

■4群 (通信工学) -2編 (アンテナ・伝搬)

4章 線状・板状アンテナ

(執筆者：平野拓一) [2013年1月 受領]

■概要■

1864年にマクスウェルが電磁波の存在を理論的に予測した。1888年にヘルツが電磁波の存在を実験で確認するのに用いたのは、現在でも最も基本的なアンテナ素子として用いられているダイポールアンテナである。本章では分布定数線路理論とアンテナの放射原理の関係について説明する。時間変化する電流は電磁波を放射するが、なぜ線路では放射しにくいのかを説明し、基本的な放射素子であるダイポールアンテナの説明へとつなげる。基本放射素子のダイポールアンテナ(波長に比して微小な長さのものは微小ダイポールと呼ばれる)の変形として、モノポールアンテナ、ループアンテナ、その他線状アンテナの動作原理を説明する。ダイポールアンテナの動作原理が理解できれば、それら種々のアンテナの動作原理の理解が容易である。ちなみに、1901年にマルコーニが大西洋を隔ててイギリス-アメリカ間の無線電信に成功し、無線通信の時代を切り拓いた。そのときに使用された受信アンテナも風を利用して導線を高く上げたモノポールアンテナであった。

マルコーニによる大西洋横断無線電信の実証後、人類の歴史としては負ではあるが大戦・冷戦を通して無線通信技術は目覚ましい発展を遂げた。大戦後はジェット旅客機時代に入り、レーダー、無線通信技術も成熟した。冷戦崩壊後は技術が成熟したこともあり、民間用の携帯電話が開発された。現在では携帯電話のみならず、各種小型端末に無線通信機能が搭載されるに至っている。本章で説明するスロットアンテナ、進行波アンテナ、広帯域な自己相似アンテナ、板状アンテナは現在多くの産業分野で使われているものである。

【本章の構成】

本章の構成は以下のとおりである。

4-1 線状アンテナ

4-1-1 ダイポールアンテナ

4-1-2 モノポールアンテナ

4-1-3 ループアンテナ

4-1-4 その他の線状アンテナ

4-2 スロットアンテナ

4-3 進行波アンテナ

4-4 自己相似アンテナ

4-5 板状アンテナ

4-1-1節ではダイポールアンテナについて説明する。分布定数線路理論とダイポールアンテナの関係を説明し、ダイポールアンテナからの電磁波放射原理を説明する。4-1-2節ではグラウンド板とダイポールアンテナの組合せとしてモノポールアンテナを説明する。4-1-3節ではダイポールアンテナの説明と同様に分布定数線路理論を用いて、磁界検出用プローブ、小型受信アンテナやICカード内蔵用アンテナなどに用いられるループアンテナの動作原理を説明する。4-1-4節では上記線状アンテナの変形で、実用に用いられているアンテナをいくつか紹

介する。地上波テレビ放送受信用アンテナの一部に用いられている折り返しダイポールアンテナ、端末内蔵アンテナとしてよく用いられる逆Fアンテナなどを紹介する。

4-2 節では導体板に穴を開けたスロットアンテナについて説明する。放射面を平面にできるので航空機搭載アンテナによく用いられている。また、大電力に耐え、かつ損失の少ない導波管を給電線路に使えるのでレーダー用アレーアンテナなどによく用いられている。

4-3 節では進行波を少しずつ放射する進行波アンテナについて説明する。進行波アンテナの一つとして、連続あるいは波長に比して短い間隔で電磁波を外部に漏らして放射する漏れ波アンテナについても説明する。

4-4 節では伸縮しても同一形状となる自己相似アンテナについて説明する。自己補対アンテナについて説明する。これらは主に広帯域用途に用いられる。

4-5 節では金属板を用いた板状アンテナについて説明する。

■4群 - 2編 - 4章

4-1 線状アンテナ

(執筆者：平野拓一) [2010年4月 受領]

4-1-1 ダイポールアンテナ

線状アンテナ (Wire Antenna) は、波長に比して細い導線で構成されるアンテナである。給電は導線の一部に間隙 (ギャップ) を設けて行う場合が多い。図 4・1 (a) に示すような直線状導線の中心にギャップを設けたダイポールアンテナ (Dipole Antenna) は、ヘルツが電磁波の実証実験を行って¹⁾以来、最も基本的なアンテナである。特に全長が半波長 ($2h = \lambda/2$) の半波長ダイポールアンテナ (Half-wavelength Dipole) はよく用いられている。

