

■4群 (通信工学) -2編 (アンテナ・伝搬)

6章 開口面アンテナ

■4群 - 2編 - 6章

6-1 開口面アンテナの基礎概念

(執筆者：田中祥次) [2010年5月 受領]

アンテナの放射電磁界が、ある有限な幾何学的面上の電磁界によって生じていると考えられる場合、その面をアンテナの開口面 (Aperture)、そのアンテナを開口面アンテナ (Aperture Antenna) と呼ぶ。この種のアンテナとしては、図 6・1 のように、ホーンアンテナ、反射鏡アンテナ、及びレンズアンテナ (Lens Antenna) がある。ここでは、ホーンアンテナ及び反射鏡アンテナについて述べる。

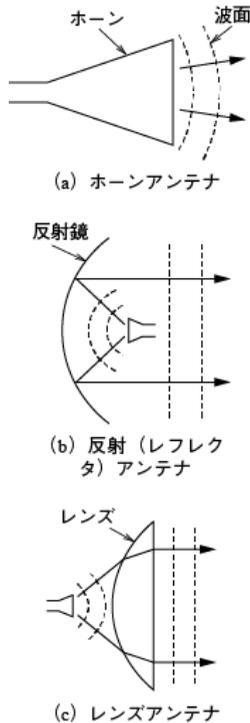


図 6・1 開口面アンテナ¹⁾

■4群 - 2編 - 6章

6-2 ホーンアンテナの基本形式

(執筆著：田中祥次) [2010年5月 受領]

6-2-1 概要

ホーンアンテナ (Horn Antenna) は電磁ホーン (Electromagnetic Horn) ともいわれ、方形や円形の給電導波管の一端を図 6・2 に示すように徐々に広げて所要の開口をもたせたものである。単体の放射器として用いられるほか、反射鏡アンテナやレンズアンテナの一次放射器 (Primary Radiator) として用いられる^{2), 3)}。ホーンアンテナはインピーダンス特性が広帯域にわたって良いことも特長である。表 6・1 にホーンアンテナの各種形式を示す⁴⁾。

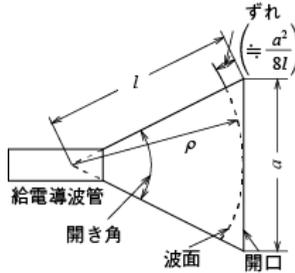


図 6・2¹⁾

表 6・1 ホーンアンテナの各種形式¹⁾

モード	単一モード		複数のモード			ハイブリットモード	
名称	ストレート ホーン	ステップ形	マルチ フレア形	フレア アイリス形	誘電体装荷形	コルゲート ホーン	誘電体 集束形
断面 形状							

6-2-2 角錐ホーンアンテナ

角錐ホーンアンテナ (Pyramidal Horn Antenna) は、図 6・3 に示すように方形導波管を徐々に広げていったアンテナで、方形導波管の基本モード TE₀₁ 波で励振される。

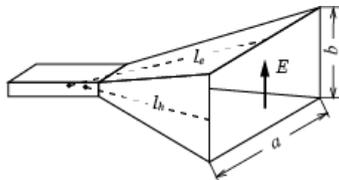
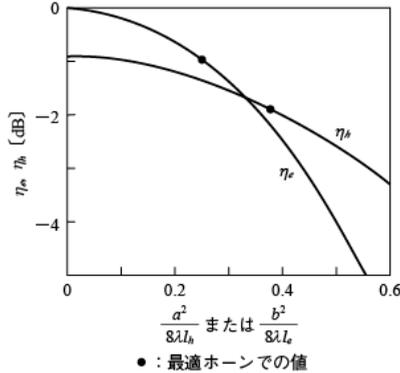


図 6・3 ホーンアンテナ¹⁾

正面方向利得 G は

$$G = 10 \log_{10} \frac{4\pi ab}{\lambda^2} + \eta_e + \eta_h \quad [dB] \quad (6 \cdot 1)$$

で与えられる. ここで, η_e, η_h は開口率 (Aperture Efficiency) で, 図 6・4 にその値を示す.



