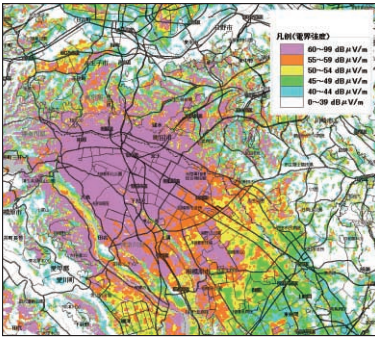


特集



第1章 自由空間の伝搬, 固定通信の伝搬, 移動通信の伝搬

電波伝搬の基礎

長谷 良裕
Yoshihiro Hase

まずは、電波伝搬を語る上で、最も基本的な事項の解説から始めましょう。この章では、自由空間伝搬損失から始まって、移動体通信の場合の受信レベル変動の典型的パターンである、長周期変動、短周期変動、瞬時変動のことまでを理解します。

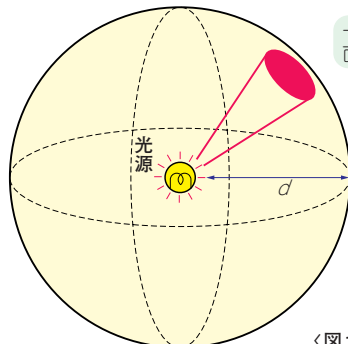
自由空間の伝搬

■ 送信電力と受信電力の関係

● 電球からの光のエネルギーで考える

小さな電球を周りに何も無い空中に固定したと考えてください。その小さな電球から放たれた光は、電球から離れば離れるほど弱く(暗く)なっていくことは容易にイメージがわきます。

光の強さは距離の2乗に反比例して弱くなっていくのです。電球が出した光は空気中ではほとんど減衰しません(吸収されません)から、図1のように、電球を中心とした半径 d の仮想的な球で囲むとすると、その球の内面に当たる電球が発した光のエネルギーの総和は d に関係なく一定のはずです。 d が大きくなると光が弱くなるというのは、 d が大きくなると球の表面積が大きくなるので、単位面積当たりの光のエネルギーが少なくなる、つまり、光のエネルギー密度が減るからです。球の表面積は $4\pi d^2$ ですから、結局、単位面積当たりの光のエネルギー密度は $4\pi d^2$ に反比例しま



〈図1〉電球から放たれた光

す。ここで注意してほしいことは、電球から離れるにつれて光は減衰するのではなく、広がるために(光のエネルギー密度が小さくなるために)同じ面積で受光する光エネルギーの総和が小さくなる、ということです。

電波も光と同じ電磁波の一種ですから、電球を送信局に置き換えると、上に書いた光とまったく同じ状況が当てはまります。自由空間では本当は電波は減衰していないのですが、同じ面積(光の場合の受光面積)で考えると、つまり、電波の場合には同じ実効面積のアンテナで受信すると、距離が遠くなれば遠くなるほど受信電力は減っていくので、あたかも距離によって損失を受けたかのように感じてしまいます。そこで、距離の2乗に反比例する「自由空間伝搬損失」という概念を導入して数式化されるのが無線業界での常識になっています。

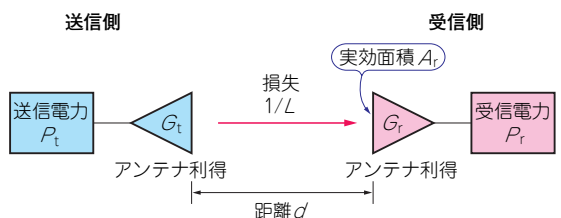
● 数式で表す

上に述べたことを数式で表してみましょう。図2を参考に、送信局の送信電力(送信アンテナに入力される電力)を P_t 、送信アンテナの利得(絶対利得)を G_t 、送受間の距離を d 、受信アンテナの実効面積を A_r とすると、受信局の受信電力 P_r は、

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r}{4\pi d^2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 P_r : 受信電力 [W], P_t : 送信電力 [W], G_t : 送信アンテナの利得(絶対利得) [単位なし], d : 送受間の距離 [m], A_r : 受信アンテナの実効面積 [m²]

となります。受信アンテナの利得 G_r (単位なし)と実効面積 A_r との間には、波長を λ mとして、



〈図2〉無線回線の基本構成

$$A_r = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \dots\dots\dots (2)$$

