

溝型導波路の電波伝搬特性

正員 山口 芳雄[†] 准員 大滝 幸夫[†] 正員 阿部 武雄[†]

Propagation Characteristics of Electromagnetic Waves in Groove Guides

Yoshio YAMAGUCHI[†], Member, Yukio OHTAKI[†], Associate Member and Takeo ABE[†], Member

あらまし 自動車電話をはじめとする都市内移動通信では、加入者容量の増加に対処するため、半径が数 km 以下の極小ゾーン化方式がとられつつある。この方式では、基地局アンテナが周囲の建物よりも低く設置される場合が多く、その状況に応じた電波伝搬特性を求める必要がある。

この論文は、基本的な構造として溝型断面をもつ道路に沿う伝搬波について幾何光学的手法を用いて検討すると共に、解析結果をマイクロ波モデル実験によって検証したものである。送信側に無指向性および指向性アンテナを用いた場合の伝搬特性を調べ、それらが幾何光学伝搬モデルによってよく説明され得ること、道路の断面寸法に比べて使用波長が小さいほど伝搬波の減衰は少なくなり、溝型断面の道路が導波作用をもつことを示している。

1. ま え が き

携帯電話や自動車電話をはじめとする移動通信では、今後の加入者容量の増加に対処するために、都市内において半径が数 km 以下の極小ゾーン化方式がとられつつある。この極小ゾーン化方式では、基地局および移動局のアンテナ高が数 m 以下であり、アンテナは周囲の建物よりも低く設置される場合が多い。また、道路は一般に連なるビル等の建造物に囲まれており、一種の溝を形成している。このような状況における電波伝搬特性については、2, 3の実測例^{(1),(2)}が報告されているが、理論的な検討はほとんど行われていない。これらの実測結果から、送信アンテナから受信アンテナに到る波は大きく分けて道路に沿って伝搬する R G 波 (Road Guided Wave) と建物上を伝搬し回折する波に分類され得ることが判明している。そして、Lバンドまでの周波数帯では、R G 波の性質として高い周波数ほど伝搬損失が少ないという結果も得られている。

一方、都市内や市街地だけでなく、類似している電磁環境下として積雪地での伝搬がある。積雪の多い地方では道路脇に雪の壁が形成され、季節によっては 4 m 以上に達する場合がある。そして、このような雪壁

で囲まれた道路は数 km にもおよび、電波に対しては溝型の導波路として作用するようにも考えられる。

そのため、道路脇に壁面が形成されている道路に沿う電波伝搬を理論的に調べることは、移動通信に対して基礎資料を与えると同時に回線設計や推定に役立つ。本文では、上記二つの環境下での共通した基本的問題として図 1 に示す断面をもつ溝型の道路に沿う電波伝搬特性を検討する。この形状に対しては厳密な解析は困難であり、また、使用される電波の波長が断面寸法に比較して小さいことを考慮して幾何光学的手法⁽³⁾によって解析を行った。この方法は屋内廊下での伝搬解析に提案されているものであり、ここでは、その考え方を溝型の道路に応用している。本文では、2.で送受信アンテナとしてダイポール、方形ホーンを使った場合の解析方法を述べ、3.でその計算結果を示し、マイクロ波シミュレーションによって比較検討している。その結果、理論的にも周波数が高くなるほど R G 波の減衰が少なくなり、溝型の道路は導波作用をもつことが導かれ、実験でも確認できた。また、導波路断面内での電界強度分布を調べたが、波源から十分離れている地点では、断面の中央付近で最大となるような水平方向に 1 回、垂直方向に 1 回の緩やかな変化をする分布が得られている。

[†]新潟大学工学部情報工学科, 新潟市
Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi,
950-21 Japan

2. 幾何光学的解析

図1にここで考える溝型の道路の断面と座標系を示す。溝の側壁の媒質は比誘電率 ϵ_{r1} 、導電率 σ_1 (S/m) の損失誘電体で構成され、地面は比誘電率 ϵ_{r2} 、導電率 σ_2 をもつ損失誘電体と仮定する。この溝に沿う伝搬波の解析方法はいくつか考えられるが、ここでは、使用される電波の波長が断面寸法に比較して小さいことを考慮して文献(3)に類似した幾何光学的手法を用いる。すなわち、図2に示す送信点Oから受信点Pに到る波には、直接波と壁面や地面に反射しながら到達する多重反射波があるが、受信点Pでこれらの波を合成すれば受信電界強度が求まるという考え方である。