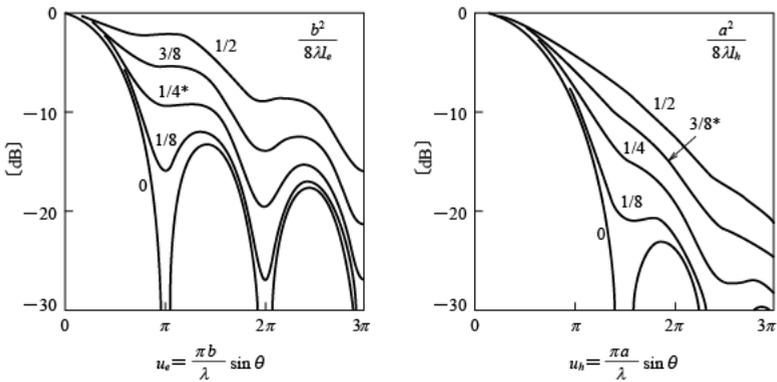
● : 最適ホーンでの値
図 6・4 角錐ホーンアンテナの開口率¹⁾

ホーン (Horn) のフレアの長さ l を一定とし, 開口径を変えたとき, 利得が最大となる開口径がある. これを最適ホーンという. このとき, 開口面での位相のずれは H 面で $3/8$ 波長, E 面で $1/4$ 波長であり,

$$a = \sqrt{3l_h \lambda}, \quad b = \sqrt{3l_e \lambda}$$

利得 G_{opt} は

$$G = 10 \log_{10} \frac{ab}{\lambda^2} + 8.08 \quad [dB] \quad (6 \cdot 2)$$



(a) 角錐ホーンアンテナの放射パターン (E面) (b) 角錐ホーンアンテナの放射パターン (H面)

* : 最適ホーンの放射パターン

図 6・5 角錐ホーンアンテナの放射パターン¹⁾

である。正規化した放射パターンを図 6・5 に示す。角錐ホーンアンテナは、その寸法より利得が正確に計算できるため、標準利得アンテナとしても用いられている。

6-2-3 円錐ホーンアンテナ

円錐ホーンアンテナ (Conical Horn Antenna) は、図 6・6 に示すように円形導波管を徐々に広げたもので、円形導波管の基本モード TE_{11} 波で励振される。

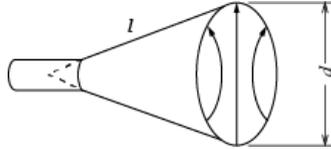


図 6・6 円錐ホーンアンテナ¹⁾

利得 G は

$$G = 10 \log_{10} \frac{\pi d}{\lambda^2} + \eta_c \quad [\text{dB}] \quad (6 \cdot 3)$$

で与えられる。ここで、 η_c は開口率で、図 6・7 にその値を示す。開口径 d に対して利得が最大となる最適ホーンは、開口面での位相のずれが $3/8$ 波長のときで、

$$d = \sqrt{3l\lambda}$$

である。このときの η_c は -2.82 dB である。円形導波管の基本モードである TE_{11} モードで励振された場合、H 面のビーム幅が E 面よりも広く、H 面のサイドローブが低くなる。また、 45° 面の交差偏波レベルも高い。

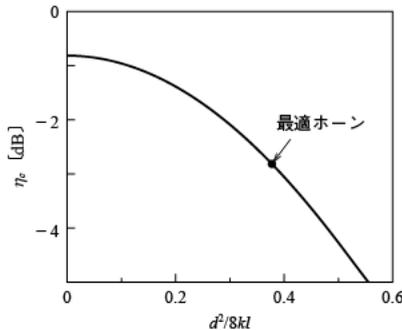


図 6・7 円錐ホーンアンテナの開口率¹⁾

6-2-4 複モード円錐ホーンアンテナ

円形導波管の基本モードである TE_{11} モード波と高次モードの一つ TM_{11} モード波の適切な合成により低い交差偏波レベルで E 面と H 面のビーム幅が等しい放射パターンが得られる。

複モード円錐ホーンアンテナ (Dual-mode Conical Horn Antenna) は、最初、ポッター (Potter)⁵⁾

によって円形導波管内にステップ状の不連続部を設ける構造で提案され、次いでホーン内壁に誘電体スリーブを装荷するもの⁶⁾、ステップに代えて複数のフレアを用いたもの⁷⁾、及びアイリスとフレアを用いたもの(フレア・アイリス形ホーン(Flare Iris Horn))⁸⁾、などが提案され実用されている。アイリスの代わりに誘電体で支持したリングを装荷したフレア・リング形ホーンも提案されている⁹⁾。図6・8(a)に各種複モードホーンの構造を、また図(b)に両モードの電気力線の様子を示す。複モードホーンでは、 TE_{11} モードと TM_{11} モードの位相差を一定に保つ必要がある。ステップ形は数%、誘電体装荷形は20%程度の比帯域で良好な指向性を維持することができる¹⁰⁾。

