

アンテナ・ハンドブック  
シリーズ



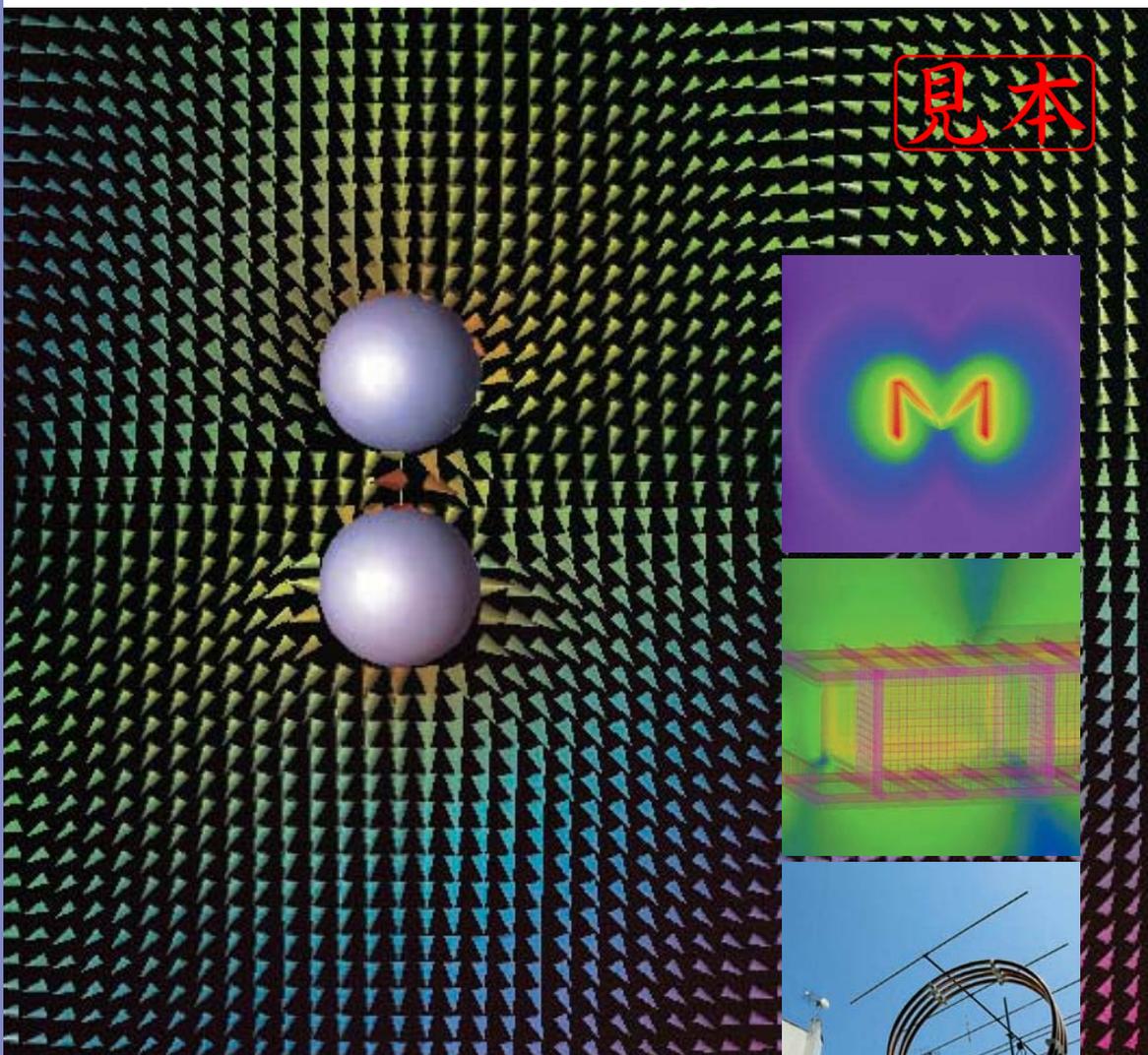
# コンパクト・アンテナ の理論と実践

[ 応用編 ]

フルサイズにせまる技術

JG1UNE 小暮 裕明 [共著]  
JE1WTR 小暮 芳江

見本



# 1 アンテナの分類

# 1 章

世界初のアンテナはヘルツが発明したダイポールです。針金の両端にはサッカーボールくらいの金属球または金属板があり、給電点には小さい金属球のギャップがあります。ヘルツ・ダイポールは空間に置いて使いますが、マルコーニは、片側のエレメントの代わりとして大地を利用しました。また、ヘルツは受波器と呼ばれた受信アンテナとして、1波長のループ・アンテナを発明してこんにもるので、今日アマチュア無線で使われている多くのアンテナのしくみは、すべて1800年代の終わりに発見されていたことがわかります。