簡単のために点O、Pをz軸上に置き、多重反射波について考える。この溝型の道路では壁面で反射しながら受信点Pに達する波は無数にあるが、地面からは1回反射の波しか存在しない。逆に受信点Pから見たこれらの反射波は、壁面、地面での反射回数に応じて図2に示すような送信アンテナの映像点A(m, n)から来た波と考えることができる。ここで、 $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, n=0, -1,$ であり、 m, n は映像点の位

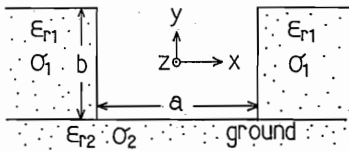


図1 溝型の構造の断面図と座標系
Fig. 1 Cross section of a groove structure and coordinate system.

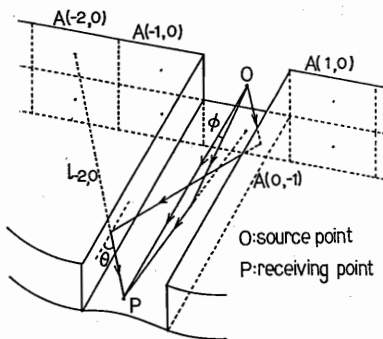


図2 映像送信点
Fig. 2 Image sources.

置に対応している。溝型の道路では、廊下などの方形導波路に比べて映像送信点の数が少なくてもよい。

さて、送信アンテナから垂直偏波で電波が送り出された場合、映像送信点A(m, n)から受信点Pに到る波は、壁面に水平偏波で入射し、|m|回の反射、また地面に垂直偏波で入射し、|n|回の反射をする。そのため、反射による減衰、位相の変化は式(1)となる。

$$R_{m,n} = R_h^{|m|} \cdot R_v^{|n|} \tag{1}$$

なお、実際の反射による減衰、位相の変化は、壁面が無限大の平面でないことを考慮しなければならないが、ここでは、波長が断面寸法に比べて小さく、波源が側壁の高さより低く設置されているという条件から近似的に式(1)が成立すると仮定する。式(1)で R_h, R_v はそれぞれ、水平偏波、垂直偏波に対応するフレネルの反射係数である。

$$\left. \begin{aligned} R_h &= \frac{\tan \theta - \sqrt{\epsilon_i (1 + \tan^2 \theta) - 1}}{\tan \theta + \sqrt{\epsilon_i (1 + \tan^2 \theta) - 1}} \\ R_v &= \frac{\epsilon_i \tan \phi - \sqrt{\epsilon_i (1 + \tan^2 \phi) - 1}}{\epsilon_i \tan \phi + \sqrt{\epsilon_i (1 + \tan^2 \phi) - 1}} \\ \epsilon_i &= \epsilon_{ri} - j 60 \sigma_i \lambda \quad (i=1, 2) \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

ここで、 λ は自由空間波長、 ϵ_i ($i=1, 2$) は損失媒質の複素比誘電率、 ϕ, θ は図2に示すように波が地面と壁面に入射するときの grazing angle である。

次に、映像送信点A(m, n)から受信点Pへの伝搬距離 $l_{m,n}$ による減衰を $L_{m,n}$ とすれば、次式で与えられる。

$$L_{m,n} = \frac{\lambda}{4\pi l_{m,n}} \tag{3}$$

また、直接波の伝搬距離 $l_{0,0}$ と $l_{m,n}$ の差により、受信点Pにおいて位相差が生ずる。この位相遅れを $\Phi_{m,n}$ とすれば、次式で与えられる。

$$\Phi_{m,n} = \exp [j 2\pi (l_{0,0} - l_{m,n}) / \lambda] \tag{4}$$

それゆえ、受信点Pにおける映像送信点A(m, n)からの電界強度は次式となる。

$$E_{m,n} = R_{m,n} \cdot L_{m,n} \cdot \Phi_{m,n} \cdot G_o \cdot T_o \cdot G_p \cdot T_p \tag{5}$$