という関係があるので、代入すると、

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2} \dots\dots\dots (3)$$

という式になります。この式の中で、

$$\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

の部分を「自由空間伝搬損失」といいます。自由空間伝搬損失を L (単位なし)と表すと、

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r}{L} \dots\dots\dots (5)$$

という極めて単純な式で受信電力を計算できます。それぞれの数値を dB 単位で表せば、受信電力は加算と減算で計算できてしまいます。つまり、単位 dB を使って対数で表すと、

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \dots\dots\dots (6)$$

となります。衛星放送で具体的な数値の一例をあげると、 $P_t = 20$ dBW, $G_t = 40$ dBi, $G_r = 26$ dBi, $L = 206$ dB の場合に、

$$P_r = 20 + 40 + 26 - 206 = -120$$

から、 $P_r = -120$ dBW といったところでしょうか。

自由空間伝搬は、言わば、理想的な伝搬状況ですが、おおむね 10° 以上の仰角が得られて、途中に遮蔽物のない晴天時の衛星通信や衛星放送の場合には、ほぼ自由空間伝搬とみなすことができます。イントロダクションで述べたボイジャーの場合などは典型的な自由空間伝搬といえます。

● 現実の無線システムと回線マージン

自由空間伝搬では、距離が変動しない固定通信の場合には、受信強度が変動する原因がまったくありませんので、システム設計は非常に楽です。

実際に衛星放送の場合にも、設置するアンテナの指向誤差と強雨時の降雨減衰を考えても、わずかに数 dB しか回線マージンを見込んでいません。ちなみに、この回線マージンは携帯電話等の移動通信では、30 dB 位もあたりまえに見込んでいます。

衛星通信や衛星放送は、実用限界ぎりぎりのところ

で動作しているシステムなのです。

■ 電界強度

なお、衛星関係の技術者は上式のように電力値をもとにした式で表すことが多く、衛星通信の教科書も上述のようなスタイルで書かれているのがほとんどです。電力値で書くと式が非常にすっきりします。しかし、移动通信や TV 関係の技術者や教科書では、電力値でなく電圧値や電界強度値の式で書かれている場合が多いようです。また、UHF 帯以下を扱う測定器は電圧表示できるものが多く見受けられます。逆に SHF 帯以上のもので電圧表示のある測定器は見たことがありません。

● 電界強度

電界強度への換算は、電界強度を E_0 、自由空間インピーダンスを $Z_0 = 120\pi\Omega$ とすると、

$$\frac{P_r}{A_r} = \frac{E_0^2}{Z_0} \dots\dots\dots (7)$$

という関係になるので、

$$E_0 = \sqrt{\frac{Z_0 P_t G_t}{4\pi d^2}} \dots\dots\dots (8)$$

となります。この式から、電界強度は周波数に関係しないことがわかります。周波数に依存せず比較できるところが電界強度表示のメリットです。

● 実効長

ちなみに、式(2)で書いたアンテナの実効面積ですが、電圧表示だと不便なので、代わりに「実効長」または「実効高」という概念がよく使われます。式(8)の電界強度に実効長をかけると受信電圧になります。つまり、電界強度が E_0 V/m の場所で実効長 l_e m のアンテナを使って受信した場合の受信電圧 V_0 V は、

$$V_0 = E_0 l_e \dots\dots\dots (9)$$

となります。半波長ダイポール・アンテナの実効長は λ/π になり、これが周波数に関係してきます。

ここで注意してほしいのは、この V_0 という電圧は、アンテナに受信機をつながない場合の開放端電圧(単位を V_{emf} のように表記することがある)であり、実際に受信機をつなぐと、その入力インピーダンスとアンテナのインピーダンスの比によって受信機への入力電

■ 単位 dB μ は電圧の dB μ V なのか電界強度の dB μ V/m なのかに注意

ところで、電界強度 E_0 の単位は V/m ですが、dB 表記の場合には dB μ V/m という単位を使うのが一般的です。技術者どうしの会話では、dB μ V/m というのは長くていいにくいので、略して dB μ (デービーマイクロと発音する)という場合が多いよう

です。また、受信機入力電圧も dB 表記では dB μ V が一般的なもので、これも略して dB μ です。

電圧の単位としての dB μ V なのか電界強度としての dB μ V/m なのか、まぎらわしい場合が多いので、会話では混同に注意してください。