

トンネル内電波伝搬特性の理論解析

Analysis of Propagation Characteristics of Radio Waves in Tunnels

笠嶋 善 憲
平 井 淳 一

要 約

矩形断面で壁面が表面水層、コンクリート、鉄筋メッシュ、コンクリート、岩盤などの多層構造となっているトンネル内での断面寸法に比べて小さい波長の電波伝搬特性に関する理論解析を示す。このトンネル内の伝搬ルートには幾何光学的近似が、多層構造壁の反射損失には各層材料の等価伝送マトリックスの入力インピーダンスが用いられている。そして、トンネル内の断面寸法、岩の誘電率、鉄筋コンクリート壁などのパラメータによる電波伝搬特性の計算例、及び掘削中の岩盤トンネル内での電波伝搬特性の計算結果とその実測結果の比較を示し、理論解析が概ね妥当であることを明らかにした。

目 次

- I. はじめに
- II. 解析手法
- III. 計算例
- IV. まとめ

I. はじめに

近年、携帯電話をはじめとする小型無線機の普及が著しく、このような無線機は、道路トンネルの中や工事中のトンネル内での情報通信システムとしても利用される。工事中のトンネル内での無線情報通信システムを Fig.1 に示す。このようなシステムを有効に運用するには、トンネル内での電波伝搬特性を知ることが重要不可欠である。四方が壁で囲まれているトンネル内での電波伝搬特性は、電波が周辺の壁面で多重反射し、その一部は壁面内に入射して減衰が著しいなど、地上の半無限空間での特性とは大きく異なる。この減衰の程度は、電波の周波数、トンネルの断面寸法、壁面材料の電気定数、送受信機間の距離などにより決まる。一般に、トンネル断面形状は、矩形と円形の間接的なものが多いが、過去のトンネル内電波伝搬の解析では、トンネル断面を矩形又は円形、その周辺の岩盤（誘電体）の誘電率を一様として、変数分離法¹⁾、幾何光学的法²⁾などを用いている。

本論文の解析では、トンネル内の電波伝搬のルートを変数分離法の解析結果から導いた電波波長が断面寸法に比べてかなり小さい範

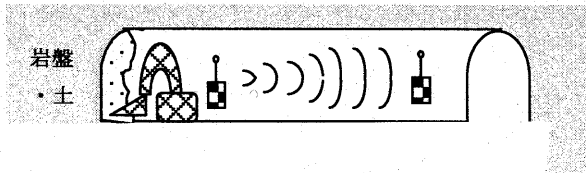


Fig.1 工事中のトンネル内電波伝搬概要
(Concept of Communication System in a tunnel)

キーワード：電波伝播，トンネル，携帯電話，無線放射損失，幾何光学

囲での幾何光学的近似とし、そのルートでの伝搬損失を無限平面の多層誘電体の多重反射でのものとした。そして、この解析法での計算結果と実測結果を比較検討した。

II. 解析手法

1. 電波伝搬のルート

電波伝搬解析用トンネル断面を Fig.2 に示す。トンネル断面は水平方向に a 、垂直方向に b の長さを持ち、周辺は一樣な誘電率 ϵ_2 の岩盤・土で取り囲まれているとする。そして、座標はトンネル断面の中央を原点とし、水平方向を x 、垂直方向を y 、トンネルの長手方向を z 軸とする。Fig.2 において電波波長 λ は次式の条件をみたすとする。

$$\lambda/2 < a, b \dots \dots \dots (1)$$

過去の論文によれば、このようなトンネル内での減衰が少なく安定に伝搬する伝搬モードは、水平偏波で励振した場合に生じる E_{m1} と垂直偏波による E_{m1} の二つの基本モードであり、これらのモードの特性は一方が得られれば他方は $x-y$ 座標面内で 90° 回転して求まる。したがって、ここでは E_{m1} モードのみを示す。トンネル内 ($-a/2 \leq x < a/2, -b/2 \leq y < b/2$) の E_{m1} モードはマックスウェルの方