ただし、 G_o, G_p は送信アンテナおよび受信アンテナの利得、 T_o, T_p は送信アンテナおよび受信アンテナの指向性とする。

従って、全電界強度Eは式(5)を m, n について加え合わせることで求められる。

$$E = \sum_{n=-1}^0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_{m,n} \tag{6}$$

水平偏波で導波路を伝わる波についても同様の方法で計算することができる。

2.1 ダイポールアンテナによる伝搬波

送受信アンテナともに標準 $\lambda/2$ ダイポールを用いた場合、式(5)の利得と指向性は次式ようになる。

$$\left. \begin{aligned} G_o &= G_p = 1.28 \\ T_o &= T_p = \frac{\cos(\pi/2 \cdot \sin \phi)}{\cos \phi} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.2 方形ホーンアンテナによる伝搬波

都市内の移動通信では、一般に指向性の鋭いアンテナを使うことは考えられなかったが、最近、移動体に指向性アンテナを用いた方が、空間ダイバーシティ受信において大きなフェージング改善効果をもつことが報告されている⁽⁴⁾。ここでは、幾何光学的手法の妥当性を確かめる目的と、後に示す実験で送信アンテナに方形ホーンを用いるために、ホーンアンテナの場合を考察する。

方形ホーンの近傍における利得は、開口面の中心を基準とし、その面上における電磁界の位相差を考慮することにより得られる⁽⁶⁾。そこで、方形ホーンが、開口面の幅 a_0 、高さ b_0 、電界面 (E 面)および磁界面 (H 面)におけるフレアの稜線の長さ l_e 、 l_h の寸法をもつ場合、その開口面の中心から距離 d だけ離れた軸上の利得 G_o は、次式で与えられる。

$$G_o = \sqrt{G_f \cdot G_e \cdot G_h} \quad (8)$$

ここで、 G_f は開口面から十分離れた位置における利得、 G_e および G_h は E 面および H 面におけるホーンの開きに起因する利得係数であり、次のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} G_f &= \frac{32 \cdot a_0 b_0}{\pi \lambda^2} \\ G_e &= \frac{C^2(w) + S^2(w)}{w^2} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} G_h &= \frac{\pi^2 \{C(u) - C(v)\}^2 + \{S(u) - S(v)\}^2}{4(u-v)^2} \\ C(w) - jS(w) &= \int_0^w \exp\left[-j\frac{\pi}{2}t^2\right] dt \\ w &= \frac{b_0}{\sqrt{2\lambda l'_e}} \\ u &= \pm \frac{a_0}{\sqrt{2\lambda l'_h}} + \sqrt{\frac{\lambda l'_h}{2}} \frac{1}{a_0} \quad (\text{複号同順}) \\ l'_e &= \frac{d \cdot l_e}{d + l_e} \quad l'_h = \frac{d \cdot l_h}{d + l_h} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

一方、方形ホーンの指向性は E 面、 H 面内においては比較的簡単な式で求められるが、任意の面内での指向性は複雑になる。そこで、指向性 T_o には、各影像送信点からの放射電界⁽⁶⁾の式を用いることにする。すなわち、図3に示すように影像送信点 $A(m, n)$ を波源とした θ' 、 ϕ' 方向成分の放射電界を極座標変換を行い、その θ 成分、 ϕ 成分を E_θ 、 E_ϕ とする。そして、偏波方向について E_θ 、 E_ϕ を加え合わせた値を方形ホーンの指向性とする。

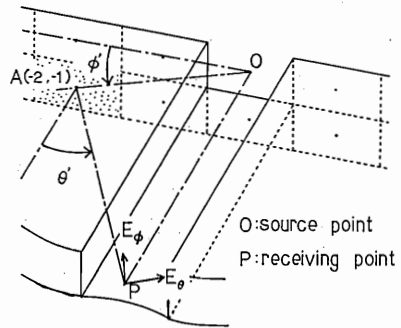


図3 方形ホーンの放射電界
Fig. 3 Radiation field from a pyramidal horn.

