

矩形平面反射体による反射電波の電界強度予測式と検証

長田 耕治

§ 1. はじめに

近年、都市の高層化に伴い、建造物の反射電波によるテレビ電波障害が多発し、社会問題となっている。この問題の防止策の一つとして、建造物の形状を工夫して電波障害域を狭くする方法が考えられるが、これには建造物条件（反射面の大きさ、電波到来方向に対する角度など）を設定した場合の散乱電磁界を予測することが必要となる。

現在、単純な形状の散乱体による散乱電磁界の厳密解を解析的に求める方法は、数多く提案されている¹⁾。また、解析的に解けない形状に関しても、数値計算によって解を得ることが可能である²⁾。しかし、現実の建造物は多種の誘電体、導電体の複合体であり、上記のような方法をもってしても厳密な解を求めることは不可能であるし、かつ、そのような厳密な解の有用性も薄いと考えられる。

以上のことより、本論では電界強度の簡便な予測式の誘導を試みた。すなわち、建造物によって反射された電磁波の波動変位がスカラー量として扱えるものと仮定すれば、波動方程式を展開した式が簡単なフレネル積分の積となることを示し、この式を反射電界強度近似式とにおいて、実際の建造物による反射波の実測値と比較し、式の有用性、および適用限界、適用する際の注意点について述べる。

§ 2. 平面による反射

図-1において、点 Q' より到達した電磁波が S_Q' 面によって反射され、点 P で観測される。図-2は、完全電波吸収体によって構成された吸収面 S_Q に S_Q' なる穴があいた状態である。点 Q より放射された電磁波は、この穴を通して点 P に到達する。 Q と Q' は面に対して鏡像の位置にある。この概念図、図-1と図-2において

可逆定理より、 Q' (Q)の変位による P の変位の大きさは等価である。したがって、以降、電磁波の反射の問題を完全電波吸収体にあいた穴を通過する電磁波の問題に置き換えて考える。また、テレビ電波障害を考える際、問題となるのは電界であるので、電界の波動変位がスカラー量として扱えるものとして考察する。

いま、図-3の場合を考える。図は、点 Q による変位が面 $S_Q \sim S_P$ を介して点 P に変位を与える場合を示している。この図において、 u を点 Q における変位、 G を各面におけるホイヘンスの2次波としてキルヒホッフ・ヘルムホルツの積分定理を適用すると次式のように表わせる³⁾。ただし、点 P 、 Q は積分において異常点であるから積分より除外してある。 u_p を点 P における変位として

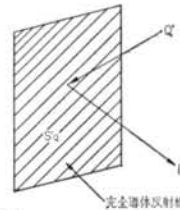


図-1 反射の概念図

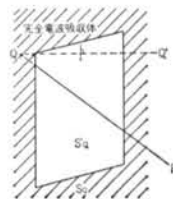


図-2 透過の概念図

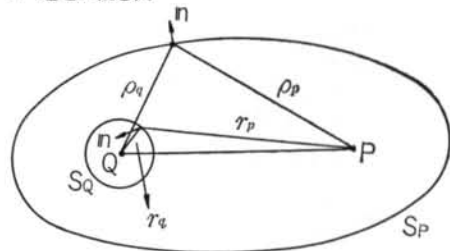


図-3 点 P 、 Q 、面 S_Q 、 S_P の関係

$$u_p = -\frac{1}{4\pi} \left[\iint_{S_Q} G \left\{ u \left(jk - \frac{1}{r} \right) \cos \theta_{nr} - \text{grad}_n u \right\} dS + \iint_{S_P} G \left\{ u \left(jk - \frac{1}{r} \right) \cos \theta_{nr} - \text{grad}_n u \right\} dS \right] \dots\dots(1)$$

ここで、右辺第1項は波源Qによっておこされた面 \$S_Q\$ 上での変位による点Pへの変位を示し、第2項は面 \$S_P\$ による点Pへの変位を示している。また、\$\theta_{nr}\$ は \$S_P, S_Q\$ 面において法線ベクトル \$\mathbf{n}\$ と、\$\rho_p, r_p\$ の成す角である。したがって、右辺第1項は、

$$\left. \begin{aligned} r &= r_p \\ u &= \frac{e^{jkr_q}}{r_q} \\ G &= \frac{e^{jkr_p}}{r_p} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)_1$$

