



第5章 電波がどこまで届くかを 知るためのコモン・センス

電波伝搬の基礎知識

藤田 昇
Noboru Fujita

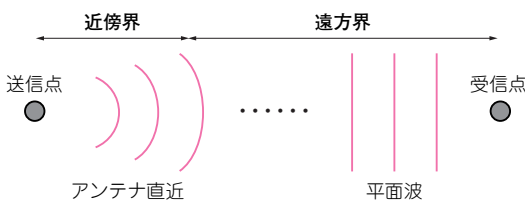
平面波で考える

送信アンテナ直近の電波は、周囲に広がりながら伝搬します。送信アンテナから十分離れた位置における電波の電界と磁界は、受信アンテナの大きさに対して一様に分布していると考えられます。また、電界と磁界の比を「電波インピーダンス」または「波動インピーダンス」といい、その値は一定です。このような波を「平面波」といいます。電波伝搬における受信電力等の計算には、電波を平面波として扱います。

一方、波長に比べて十分小さなアンテナ、例えば微小ダイポール・アンテナまたは微小ループ・アンテナを電波発生源としたときに、そのごく近傍では電界または磁界が支配的になります。別な言い方をすれば電波インピーダンスが高く（電界が支配的）または低く（磁界が支配的）なるともいえます。

図1のように電波発生源からある距離以上離れたと、平面波として考えることができ、その距離は波長を λ で表すと $\lambda/(2\pi)$ になります。例えば、2.4 GHz帯の波長は約12 cmですから、約2 cmになります。この距離以下を「近傍界」といい、近傍界より遠い位置を「遠方界」といいます。

実際に使用するマイクロ波帯のアンテナの多くは $1/2\lambda$ 程度、またはそれ以上の大きさがあるので、アンテナから数波長以上離れた位置を遠方界（平面波）と考えるのが一般的です。



〈図1〉 近傍界と遠方界

送信電力と受信電力

電力束密度

理想アンテナから放射された電波は、図2のように球状に広がっていきます。球の表面積は $4\pi D^2$ なので、送信電力を P_t Wとすれば距離 D mの地点の単位面積あたりの電力束密度 P_d W/m²は、式(5-1)で表されます。

$$P_d = \frac{P_t}{4\pi D^2} \dots\dots\dots (5-1)$$

この式には周波数項がないことに注目してください。つまり、ある距離の単位面積を通過する電波（電磁波）のエネルギーは送信電力と距離だけの関数となり、周波数の高低にはまったく関係ないことがわかります。

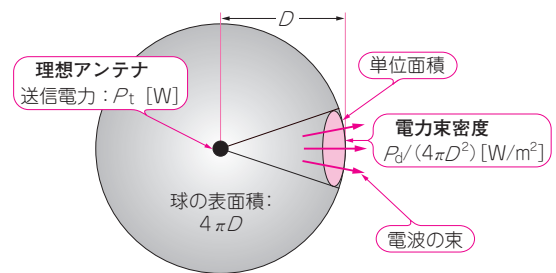
さて、距離 D が波長やアンテナの大きさに比べて十分長ければ、実際のアンテナにも上式が当てはまります。送信アンテナ利得を G （絶対利得）とすれば、

$$P_d = \frac{GP_t}{4\pi D^2} \dots\dots\dots (5-2)$$

となります。

例えば、送信電力 P_t を1 W、送信アンテナ利得 G を10 dBi（10倍）とすれば、100 m離れた地点の1 m²の面積を通過する電力束は式(5-2)から、

$$P_d = \frac{10 \times 1}{4\pi \times 100^2} \approx 0.00008 \text{ [W/m}^2\text{]}$$



〈図2〉 理想アンテナの電力束密度

見本

$$\approx -41 \text{ [dBW/m}^2\text{]} = -11 \text{ [dBm/m}^2\text{]}$$

となります。

もし、この位置に実効開口面積が1 m²の受信アンテナを置けば、そのアンテナ端子から-11 dBmの電力を得られることがわかります。

■ 電波インピーダンス

先に述べたように、電波は直交した電界と磁界で構成されます。その電界の強さを表すものが電界強度です。単位は“V/m”で、長さ1 m当たりの電圧という意味です。一方、磁界強度は磁界の強さを表すもので、単位は“A/m”です。直径1 mのループに1 Aの電流を流したときの中心の磁界が1 A/mになります。