マルコーニはヘルツのダイポールを追試し、両端に付けた金属板の一つを地面（写真では机の下）に敷いて使った（マルコーニ博物館にて筆者撮影）

## 1-1 接地型アンテナとは

ハムの入門アンテナの筆頭は、逆Lアンテナやダイポール・アンテナでしょう。筆者は、中学生のときにCQ ham radio誌で入門記事を読み、竹ざお2本でこれらのアンテナを完成させました。電線1本で誰でも工作できるので、いくつかの周波数用に試しましたが、そもそも電波の波長に合わせた寸法にしなければならない理由が、中学時代の筆者にはよくわかりませんでした。

父に相談すると、蔵書の「新ラジオ技術教科書」（日本放送協会 編）を読めばわかるとのこと。本の扉の写真はNHKラジオ放送用鉄塔で、高さが312mもある川口放送所でした。ここからの電波は筆者の短いアンテナでも良好に受信できるため、波長とアンテナ長の関係がますますわからなくなりました。

### 各種の受信アンテナ

図1-1は、「新ラジオ技術教科書」で紹介されていた、各種受信アンテナの構造を表す図です。いずれのタイプもアンテナ線の長さの指定がないので、絵から判断した大まかな寸法で作りました。

アンテナ線はラジオのアンテナ端子につながりました。ここで重要なのは、必ずラジオからアース線を伸ばして、良好な接地（アース）が必要だということでした。

当時の水道管は鉄パイプだったので、庭にある蛇口付近にアース線を接続しましたが、現在の水道管は地中部分が塩ビ管なので、この方法は採用できません。アース棒は、銅棒や鉄棒に銅メッキした数十cm長の製品があるので、それらを地中に埋めて使えば確実です。

### なぜアースが必要なのか？

アースは、「アンテナに誘起された電圧によりアンテナ回路に流れる電流を、大地に導く役目をするものである」と説明されています。そこで、アンテナ自体の働きを先に知る必要があります。受信アンテナは、放送局から発射された「電波を再び電流の形で取り出す」役目をするものと説明されます。

電波が伝わる途中で針金などの導体があると、「電波のエネルギーによって導体中の電子が振動するので、それによって導体には電波の周波数と同じ周波

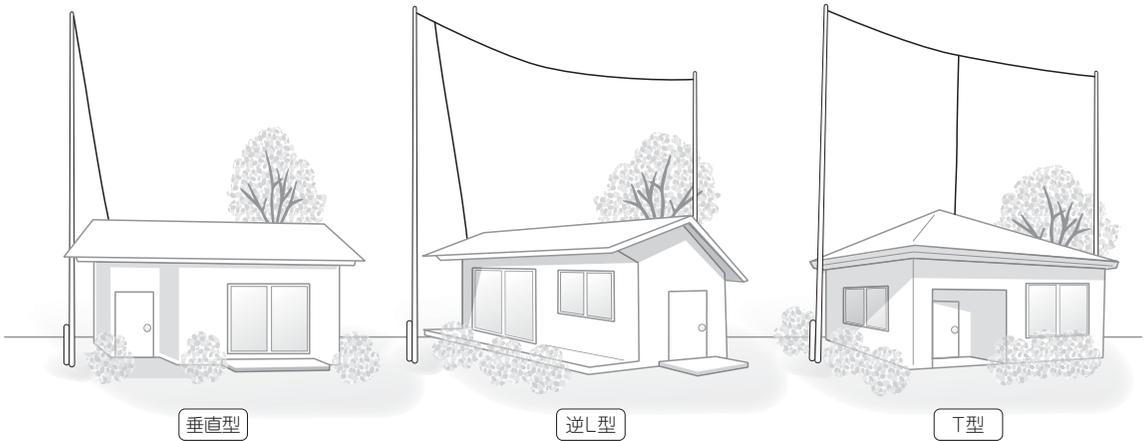


図1-1 「新ラジオ技術教科書」に載っていたラジオ放送受信用の各種アンテナ

数の高周波電流が流れる」というわけですが、アンテナは、電圧が誘起されると電流が流れるので、アンテナの先端と大地の間に電位の差があるということです。例えば先端付近にプラスの電荷が分布している瞬間、大地にマイナスの電荷が分布していれば、アンテナ線には電流が流れるでしょう。