右辺第2項は、

$$\left. \begin{aligned} r &= \rho_p \\ u &= \frac{e^{jk\rho_q}}{\rho_q} \\ G &= \frac{e^{jk\rho_p}}{\rho_p} \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)_2$$

式(2)₁、式(2)₂を式(1)に代入して次式を得る。

$$u_p = -\frac{1}{4\pi} \left[\iint_{S_Q} \frac{e^{jkr_p}}{r_p} \left\{ \frac{e^{jkr_q}}{r_q} \left(jk - \frac{1}{r_p} \right) \cos \theta_{nr} - \text{grad}_n u \right\} dS + \iint_{S_P} \frac{e^{jk\rho_p}}{\rho_p} \left\{ \frac{e^{jk\rho_q}}{\rho_q} \left(jk - \frac{1}{\rho_p} \right) \cos \theta_{nr} - \text{grad}_n u \right\} dS \right] \dots\dots(3)$$

$$\text{grad}_n u = \begin{cases} \frac{e^{jkr_q}}{r_q} \left(jk - \frac{1}{r_q} \right) \cos \theta_{nr_q} : \text{第1項} \\ \frac{e^{jk\rho_q}}{\rho_q} \left(jk - \frac{e^{jk\rho_q}}{\rho_q} \right) \cos \theta_{nr_q} : \text{第2項} \end{cases}$$

第2項において、\$\rho_p, \rho_q\$ は \$PQ\$ 間に対して十分大きいと考えれば、\$S_P\$ は半径 \$\rho \to \infty\$ の無限大球面であると近似し得る。すなわち、第2項 \$\to 0\$。これは \$S_P\$ 面が十分遠方であり、点Pへの変位の寄与は無視し得ることを意味している。したがって式(3)は、

$$u_p = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_Q} \frac{e^{jk(r_p+r_q)}}{r_p r_q} \cdot \left\{ \left(jk - \frac{1}{r_p} \right) \cos \theta_{nr_p} - \left(jk - \frac{1}{r_q} \right) \cos \theta_{nr_q} \right\} dS \dots\dots(4)$$

さらに、\$k \gg 1/r_p, 1/r_q\$ とすれば式(4)は、

$$u_p = -\frac{1}{4\pi} \iint_{S_Q} \frac{e^{jk(r_p+r_q)}}{r_p r_q} \cdot (\cos \theta_{nr_p} - \cos \theta_{nr_q}) dS \dots\dots(5)$$

となる。この式(5)が、点Qによっておこされた変位が、面 \$S_Q\$ を介して点Pに与える変位の量をあらわしている。ここで座標系を図-4のように定める。

図-4において \$R_p, R_q\$ が面に対して十分大きいと仮定すれば、\$\xi, \eta\$ の変化による \$\cos \theta_{nr_p}/r_p \cdot r_q, \cos \theta_{nr_q}/r_p \cdot r_q\$ の変化は小さく、次式のように近似し得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\cos \theta_{nr_p}}{r_p r_q} &\approx \frac{\cos \delta}{R_p R_q} \\ \frac{\cos \theta_{nr_q}}{r_p r_q} &\approx \frac{\cos \delta}{R_p R_q} \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

式(6)を式(5)に代入すると、

$$u_p = \frac{j2k \cos \delta}{4\pi R_p R_q} \iint_{S_Q} e^{jk(r_p+r_q)} dS \dots\dots(7)$$