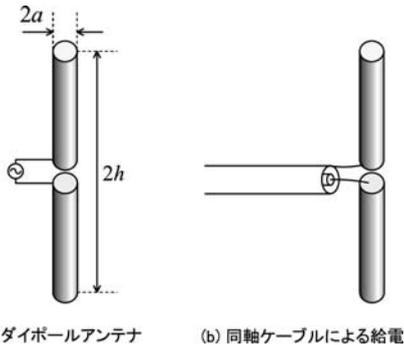


図 4・1 ダイポールアンテナ

ダイポールアンテナの動作原理について説明する。図 4・2 (a) は、左側より励振され、右端が開放された平行二本線路 (Parallel Line) (あるいはレッチェル線 (Lecher Line)) を示している。図中の正弦波分布は導線に流れる電流の振幅を、矢印は向きを示している。高周波なので分布定数回路 (Distributed Constant Circuit) として動作し、位置によって電流値は異なるが、2本の上下平行導線に流れる電流はどの位置においても逆向きである。マクスウェルの方程式 (Maxwell's Equations) より、空間に電流が流れると電磁波の放射は必然的に起こるが、伝送線路ではこのように近接して逆方向に流れる電流による放射の打ち消し効果を利用して、空間への放射を抑圧している。また、線路上には左側からの入射波と右端での反射波の合成の定在波ができています。

右端開放端より $1/4$ 波長離れた A-A' の位置において、上部導体を直角に上側に、下部導体を下側に折り曲げると図 4・2 (b) のようになる。すると、A-A' の位置にある折り曲げられた導線部分では電流の向きがそろうため、放射の打ち消しが起こらずに空間に電磁波が放射される。導体棒の上部、下部にはそれぞれ逆符号の電荷が蓄積される (ダイポール) ので、ダイポールアンテナと呼ばれる。

長さが半波長 ($2h = \lambda/2$) の場合、共振して入力インピーダンスが純抵抗となるので整合 (反射をなくすこと) が取りやすい。実際に給電するためには、図 4・1 (b) のように 2本の導体棒に同軸線路などを接続する。また、このようにただ線路をアンテナにつないだだけでは一般には整合がとれないので、バラン (Balun) やスタブ (Stub) などを用いて整合をとる²⁾。

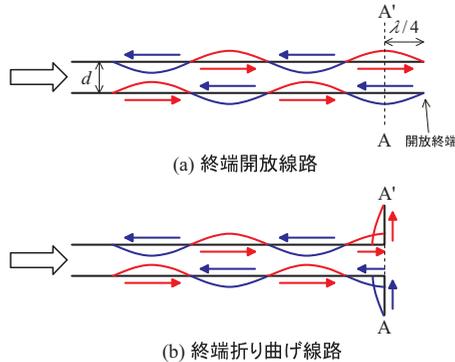


図 4・2 平行二本線路上の電流分布

前述のダイポールアンテナの動作原理は定性的なもので、正確にはマクスウェルの方程式の境界値問題を解かなければならない。このような形状の境界値問題は解くことができない（閉形式を得ることができない）ので、現実的にはモーメント法 (Method of Moments : MoM)（あるいは境界要素法 (Boundary Element Method : BEM)）、FDTD 法 (Finite-difference Time-domain Method : 時間領域差分法)、有限要素法 (Finite Element Method : FEM) などの数値解法が用いられる^{2),3)}。

図 4・3 にモーメント法を用いて計算した半波長ダイポールアンテナ ($2h = \lambda/2$, $a = 0.001\lambda$) の電流分布と電磁界放射を示す。図 4・3(a) は電流分布を示しており、導体棒上の電荷を青点で、電流の振幅を赤線で示している。アンテナ長がちょうど半波長のときは、電流の振幅分布は正弦波ではなく、少し中心部がくびれている。これは波長短縮効果によるものである。 $2h = 0.47\lambda$ 程度するとき、電流分布中央のくびれがなくなって正弦波状になり、電流の印加電界に対する位相が 0 になる（共振する）ことが知られている。このように図 4・2 のように線路の開放終端では電流が 0 であり、そこから導体棒上を正弦波状に電流が分布するという考え方は近似的ではあるが、線状アンテナの特性が直感的に把握できるので工學上有用である。