このようなアンテナは、イタリアのマルコーニ（1874 - 1937年）が実用化し、「接地型アンテナ」とも呼ばれています。

### 送信アンテナにもアースが…

図1-2は「新ラジオ技術教科書」に写真が載っていた、NHKラジオ放送用のアンテナの構造図です。2本の鉄塔にアンテナ支線を差し渡し、中央から垂らしたアンテナ線の長さは約270mありました。

図1-2の構造は図1-1のT型に見えますが、水平部は支線なので、アンテナ部は図1-1の垂直型と考えられます。また、送信周波数は590kHzだったので、波長は508.5mです。アンテナ線の長さは約270mで、これは $\frac{1}{2}$ 波長に近いので、垂直設置のダイポールアンテナに見えます。しかし、送信所では良好なアース設備につないでいるため、これはやはり接地型アンテナです。

図1-3は、このアンテナ線に590kHzで給電したときの電界ベクトルの分布で、電磁界シミュレータXFDTDの計算結果を表示しています。

### アンテナには電荷が集まる？

電界は電場とも呼ばれ、空間に広く分布する電位の勾配を表します。図1-3は、電界の方向と大きさを小さい円錐形で表現しているため、これらは電界

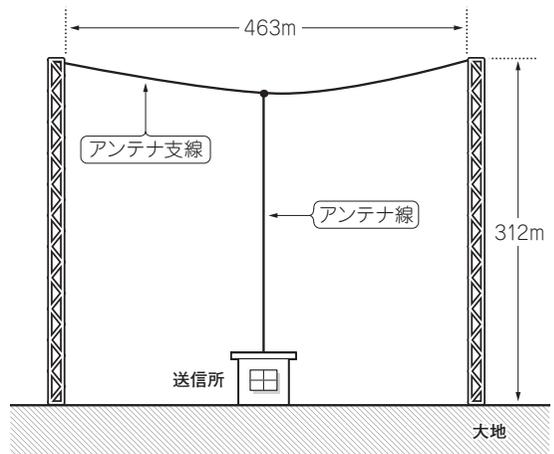


図1-2 埼玉県川口市にあったNHKラジオ放送用アンテナ



図1-3 ラジオ放送用アンテナの電磁界シミュレーション結果で、電界ベクトルを表している（位相角:90°）

ベクトルです。これらの円錐は、連ねると1本の線が描け、この線は電気力線<sup>りききんせん</sup>と呼ばれています。

地面は理想導体に設定していますが、その付近に強い電界が集まっているときに、先端付近の電界もやはり強くなっています。また電界ベクトルは、地面やアンテナ線の表面に対してほぼ垂直に出入りし

## 電界型のコンパクト・アンテナ

ヘルツが発明したダイポール・アンテナは、両端に金属球または金属板があり、コンデンサのように電荷が分布します。マルコーニは、片側のエレメントの代わりに大地を利用し、やはり大地との間に電荷が分布しました。電荷間にできる電位の勾配、つまり電界を発生させる構造が電磁波を生み出します。一方、これは空間を移動する電磁波の電界を引き込む構造でもあり、このタイプのアンテナを「電界検出型のアンテナ」あるいは単に「電界型アンテナ」と呼んでいます。



リニアロードでコンパクト化したトライバンド八木アンテナ KLM KT34A

## 2-1

## そもそも電界とは？

コンデンサは、電圧を加えて電気を蓄える装置です。バリコンの羽根のように、対向する導体の間に電荷を蓄えると、プラスの電荷からマイナスの電荷に、ファラデーやマクスウェルが描いた電気力線で、電位の勾配を表すことができます。これが電界または電場です。

## 平行平板コンデンサの電界

図2-1(a)は第1章でも述べた平行平板コンデンサの電界（電気力線）です。また、図2-1(b)は電磁界シミュレーションによる電界分布の結果で、平板の寸法は10cm×10cm、間隔は1cm、リード線の中央で433MHzの正弦波（サイン波）信号を加えています。

リード線は、高周波ではL（インダクタンス）として働くので、この回路はある周波数で、コンデンサのC（キャパシタンス）とともにLC共振します。

図2-1(b)は、433MHzで共振しているわけではありませんが、図2-1(c)の電界強度分布でわかるとおり、両縁から空間へわずかにはみ出ています。また左半分の電界は、リード線の周りに分布する電界が広がっています。平板間の距離は波長に比べて十分短いので、空間へ押し出される電界は限られていることに注意してください。