いま、面 \$S_Q'\$ の幅 (\$x\$ 軸方向) を \$W\$、高さ (\$y\$ 軸方向) を \$T\$ とおくと、

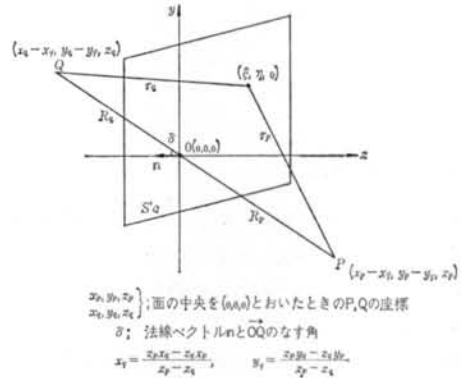


図-4 反射体および受信点の座標系

$$u_p = \frac{jk \cos \delta}{2\pi R_p R_q} \int_{-\frac{W}{2}-x_q}^{\frac{W}{2}-x_p} \int_{-\frac{T}{2}-y_q}^{\frac{T}{2}-y_p} e^{jk(r_p+r_q)} dS \quad \dots\dots(8)$$

ここで改めて、

P点の座標 $(x_p-x_q, y_p-y_q, z_p) = (x'_p, y'_p, z'_p)$,

Q点の座標 $(x_q-x_q, y_q-y_q, z_q) = (x'_q, y'_q, z'_q)$

とおくと、

$$r_p^2 = (x'_p - \xi)^2 + (y'_p - \eta)^2 + z_p'^2 \quad \dots\dots(9)$$

ここで、 $R_p = (x_p'^2 + y_p'^2 + z_p'^2)^{1/2}$ であるから式(9)は、

$$r_p = R_p \left\{ 1 - \frac{2(x'_p \xi + y'_p \eta)}{R_p^2} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{R_p^2} \right\}^{1/2} \quad \dots\dots(10)$$

ここで、 R_p が十分大きいと考えると、式(10)は次式のように近似できる。

$$r_p \approx R_p - \frac{x'_p \xi + y'_p \eta}{R_p} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2R_p} \quad \dots\dots(11)$$

同様にして、

$$r_q \approx R_q - \frac{x'_q \xi + y'_q \eta}{R_q} + \frac{\xi^2 + \eta^2}{2R_q} \quad \dots\dots(12)$$

式(11), (12)より、式(8)は、

$$u_p = c_k e^{jk c_x} \int_{-\frac{W}{2}-x_q}^{\frac{W}{2}-x_p} e^{j c_r (\xi - c_x)^2} d\xi \cdot \int_{-\frac{T}{2}-y_q}^{\frac{T}{2}-y_p} e^{j c_r (\eta - c_y)^2} d\eta \quad \dots\dots(13)$$

ただし、

$$c_k = \frac{jk \cos \delta}{2\pi R_p R_q}$$

$$c_s = R_p + R_q - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{R_p R_q (R_p + R_q)} \left\{ (x'_p R_q + x'_q R_p)^2 + (y'_p R_q + y'_q R_p)^2 \right\}$$

$$c_r = \frac{k(R_p + R_q)}{2 R_p R_q}$$

$$c_x = \frac{x'_p R_q + x'_q R_p}{R_p + R_q}$$

$$c_y = \frac{y'_p R_q + y'_q R_p}{R_p + R_q}$$

となり、二重積分は2つの積分の積として表わすことができる。ここで、 ξ に関する積分を I_x 、 η に関する積分を I_y とすると、

$$I_x = \left| F\left(\frac{W}{2} - c_x - x_q\right) - F\left(-\frac{W}{2} - c_x - x_q\right) \right|$$

$$I_y = \left| F\left(\frac{T}{2} - c_y - y_q\right) - F\left(-\frac{T}{2} - c_y - y_q\right) \right|$$

ただし、

$$F(u) = \int_0^{\sqrt{c_r} u} e^{j t^2} dt \quad (\text{Fresnel 積分})$$

となる。 I_x, I_y は図-5に示すように Cornu の螺旋上の距離を意味している。

フレネル積分は一般の数表に値が示されており⁴⁾、式(13)は簡単に計算することができる。ただし、この式はQ点の変位によってひきおこされるP点の変位を相対強度で表わしたものであるから、実際に観測される電界強度 E_p は、送信アンテナの実効ふく射電力 (ERP) を考慮した次式で与えられる。

$$E_p = 7\sqrt{ERP} \cdot c_k \cdot e^{jk c_x} \cdot I_x \cdot I_y \quad \dots\dots(14)$$