図 4・3(b) は半波長ダイポール周囲の電気力線 (Electric Flux Line) を示している。境界条件より、電気力線は導体棒に垂直となっていることが分かる。電気力線はちぎれて導体棒軸の横方向に飛んでいく。遠方界指向性（遠方において $1/r^2$ の減衰を除いた角度による電磁界の違い）の振幅を 3 次元表示すると図 4・3(c) のようになる。断面は数字の 8 の字形をしているので、8 の字形指向性 (Pattern of Figure 8) と呼ばれる。通常、図 4・3(d) のようにカット面で指向性 (Directional Pattern) を描くことが多い。電界がのる面を E 面 (E-plane)、磁界がのる面を H 面 (H-plane) という。波長に比して微小な長さのダイポールアンテナである微小ダイポール (Infinitesimal Dipole) とほぼ同じ指向性であるが、それよりも少し鋭いビームになっている。電流が流れる導線を細分化して電流素片の和とみなし、各素片の微小ダイポールが放射する電磁界の総和がアンテナの放射電磁界であると考えても理解しやすい。ビームが絞られているので、通信用アンテナに用いる場合には電力利用効率が高まる。等方性アンテナ (Isotropic Antenna) (存在しないが) と比べた場合の着目方向での増加量を指向性利得

(Directivity, Directive Gain) (単位: dBi) といひ、微小ダイポールの最大放射方向では 1.76 dBi, 半波長ダイポールアンテナでは 2.15 dBi である。

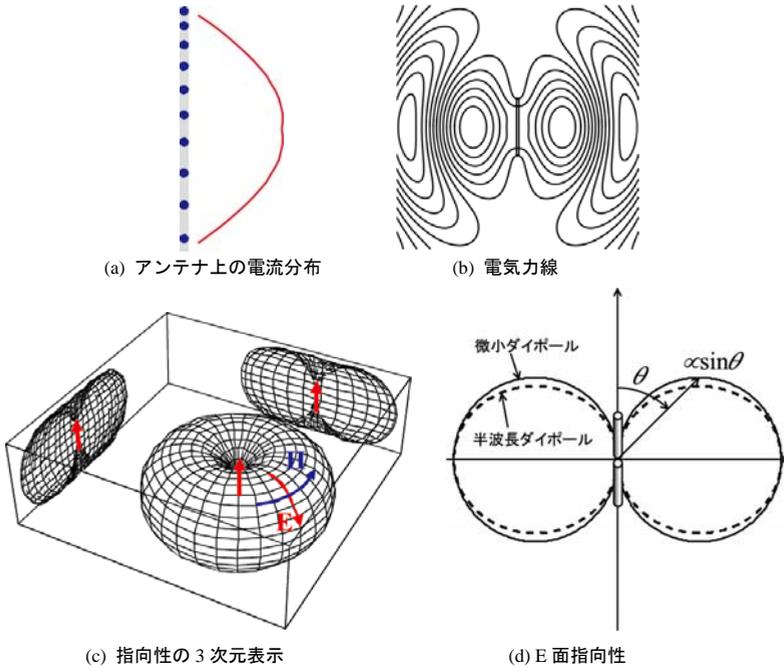


図 4-3 半波長ダイポールアンテナの電流分布と放射電磁界

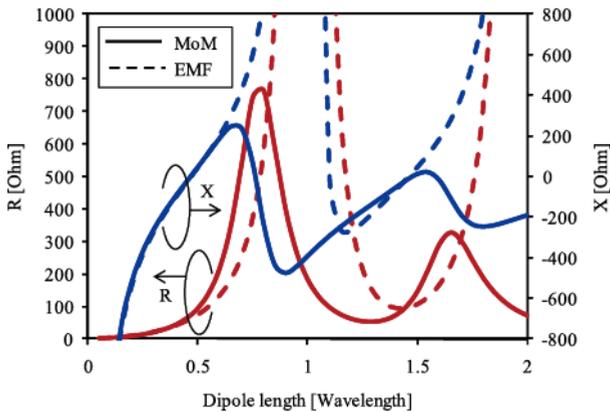


図 4-4 ダイポール長によるダイポールアンテナの入力インピーダンスの変化 ($\Omega = 2\ln(2h/a) = 10$)

図 4-4 にダイポール長 ($2h$) によるダイポールアンテナの入力インピーダンス (Input

Impedance) の変化を示す。実線はモーメント法 (MoM), 点線は正弦波状の電流分布を仮定して近似計算する起電力法 (Electro Motive Force Method : EMF Method) の結果である。精度はモーメント法の方が高い。半波長ダイポールアンテナの入力インピーダンスはモーメント法では $Z_{in} = 93 + j43 [\Omega]$, 起電力法では $Z_{in} = 73 + j43 [\Omega]$ である。

図 4・5 にダイポールアンテナの長さによる指向性 (Sidelobe) の変化を示す。アンテナ長が 1 波長までは 8 の字形指向性であるが、それ以上長くなると上下の軸方向から新たなサイドローブが加わり、更に長くすると複数のサイドローブが加わる。

