した。任意偏波に対処するために、差動形 180 度位相差板と 90 度位相差板とを組み合わせた偏波変換器を使用し、給電装置の楕円偏波率を 0.08dB 以下、アンテナ全体で 0.18dB 以下の特性を実現した。



▲TTC&M局アンテナ

- ・直交2偏波共用化
- ・非対称鏡面による交差偏波相殺
- ・衛星利用地球局偏波特性試験法確立
- ・全パイプ構造使用

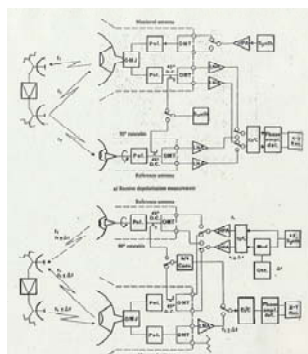
衛星利用偏波特性の測定法

地球局アンテナの楕円偏波率測定に、信号源として衛星を用いると、良好な衛星でも 0.3dB の楕円偏波成分がベクトル加算されるので、楕円偏波率 0.2dB を検証することができない。このため、楕円偏波率 0.12dB 以下でその偏波楕円の長軸を回転できる直径8mの偏波基準アンテナを作り、衛星と地球局アンテナの偏波特性の和の値のベクトル(振幅と位相)で測定し、偏波基準アンテナの

偏波楕円の長軸を回転させて衛星の偏波特性もベクトルで測定して、その両方から地球局の偏波特性を求める方法を開発した。この方法は、インテルサット V 号衛星にアクセスする地球局の認定試験にも使用された。



▲山口TTC&M局アンテナ
(楕円偏波率: 0.2dB以下を実現)

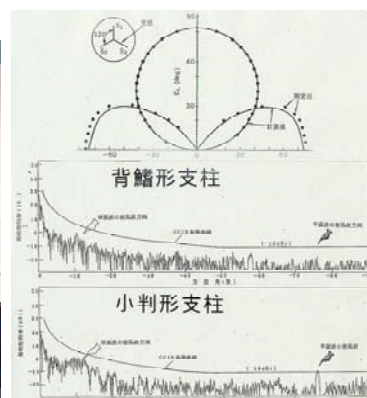
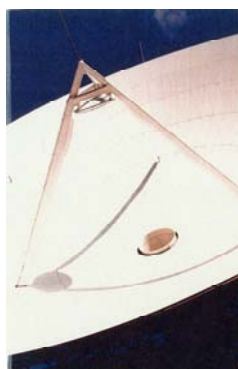


衛星利用地球局偏波特性試験法確立

(衛星を介した楕円偏波率の測定法を確立)

副反射鏡支柱を工夫して広角度放射特性を改良

アンテナの副反射鏡を支える支柱による回折・散乱波が特定方向の広角度放射パターンのサイドローブレベル、特に交差偏波パターンのサイドローブレベルを上昇させる。これを制御するために、副反射鏡支柱からの回折・散乱波をレイトレーシング法とGTD(幾何光学的回折の解析)法を用いて解析し、支柱に2段階の鰭を GTD 法で回折・散乱波が主ビーム近傍に集まるように設計した。設計された副反射鏡支柱は山口第2アンテナや茨城第4アンテナに使用され、主偏波のみならず交差偏波の広角度放射パターンが CCIR Rec.465 の勧告を満たすことが確認された。



▲副反射鏡支柱からの散乱波の制御

KDD地球局アンテナの特性例

	茨城第1アンテナ		茨城第2アンテナ		山口第1アンテナ		山口第2アンテナ	
アンテナ形式	ファーフィールド形 カセグレンアンテナ		モデファイド形 カセグレンアンテナ		鏡面修整形 カセグレンアンテナ		ビーム給電(4レフ)形 カセグレンアンテナ	
マウント形式	A ₂ -E _L ヨークタワー形		A ₂ -E _L ヨークタワー形		A ₂ -E _L ヨークタワー形		A ₂ -E _L レール車輪形	
駆動方式	油圧駆動		油圧駆動		油圧駆動		直流モータ駆動	
衛星追尾方式	6mアンテナスレーブ追尾		モノパルス追尾		モノパルス追尾		モノパルス追尾	
アンテナ直径[m]	22		27.5		27.5		34	
性能	送信	受信	送信	受信	送信	受信	送信	受信
利得 [dB] (測定周波数 [MHz])	58.1 (6390)	55.9 (4170)	62.83 (6000)	59.16 (4000)	63.3 (6000)	60.1 (4000)	65.6 (6000)	61.9 (4000)
開口能率 [%]	36	51	62.7	62.1	73	77	82	80
給電系損失 [dB]	0.50	0.52	0.11	0.22	0.10	0.21	0.18	0.22
アンテナ雑音温度 [G/T](測定仰角[度])	—	37.4 (30)	—	42.0 (5)	—	43.2 (5)	—	45.1 (5)
楕円偏波率 [dB]	1.4	0.9	1.0	1.3	1.3	1.5	0.25	0.28
入力電圧定在波比	1.04	1.15	1.10	1.19	1.09	1.18	1.12	1.15
周波数帯域 [MHz]	6390±12.5	4170±12.5	6175±250	3950±250	6175±250	3950±250	6175±250	3950±250