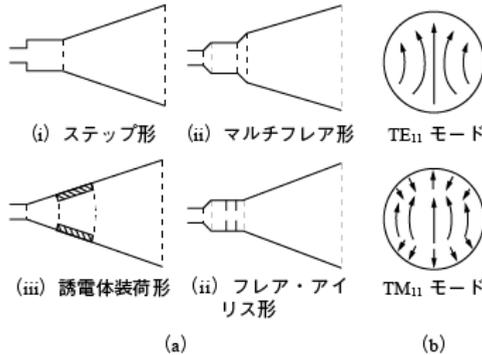


図6・8 複モード円錐ホーンアンテナ¹⁾

6-2-5 コルゲートホーンアンテナ (Corrugated Horn)

図6・9(a)に示すようにコルゲート円形導波管を徐々に広げ、断面形状が円形で軸対称なホーンをコルゲート円錐ホーンアンテナ (Corrugated Conical Horn Antenna)^{11), 12)} という。反射鏡アンテナの一次放射器によく用いられており、約1オクターブの周波数帯域にわたって軸対称ビームと良好な交差偏波特性を有する。このホーンは、コルゲート円形導波管の基本ハイブリッドモードである EH_{11} モードを伝搬させるものであり、ホーンの開口面電界分布は図6・9(b)に示すように交差偏波成分がない。コルゲート導波管の歯の高さが約1/4波長になると、 EH_{11} モードの開口面電界分布は半径方向にガウス分布状になるとともに、周回方向に変化のない軸対称な形となるので、その指向性は低サイドローブで交差偏波成分の少ないものとなる¹³⁾。

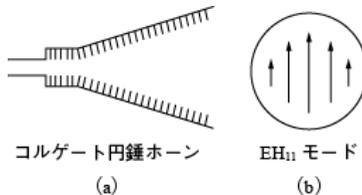


図6・9 コルゲート円錐ホーンアンテナ¹⁾

■4群 - 2編 - 6章

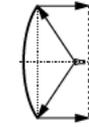
6-3 反射鏡アンテナの基本形成

(執筆著：田中祥次) [2010年5月 受領]

6-3-1 概要

反射鏡アンテナ (Reflector Antenna) は、電波を反射する1枚以上の反射鏡と一次放射器から構成される。各反射鏡アンテナの種類と代表的な用途を表6・2に示す。反射鏡アンテナは、給電回路での伝送損失が生じないので、同じ開口径のアレーアンテナに比べて低損失かつ低価格である。衛星通信・放送用として大型地球局アンテナ、衛星搭載アンテナ、衛星放送受信アンテナ、また、マイクロ波帯無線中継用アンテナ及び電波望遠鏡など多くの分野で利用されている。

表6・2 反射鏡アンテナの種類、特長と代表的な用途¹⁾

アンテナ形式		パラボラ アンテナ	オフセット パラボラ アンテナ	ホーン レフレクタ アンテナ	複反射鏡 アンテナ (グレゴリアン アンテナ) (カセグレン アンテナ)	オフセット複反射鏡 アンテナ (オフセット カセグレン アンテナ) (オフセット グレゴリアン アンテナ)
鏡面修整 による 開口分布 の制御	電界強度 分布 (振幅分布)					
	位相分布	○	○	○	○	○
主な用途		衛星放送受信 衛星通信 VSAT 人工衛星搭載 エントランス 回線 レーダ	衛星放送受信 衛星通信 VSAT 人工衛星搭載 エントランス 回線 レーダ	人工衛星搭載 マイクロ波 中継回線	衛星通信大形 地球局 人工衛星追跡 管制局 人工衛星搭載 電波望遠鏡 レーダ	衛星通信 VSAT 人工衛星搭載 マイクロ波 中継回線 レーダ

6-3-2 パラボラアンテナ

(1) 構成

パラボラアンテナ (Parabola Antenna (Parabolic Antenna, Paraboloidal Reflector Antenna)) は、回転放物面の一部を反射鏡として用いる回転放物面反射鏡 (Paraboloidal Reflector) アンテナの総称であるが、一般的には図6・10に示すような軸対称 (回転対称) 形状のものを示す。このアンテナは高利得のペンシルビーム (Pencil Beam) アンテナとして広く用いられている。