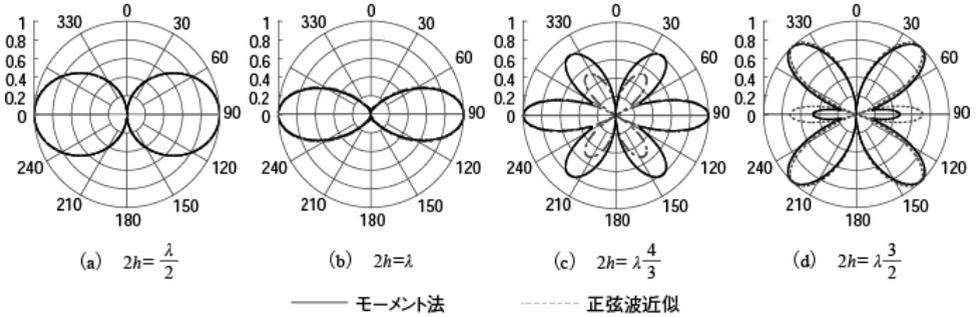


図 4・5 ダイポールアンテナの長さによる指向性の変化²⁾

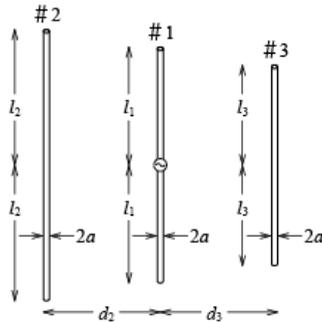


図 4・6 3素子八木・宇田アンテナ²⁾

また、図 4・6 に示すように、ダイポールアンテナの横に給電しない導体棒 (寄生素子 (Parasitic Element) という) を配列した八木・宇田アンテナ (Yagi-Uda Antenna) (あるいは八木アンテナ (Yagi Antenna)) がある。寄生素子として多素子の導体棒を用いることが多い。給電ダイポールアンテナの片側の導体棒は通常給電ダイポール長の半波長よりも短く、反対側の導体棒は長くなっている。短い側の導体棒を導波器 (Director), 長い側の導体棒を反射器 (Reflector) という。名前が示すとおり、導波器側に主ビーム (Main Beam) が形成され、反射器側の放射は弱くなる。動作原理は、寄生素子導体棒の長さが変わるとその上に流れる電流の位相も変化するという物理現象による。共振長よりも短くすると電流の位相が遅れるので、再放射される電磁波の位相も遅れる。この位相差を利用して導波器側から見て位相が揃

い、電磁波が強め合うエンドファイアアレー (Endfire Array) として動作していると理解することができる。一例として図 4・7 に 3 素子八木・宇田アンテナの指向性を示す。八木・宇田アンテナは家屋の屋根に設置し、地上波テレビ放送の受信アンテナとしてよく用いられている。

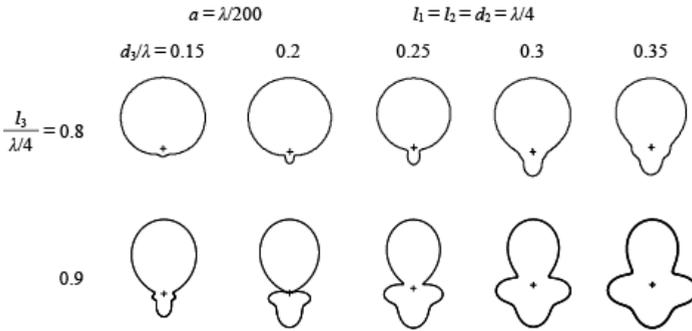


図 4・7 3 素子八木・宇田アンテナの指向性²⁾

4-1-2 モノポールアンテナ

図 4・3 (b) のダイポールアンテナから放射される電気力線を見ると分かるように、中央給電ダイポールアンテナの給電点を通り、ダイポール軸と直交する面内では電界は垂直である。すなわち、図 4・8 (a) に示すように、その面を無限に広いグラウンド板 (Ground Plane) で置き換えても上側半空間の電磁界分布は変わらない (イメージ理論 (Image Theory) より)。このように、ダイポールアンテナの導体棒片方とグラウンド板で構成された図 4・8 (b) に示すようなアンテナはモノポールアンテナ (Monopole Antenna) と呼ばれる。

