

## 1. アンテナの放射効率とは

次の疑問が出されました。

短縮コイル入りのダイポールにおいて、ヒゲの調整によって共振周波数がハムバンド内に収まり、SWR も 1.5 以下になりました。

しかし、共振してリアクタンスがゼロ近くになってもアンテナ固有の放射抵抗値が送信機側の負荷  $50 \Omega$  でないと実際にマッチングがとれたことにならないのではないのでしょうか？

この提起には「エレメントの共振」「SWR」「放射抵抗」「給電点インピーダンス」「インピーダンス整合」「アンテナの性能」など様々な内容が含まれているので全般的な理解はアンテナ解説書に譲るとして、本稿では放射抵抗と放射効率に絞ってアンテナの性能を説明します。

アンテナの放射効率はアンテナからの全放射電力と供給電力の比であり、そのアンテナが持つ指向特性とともにその性能の優劣を決定します。アンテナの放射効率は放射抵抗と損失抵抗の関数であるとされますが、それらの値を実測することはほとんど不可能であり、そのために放射効率の重要性にもかかわらず現実的なアンテナの評価基準になっていません。

そこで本稿では、給電点インピーダンスという測定可能な値と理論値を基にアンテナの放射効率を推定する方法を提案します。

## 2. 放射抵抗の常識

理論はさておき、一般に次のことが知られています。

- 自由空間に置かれた  $\lambda/2$  ダイポールの放射抵抗  $R_a$  は  $73\Omega$  である。
- 短縮ダイポールでは、短縮率に応じて放射抵抗が  $73 \sim 0\Omega$  になる。

給電点インピーダンスを測定して検証できますから、上の二つは正しいことが分かります。ところで、次は正しいでしょうか。

- ゲインが増すほど放射抵抗が下がる。

これについては「そんなはずはない」という人もいれば、「納得している」という人もいて、議論の分かれる所です。

事実に基づくために、 $\lambda/4$  モノポールアンテナ (グラウンドプレーンアンテナ) を例にとりまします。完全導体に対して垂直に置かれた  $\lambda/4$  の放射器は  $\lambda/2$  ダイポールの半分の寸法です。放射抵抗は  $40\Omega$  と計測されました。では何故  $40\Omega$  になったのでしょうか。短縮アンテナと見るには無理があり、それが理由で放射抵抗が下がったのではないでしょう。

後藤尚久著「アンテナがわかる本」p207 によると、 $\lambda/2$  ダイポールでは絶対利得  $G_{is}$  と  $R_a$  の関係は

$$G_{is} R_a = 120[\Omega]$$

$\lambda/2$  ダイポールの放射特性がドーナツ型ですが、 $\lambda/4$  モノポールアンテナのそれはベークマン型でありゲインが大きいことから、後者の放射抵抗が低いのは頷けます。八木型や 8JK 型など  $\lambda/2$  ダイポールにエレメントを追加した高ゲインアンテナの放射抵抗は  $10\Omega$  台に下が

ることがあります。つまり、放射抵抗はアンテナの形状と設置環境から決まってくるアンテナ固有の値になるべきものです。

実際のアンテナを給電点で計測すると、そのアンテナ固有の放射抵抗よりも増または減となります。増減の原因は損失抵抗にあります。

### 3. 従来の説明の仕方

一般にアンテナの放射効率  $\eta_s$  とアンテナの放射抵抗  $R_a$  および損失抵抗  $R_l$  の関係は、次式であるとしします。

$$\eta_s = \frac{R_a}{R_a + R_l} \times 100 [\%] \quad (1)$$

例えば中波用垂直接地アンテナについて、岡本次雄著「アマチュアのアンテナ設計」p19では、約  $R_a = 3.4\Omega$  になります。 $R_l$  はアンテナと大地との間の接地抵抗  $R_g$  のみであり  $R_g = 2.3\Omega$  であったとすると、具体的には  $\eta_s = 60\%$  です。

この式が示すように  $\eta$  の低下の原因は、 $R_a$  が非常に小さいこと、それだけに  $R_g$  の効きめが大きいこと、にあります。したがって、 $R_a$  をできるだけ大きくし  $R_l$  をゼロに近づけると、 $\eta_s$  が高い良いアンテナになります。

このようなアンテナを、図1の等価回路で表現します。当然、リアクタンス  $X_c$  は適当な誘導性リアクタンスで打ち消しますので、抵抗分で供給電力が消費されます。