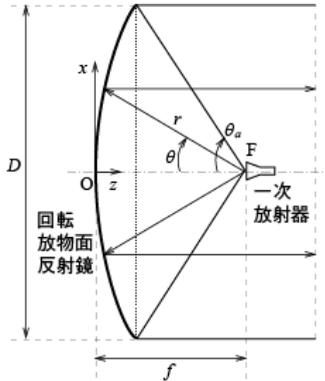


図 6・10 パラボラアンテナ¹⁾

図 6・10 において、放物面反射鏡の鏡面座標は、直角座標系表示で

$$z = \frac{x^2 + y^2}{4f} \quad (6 \cdot 3)$$

あるいは、極座標系で

$$r = \frac{2f}{1 + \cos\theta} \quad (6 \cdot 4)$$

と表される。ここで、 f は焦点距離 (Focal Length) OFである。焦点 (Focal Point) から反射鏡周辺を見込む角である開口角 (Aperture Angle) $2\theta_a$ と fD 比 (f by D) (焦点距離/開口径) との関係は以下で与えられる。

$$\frac{f}{D} = \frac{1}{4} \cot \frac{\theta_a}{2} \quad (6 \cdot 5)$$

開口角は、通常、 $120 \sim 180^\circ$ ($fD = 0.43 \sim 0.25$) に選定される。広い開口角全体に電波を照射するために、パラボラアンテナの一次放射器としては、ビーム幅がある程度広い小形アンテナを用いることが多い。

(2) 開口分布と利得

パラボラアンテナの開口能率を高くするには、なるべく一様な開口面電界強度分布とすればよいが、エッジレベルが高くなりすぎるとスピルオーバー (Spillover) により開口能率が低下する。

パラボラアンテナの利得 G は、開口能率を η とすると

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \eta \quad (6 \cdot 6)$$

で与えられる。開口分布のエッジレベルが $-10 \sim -14$ dB の場合に、パラボラアンテナの開口能率 η は最大となるが、通常、開口能率 η は $50 \sim 60\%$ である。

6-3-3 オフセットパラボラアンテナ

一次放射器やその給電線路によるブロッキング (Blocking) は、サイドローブ特性などの放射特性の劣化の原因となる。図 6・11 に示すように軸対称ではない反射鏡を用いるオフセットパラボラアンテナ (Offset Parabolic Antenna) は一次放射器を開口の外に設けることによりブロッキングによる性能劣化をなくしている。このアンテナは低サイドローブアンテナとして有効であり、また、反射鏡により反射された電波が一次放射器へ戻ってこないで、広帯域にわたって周波数特性が良い。

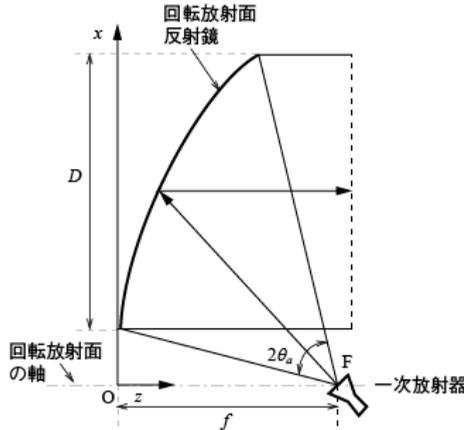


図 6・11 オフセットパラボラアンテナ¹⁾

6-3-4 複反射鏡アンテナ

(1) 構成

主反射鏡と副反射鏡の 2 枚の反射鏡、及び一次放射器により構成されるアンテナを複反射鏡アンテナ (Dual Reflector Antenna) あるいは双反射鏡アンテナという。このうち、図 6・12 に示すように主反射鏡に軸対称な回転放物面、副反射鏡に軸対称な回転双曲面を用いるものをカセグレンアンテナ (Cassegrain Antenna) といい、図 6・13 に示すように主反射鏡に軸対称な回転放物面、副反射鏡に軸対称な回転だ円面を用いるものをグレゴリアンアンテナ (Gregorian Antenna) という。

副反射鏡の二つの焦点のうち一方 (図の点 F1) は一次放射器の位相中心 (Phase Center) と一致し、他方 (図の点 F2) は主反射鏡の焦点と一致している。

複反射器アンテナは、軸方向寸法が同じパラボラアンテナに比べて反射鏡系によって生ずる交差偏波成分が小さい。また、開口の大きな一次放射器が使用可能なので低交差偏波及び広帯域化が実現可能である。更に、鏡面修整 (Reflector Shaping (Shaped Reflector)) による開口分布の制御により、高能率な反射鏡アンテナの実現が可能である。一方、副反射鏡の直径 D_s が主反射鏡直径 D に対して大きすぎるとブロッキングが増大し、利得の低下及び再度ローブ特性の劣化を引き起こす。

