

UDC 621.371.33.091.1:624.19

反射係数による方形トンネル内の  
電波減衰特性の検討

山口 芳雄 阿部 武雄

山口芳雄, 阿部武雄: 正員 新潟大学工学部情報工学科  
Attenuation Characteristics of Radio Waves in Rectangular  
Tunnels by Reflection Coefficient. By Yoshio YAMAGUCHI  
and Takeo ABE, Regular Members (Faculty of Engineering,  
Niigata University, Niigata-shi 950-21 Japan).

論文番号: 昭58-技195[B-47]

あらまし 反射係数を用いた幾何光学的解析によつて方形トンネル内電波減衰特性を検討すると共に, 変数分離法による解析結果と一致することを示した。

1. まえがき

方形トンネル内の電波減衰特性の解析方法に近似的な変数分離法<sup>(1)</sup>, 幾何光学的手法<sup>(1),(2)</sup>, ポイントマッチング法<sup>(3)</sup>などがある。このうち, 反射係数を用いた幾何光学的手法<sup>(1)</sup>は断面寸法に比べて波長λが十分小さな高周波領域で精度が良く, 又, 減衰機構の物理的な解釈が容易であるという特徴をもっている。この方法では, 減衰定数が反射係数を使った形で表現されていたが, 本論文では反射係数を近似することにより変数分離解と同一の結果が得られることを示す。

又, 従来の解析結果<sup>(3)</sup>から断面寸法が数λ以下の低周波領域では, 減衰定数がλ<sup>2</sup>に比例しなくなることが数値的に導かれていたが, 反射係数からこの現象が説明できること, 及び, λ<sup>2</sup>特性を示さなくなる臨界周波数付近では反射係数が最小となっていることを示す。

2. 本文

図1に示すような方形断面のトンネル内で減衰が少なく安定に伝搬するモードは, 水平偏波で励振した場合に生ずる E<sub>11</sub><sup>h</sup> と垂直偏波による E<sub>11</sub><sup>v</sup> の2つの基本モードである。これらのモードの特性は一方が得られれば他方は座標系を90°回転して求まるので, 以下 E<sub>11</sub><sup>h</sup> モードについて考える。

断面寸法に比べて波長が十分小さな場合に, このモードの伝搬は幾何光学的(図2)に扱うことができ, 文献(1)ではその減衰定数αが反射係数を用いて式(2)のように与えられている。

$$\alpha = 10 \left( \frac{1}{z_1} \log \frac{1}{|R_v|^2} + \frac{1}{z_2} \log \frac{1}{|R_h|^2} \right) \quad (1)$$

$$\Rightarrow 5\lambda \left( \frac{1}{a^2} \log \frac{1}{|R_v|^2} + \frac{1}{b^2} \log \frac{1}{|R_h|^2} \right) \quad [\text{dB/m}] \quad (2)$$

但し,

$$R_v = \frac{\epsilon_{r1}^* \sin \phi_1 - \sqrt{\sin^2 \phi_1 + \epsilon_{r1}^* - 1}}{\epsilon_{r1}^* \sin \phi_1 + \sqrt{\sin^2 \phi_1 + \epsilon_{r1}^* - 1}}$$

$$R_h = \frac{\sin \phi_2 - \sqrt{\sin^2 \phi_2 + \epsilon_{r2}^* - 1}}{\sin \phi_2 + \sqrt{\sin^2 \phi_2 + \epsilon_{r2}^* - 1}}$$

$$\epsilon_{ri}^* = \epsilon_{ri} - j\sigma_i / \omega \epsilon_0 = \epsilon_{ri} (1 - j \tan \delta_i), \quad i = 1, 2$$

i = 1 : 側面, i = 2 : 上下面

さて, 式(2)の対数項を次のように変形する。

$$\log \frac{1}{|R_v|^2} = \frac{2}{\ln 10} \ln \left| \frac{1+x}{1-x} \right| \quad (3)$$

$$x = \frac{\epsilon_{r1}^*}{\sqrt{\sin^2 \phi_1 + \epsilon_{r1}^* - 1}} \sin \phi_1 \quad (4)$$

UHF帯以上の周波数領域では, トンネルを囲むコンクリートなどの導電率から媒質の tan δ<sub>i</sub> は1より十分小さくなり, 又, 一般的なトンネル寸法から a, b ≫ λ が成立するので sin<sup>2</sup> φ<sub>1</sub> ≃ 0 となる。そのため, 式(4)は次のように近似され, その値は1より小さくなる。

$$x \approx \frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{\epsilon_{r1} - 1}} \frac{\lambda}{2a} \quad (5)$$

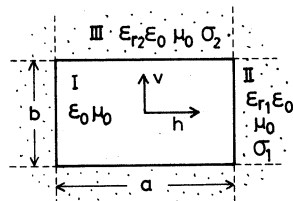


図1 方形トンネル断面  
Fig.1- Cross section of a rectangular tunnel.

