

＜建造物障害予測技術 その8：予測技術の基礎 2＞ （球面大地における電波伝ぱん）

地球は半径約 6,380km の楕円体であり、実際の電波伝ぱんの解析ではこの丸みを考慮しなければなりません。この電波伝ぱんによる電界強度は図 1 に示すように次の 3 つの領域に区分して扱います。

- a 見通し距離内：平面大地での計算式を補正して利用します。
- b 見通し距離外：回折波伝ぱん計算式によります。
- c 見通し距離近傍：計算式で求めることは難しいため、上記 2 領域を考慮して近似的に求め使用します。

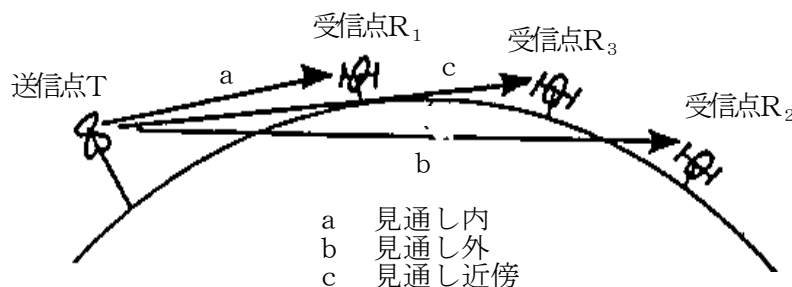


図 1 伝ぱんの 3 領域

☆ 見通し距離内の伝ぱん

送・受信点が見通しの場合、ある地点での電界は、次のことに留意しつつ前回述べたように幾何光学的な取り扱いができます。

- ① 反射係数としては、球面の反射係数を用いなければなりません。ほぼ、平面大地の反射係数で近似できます。誤差は、周波数が低く、接触角 ϕ (図 3 参照) が 0 に近づくほど大きくなります。
- ② 大地反射の際、電波の拡散を考慮する必要があります。
- ③ 地上の大気により地上高によって電波の屈折率が異なるため、電

波の経路は直線にはなりません。大気の屈折率が高さ方向にほぼ直線的に変化している範囲では、地球の半径を K 倍することにより、
 図 2 に示すように電波の経路を直線として扱うことができます。この K を地球の等価半径といい、標準大気では約 $4/3$ です。

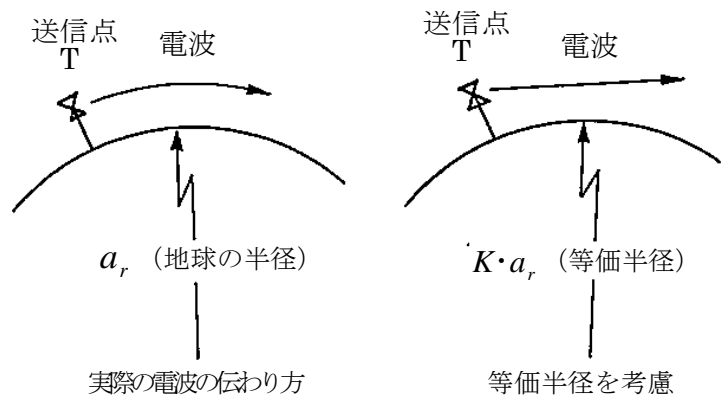


図 2 地球大地上の電波伝ぱん

以上により、図 3 に示す球面大地上の見通し距離内での伝ぱんにおいて、受信点 R における電界は直接波と大地反射波の合成電界となり、伝ぱん経路 r_0 を基準として次式で表わされます。

$$\dot{E} = (e^{j\theta_r} + \alpha_r \dot{R} e^{-j\theta_r}) \dot{E}_0 \quad \dots \dots \dots (148-1)$$

ただし

$$\alpha_r : \text{拡散係数} \quad \dot{R} : \text{反射係数} \quad \theta_r : \frac{2\pi h_{1e} h_{2e}}{\lambda d}$$