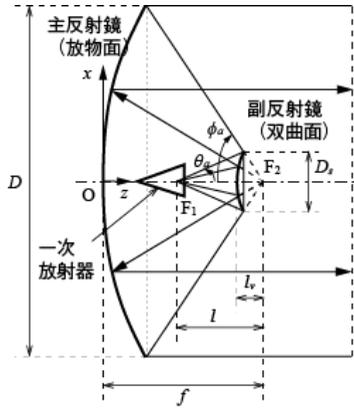


図 6・12 カセグレンアンテナ¹⁾

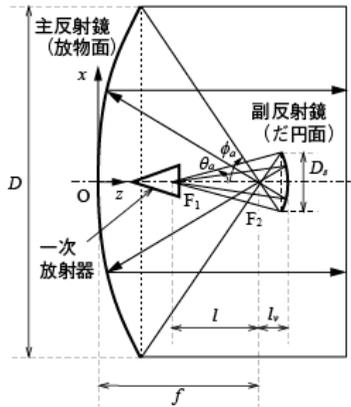


図 6・13 グレゴリアンアンテナ¹⁾

6-3-5 オフセット複反射鏡アンテナ

パラボラアンテナに対するオフセットパラボラアンテナと同様に、副反射鏡を開口の外に設け、副反射鏡のブロッキングによる放射特性劣化を避けるようにした複反射鏡アンテナがオフセット複反射鏡アンテナ (Offset Dual Reflector Antenna) である。オフセット複反射鏡アンテナでは、2 枚の反射鏡のパラメータを適切に選ぶことにより交差偏波成分の発生を消去する方法^{14), 15)}が提案されている。オフセット複反射鏡アンテナは低サイドローブ化が可能であり、衛星搭載用アンテナや衛星通信用 VSAT アンテナなどに用いられている。

■4群 - 2編 - 6章

6-4 開口面アンテナの応用技術

(執筆著：田中祥次) [2010年5月 受領]

地上マイクロ波通信用アンテナや衛星通信・放送用アンテナ、電波望遠鏡など、反射鏡アンテナを代表とする開口面アンテナが広く利用されている。現在では、通信システムなど応用先の高度化の流れに合わせ、高能率・低サイドローブ化技術、偏波共用技術、周波数共用技術、成形ビーム技術、マルチビーム化・ビーム走査技術、追尾技術などの開口面アンテナの応用技術が開発されている。ここでは、開口面アンテナの高能率化・低サイドローブ化技術及び成形ビーム技術について述べる。

6-4-1 開口面アンテナの高能率・低サイドローブ化技術

高利得化は、開口面アンテナの開口面積及び開口能率（開口効率）を大きくすることによって達成される。開口径を増大させることは、ある程度までは容易であるものの、経済性ととも、自重や風圧加重による機械的歪み（鏡面精度(Surface Accuracy)）による開口面位相分布の乱れが大きな制約となる。

(1) 高能率化

パラボラアンテナの場合の開口能率 η は、次式で表すことができる。

$$\eta = \eta_i \eta_s \eta_b \eta_r \eta_p \tag{6・7}$$

ここで、 η_i は開口面照度分布に基づく能率、 η_s は反射鏡からのスピルオーバーに基づく能率、 η_b は支持柱などによるブロッキングに基づく能率、 η_r は反射鏡の鏡面精度に基づく能率、また、 η_p は偏波能率（Polarization Efficiency）である。

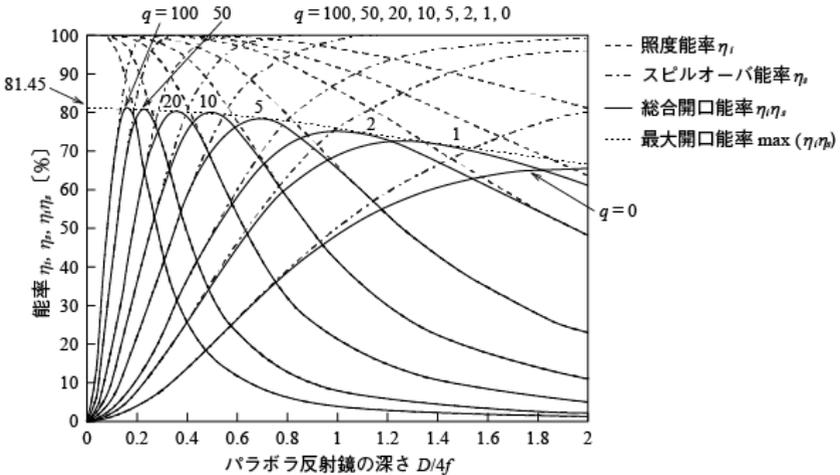


図 6・14 照射能率とスピルオーバー能率のトレードオフ¹⁶⁾

式(6・7)の各成分の中で、 η_i と η_s はトレードオフの関係にある。図6・14は、一次放射器の電界強度パターンを中心軸からの角度 θ の関数として $E_f(\theta) = E_o \cos q(\theta/2)$ でモデル化した場合に、パラボラ反射鏡の深さを変化させて η_i と η_s 、ならびに両者の積 $\eta_i \eta_s$ の変化を示したものである。同図から、積 $\eta_i \eta_s$ に対してパラメータ q の最適値が存在することが分かる。具体的には、エッジ照射レベルが約-11 dBのところにお最適値があり、このとき η_i と η_s はどちらも約90%となり、結果として積 $\eta_i \eta_s$ が約81%となっている。これが通常の一次放射器とパラボラ反射鏡を使用した場合の達成可能な能率の上限と考えられている¹⁶⁾。