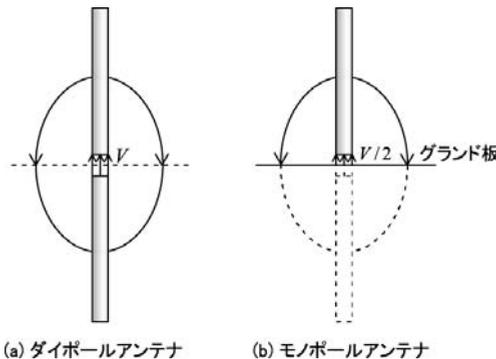


図 4・8 ダイポールアンテナとモノポールアンテナ

グラウンド板が無限に広い場合には、上部の電磁界分布はモノポールアンテナでもダイポールアンテナでも同じである。したがって、導体棒上に流れる電流は両アンテナで同じである。一方、電圧はモノポールアンテナではグラウンド板からの電界の接線線積分値になるので、ダ

ダイポールアンテナの 1/2 になる。すなわち、モノポールアンテナの入力インピーダンスはダイポールアンテナの 1/2 になる。モノポールアンテナでは、給電線をグランド板の下に隠すことができるので、高い精度が求められる測定ではよくダイポールアンテナの代替として用いられる。また、モノポールアンテナに近い構造として同軸ケーブルの外部導体を剥いて中心導体を出したスリーブアンテナ (Sleeve Antenna) がある²⁾。グランド板を模擬するために細線が用いられることもある。

4-1-3 ループアンテナ

ループアンテナ (Loop Antenna) とは、図 4・9 に示すように導線をループ状にして間にあるギャップから励振するアンテナである。ダイポールアンテナは図 4・2 の平行二本線路の先端を開放したものであったが、ループアンテナは図 4・10 に示すように平行二本線路の先端を短絡してループを形成したものと考えることもできる。

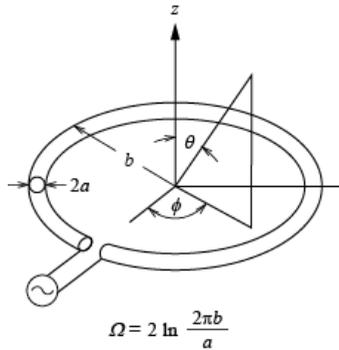


図 4・9 円形ループアンテナ²⁾

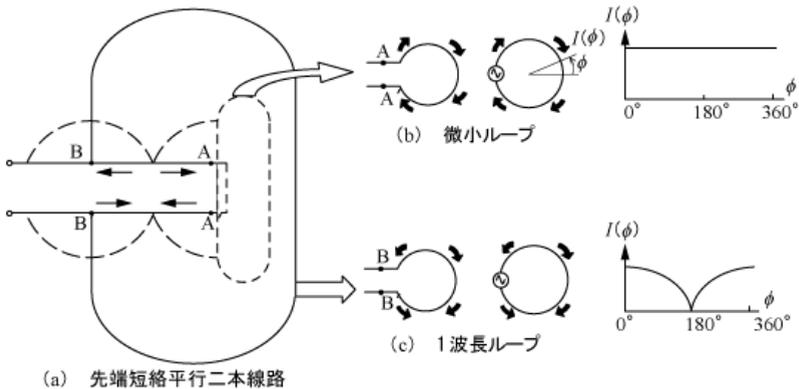


図 4・10 先端短絡平行二本線路とループアンテナの電流分布の類似性²⁾

図 4・10 (b) に示す微小ループ (Infinitesimal Loop) は、電磁気学のアンペアの法則 (Ampere's Law) より (波長に比して微小なので、静磁界近似が有効である)、磁界がループ面に垂直に

発生する。これはちょうど電流源の微小ダイポールの電界が磁界に置き換わったものと考えることができ、電磁界の双対性 (Duality) より微小磁流源からの放射と考えると指向性を想像しやすい。指向性はループ面内で最大値をとるようにドーナツ状に広がり (図 4・3(c)), 8の字形指向性となる。そして、放射電磁界は電流源の微小ダイポールにおいて、電界と磁界を入れ替えた形 (電界の向きは負号をつける) になっている。

ダイポールアンテナのときは共振する最小のアンテナ長は $1/2$ 波長であったが、ループアンテナでは図 4・10 の先端短絡平行二本線路の先端から見て次に電流が最大となる場所より、周囲長が 1 波長となるときである。ダイポールアンテナでは微小ダイポールも半波長ダイポールも指向性はほぼ同じであったが、図 4・10(c) の 1 波長ループアンテナの電流分布を見て想像できるように、微小ループアンテナと 1 波長ループアンテナの指向性は大きく異なる。粗く近似すると左右に 2 本のダイポールアンテナ (円弧状に曲がってはいるが) が配置されていると考えることができ、指向性が割れる。微小ループアンテナは磁界検出用に、多数巻ループアンテナは IC カード内蔵用アンテナとしてよく用いられる。