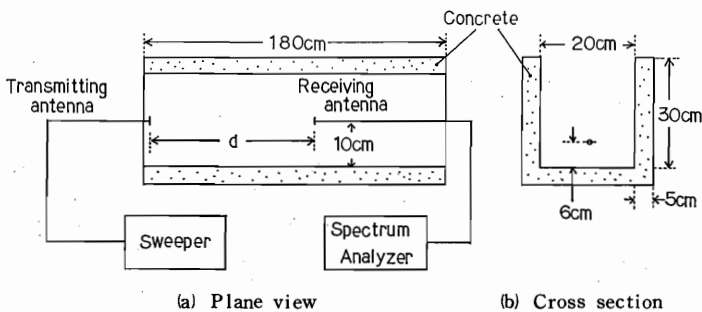


図4 実験装置の概略
Fig. 4 Experimental setup.

$$\left. \begin{aligned}
 T_o &= E_\theta \cdot \sin \phi' + E_\phi \cdot \cos \phi' \\
 E_\theta &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{\cos U}{(\pi/2)^2 - U^2} \cdot \frac{\sin V}{V} \\
 &\quad \times \left[\left\{ \cos \theta' \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_0}\right)^2} + 1 \right\} \sin \phi' \right] \\
 E_\phi &= \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \cdot \frac{\cos U}{(\pi/2)^2 - U^2} \cdot \frac{\sin V}{V} \\
 &\quad \times \left[\left\{ \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a_0}\right)^2} + \cos \theta' \right\} \cos \phi' \right] \\
 U &= \frac{\pi a_0}{\lambda} \sin \theta' \cdot \cos \phi', \quad V = \frac{\pi b_0}{\lambda} \sin \theta' \cdot \sin \phi'
 \end{aligned} \right\} (10)$$

波を水平偏波で励振した場合も上記と同様の方法で求めることができる。

3. マイクロ波シミュレーション

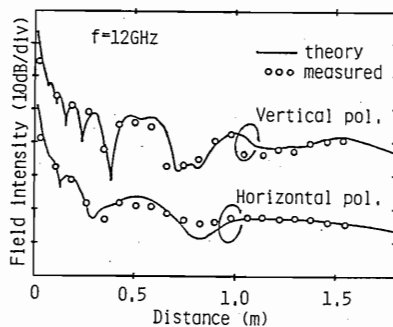
この幾何光学的解析手法が溝型の道路に適応できるかどうかを確かめる意味でマイクロ波モデル実験を行った。図4に実験装置の概略図を示す。損失媒質としてコンクリート板を用い、幅20cm、高さ30cm、長さ180cmの溝型の道路モデルを構成した。コンクリート板の媒質定数は2GHzにおける実測結果より、比誘電率2.6、導電率0.053(S/m)が得られ、計算値の算出にはこの値を用いる。送信アンテナ(ダイポールあるいは方形ホーン)を道路モデル一端の断面内に図4(b)に示す位置に設置し、受信ダイポールアンテナを溝の中で移動させた。測定周波数は2.3-12.4GHzである。

このようにして溝に沿って受信した電界強度の実測値と計算値の一例を図5に示す。この図から分かるように、アンテナ間の距離が近い場合には電界の距離に対する変動が大きい。そして、この傾向は送信側にダイポールを用いて波を垂直偏波で励振した場合に顕著である。この原因は、溝型の道路では垂直偏波で波を励振したときに壁面には水平偏波で波が入射し、反射係数 R_h が R_v より大きいために、壁面の影響を受けやすいことによる。更に、ダイポールの放射パターンは壁面に対しては無指向性であり壁面の影響を受けやすいが、方形ホーンの場合は壁面に対しても指向性があるので、変動が少なくなると考えられる。