## 押し出される電界

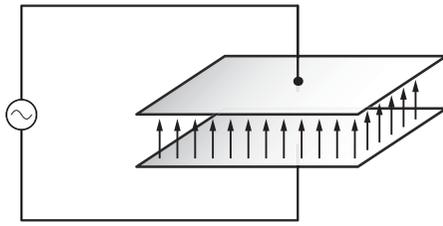
図2-1(d)は平板間の距離を5cmにしたモデルの電界強度分布です。平板の開き口部から空間へ広がる電界が確認できるでしょう。

このモデルも433MHzで共振してはいませんが、黒色で抜けている電界がゼロの領域は、時間が経つに連れて広がっているので、弱いながらも電磁波を放射していることがわかります。

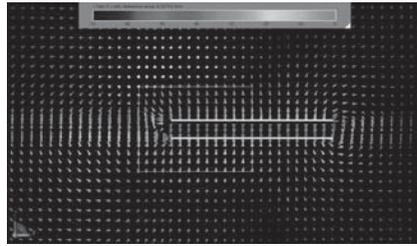
図2-2(a)は、上側の平板を90°回転して、平板間に分布する電界を、意図的に空間へ押し出そうとするアイデアです。電界ベクトルは、導体面に垂直に出入りするので、図2-2(a)に示すように、ある位置で電気力線のループができるのではないのでしょうか？

図2-2(b)は、これを確かめるための電磁界シミュレーションの結果です。ある瞬間の電界強度分布ですが、右上の空間に電気力線のループが発生しているのがわかるでしょう。また、図2-2(c)は同じ瞬間の電界ベクトルの表示で、右上の空間にループ状の電気力線がイメージできるでしょう。

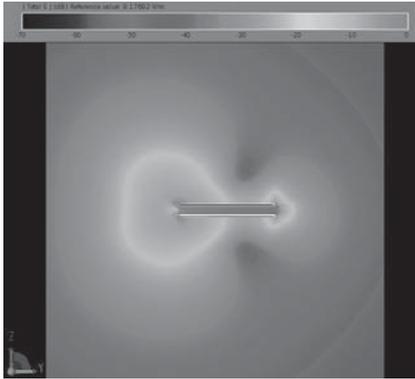
この装置からの放射は、図2-2(d)の放射パターンを描けば確かめられます。右上を向く長い矢印は



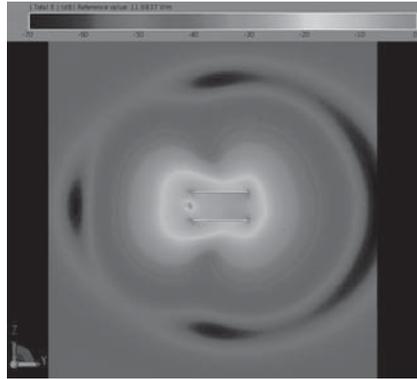
(a) 平行平板コンデンサの電界(電気力線)



(b) 電磁界シミュレーションによる電界分布



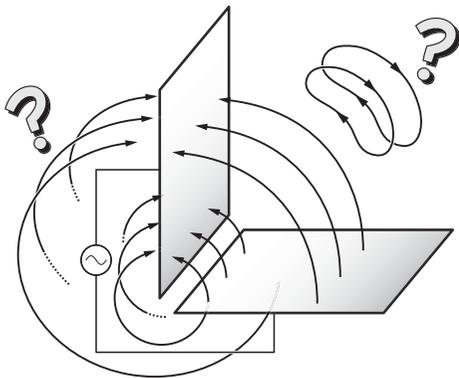
(c) 平板の手前から2cm入った断面の電界強度分布



(d) 平板を5cm離れたときの電界強度分布

図2-1 平行平板コンデンサ

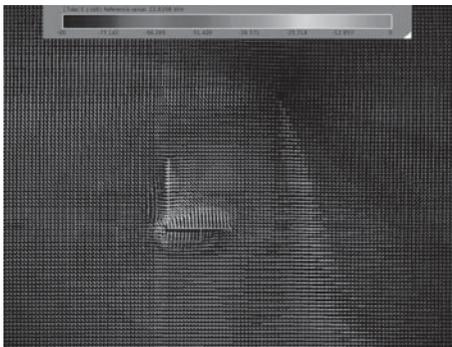
平板は10cm×10cm, 間隔1cm, リード線の中央で433MHzの正弦波信号を加えている



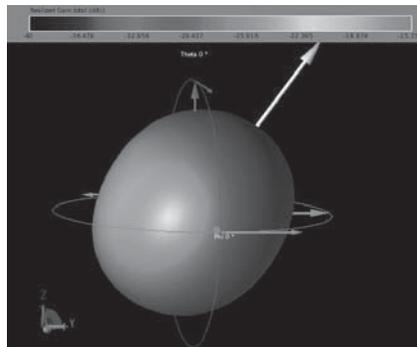
(a) 90°回転した平板に分布する電気力線はこのように描けるのか?