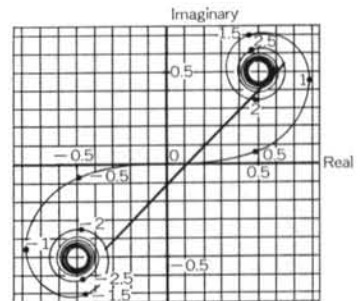


図-5 Cornu の螺旋

§ 3. 式の検証

3.1 検証の方法

得られた式(4)の有用性の確認は、フィールドで実測した水平パターン図と、式(4)によって得られた値によるシミュレーション水平パターン図を比較することによって行なった。

3.2 電界強度の実測

(1)測定反射体

測定した反射体は、新造成地に建設された2棟の高層集合住宅(14F)である。新造成地であるため、対象となった2棟のほかには周辺に建造物もほとんどなく、ほぼ理想的な測定条件であった。

(2)測定方法

測定は、VHF 1, 3, 4, 6, 8, 10, 12チャンネルについて行なった。測定点は反射体の主反射方向と思われる地点およびその周辺に選り、各々の点において、各チャンネルについて指向特性が既知のアンテナを360度回転して電界強度をプロットした水平パターン図を作成した。測定に用いたアンテナの指向特性を図-6に、測定点と反射体、電波到来方向の位置関係を図-7に示す。

(3)実測結果

図-7に示された各測定点(1)~(9)における実測水平パターン図を、図-8.1~8.9に示す。ただし、これらは1チャンネルの例である。

3.3 電界強度の予測

予測式(4)を用いて実測と同一条件を与えてシミュレーションを行なった予測水平パターン図を、図-9.1~9.9に示す。ただし、壁面による反射減衰量は6dBを仮定している。

3.4 考察

1)測定点1, 4, 5, 6, 9においては、実測結果と予測結果との間に比較的良好な対応が得られている。

2)測定点2における予測結果(図-9.2(a))は、反射体Iと反射体IIの反射波が合成されて受信されている様子を示しているが、実際には反射体IIの反射波は反射体Iによって遮断されるため測定点2には到達しない。反射体IIの影響を除外した予測結果が図-9.2(b)である。実測結果と良く対応している。

3)測定点3および8において、実測結果では反射体IIによって反射された電波が反射体Iの側壁、および図-7に示された破線の部分(シミュレーションでは考慮し

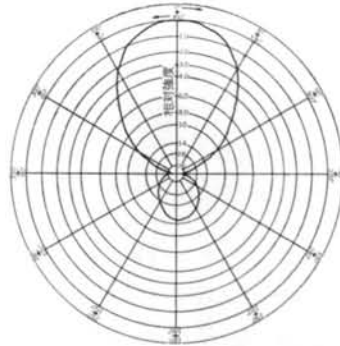


図-6 測定に用いたアンテナの指向特性 (Low-channel)

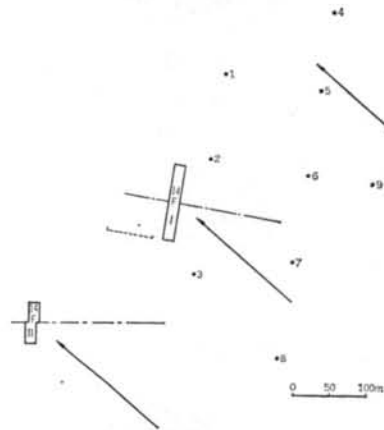


図-7 反射体および測定点

ていない)によって再び反射された2次反射波が観測されている。式(4)では2波反射をみつかることが不可能であり、今後の課題である。しかし、図の上で2次反射波を除外して考えると、比較的良好な対応が得られている。

4)測定点7においては、実測結果は後方の反射体Iからの反射波が主であり、反射体IIの反射波が小さいことを示しているが、予測結果では反射体IIの反射波が大きいことを示している。測定点7は、図-7に示すように反射体IIの主反射方向に位置しているのに、反射体IIの反射波が実測において小さくなっている。その理由は不明である。

以上のように、式(4)による予測結果は欠点は有するものの、ほぼ実測結果と良好な対応関係があることが分かった。また、1チャンネルにおける反射体の反射減衰量を6dBと仮定したことも妥当であったことが分かった。