カセグレンアンテナやグレゴリアンアンテナなどの複反射鏡アンテナの場合には、式(6・7)は次式のようになる。

$$\eta = \eta_i \eta_{ss} \eta_{sm} \eta_b \eta_r \eta_x \quad (6 \cdot 8)$$

ここで、 η_{ss} は副反射鏡からのスピルオーバーに基づく能率、 η_{sm} は主反射鏡からのスピルオーバーに基づく能率である。複反射鏡アンテナの場合、副反射鏡径が大きいほど主反射鏡を照射するビームを良好に形成でき、 η_i 及び η_{sm} の向上に寄与する。しかし副反射鏡が大きくなりすぎると、ブロッキングによる能率 η_b が低下する。図6・15は、主反射鏡径に対する副反射鏡の比 D_s/D_m と能率の関係を示したものであり、能率を最大とする最適値の存在が理解できる¹⁷⁾。

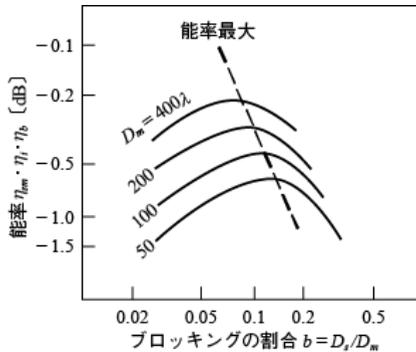
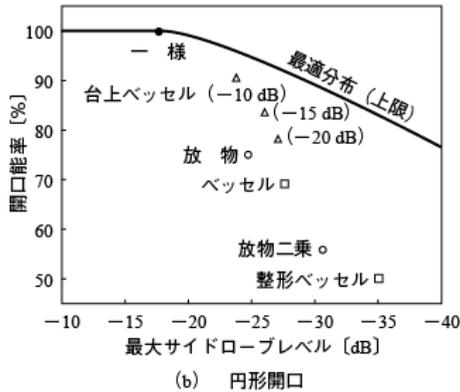
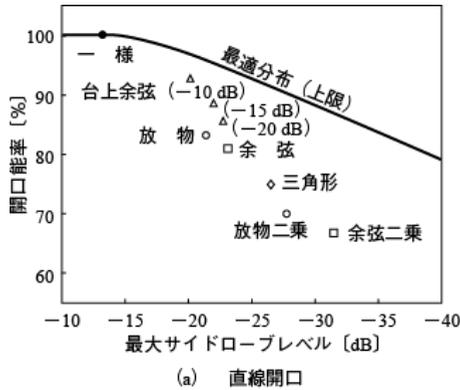


図6・15 副反射鏡のブロッキングと能率¹⁷⁾

上述以外の高効率化としては、一次放射器に複モードホーンやハイブリットモードホーンを用いることによる η_i 、 η_s 及び η_x の向上及び複反射鏡アンテナへの鏡面修整技術の適用などが有効である。

(2) 低サイドローブ化

現実の通信システムでは、他の無線局などの与干渉・被干渉源が、ある特定の方向に存在するのが通常であって、干渉軽減のために特定の角度領域を低サイドローブ化する必要が生ずることもある。サイドローブを低減するには、開口面照度分布の制御が有効であり、その実現には鏡面修整技術が適用される。代表的な開口面照度分布について最大サイドローブレベルと能率との関係をプロットしたものを図6・16に示す¹⁸⁾。

図 6・16 最大サイドローブレベルと開口能率の関係¹⁸⁾

また、一次放射器もしくは副反射鏡、及びそれらの支持柱などによるブロッキングによるサイドローブの上昇を避けるためにオフセット反射鏡アンテナ (Offset Reflector Antenna) の適用が有効である。

6-4-2 開口面アンテナの成形ビーム技術

ここでは、主ビームの形状がペンシル形以外のものを総称して成形ビーム (Shaped Beam (Contoured Beam)) と呼ぶことにする。例えば、通信や放送用では、サービスエリアを効率良く一つのビームで照射するために、ビームの輪郭形状をサービスエリアを覆うように成形した例がある。

開口アンテナで成形ビームを合成する技術としては、大別すると、鏡面修整 (レンズを含む) を用いる方法と、複数のペンシルビームを同時に励振する方法 (アレー給電) とに分けられる。