(b) 平板の手前から2cm入った断面の電界強度分布(位相角:0°). 右上に電気力線のループが発生している



(c) 電界ベクトル表示(位相角:0°). 右上の空間にループ状の電気力線がイメージできる

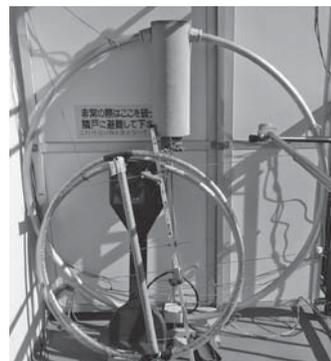


(d) 放射パターンと電力利得のスケール

図2-2 上側の平板を90°回転してみる

## 磁界型のコンパクト・アンテナ

アマチュア無線家が愛用しているアンテナは、ほとんどヘルツのダイポール・タイプです。これは彼が世界で初めて電磁波の実証に成功したアンテナですが、彼に続くマルコーニの接地系アンテナも、やはり電界を発生させる構造が電磁波を生み出します。一方、古くから方向探知器に使われている微小ループ・アンテナは、空間を移動する電磁波の磁界が貫通することで起電力を得る方式で、このタイプのアンテナを「磁界検出型のアンテナ」あるいは単に「磁界型アンテナ」と呼んでいます。その後、送信にも使える1回巻きのマグネチック・ループ・アンテナが発明され、アマチュア無線用にも普及しています。



筆者のベランダで実験を待つMLA群

## 3-1 そもそも磁界とは？

コイルに電流が流れると、その周りに磁界（磁力線）が発生します。小学校の理科の実験で学んだ電磁石を思い出します。そのときは電源に乾電池（直流）を使いました。また、ゲルマ・ラジオのキット（写真3-1）を作ると、バー・アンテナのコイルやスパイダー・コイルがラジオ放送の電波をキャッチします。

電界の変動は磁界の変動を作り、またそれが電界を作り、電界と磁界は空間を伝わります。時間変化

する（交流の）磁界は、コイルを通り抜けると起電力が発生して、ラジオ放送の電波を受信できるというわけです。

## 身近な磁界型アンテナ

電車やバス、買い物でも使えるICカードは、13.56 MHzの短波帯を使っています。ハムの14MHz帯に近いので、カードの寸法に超小型のアンテナが内蔵されているとは、にわかには信じがたいでしょう。

写真3-2は、薄い透明フィルムの表面にアルミ箔で作られたRFIDタグです。RFIDは、Radio Frequency Identificationの頭文字で、直訳すると電波による識別です。衣類などの商品に付けた荷札としてバーコード代わりに使われますが、電波を使ってデータの書き換えが可能なので、流通履歴を確



写真3-1 ワンダーキット WK-RD801

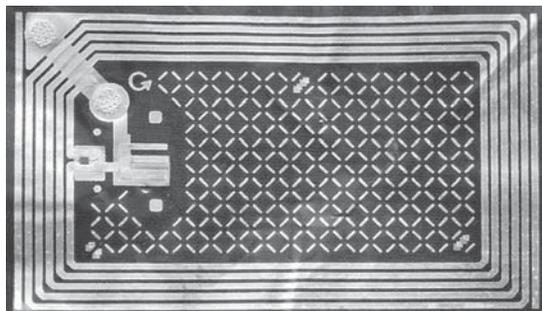
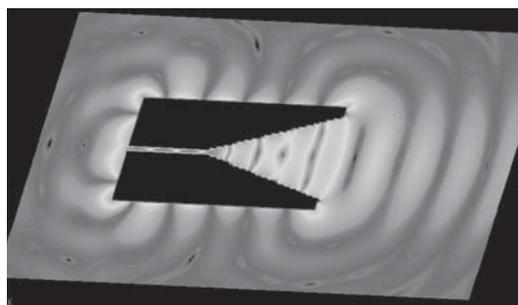