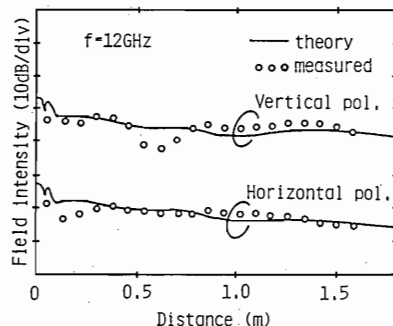
また、アンテナ間の距離が約20波長を越えると変動は数dB以内と小さくなり、計算値と実測値がよく一致している。そして、この領域では、電界強度は距離に比例して単調に減少し、送信アンテナの指向性にはあまり依存しない。この領域で距離に対する電界強度

の傾き(減衰定数)を最小2乗法によって求めると図6のようになり、周波数が高くなるほど減衰が少なくなる。このことは、波が溝に沿って伝搬し、溝型の道路がトンネルや廊下などと同様に導波作用をもっていることを示している。なお、6GHz以下で水平偏波の計算値は実測値よりも少ないが、6GHz以上の高い周波数ほど実測値に漸近しており、波長に比べて断面寸法が大きい導波路での幾何光学的手法の妥当性が確認される。

次に、溝型導波路ではどのようなモード、あるいは電磁界分布をもつ波が伝搬しているのかを調べるために、送受信アンテナともにダイポールを用いて断面内電界強度分布を測定した。一例として周波数12GHzにおいて垂直偏波で波を励振した場合、アンテナ間距離が、 21λ 、 43λ 、 64λ のときの実測値と計算値(図1のx軸上とy軸上での値)を図7に示す。計算値は実測値と非常によく一致しており、この結果からも解析手法の妥当性が分かる。アンテナ間距離が 50λ



(a) Dipole-Dipole



(b) Horn-Dipole

図5 距離特性

Fig. 5 Field intensities in the z-axis.

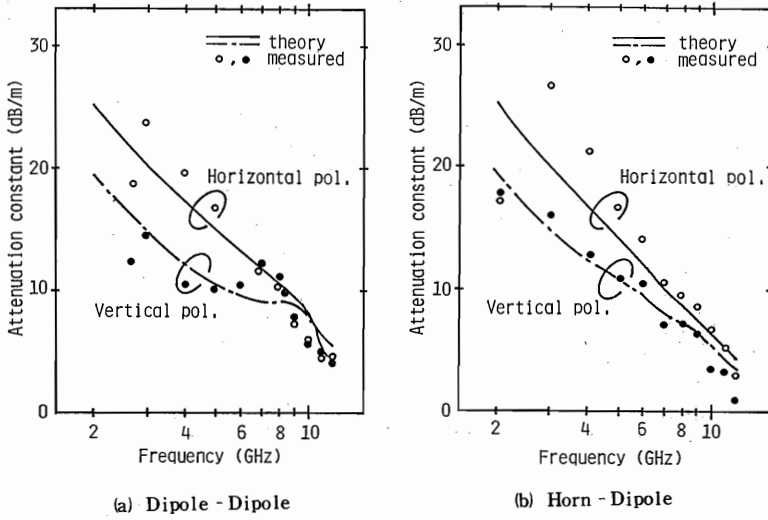


図6 減衰定数の周波数特性
Fig. 6 Frequency characteristics of attenuation constants.

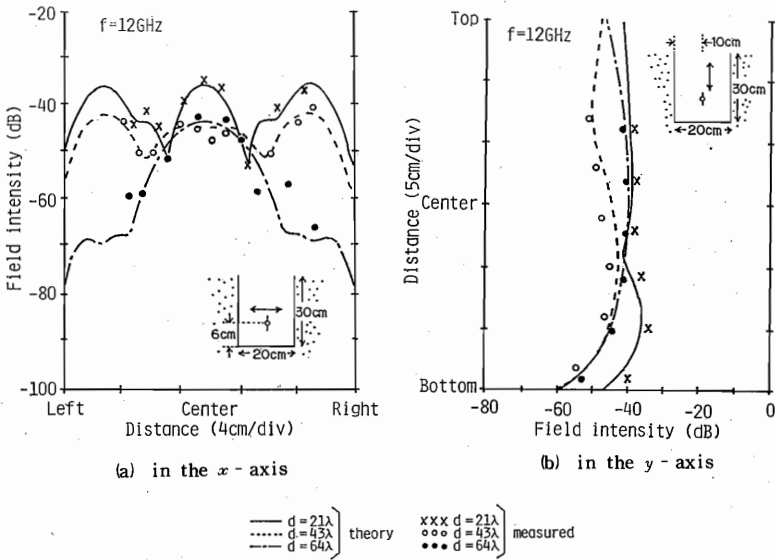


図7 断面内電界強度分布
Fig. 7 Field distribution in the cross section.