図-8.1 測定点(1)の実測水平パターン



図-8.4 測定点(4)の実測水平パターン

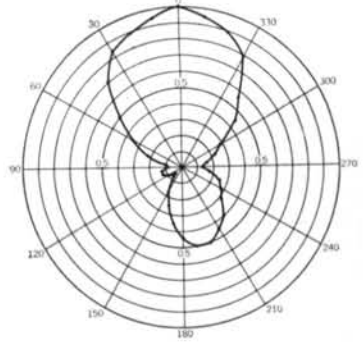


図-8.7 測定点(7)の実測水平パターン

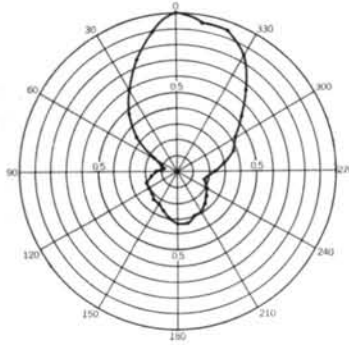


図-8.2 測定点(2)の実測水平パターン

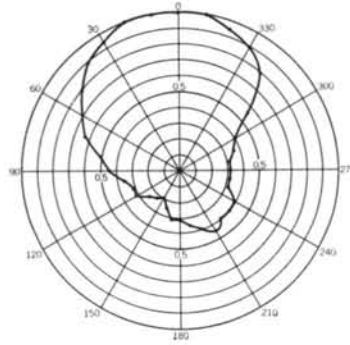


図-8.5 測定点(5)の実測水平パターン

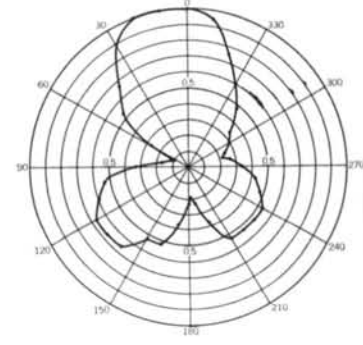


図-8.8 測定点(8)の実測水平パターン

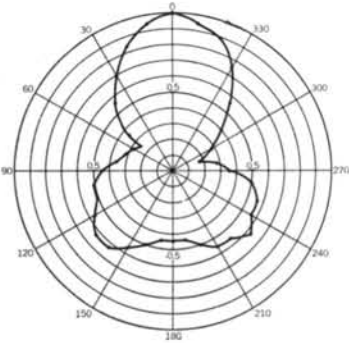


図-8.3 測定点(3)の実測水平パターン

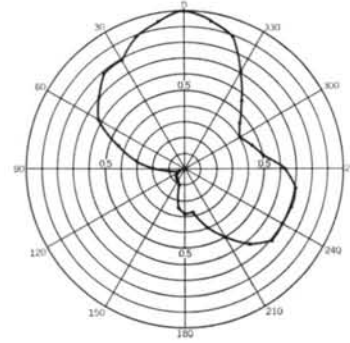


図-8.6 測定点(6)の実測水平パターン

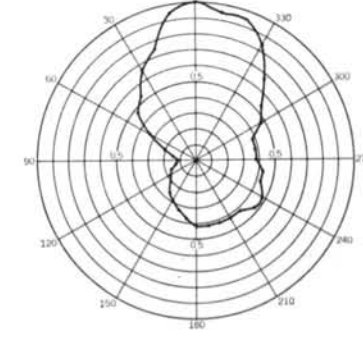


図-8.9 測定点(9)の実測水平パターン

§ 4. おわりに

式(4)は、高層建造物の電波障害域の予測、材料の決定などに有効に利用できる。しかし、本式による予測に際しては次の点に注意を要する。

- 1) 2次反射を扱うことができない。
- 2) 近似を用いていることより、反射体に近い地点においては誤差が大きくなることが予想される。
- 3) シミュレーションを行なう際に、遮蔽の影響に留意しなければならない。