写真3-2 透明フィルムの表面に作られたRFIDタグ

# 4 進行波アンテナは小さくなるのか？

## 4 章

ダイポール・アンテナをはじめとする電界型アンテナや、MLA (マグネチック・ループ・アンテナ) を代表とする磁界型アンテナは、いずれも  $L$  (インダクタンス) 成分と  $C$  (キャパシタンス) 成分による  $LC$  共振現象を利用して強い電流を得ています。そこで、アンテナは共振することが前提であると思いがちですが、給電路を伝わる進行波をそのまま空間へ放出するタイプのアンテナがあり、進行波アンテナとも呼ばれています。共振を利用しないので、理論的には超広帯域で使えるFBなアンテナです。



テーパード・スロット・アンテナ (TSA) の電界強度分布

### 4-1 進行波とは？

電気回路には、電源・配線・負荷の三つの要素があります。アンテナ (負荷) に送信機 (電源) からの電力を供給するために給電線 (配線) が必要で、直流も交流も配線はペアで働きます。電流の流れをたどると、電源から出発して負荷を通り、再び電源に戻るループです。また配線は、電源の電気を負荷に無駄なく伝えるための伝送路ともいえます。

配線間の電圧によって電界が分布し、電流の周りに磁界が分布するので、これらは電源から負荷へ向かって進む電界と磁界の波 (電磁波) で、これを進行波とも呼んでいます。

#### インピーダンス整合と進行波

電気の教科書では、配線の説明に平行2線路がよく使われます。無限の線路を仮定している場合は、進行波が伝わっていることになるので、線路の先にある終端抵抗のことは忘れて理論が展開できます。

しかし、実際には線路の先に負荷となる素子があり、線路は負荷に電力を供給するために必要不可欠です。負荷 (アンテナ) の入力インピーダンスと線路の特性インピーダンスが大きく異なると、両者の接続点で電力の反射が起り、負荷に十分な電力が供給できなくなります。

図4-1に示すように、内部抵抗  $R_i$  を持つ電源から負荷  $R_L$  へ供給される電力  $P$  は、次の式で表されます。

$$P = \left( \frac{V}{R_i + R_L} \right)^2 R_L$$

ここで、 $R_i = R_L$  のときに、図4-2に示すように  $P$  が最大となることがわかります。また、線路の特性インピーダンスも  $R_i$  と同じ値、つまりアンテナの入力抵抗と同じ値のときに、電源と負荷は「整合」しています。

このように、実際の回路では電源と負荷は線路に

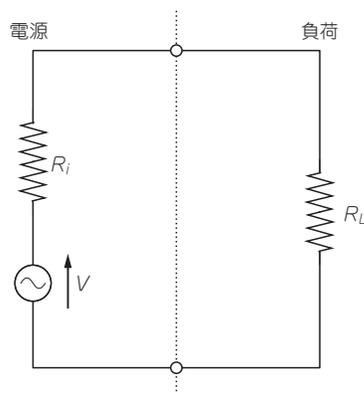


図4-1 内部抵抗  $R_i$  を持つ電源と負荷  $R_L$  をつないだ回路

5  
章

## ちょっと変わったコンパクト・アンテナ

アンテナは、その外観から動作原理が想像できますが、中にはちょっと変わったアンテナもあります。アンテナは一般にスケール変換が可能で、例えばダイポール・アンテナは、エレメント長をほぼ半波長にすることで、どのバンドでも使えます。これとは逆に、かつて「周波数依存性がないアンテナ」が主張されたことがありましたが、共振を利用するアンテナでは考えられません。そのような突飛な話とはもかく、外観からは何アンテナがベースになっているのか、極めてわかりづらいアンテナを集めてみましょう。



ベランダに設置したヘリカル・コイル・エレメント  
(JA1QQJ 村吉OM 製作)

## 5-1 ヘリカル・アンテナ

初期の携帯電話のアンテナは、図5-1に示すように、外部アンテナの上部に背の低い円筒形のカバーが固定されているタイプです。この円筒の中には、図5-1のような、ダイポール・アンテナの線をバナネ状に巻いたコイル・アンテナ（ヘリカル・アンテナともいう）が収納されています。

コイルは誘導性リアクタンスなので、エレメントがすべてコイルであれば純抵抗分がなくアンテナにはならないと考えられますが、それは本当でしょうか？



図5-1 初期の携帯電話の外部アンテナ

## コイルはアンテナになるのか？

コイルが波長に比べて極めて小さく、集中定数と見なせるのであれば、理論的には誘導性リアクタンスなので、レジスタンスは無視できる値です。しかし、波長に近い長さを粗く巻いたコイルは、物理的な寸法と動作周波数の波長との関係によって、図5-2のような種類の放射パターンが得られます。