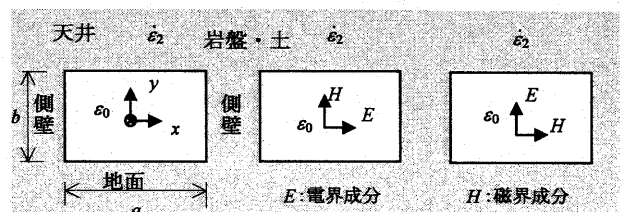


Fig.2 矩形トンネル断面と基本モード
(Rectangular Tunnel Section and Fundamental Modes)

程式と境界条件から近似的に次式となる¹⁾。

$$k_1, k_2 < k_3 \dots\dots\dots (2)$$

$$E_x = E_0 \cos k_1 x \cos k_2 y e^{-jk_3 z} \dots\dots\dots (3)$$

$$H_y = \frac{(k_1^2 + k_2^2)}{\omega \mu_0 k_3} E_0 \cos k_1 x \cos k_2 y e^{-jk_3 z} \dots\dots\dots (4)$$

$$k_1^2 + k_2^2 + k_3^2 = k_0^2 \dots\dots\dots (5)$$

$$k_0 = 2\pi / \lambda \dots\dots\dots (6)$$

$$k_1 \cong \frac{\pi}{a} + \frac{j \dot{\epsilon}_2 \lambda}{a^2 (\dot{\epsilon}_2 - 1)^{1/2}} \dots\dots\dots (7)$$

$$k_2 \cong \frac{\pi}{b} + \frac{j \lambda}{b^2 (\dot{\epsilon}_2 - 1)^{1/2}} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、

E_x : x 軸方向の電界

H_y : y 軸方向の磁界

k_1 : x 軸方向の伝搬定数

k_2 : y 軸方向の伝搬定数

k_3 : z 軸方向の伝搬定数

k_0 : 自由空間の伝搬定数

(7), (8)式において、第1項の実数は位相定数を、第2項の虚数は反射損失を示す。したがって、周辺が様な一種類の誘電材料で囲まれているトンネル内の電波伝搬の損失は、(7), (8)式の第2項を計算することによっても求められる。

本論文での解析では、電波波長が断面寸法に比べて小さい範囲として、(7), (8)式の第1項の伝搬定数からトンネル内の幾何光学的近似の電波伝搬ルートを決定し、また反射損失を異なった誘電率材料の無限平面の多層構造壁面での多重反射として求める。したがって、(7), (8)式の第1項から幾何光学的近似電波伝搬の x, y 軸方向の位相定数を次式とする。

$$\beta_1 = \frac{\pi}{a} \dots\dots\dots (9)$$

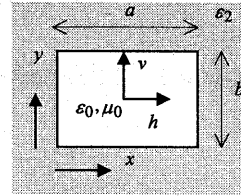
$$\beta_2 = \frac{\pi}{b} \dots\dots\dots (10)$$

このため、トンネルの xz, yz 断面内の電波伝搬のルートは、Fig.3(b),(c)に示すようになる。Fig.3(b)において、x 軸方向には(9)式の位相定数 β_1 で、電波伝搬方向には(6)式の自由空間での伝搬定数 k_0 で進む。よって、壁面への電波のかすめ角 θ_a は次式となる。

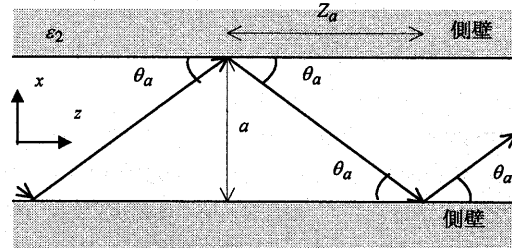
$$\cos \theta_a = \frac{\sqrt{k_0^2 - \beta_1^2}}{k_0} \dots\dots\dots (11)$$