(1) ビーム形成のための鏡面修整技術

(a) 反射鏡輪郭形状によるビーム成形

所望のビーム形状がだ円のように単純であれば、開口面の輪郭形状を円形以外とすることにより、ある程度までの制御が可能である。パラボラアンテナについても成形可能であり、レーダー用アンテナや衛星放送用または衛星通信用アンテナとして実績がある。ただし、効率を犠牲にすることなく、低サイドローブ特性を要求する場合には、反射鏡端部における開口面照度レベルを制御する必要がある、輪郭形状に合った一次放射パターンを得る工夫が必要となる。

(b) 開口波面の制御によるビーム成形

反射鏡輪郭形状を制御する方法では、波面 (Wave Front) としては平面 (一様な位相分布) を前提としているため、だ円以外の複雑な形状の成形ビームを合成するのは困難である。これに対し、アンテナ開口における波面の制御による成形ビーム合成技術は、二次元的で複雑なビーム断面形状を有する成形ビームにも適用されており、通信衛星 CS 及び CS-2 に搭載されたホーンレフレクタアンテナ (Horn Reflector Antenna) が代表的である。この例では、静止衛星軌道上から見た日本国土をほぼ一様な利得で照射し、他方向への不要放射を小さくすることに成功している^{19), 20)}。このアンテナは 4/6/20/30 GHz 帯の多周波共用で、29.25 GHz の例を図 6・17 に示す。

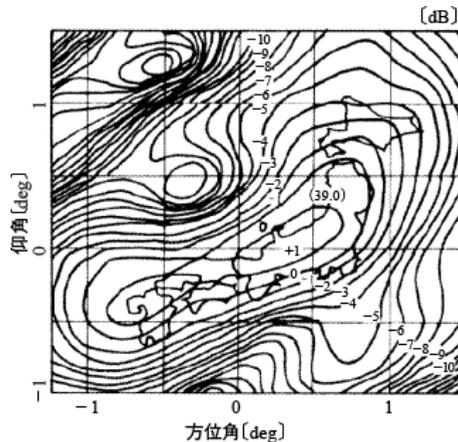


図 6・17 通信衛星 CS-2 用成形ビームアンテナの放射パターン (29.25 GHz)²¹⁾

(c) 開口面を分割してアレー最適を適用した鏡面修整

静止衛星軌道から効率良く日本国土を照射する目的で放送衛星搭載用アンテナを対象に、オフセットパラボラアンテナの鏡面を修整することによって成形したビームを合成する技術がある。まず、開口面を多数のセルに分割して、各セルにおける位相を最適化する。次に得られた所望の位相分布を実現するように光路長一定の法則から修整鏡面を得る。しかし、この方法では分割された隣接格子間での位相の不連続性により、鏡面に大きな段差が生ずることがあり、隣接格子間での位相差に制約を付与してこれを回避することが必要である²²⁾。更

に、オフセット複反射鏡形式として、位相分布のみならず振幅分布も制御する技術が検討されている²³⁾。

(2) アレー給電反射鏡によるビーム成形

アレー給電反射鏡によるビーム成形は、インテルサット衛星などの衛星搭載用アンテナで広く実用化されているもので、オフセットパラボラアンテナを複数の一次放射器から構成されるアレーにより給電(アレー給電もしくはクラスタ給電)するものである。複数個の一次放射器が同時に励振され、個々の一次放射器から放射されるビームが空間で合成されることで、成形ビームが得られる。アレー給電反射鏡によるビーム成形では、反射鏡の深さやオフセット角などの鏡面系構成パラメータと、給電アレーの設置位置、及び給電アレーを構成する一次放射器の形式・口径ならびに配列(格子形状・間隔)が基本的なアンテナ設計パラメータとなる。そのうえで、所望の遠方パターンとの差を最小化することを目的として、複数の一次放射器の励振係数(振幅・位相)を最適化する。

わが国の放送衛星搭載用アンテナとして、1978年打ち上げの実験衛星BSE及び1984年打ち上げのBS-2では、だ円開口のオフセットパラボラアンテナを大きさの異なる三つのホーンアンテナによりクラスタ給電しており、各ホーンアンテナの振幅と位相を調整して、本土に加えて沖縄及び小笠原を効率良く照射する成形ビームを実現している²⁴⁾。また、BS-3では、小笠原の利得を向上するために、だ円コルゲートホーン(Elliptical Corrugated Horn)と方形コルゲートホーンを組み合わせたクラスタ給電系を使用している²⁵⁾。