これらはヘリカル（螺旋状の）アンテナと呼ばれていますが、図5-2(a)は、ヘリックス1回巻きの長

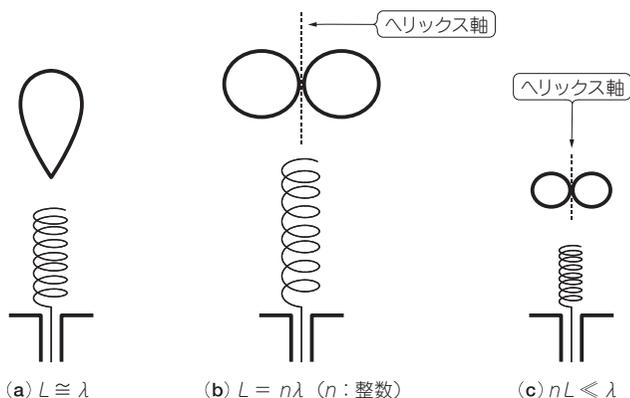
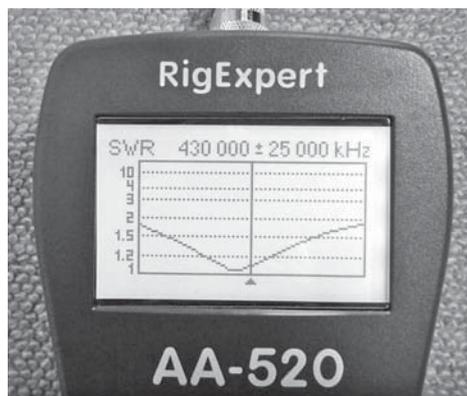


図5-2 ヘリカル・アンテナの寸法と放射パターン

# アンテナ・システムの測定法

## 6章

最近よく見かけるFeliCaなどの非接触ICカードは、13.56MHzで共振する小型のマグネチック・ループ・アンテナが使われています。また、バーコードの代わりに普及している920MHzのRFIDタグは、コンパクト・ダイポール・アンテナが主流です。いずれも高周波ICにアンテナが直付けされているので、給電線路はありません。しかし、一般にアマチュア無線用のアンテナは同軸ケーブルで給電されるので、両者を含むアンテナ・システムとしての測定方法を知る必要があります。給電線路の長さを調整してVSWRを下げるというノウハウ(?)をご披露されるOMの報告がありますが、正しい方法なのでしょうか？



VSWRのグラフ表示機能は便利。スミスチャートを表示できる機種もある

筆者が愛用しているアンテナ・アナライザ、リグエキスパートAA-520 (<http://ja1scw.jp/shop/>)

### 6-1

### 給電線路の基本

アマチュア無線のアンテナ給電に用いられる線路は、同軸ケーブルが一般的です。筆者が中学生だった1960年代、トリオ(現 JVC KENWOOD)製送信機TX-88Aのアンテナ端子は、平衡回路につながっていたので、平行2線路(はしごフィーダ)を接続していました。当時、ダイポール・アンテナは、はしごフィーダで給電するものかと思いついていました。

その後、SSB機のFL-50B(八重洲無線製)が1969年に発売され、アンテナ端子に不平衡用のM型コネクタを採用したため、このころからアンテナには同軸ケーブルを使って給電するようになりました。

#### さまざまな給電線路

表6-1に、アマチュア無線で使われる給電線路をまとめています。電界(電気力線)は実線、磁界(磁力線)は点線で表しています。また伝搬モードとは、伝送線路の形状によって決まる境界条件<sup>\*1</sup>のもとでマクスウェルの方程式を解くことで得られます。

交流理論や数値解析<sup>\*2</sup>では正弦波を扱いますが、

同軸線路や導波管内では、正弦波で表される複数の独立な伝搬解が得られ、これらをモード番号の添え字を付けて表します。

表6-1の $m$ 、 $n$ はモード番号で、0から始まる整数です。また、同軸線路と導波管は代表的なモードを示しています。同軸線路は基本のモードであるTEMモード<sup>\*3</sup>で使います。

マイクロ波やミリ波で使われる導波管では、モード番号が増えるに連れて電磁界分布のパターンはより複雑になります。電界ベクトルと磁界ベクトルは、空間のどの位置でも直交していることに注意してください。

#### 給電線路の特性インピーダンスとは

平行2線路や同軸線路のようなTEMモードの場合、電磁界シミュレータで得られた電界 $E$ と磁界 $H$ の大きさから、その線路の特性インピーダンスがわかります。