(11)式に(6), (9)式を代入して

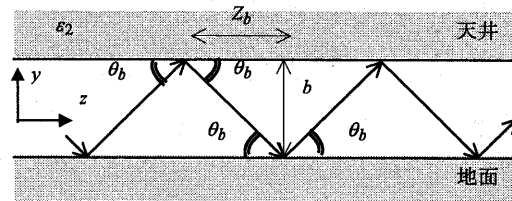
$$\cos \theta_a = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \dots\dots\dots (12)$$



(a) 断面



(b) 平面図



(c) 側面図

Fig.3 基本モードの伝搬
(Propagation of the Dominant Mode)

$$\theta_a = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \right) \dots\dots\dots (13)$$

同様に天井・地面へのかすめ角 θ_b は次式である。

$$\theta_b = \cos^{-1} \left(\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2} \right) \dots\dots\dots (14)$$

そして、xz, yz 断面の両壁面間での1回反射による電波の到達距離 Z_a, Z_b は次式となる。

$$Z_a = \frac{1}{a} \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta_a \right) \dots\dots\dots (15)$$

$$Z_b = \frac{1}{b} \tan \left(\frac{\pi}{2} - \theta_b \right) \dots\dots\dots (16)$$

2. トンネル壁面での反射損失

波長がトンネル断面寸法に比べて小さいとの仮定から、壁面をFig.4のように表面水層、コンクリート、鉄筋メッシュ、コンクリート、岩盤・土からなる無限平面の多層誘電体とし、その壁面の反射損失をFig.5の等価回路を用いて求める³⁾。計算はTE, TMの両モードに対して行う必要があるが、ここでは主にTEモードに対する式を示す。(TEモードに対する定数にはサフィクス e, TMモードにはサフィクス m を付ける。)

Fig.5における Z_{4e} は、Fig.4の s 点から無限厚の岩盤・土(誘電

率； ϵ_4) の入射角 θ_0 での TE モードに対するインピーダンスで、以下のように求める。なお、以下の全てのインピーダンスは、自由空間のインピーダンス ($Z_0 = 377\Omega$) で正規化されているとする。

$$r_4 = j\sqrt{\epsilon_4} \dots\dots\dots (17)$$

$$Z_{04} = 1/\sqrt{\epsilon_4} \dots\dots\dots (18)$$

$$\cos\theta_4 = \sqrt{1 + (\sin\theta_0/r_4)^2} \dots\dots\dots (19)$$

$$Z_{4e} = Z_{04} \cos\theta_0 / \cos\theta_4 \text{ (TE モード)} \dots\dots\dots (20)$$

$$(Z_{4m} = Z_{04} \cos\theta_4 / \cos\theta_0 \text{ (TM モード)}) \dots\dots\dots (21)$$

次に、Fig.5 におけるマトリックス $[F_{\Sigma e}]$ は次式のようになる³⁾。

$$[F_{\Sigma e}] = [F_{1e}] \cdot [F_{2e}] \cdot [F_{re}] \cdot [F_{3e}] \dots\dots\dots (22)$$

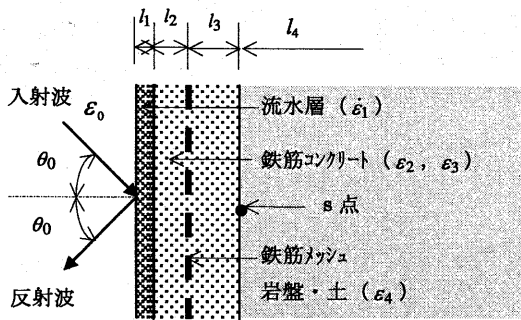


Fig.4 多層構造トンネル壁 (Multi-layer-structure Tunnel Wall)

$$[F_{\Sigma e}] = \begin{bmatrix} A_e & B_e \\ C_e & D_e \end{bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