この電界強度 E と磁界強度 H の比は、媒質の誘電率 ϵ と透磁率 μ で決まり、式(5-3)の関係にあります。

$$E/H = \sqrt{\mu/\epsilon} \dots\dots\dots (5-3)$$

この E/H を電波インピーダンス(または波動インピーダンス)といいます。 E と H をそれぞれ単位 V/m, A/m で表したときの電波インピーダンスの単位は Ω となります。

真空中の誘電率 ϵ_0 F/m と透磁率 μ_0 H/m は、それぞれ次のとおりです。

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \pi c^2 \times 10^{-7}} \text{ [F/m]}$$

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{ [H/m]}$$

ここで、 c は真空中の電波伝搬速度 (= 光速) で、 $c = 3 \times 10^8$ m/s ですから、真空中の電波インピーダンス Z を計算すると、

$$\begin{aligned} Z = E/H &= \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} \dots\dots\dots (5-4) \\ &\approx \sqrt{(4 \pi \times 10^{-7}) / (36 \pi \times 10^9)} \\ &\approx 120 \pi \text{ [\Omega]} \end{aligned}$$

となります。空気の誘電率は真空とほぼ同等(すなわち電波伝搬速度が同等)ですから、空気中の電波インピーダンスも $120 \pi \Omega$ になります。

さて、次元から見てもわかるとおり、電力束密度 P_d W/m² は電界強度 E V/m と磁界強度 H A/m の積で表されます。これらは式(5-5)のようにオームの法則の電力、電圧、電流と同じように計算できます。空气中であれば抵抗(電波インピーダンス)が一定ですから、電力束密度、電界強度、磁界強度のいずれかが決まるとほかは一義的に決まります。

$$P_d = E \times H \dots\dots\dots (5-5)$$

■ 送信電力と電界強度

● 送信出力、送信アンテナ利得が既知のときの、ある距離における電界強度

送信出力 P_t W, 送信アンテナ利得 G (絶対利得)のとき、距離 D m の地点の電力束密度 P_d W/m² は、次式で表されます。

$$P_d = \frac{GP_t}{4 \pi D^2} \dots\dots\dots (5-6)$$

オームの法則でいえば $E = \sqrt{WR}$ なので、電界強度 E V/m は、式(5-7)で表されます。

$$E = \sqrt{\frac{GP_t}{4 \pi D^2} Z} \dots\dots\dots (5-7)$$

Z は電波インピーダンスで、真空中では約 120π ですから、

$$\begin{aligned} E &\approx \sqrt{\frac{GP_t}{4 \pi D^2} \times 120 \pi} \\ &= \sqrt{\frac{30 GP_t}{D}} \dots\dots\dots (5-8) \end{aligned}$$

となります。

この式の中に周波数の項目がないので、周波数に関係なく電界強度を計算できるように見えますが、実はアンテナ利得が周波数の関数になっています。つまり、ある利得のアンテナの開口面積は波長の2乗に比例(周波数の2乗に逆比例)するので、低い周波数で同一電界強度を得ようとすると、高い周波数に比べて大きなアンテナが必要になります。

● ある電界強度を得るための送信電力

逆に、ある電界強度を得るための送信電力 P_t W は、式(5-9)で表されます。

$$P_t = \frac{E^2 D^2}{30 G} \dots\dots\dots (5-9)$$

例えば利得 2.14 dBi (≈ 1.6 倍)のホイップ・アンテナを使用し、3 m 離れた距離の電界強度 500μ V/m が必要なときの送信電力を計算してみましょう。

$$\begin{aligned} P_t &= \frac{E^2 D^2}{30 G} = \frac{(500 \times 10^{-6})^2 \times 3^2}{30 \times 1.6} \\ &\approx 4.69 \times 10^{-8} \text{ [W]} \\ &\approx -43 \text{ [dBm]} \end{aligned}$$

3 m 離れた距離で電界強度 500μ V/m というのは、電波法上の微弱電波の規格(周波数 322 MHz 以下の場合)です。例えば、周波数が 300 MHz の場合は、250 mm 長のホイップ・アンテナでも -43 dBm という極めて小さな出力が限界となります。この出力は、一般的な無線装置(空中線電力 1 W 以下)のスプリアス規格(-10 dBm)の1/1000よりも小さな値です。また、一般的な受信機の不要輻射の規格は-54 dBm なので、微弱電波の送信機といっても受信機に毛が生えた程度の出力といったほうがよいでしょう。逆にいうと、このような小さな出力だから無免許で使用できることとなります。

■ 電界強度と受信電力

受信電力は、電力束密度と受信アンテナの開口面積から計算できます。電力束密度は電界強度と電波インピーダンスから計算でき、開口面積はアンテナ利得か