4-1-4 その他の線状アンテナ

図 4・11 に折り返しダイポールアンテナ (Folded Dipole Antenna) を示す。半波長 ($L = \lambda/2$) の場合の入カインピーダンスはダイポールアンテナの 4 倍の約 300Ω となり、平行二本線路との整合をとるのに都合がよい。



図 4・11 折り返しダイポールアンテナ²⁾

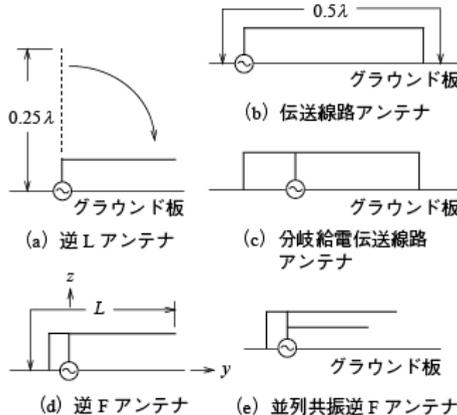


図 4・12 低姿勢線状アンテナ及び線状逆 F アンテナ²⁾

図 4・12 に低姿勢線状アンテナ及び線状逆 F アンテナ (Inverted-F Antenna) を示す。長波通信、移動体通信などでは低姿勢なアンテナが要求される。図 4・12(a) はラジオ放送送信アン

テナを低姿勢化するために考案された、モノポールアンテナの先端を折り曲げた逆Lアンテナ (Inverted-L Antenna) である。図 4・12 (b) はループアンテナをグランド板で半分にした (イメージ理論より) 伝送線路アンテナ (Transmission Line Antenna) である。

図 4・12 (c) はそれに対して整合調整用のスタブがついた分岐給電伝送線路アンテナである。そして図 4・12 (d) は低姿勢・小型アンテナとして通信機器でよく用いられている逆 F アンテナである。図 4・12 (e) は更に多重共振を利用してマルチバンド化した逆 F アンテナである。ほかにも、様々な折り返しアンテナ、モノポールアンテナの導線をジグザグに折り曲げて小型化したメアンダラインアンテナ (Meander Line Antenna)、らせん状のヘリカルアンテナ、渦巻状のスパイラルアンテナ (Spiral Antenna) などがある²⁾。

■4群 - 2編 - 4章

4-2 スロットアンテナ

(執筆者：平野拓一) [2010年4月 受領]

スロットアンテナ (Slot Antenna) は、図 4・13 のように導体面上にあけたスロットを放射素子として用いるアンテナである。スロットは、線路の先端で直接励振したり、スロット背面に設けた空洞を介して励振したりする。地板を利用したアンテナや、マイクロストリップ線路 (Microstrip Line) からスロットを介したパッチアンテナへの給電などに用いられる。また、図 4・14 に示すような導波管の壁にスロットを切った導波管スロットアンテナ (Waveguide Slot Antenna) は、導波管壁に流れる電流をスロットが遮ることでスロット部に電界が発生し、外部に放射される。アレー化した場合には低損失で給電が可能となるため、特に高周波でよく用いられる。12 GHz 帯の衛星放送受信用としてラジアルラインスロットアンテナ (Radial Line Slot Antenna : RLSA) も考案されている²⁾。

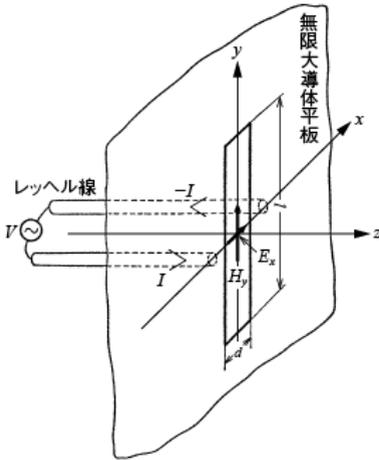
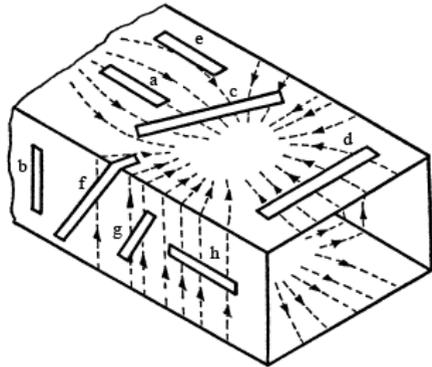