(22)式の $[F_{1e}]$ 、 $[F_{2e}]$ 、 $[F_{3e}]$ は、Fig.4 の誘電体 1, 2, 3層それぞれの誘電率 ϵ_1 、厚さ l_i における入射角 θ_0 での TE モードに対する F マトリックスである。また、 $[F_{re}]$ は鉄筋メッシュの寸法から求められる F マトリックスである。なお、 A_e, B_e, C_e, D_e は $[F_{\Sigma e}]$ の要素である。したがって、Fig.5 の入力インピーダンス Z_{1e} は次式となる。

$$Z_{1e} = \frac{A_e Z_{4e} + B_e}{C_e Z_{4e} + D_e} \dots\dots\dots (24)$$

そして、(24)式の入力インピーダンスに対する反射係数、損失は次式となる。

$$r_{1e} = \frac{Z_{1e} - 1}{Z_{1e} + 1} \dots\dots\dots (25)$$

$$\Gamma_{1m} = 20 \cdot \log_{10} r_{1e} \dots\dots\dots (26)$$

同様には TM モードに対する反射損失は次式となる。

$$\Gamma_{1m} = 20 \cdot \log_{10} r_{1m} \dots\dots\dots (27)$$

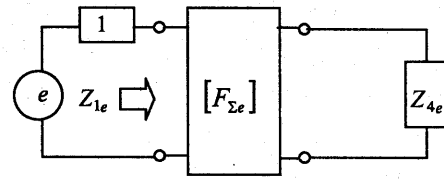


Fig.5 解析モデルの等価回路

(Equivalent Circuit for a Multi-layer-structure Tunnel Wall)

ただし、 r_{1m} は TM モードでの反射係数である。

Fig.3(b)の xz 断面で、電波が TE モードで側壁面に多重反射して z 軸方向に伝搬していく過程での単位長さ当りの反射損失は次式となる。

$$L_{side} = \frac{1}{Z_a} \Gamma_{1e} \dots\dots\dots (28)$$

また、(c)の yz 断面のように TM モードで天井・地面に多重反射することによる反射損失は次式となる。

$$L_{updown} = \frac{1}{Z_b} \Gamma_{1m} \dots\dots\dots (29)$$

したがって、トンネル全体での単位長さ当りの E_{h11} モードの伝搬損失は、側壁面の TE モードでの損失と天井・地面の TM モードでの損失の和であり次式となる。

$$L_{h11} = \frac{1}{Z_a} \Gamma_{1e} + \frac{1}{Z_b} \Gamma_{1m} \dots\dots\dots (30)$$

単位長さ当りの E_{v11} モードの伝搬損失は、 E_{h11} モードの場合に対してその電磁界分布が xy 平面で 90° 回転したものとなるので次式となる。

$$L_{v11} = \frac{1}{Z_a} \Gamma_{1m} + \frac{1}{Z_b} \Gamma_{1e} \dots\dots\dots (31)$$

III. 計算例

1. 基本定数の変化による伝搬特性

Fig.6 に基本計算モデルのトンネル断面を示す。Fig.6(a) はトンネル断面寸法が一定 ($a \times b$)、電波周波数が一定 (1GHz) で、一様な岩盤の誘電率 (ϵ_2) のみがある実数部と虚数部の比を一定 ($\epsilon_2'/\epsilon_2'' = 0.1$) に保ちながら、変化する場合の計算モデルを示す。この計算結果を Fig.7 に示す。計算は水平・垂直偏波 (E_{h11}, E_{v11}) に対する長さ 100m 当りの伝搬損失 L_{h11}, L_{v11} を求め、これを計算結果の図中では Xh, Xv 等と示す (以下全て同じ)。Fig.7 からは誘電率の伝搬特性への影響は比較的小さいことが分かる。