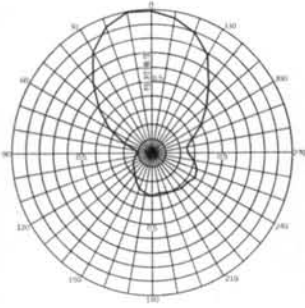


図-9.1 測定点(1)のシミュレーション水平パターン

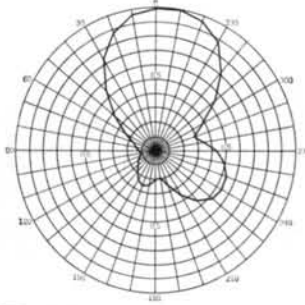


図-9.3 測定点(3)のシミュレーション水平パターン

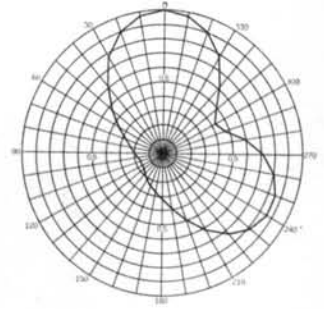


図-9.6 測定点(6)のシミュレーション水平パターン

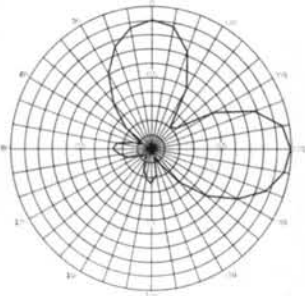


図-9.2(a) 測定点(2)のシミュレーション水平パターン

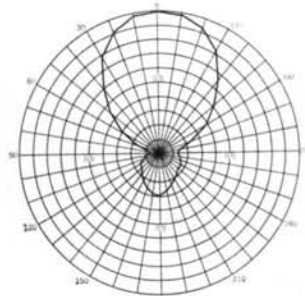


図-9.4 測定点(4)のシミュレーション水平パターン

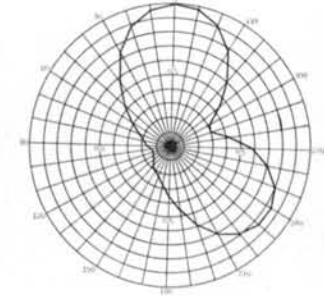


図-9.7 測定点(7)のシミュレーション水平パターン

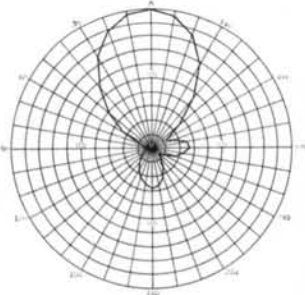


図-9.2(b) 測定点(2)のシミュレーション水平パターン
(反射体 I による遮蔽の影響を考慮した場合)

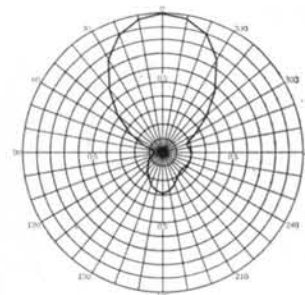


図-9.5 測定点(5)のシミュレーション水平パターン

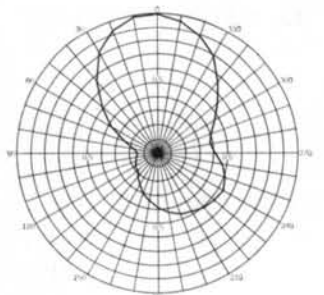


図-9.8 測定点(8)のシミュレーション水平パターン

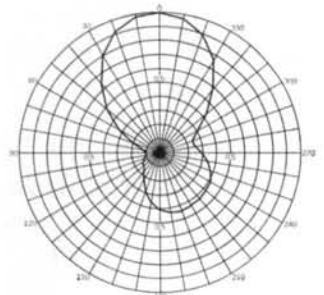


図-9.9 測定点(9)のシミュレーション水平パターン

〈参考文献〉

- 1) 木下, 関口: "有限長円筒導体による平面波の散乱について" 電子通信学会論文誌 Vol. J 64-B, No. 5
- 2) 加川: "電気, 電子のための有限要素法入門" オーム社
- 3) 石黒, 高木: "光学電子光学 I" 朝倉書店
- 4) 例えば, 培風館数表