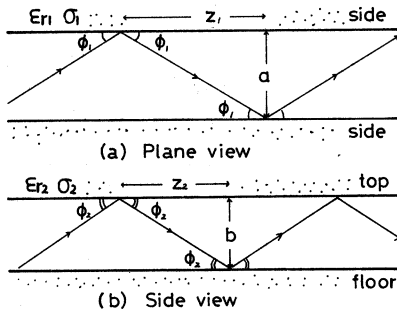


図2 基本モードの伝搬モデル  
Fig.2- Propagation model of the dominant mode.

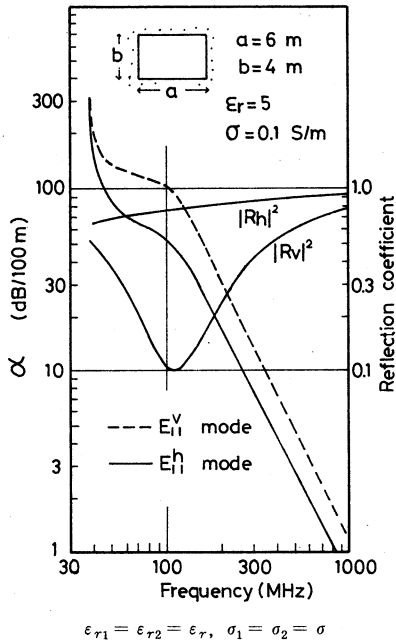


図3 減衰定数と反射係数の周波数特性  
Fig.3-Frequency characteristics of attenuation constants and reflection coefficients.

従って公式

$$\ln \left( \frac{1+x}{1-x} \right) = 2 \left( x + \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} + \dots \right) \approx 2x \quad (6)$$

を用いて式(3)を展開することができ、次の近似式が得られる。

$$\log \frac{1}{|R_v|^2} \approx 0.8686 \frac{\epsilon_{r1}}{\sqrt{\epsilon_{r1}-1}} \frac{\lambda}{a} \quad (7)$$

同様に、

$$\log \frac{1}{|R_h|^2} \approx 0.8686 \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \frac{\lambda}{a} \quad (8)$$

それ故、 $E_{11}^h$ モードの減衰定数は次の式で表わすことができる。

$$\alpha = 4.343 \lambda^2 \left( \frac{\epsilon_{r1}}{a^3 \sqrt{\epsilon_{r1}-1}} + \frac{1}{b^3 \sqrt{\epsilon_{r2}-1}} \right) \quad (9)$$

この式は、近似的な変数分離法によって得られている結果<sup>(1)</sup>と全く同一の形式であり、本近似法の妥当性が確認される。

次に、式(1)に基づいて計算した減衰定数の周波数特

性を図3に示す。従来、この図に示すような周波数全体にわたる減衰定数の物理的な解釈や説明は述べられていなかったが、図に併記した反射係数によって容易に理解することができる。すなわち、約100 MHz ( $a \approx 2\lambda$ )を臨界周波数として高周波領域では、反射係数が周波数と共に増加するため、減衰定数は式(9)の特性を示す。そしてこの領域では式(7)、(8)の反射係数からも分かるように媒質定数よりも周波数による変化が大きい。一方、低周波領域では周波数の低下に伴ない垂直偏波の反射係数が再び増加するため、減衰定数は式(9)から予想される値よりも小さな値をとる。そしてこの領域では、反射係数が媒質定数に大きく依存するので減衰定数は周波数よりも媒質定数値によって大きく変化する。

又、臨界周波数付近では垂直偏波の反射係数が最小になっており、電波が壁面にブリュースタ角で入射することを意味している。従って、近似式(9)が成立するための臨界周波数をブリュースタ角に対応して考えることもできる。

### 3. むすび

方形トンネル内の基本モード減衰特性について反射係数を用いた近似式を展開し、変数分離法による結果と一致することを示した。又、減衰特性を反射係数の観点から考察すると共に、減衰定数が波長の2乗に比例しなくなる臨界周波数付近で反射係数が最小となっていることを見出した。なお、低周波領域では基本モードの伝搬を厳密な意味で幾何光学的に考えることはできないが、減衰特性の物理的解釈は十分可能と思われる。

### 文 献

- (1) Alfred, G.E., Robert, L.L. and Peter, F.S.: "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels", IEEE Trans. Antennas & Propag., AP-23, 2, pp.192-205 (March 1975).
- (2) Mahmoud, S.F. and Wait, J.R.: "Geometrical optical approach for electromagnetic wave propagation in rectangular mine tunnels", Radio Sci., 9, 12, pp.1147-1158 (Dec. 1974).
- (3) 山口, 阿部: "ピル内ろう下の電波伝搬特性", 信学技報, A-P81-21 (1981-06).

(昭和58年7月13日受付)