KDD 衛星通信所の典型的なアンテナ特性を示したものが本表であり、アンテナ開口能率の改善経緯や楕円偏波率、給電装置の損失改善の経緯が判る。なお、山口第2アンテナの給電装置には、直交2偏波で運用でき、降雨による楕円偏波率の劣化を補償する回路も組み込まれている。

海事衛星 MARECS の追跡・管制局

これは、茨城の海事衛星 MARECS の追跡・管制局の写真であり、C/L バンド共用アンテナは 1.6/1.5GHz と 6/4GHz とを共用できるように両周波数帯で動作するコルゲート鰭を2重にし、副反射鏡にLバンドのスピルオーバー電力を低減し、それを有効活用できるようにレイトレーシング法で設計したスカートが付いている。C/L バンド共用のため、給電装置は低順位分波方式で設計している。



VHF送信 C/L 共用TT&C Lバンド海事衛星 VHF受信
▲茨城（MARECS）TT&C地球局アンテナ

追尾方式の比較

これは衛星追尾方式のトレードオフした表であり、下名が電子情報通信ハンドブックに記載したものである。

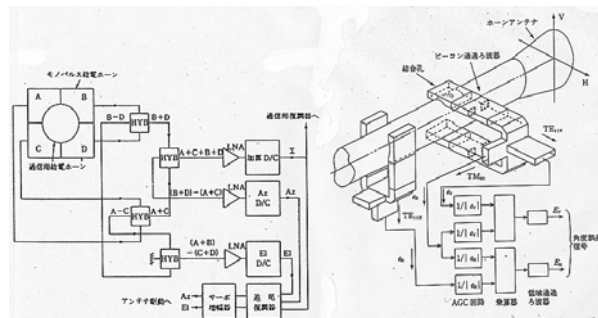
追尾方式の動作原理と特徴

方式	ローピング方式		モノパルス方式		プログラム追尾方式
	コニカルスキャン形	ステップトラック形	単一ホーン形	4ホーン形	
動作原理	1次放射器をアンテナ軸回りに回転させ、アンテナビームをコニカルに振り、各位置の振幅比較により衛星方向を検出する方式。	アンテナ全体をビーム幅の1/20程度のステップ幅で動かし、前後の振幅を比較し、試行錯誤的に衛星方向を検出する方式。	アンテナが衛星方向からずれたときに発生する高次モード波と、基本モード波との振幅・位相比較により瞬時に衛星方向を検出する方式。	4個のホーンをアンテナ軸回りに配置し、各ホーンの受信電波を振幅位相比較により瞬時に衛星方向を検出する方式。	衛星の位置情報を外部から入手するか、計算機で求め、その情報に従ってアンテナを指向させる方式。
特 徴	長 所	長 所	長 所	長 所	長 所
	短 所	短 所	短 所	短 所	短 所
特 徴	長 所	長 所	長 所	長 所	長 所
	短 所	短 所	短 所	短 所	短 所

衛星追尾方式の原理

この図は衛星追尾方式の原理を示したもので、初期にはコニカルスキャン方式が使用され、4ホーンモノパルス方式が考案された後はあまり使用されていない。

5ホーンモノパルス方式は4ホーンモノパルス方式の改良形であるが、4ホーンの形状が異形になるので偏波特性を良好にするための細工が必要である。高次モード追尾方式は単一ホーンで追尾が可能であるため、アンテナ放射系の設計に制限を与えないので、衛星通信地球局アンテナに多用されている。特に、ニャーフィルド形、ホーンリフレクタ給電方式および4回反射ビーム伝送給



▲追尾方式の原理（１）

▲追尾方式の原理（２）

この表は、下名が各種反射鏡アンテナをトレードオフしたもので、独断と偏見が書かれている。

方式		軸 対 称 形 ア ン テ ナ			オ フ セ ッ ト 形 ア ン テ ナ	
		単一反射鏡形	複 反 射 鏡 形		単一反射鏡形	複 反 射 鏡 形
		パ ラ ボ ラ 形	カ セ グ レ ン 形	集束ビーム給電形	ト ー ラ ス 形	カ セ グ レ ン 形
特 徴	長 所	構成が簡単。	- 鏡面修整により高能率化可能(70~80%)。 - パラボラ形より雑音温度、放射パターンがよい。	- 集束ビーム給電系で超広帯域設計が可能。 - 給電装置、送受信機が地上に固定でき、保守・運用性が最もよい。	- 主反射鏡を動かさずに±25°程度の衛星に対応可能。 - 多ビーム化が可能。	- 高能率(80%以上)、低雑音。 - 放射パターン、VSWRがよい。 - 主反射鏡を水平設置すれば風荷重軽減可能。
	短 所	- 開口能率が低い(50~60%)。 - 受信機などの保守・運用性が最も悪い。	1次放射器の周波数特性が大きい。 - 受信機などが仰角回転を受ける。	- 構成が大規模。 - 交差偏波識別度が少し悪い。	- 開口能率が低い(30%程度)。 - 交差偏波識別度が最も悪い。	構成が最も複雑で、全天駆動形アンテナは不向き。

Space Japan Review, No. 49, October / November 2006