図 4・13 無限大導体平板に切ったスロットアンテナ²⁾



点線は導波管壁に流れる電流を示している

図 4・14 導波管スロットアンテナ²⁾

スロットアンテナは磁界に反応するので磁流アンテナ (Magnetic Current Antenna) の一例である。電界ではなく、磁界に反応する理由は、図 4・13 において受信状況を考えて説明する。右から左に向かって垂直入射した平面波が無限導体板で反射して右側の空間に定在波を作っている状態を考える。スロットがないとすると $z=0$ において磁界は存在するが、電界は 0 である。その条件で受信できることを考えると、電界ではなく磁界に反応していると考えられることができる。一方、ダイポールアンテナやモノポールアンテナは電界に反応する電流アンテナ (Electric Current Antenna) の一例である。

■4群 - 2編 - 4章

4-3 進行波アンテナ

(執筆著：平野拓一) [2010年4月受領]

進行波アンテナ (Traveling Wave Antenna) は、進行波 (つまり反射波がない) を利用して放射するアンテナである。その一つである漏れ波アンテナ (Leaky Wave Antenna) は、進行波の導波部で連続的または波長に比して短い間隔で電磁波を外部に漏らして放射するアンテナである。終端からの反射があってはならないので、終端電力は入力電力に対して十分小さくしたり、効率は下がるが終端に整合用の抵抗を入れたりする。

図 4・15 に種々の漏れ波導波管 (Leaky Wave Waveguide) を示す。(a)～(e) は方形導波管 (Rectangular Waveguide) 壁に穴をあけた構造である。(f) は同軸ケーブル (Coaxial Cable)

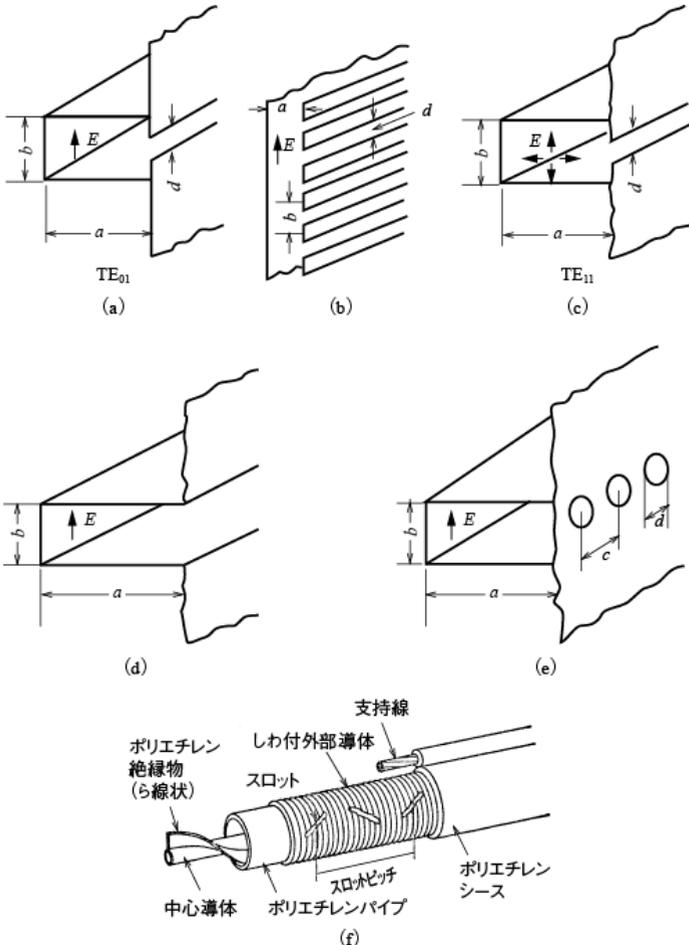


図 4・15 種々の漏れ波導波管²⁾

の外導体に穴をあけた漏れ同軸ケーブル (Leaky Coaxial Cable) であり, トンネルや地下における通信用に利用されている. 漏れ波アンテナでは位相が揃う方向 $\theta_m \cong \sin^{-1}(\lambda_0/\lambda_g)$ (λ_0 : 自由空間波長, λ_g : 管内波長, θ_m は導波路軸に垂直な面からの角度) に主ビームが形成される (ビームチルト (Beam Tilt)). 図 4・15(a) のような漏れ波導波管ではビームチルト角 θ_m が大きく, 埋め込み構造にできるため, 航空機着陸システムのアンテナなどに利用されている.