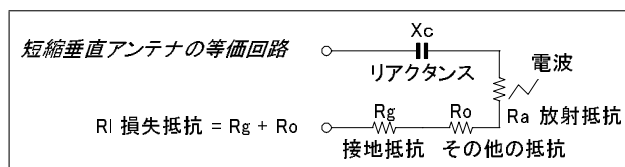


図1: 短縮アンテナの素子直列による等価回路

誰でも式(1)と図1からアンテナの放射効率を直感できます。Kraus 著谷村功訳「空中線」p347でも同じ式が使われており、上記の考え方は定説となっています。

### 4. 実際に近いアンテナの等価回路

波長に比べて無視できないほどの長さを持っているアンテナを集中定数で表現するのは簡単ではありませんが、各素子の働きを大まかに掴むには等価回路は良い方法です。ここで、前項の直列回路よりは図2で示す直列並列等価回路の方が、より実際のアンテナ解析に向いていると思います。

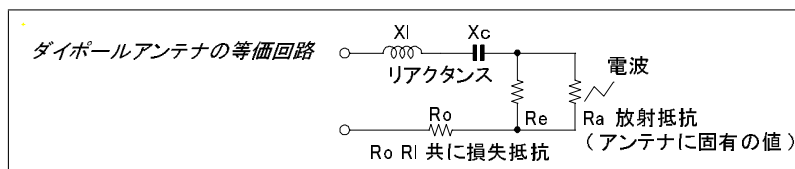


図2: ダイポールアンテナの複合等価回路

図2中の  $R_a$  は、第2項で述べたようにアンテナ固有の放射抵抗になります。なお、短縮ダイポールの指向性は  $\lambda/2$  ダイポールに類似していますから、放射抵抗自体は  $73\Omega$  であるけれど  $\eta$  を下げる原因となる損失抵抗  $R_e$  を並列に接続していると解釈できます。こうすれば、 $\lambda/2$  ダイポールの  $R_a = 73\Omega$ 、 $\lambda/4$  モノポールアンテナの  $R_a = 40\Omega$  というふうに、 $R_a$

を定数のように扱うことができます。

総体的な損失抵抗は、オーミックな損失抵抗  $R_o$  と放射損失抵抗  $R_e$  に分けて考えます。 $R_o$  は供給電圧を分圧する形となり、 $R_e$  は電流を分流する形で、いずれも  $R_a$  へのエネルギーを縮小します。

損失抵抗の具体的な姿は、 $R_o$  はダイポールアンテナの電流波腹部分で大きく効き、その原因には導体抵抗、表皮作用、接地抵抗などがあります。 $R_e$  はダイポールアンテナの電圧波腹部分で影響が大きく、原因は誘電体損失、絶縁抵抗などがあります。また、アンテナ周辺の遮蔽やエレメント短縮なども  $R_e$  になると考えられます。同じく給電点抵抗を下げる働きをする  $R_e$  は、ゲインによる  $R_a$  の低下とは違って、悪者です。

ワイヤーやポールなど VHF 以下の周波数で使われるアンテナでは、 $R_e$  よりも  $R_o$  の方が効きめが大きいでしょうが、携帯電話や RFID などの平面アンテナでは誘電体損失や周辺環境が大きくなりますので、 $R_e$  も無視できなくなります。

#### 5. 給電点から見たアンテナの良さ

以上に述べたように、 $R_a$  はそれぞれのアンテナのゲイン (それに直接関連する指向性) に由来する固有の値を持っていますから、一概に高い  $R_a$  を求めても意味がありません。また、 $R_a$  を直接計測する手段もないので、第 1 項の質問にある「 $50\Omega$  でないと」という条件だけでは、正当な答えが出せないことになります。

正しく言うと、自由空間に置かれた  $\lambda/2$  ダイポールであれば給電点で  $73\Omega$  よりも高くても低くても  $\eta = 100\%$  ではない、ということです。 $\lambda/4$  モノポールアンテナの場合には給電点で  $40\Omega$  が理想的なアンテナとなります。その他のアンテナの固有の  $R_a$  は、例えば「空中線」などに値が示されています。一般にビームアンテナでは  $R_a$  は低い値を示しますが、それがそのアンテナ固有の最適値です。

損失抵抗は図 2 から分かるように、給電点での測定値を高くする場合もあれば、低くする場合もあり、両者が共に存在することもあるので複雑です。実際の環境の下で各損失抵抗の効きめを勘案しなければならないのです。

なお、 $R_o$  が直列に  $R_e$  が並列接続されたことによる放射効率  $\eta_p$  は次式で表されます。

$$\eta_p = \frac{R_x^2}{R_a(R_o + R_x)} \times 100 [\%] \quad \text{ただし、} R_x = \frac{R_a R_e}{R_a + R_e} \quad (2)$$

一般的に、 $R_o$  を小さくし  $R_e$  を  $R_a$  に対して十分大きくとることが放射効率を高くし、良いアンテナとなります。

以上