以内(約120 cm以内)の場合には、電界分布は多重反射波による影響を強く受け、距離の変化によるその変動は大きくなる。それ以上の距離では、多重反射波の減衰が大きくなり、電界分布は直接波と数回の反射波にのみ依存し、例えば、 64λ の場合のように水平方向に1回、垂直方向に緩やかな1回の変化をするほ

ぼ一定の分布をもつようになる。そして、この電界分布をもつ波がこの溝型導波路の基本伝搬モードと思われる。

4 むすび

ビル等の建造物で囲まれた道路や積雪地における道

路における電波伝搬の基礎資料を得るために、本文では溝に沿う電波の伝搬特性を考察した。解析には、直接波および多重反射波を受信点で合成するという幾何光学的手法を用い、また、この解析手法の妥当性を調べるために、ダイポール、方形ホーンの2種類のアンテナを用いてマイクロ波モデル実験を行った。その結果、送信点から約20波長以上離れた領域では、受信電界強度は距離に対して単調に減少し、波は水平方向、垂直方向にそれぞれ1回ずつ変化する電界分布で伝搬していくことが分った。そして、この領域では幾何光学的な計算値と実測値がよく一致する。アンテナ間距離に対する電界強度の変化は、測定に使用した2種類のアンテナで同様の結果が得られているので、測定アンテナの指向性に依存しないと言える。減衰定数の周波数特性から、高い周波数ほどその値は小さくなり、この溝型の道路は導波作用を持つことが分かった。また、6 GHz以上の周波数領域で計算値は実測値に漸近していることから、数波長以上の断面寸法を持つ溝型導波路では、この解析手法が適用できると考えられる。今後、実際の道路上で実測を行い理論値と比較検討する予定である。

文 献

- (1) 加地正毅：“ビル街におけるUHF帯近距離伝搬特性”，昭59信学総全大，670。
- (2) 加地，西尾：“ビル街におけるUHF帯近距離伝搬特性”，信学技報，A・P84-25(1984-06)。
- (3) 岸本英生：“屋内伝搬特性の幾何光学的解析”，信学技報，A・P76-62(1976-11)。
- (4) 池上，竹内，吉田：“移動通信の多重波フェージングにおけるアンテナ指向性の効果”，信学論(B)，J68-B, 3, pp. 403-410(昭60-03)。
- (5) E. V. Jull：“Finite-Range Gain of Sectoral and Pyramidal Horns”，Electron. Lett., 6, 21, pp. 680-681(Oct. 1970)。
- (6) 榎本，関口：“電波工学”，pp. 186-195, オーム社(1974)。

(昭和61年2月24日受付)

大滝 幸夫

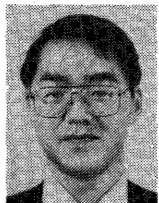


昭60新潟大・工・情報卒。現在、同大学院修士課程在学中。この間、損失媒質系の導波伝送の研究に従事。IEEE会員。

阿部 武雄



昭24東工大・工・電気卒。電気試験所，千葉工大，東工大工業教員養成所を経て，現在，新潟大・工・教授。この間，高周波標準，レーザー光の降雪中の伝搬，マイクロ波素子，損失媒質中の伝搬，および移動通信などの研究に従事。工博。IEEE，日本雪氷学会各会員。



山口 芳雄

昭51新潟大・工・電子卒。昭53東工大大学院修士課程了。同年新潟大・工・助手，現在に至る。損失媒質で囲まれた空間における電波伝搬，導波伝送の研究に従事。工博。IEEE会員。