一般に、 $\alpha_r \cdot \dot{R} = -1$ として電界強度は平面大地の場合と同様に次式で近似できます。

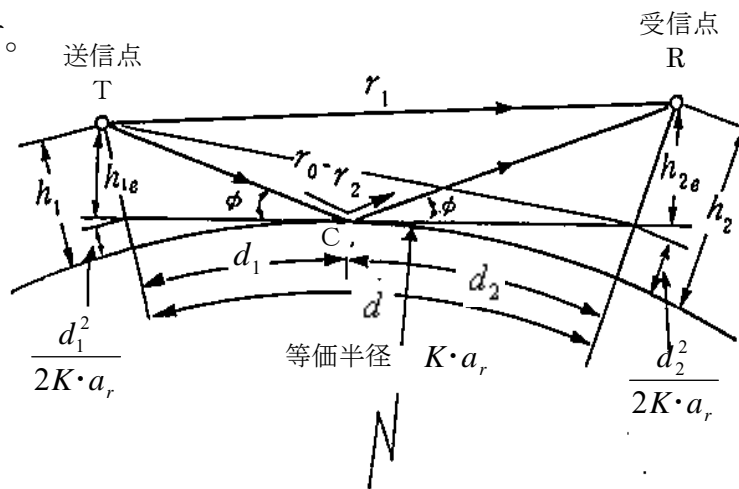


図 3 見通し距離内での電波伝ぱん

$$E \doteq 2E_0 \left| \sin \frac{2\pi h_{1e} h_{2e}}{\lambda d} \right| \dots \dots \dots (148-2)$$

h_{1e} および h_{2e} は、図 3 に示すように送信点 T および受信点 R より反射点 C の接平面におろした垂線の長さで、実効アンテナ高といえます。 a_r, d_1, d_2, h_1 および h_2 の単位を(m)とし、 $K \cdot a_r$ が d_1 および d_2 に比べ十分大きいとすると

$$h_{1e} \doteq h_1 - \frac{d_1^2}{2K \cdot a_r}, \quad h_{2e} \doteq h_2 - \frac{d_2^2}{2K \cdot a_r} \dots \dots \dots (148-3)$$

[式の誘導:末尾もっと知りたい方のために]参照

で近似され、さらに d が十分大きく、接触角 ϕ が 0 に近づくと、次式で近似されます。

$$h_{1e} \doteq h_1 - \frac{1}{2K \cdot a_r} \left(\frac{d}{1 + \sqrt{h_2/h_1}} \right)^2 \quad h_{2e} \doteq h_2 \dots \dots \dots (148-4)$$

☆ 見通し距離外の伝ぱん

前項では、球面大地上での電波の経路を直線として扱うために地球の等価半径を考えましたが、このことから電波的な見通し距離を求めることができます。図 4 において地球の等価半径を $K \cdot a_r$ とすると、見通し距離 d_0 (m) は、次式で与えられます。

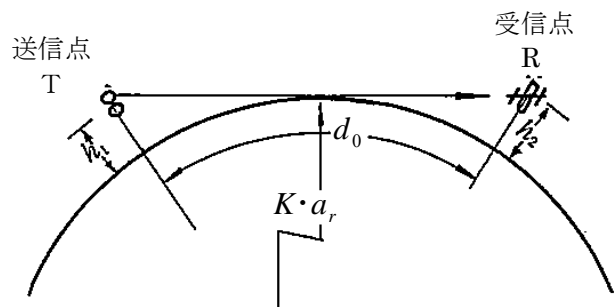


図 4 電波の見通し距離内

$$d_0 \doteq \sqrt{2K \cdot a_r} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \dots \dots \dots (148-5)$$

[式の誘導:末尾もっと知りたい方のために]参照

標準大気中では、 K は $4/3$ ですので、 h_1, h_2 の単位を(m)、 d_0 を(km)で表すと次式になります。

$$d_0 \doteq 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \dots \dots \dots (148-6)$$

受信アンテナ高が 4m と 8m のときの送信アンテナ高と見通し距離との関係を示したのが図 5 です。

この見通し距離 d_0 を越えた地点の電界強度は、次式で与えられます。この式は、実際の伝ぱん結果をもとに導き出した実験式です。

$$E = 8 \times 2^{\frac{1}{4}} (K \cdot a_r)^{\frac{5}{4}} \frac{(h_1 h_2)^{\frac{9}{8}}}{\sqrt{\lambda d^3}} E_0 \dots \dots \dots (148-7)$$