また, 開放型の表面波伝送線路 (Surface Waveguide, Surface Transmission Line) による漏れ波アンテナとしては誘電体棒アンテナ (Dielectric Rod Antenna) (ポリロッドアンテナ (Poryrod Antenna)) などがある. 線状アンテナではヘリカルアンテナ, スパイラルアンテナ, ジグザグアンテナなど²⁾, また, 次節で述べるバイコニカルアンテナ (Biconical Antenna) などは進行波アンテナと考えることもできる.

■4群 - 2編 - 4章

4-4 自己相似アンテナ

(執筆著：平野拓一) [2010年4月 受領]

自己相似アンテナ (Self-complementary Antenna) は、伸縮しても同一形状 (自己相似) のアンテナである。図 4・16 の無限の高さの円錐状導体の頂点が二つ向かい合わせになったバイコンカルアンテナ (Biconical Antenna) は、その一例である。自己相似アンテナは、周波数によらず同一特性となるので超広帯域である。しかし、実際にはアンテナのサイズは有限なので完全な自己相似を実現することができず、最大サイズで最低周波数が決まってしまう。バイコンカルアンテナを平面に投影し、有限長で打ち切った図 4・17 のボウタイアンテナ (Bow-tie Antenna) は広帯域アンテナとして用いられる。

また、図 4・18 に示すような、金属部とそれ以外の部分を入れ替えても同一の構造になるものを自己補対構造といい、バビネの原理 (Babinet's Theorem) と自己補対構造により、その入力インピーダンスは周波数とは無関係に 60π となる (虫明の関係式 (Mushiake's Relation)) ことが知られている²⁾。市松模様アンテナ (Ichimatsu Moyou Antenna)²⁾ も自己補対アンテナの一例である。

ほかにも、対数周期構造を有する対数周期アンテナ (Log-periodic Antenna)、フラクタル構造を有するフラクタルアンテナ (Fractal Antenna) などの離散値倍の伸縮で自己相似形状にしてマルチバンド化する広帯域アンテナがある²⁾。



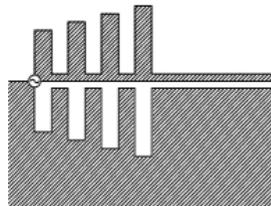
図 4・16 バイコンカルアンテナ²⁾



図 4・17 ボウタイアンテナ²⁾



(a) 平衡形自己補対アンテナ



(b) 不平衡形自己補対アンテナ

図 4・18 自己補対アンテナの例²⁾

■4群 - 2編 - 4章

4-5 板状アンテナ

(執筆者：平野拓一) [2010年4月 受領]

板状アンテナ (Disc Antenna) は、金属の板で構成されるアンテナである。図 4・19 に示すのは、金属の板を地板上に立てた板状モノポールアンテナ (Disc Monopole Antenna) である。図 4・13 のスロットアンテナ、図 4・17 のボウタイアンテナ、図 4・18 の自己補対アンテナなども板状アンテナといえる (動作原理や構造などで分類し、集合として交わりをもっているので一意には分類できない)。パッチアンテナ (Patch Antenna) (あるいはマイクロストリップアンテナ (Microstrip Antenna : MSA)) も広義の意味で板状アンテナである。

線状アンテナにおいて太い導線を用いると帯域が広がるのが経験的に知られているので、線状アンテナの線を板に置き換えて広帯域化を図る手法がある。無線端末に用いられているプリントダイポールアンテナ (Printed Dipole Antenna) や板状逆 F アンテナ (Planar Inverted-F Antenna : PIFA) などはその一例である。また、図 4・17 のボウタイアンテナもこのように広帯域化を図ったものと解釈することもできる。

板上モノポールアンテナの板形状をフラクタル構造にしたり、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いて円板を変形したりして広帯域化したアンテナ²⁾もある。比帯域は最大で 180 % 程度が得られている。高機能化するために線状と板状を組み合わせた組合せアンテナも多数考案されている²⁾。

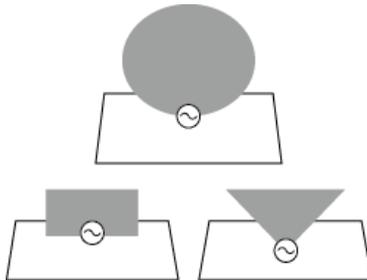


図 4・19 板状モノポールアンテナ²⁾

■参考文献

- 1) H. Hertz, "Electric waves," Dover pub inc., pp.144-145.
- 2) 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.
- 3) 後藤尚久, 中川正雄, 伊藤精彦(共編), "アンテナ・無線ハンドブック," オーム社, 2006.