■参考文献

- 1) 電子情報通信学会(編)，“アンテナ工学ハンドブック(第2版),” オーム社, 2008.
- 2) A. D. Olver, P. J. B. Clarricoats, A. A. Kishk, and L. Shatai, “Microwave horns and feeds,” IEEE Press, New York, 1994.
- 3) T. Kitsuregawa, “Satellite Communication antennas,” Artsch House, Boston, London, 1990.
- 4) 宮 憲一, “衛星通信技術,” 電子通信学会(編), コロナ社, 1985.
- 5) P. D. Potter, “A new horn antenna with suppressed sidelobes and equal beam widths,” Microwave J., vol.6, no.6, pp.71-78, Jun. 1963.
- 6) 佐藤敏雄, “誘電体装荷ホーンアンテナ,” 信学論(B), Vol.54-B, no.8, p.475, Aug. 1971.
- 7) S. B. Cohn, “Flare angle changes in a horn as a means of pattern control,” Microwave J., vol.13, no.10, pp.41-46, Oct. 1970.
- 8) 蛭子井貴, 片木孝至, 水沢丕雄, “フレアアイリス形円偏波複モードホーンアンテナ,” 信学論(B), vol.J62-B, no.12, pp.1109-1115, Dec. 1979.
- 9) 大西秀知, 野口啓介, 片木孝至, 水沢丕雄, 別段信一, 内藤 出, “フレア・リング形複モードホーンアンテナ,” 信学論(B), vol.J85-B, no.11, pp.1972-1976, Nov. 2002.
- 10) 佐藤敏雄, “誘電体装荷ホーンアンテナの交差偏波特性,” 信学論(B), vol.57-B, no.10, p.617, Oct. 1974.
- 11) A. F. Kay, “The scalar feed,” TRG Science Report 5, AFCRL Project 4600, Contract no.AF 19(604)-8057, Mar. 1964.
- 12) P. I. B. Clarricoats and P. K. Saba, “Propagation and radiation behaviour of corrugated feeds, Part 2-corrugated-conicalhorn feed,” Proc. IEE, vol.118, no.9, p.1177, Sep. 1971.
- 13) 水沢丕雄, 武田文雄, 別段信一, “コルゲート円すいホーンアンテナの放射特性,” 信学論(B), vol.56-B, no.1, pp.14-19, Jan. 1973.
- 14) 田中宏和, 水澤丕雄, “オフセット複反射鏡アンテナにおける交差偏波の消去,” 信学論(B), vol.58-B, no.12, pp.643-650, Dec. 1975.
- 15) 水口芳彦, 横井 寛, “オフセット形双反射鏡アンテナの曲面について,” 信学論(B), vol.58-B, no.2,

pp.94-95, Feb. 1975.

- 16) 野本真一, “ワイヤレス基礎理論,” 第9章, 電子情報通信学会, Jul. 2003.
- 17) 水沢丕雄, “鏡面修整カセグレンアンテナの放射特性に及ぼす副反射鏡放射パターンの効果,” 信学論(B), vol.52-B, no.2, pp.78-84, Feb. 1969.
- 18) 野本真一, “アンテナ・無線ハンドブック,” IV部第1章 1・1 「開口理論」, オーム社, Oct. 2006.
- 19) 進士昌明, 島田禎晉, 片木孝至, 武田文雄, 橋本 勉, 小野 誠, 武市吉博, 近藤五郎, “国内通信衛星用整形ビームホーンリフレクタアンテナシステムの試作,” 信学論(B), vol.57-B, no.6, pp.353-360, Jun. 1974.
- 20) T. Katagi and Y. Takeichi, “Shaped-beam horn-reflector antennas,” IEEE Trans. Antennas & Propag., vol.AP-23, no.6, p.757, Nov. 1975.
- 21) S. Makino and N. Miyahara, “Satellite onboard reflector antennas,” IEICE Trans. Connun., vol.E86-B, no.3, pp.944-953, Mar. 2003.
- 22) 庄木裕樹, 川端一彰, “単一修整鏡面による2周波数帯ビーム成形,” 信学技報, AP89-71, Dec. 1989.
- 23) 正源和義, 西田勇人, “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,” 信学論(B-II), vol.J75-B-II, no.7, pp.447-455, Jul. 1992.
- 24) 梶川 実, 安永啓一, 松前 仰, 外山 昇, 諸岡 翼, 鈴木康夫, 伊藤 孝, 植野船首, “放送衛星2号搭載用アンテナの開発(BBM の特性),” 信学技報, AP82-48, 1982.
- 25) 外山 昇, 三浦秀一, 小淵知己, 宮田吉秀, “放送衛星3号(BS-3)放送用アンテナの電気設計,” テレビ誌, vol.43, no.1, pp.67-74, 1989.