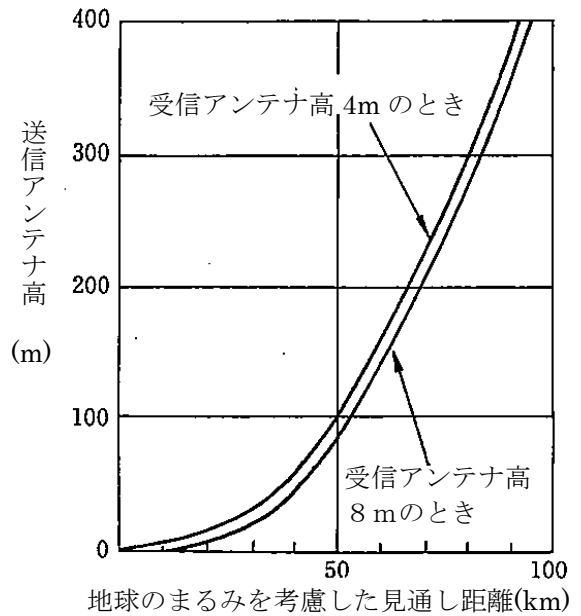


図 5 アンテナ高と見通し距離との関係

☆ 見通し距離近傍への伝ぱん

見通し距離近傍では、回折波の影響が現れ電界を定量的に扱うのは難しいため、ここでは定性的に考えるにとどめます。

図 6 は、見通し距離近傍の地点で受信アンテナ高を地上から順次高くなったときの電界強度の変化を示しています。受信アンテナ高が地上からある高さ h'_0 間では電界強度はほぼ一定値をとりますが、これは地表波によるものです。 h'_0 までを最小有効アンテナ高といいます。アンテナ高が h'_0 より高くなると、電界強度は高さに対して直接的に増加する領域があり、増加量は大地の状態と波長により異なります。この範囲の上

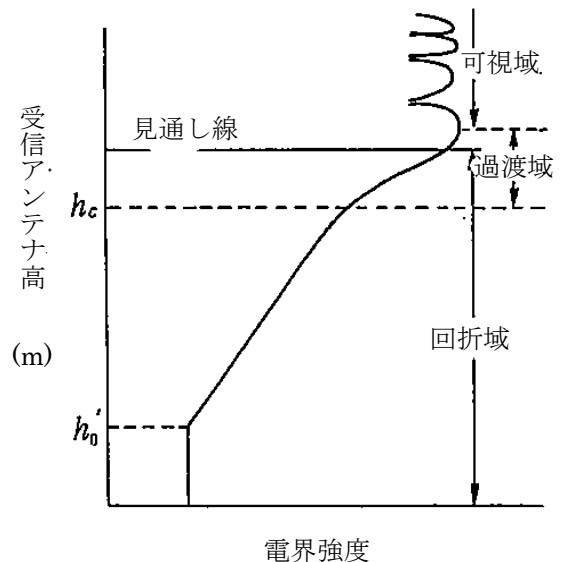


図 6 見通し距離でのハイトパターン

限は (148-8) 式で与えられ、この h_c を臨界アンテナ高といいます。

$$h_c = 30\lambda^{\frac{2}{3}} \quad \dots \dots \dots (148-8)$$

受信アンテナ高を h_c まであげていくと見通し線を越え、大地反射による位相合成効果が現れ始め、最初の電界強度の極大点に至ります。この間、電界強度は指数的に増加します。

以上のことから、球面大地における伝ぱん距離特性例は、図 7 のようになります。

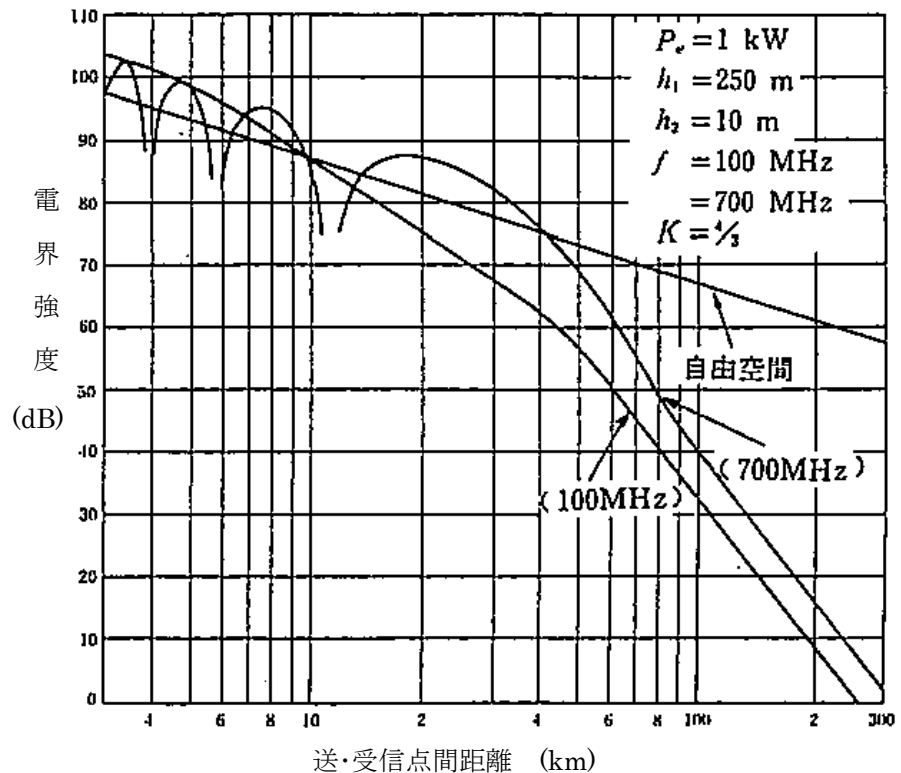


図 7 電波の伝ぱん距離特性例

[もっと知りたい方のために]