TEM波伝送路では、図6-1のような分布定数回

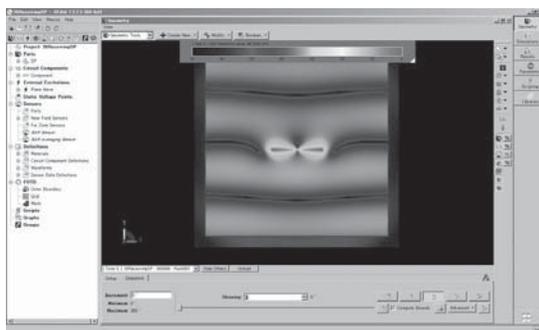
\*1 境界条件は、2種類の媒質の境界面において電界と磁界に課する条件。

\*2 数値解析とは、数値を直接用いて近似的に解く解析手法のことで、機械系で用いられる有限要素法(FEM)や境界要素法(BEM)は、電磁界シミュレーションの手法としても発展している。

\*3 TEM(Transverse Electromagnetic)モードは、電界も磁界もその進行方向と直交する成分しか持たないような振動のモードをいう。

## 章

電磁界シミュレータは、コンピュータでマクスウェルの方程式を解いているので、アンテナはもちろん、最近問題になっている高周波ノイズの解決や多層基板の設計にも使われています。携帯電話やスマートフォンは小型アンテナを内蔵しているため、世界中のメーカーがさまざまなシミュレータを駆使して、短期間に何種類もの機種を開発するという新手法が、業界の常識になってきました。しかし、ハムがこれを活用することにはアレルギー反応 (hi) もあるようで、プロの世界でもいまだに賛否両論があります。



平面波を受信しているダイポール・アンテナの周りの電界強度分布  
電磁界シミュレータXFDTDの画面

## 7-1

## シミュレーションは役に立つのか

筆者らの旧友であるAJ3K Dr. Jim Rautioは、1986年にベンチャーとして起業し、電磁界シミュレータSonnetを開発・販売しています。そのご縁で30年ほど活用していますが、友人の環が広がり、他社のプログラマーたちとも交流があります。彼らの多くは優秀な技術者で、ベンチャーとはいえ10人前後の博士号取得者が設計・開発しています。

## 高価なおもちゃ？

1980年代から電磁界シミュレータを活用していますが、そのおかげで、何年か前のあるベンダーから「電磁界シミュレータのエバンジェリスト」の称号を賜り、おどろきました。エバンジェリスト (エヴァンゲリオンではない、hi) とは伝道師という意味で、電磁界シミュレータの普及に貢献していると認められたわけです。しかし、ここまでの道のりは決して平坦ではなく、説明に出かけた企業で「高価なおもちゃじゃないのか？」と問われる日々が続きました。

1990年代、UNIXワークステーション上で使う電磁界シミュレータは、当時のソフトウェアとしては高額の1,000万円を超えるものが主流でした。

## そもそも手計算では解けない？

「パソコンなんかで設計するから、理論もわからない技術者が増えるんだ」と、電気関連の企業でお叱りを受けることがあります。また、「学生にいったん使わせてしまうと、二度と手計算をしなくなる」といった性悪説(?)を唱える教授もいらっしゃいます。

しかし、学校の授業で電磁気学をしっかりと学んでも、社会へ出てしばらく経つと「あれは難しかった」という記憶だけが残っているのが現状でしょう。筆者も、方程式の暗記と応用問題の解法に明け暮れた学生時代でしたが、改めて教科書に書かれている多くの式を眺めると、このままアンテナの設計に使えるものは見あたりません。これらの式から、現場の設計に役立つ式が導出できるものなのか……教科書にはできるとも書かれていないし、無謀だからやめよともありません。

アンテナは「電磁気学の究極の問題」なので、マクスウェルの方程式を解く必要があることはわかります。しかし、性悪説を唱える人たちは、これを「手計算で解け!」とでも言いたいのでしょうか。

例えば、直線状のダイポール・アンテナの両端を

**CQ出版社**

見本

ISBN978-4-7898-1645-8

C3055 ¥2400E

**CQ出版社**

定価：本体2,400円（税別）



9784789816458



1923055024007

このPDFは、CQ出版社発売の「コンパクト・アンテナの理論と実践[応用編]」の一部見本です。

内容・購入方法などにつきましては以下のホームページをご覧ください。

内容 <http://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/16/16451.htm>

購入方法 <http://www.cqpub.co.jp/order.htm>

アンテナ・ハンドブック  
シリーズ



# コンパクト・アンテナ の理論と実践 [応用編]