$$h_{1e} \doteq h_1 - \frac{d_1^2}{2K \cdot a_r} \quad , \quad h_{2e} \doteq h_2 - \frac{d_2^2}{2K \cdot a_r} \quad \dots \dots (148-3) \quad \text{の誘導}$$

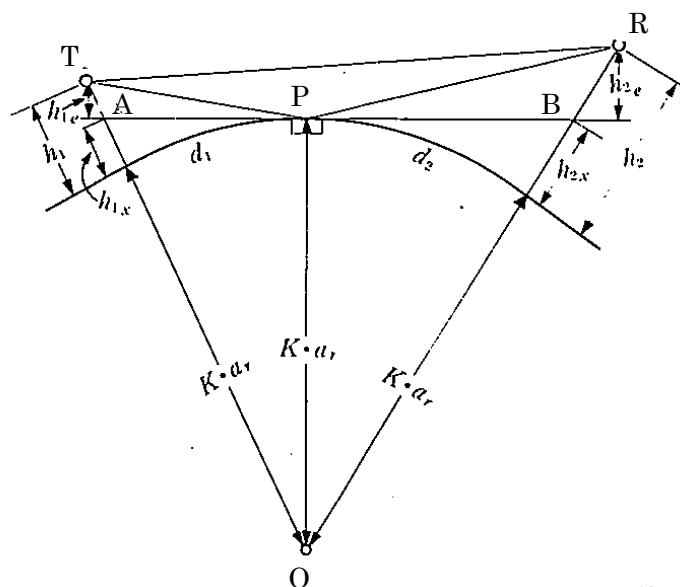
付図 1 において $\triangle OPA$ 、 $\triangle OPB$ は直角三角形 であり、 $K \cdot a_r \gg d_1, d_2$ とすると、

$$K \cdot a_r + h_{1x} \doteq \sqrt{(K \cdot a_r)^2 + d_1^2} \doteq K \cdot a_r + \frac{d_1^2}{2K \cdot a_r}$$

$$K \cdot a_r + h_{2x} \doteq \sqrt{(K \cdot a_r)^2 + d_2^2} \doteq K \cdot a_r + \frac{d_2^2}{2K \cdot a_r}$$

$$h_{1_x} = \frac{d_1^2}{2K \cdot a_r}$$

$$h_{2_x} = \frac{d_2^2}{2K \cdot a_r}$$



付図 1 実効アンテナ

よって

$$h_{1_e} = (h_1 - h_{1_x}) \cdot \frac{K \cdot a_r}{K \cdot a_r + h_{1_x}} \doteq h_1 - h_{1_x} = h_1 - \frac{d_1^2}{2K \cdot a_r}$$

$$h_{2_e} = (h_2 - h_{2_x}) \cdot \frac{K \cdot a_r}{K \cdot a_r + h_{2_x}} \doteq h_2 - h_{2_x} = h_2 - \frac{d_2^2}{2K \cdot a_r}$$

$$d_0 \doteq \sqrt{2K \cdot a_r} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \dots (148-5) \text{ から}$$

$$d_0 \doteq 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad \dots (148-6) \text{ の誘導}$$

図 4 で

$$d_0 = \sqrt{(K \cdot a_r + h_1)^2 - (K \cdot a_r)^2} + \sqrt{(K \cdot a_r + h_2)^2 - (K \cdot a_r)^2}$$

$$= \sqrt{2K \cdot a_r h_1 + h_1^2} + \sqrt{2K \cdot a_r h_2 + h_2^2}$$

$K \cdot a_r \gg h_1, h_2$ とすると、

$$d_0 = \sqrt{2K \cdot a_r} \sqrt{h_1} \left(1 + \frac{h_1}{2K \cdot a_r}\right)^{\frac{1}{2}} + \sqrt{2K \cdot a_r} \sqrt{h_2} \left(1 + \frac{h_2}{2K \cdot a_r}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\doteq \sqrt{2K \cdot a_r} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

いま、 $K = \frac{4}{3}$ 、 $a_r = 6380 \text{ km}$ とすると、 $d_0 (\text{km})$ は、

$$d_0 \doteq 4.12 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

となります。