Fig.6(b) は一様な岩盤の誘電率 (ϵ_2) が一定、周波数が一定

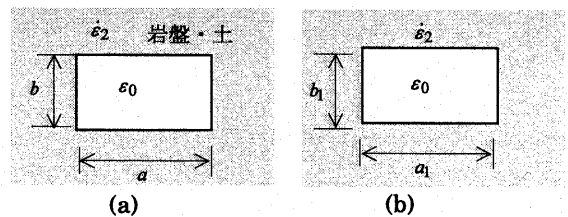


Fig.6 基本計算モデルのトンネル断面 (Fundamental Calculation Models)

(1GHz)で、トンネル断面寸法 ($a_1 \times b_1$) のみが高さ (b_1) と横幅 (a_1) の比を一定 (2/3) に保ちながら、変化した場合の計算モデルを示す。この計算結果を Fig.8 に示す。Fig.8 からはトンネル断面寸法はその伝搬特性に非常に大きな影響を与えることが分かる。

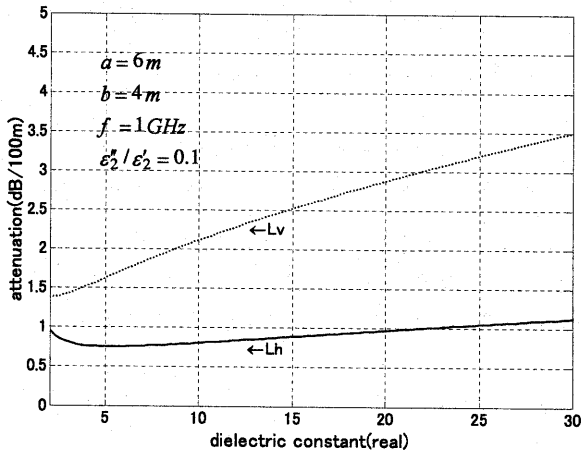


Fig.7 岩盤の誘電率を変化させた場合の伝搬特性

(Radio Wave Propagation Changing Permittivity of Bedrock and Soil)

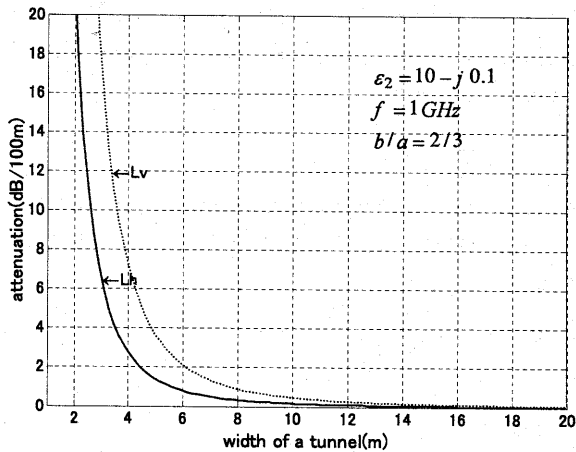


Fig.8 トンネル断面の寸法を変化した場合の伝搬特性

(Radio Wave Propagation Changing Size of Tunnel Sections)

2. 各種トンネルの伝搬特性

パラメータを変えた4種類の計算モデルトンネル断面を Fig.9 に示す。これらのトンネル内の周波数 300MHz~3GHz に対する伝搬特性を計算する。Fig.9(a)は、一様な誘電率の岩盤・土で囲まれた断面 ($a \times b$) のトンネルで、計算パラメータは2種類の誘電率 ($\epsilon_{21}, \epsilon_{22}$) である。計算結果を Fig.10 に示す (誘電率の虚数部は、導電率 σ に比例し、角周波数 ω に逆比例するので、 $j \times \sigma / \omega$ 等と示した。以下同じ)。Fig.10 からは、同じ誘電率での例えば L_h と L_v を比較すると、全周波数において $L_v > L_h$ となっているが、これは L_v の場合には幅の広い (a) の壁面に反射損失の大きい TM モードで電波が、幅の狭い (b) の壁面に反射損失の小さい TE モードで電波が当たったためであることが分かる。

Fig.9(b)は、(a)の岩盤・土の誘電率が ϵ_{22} の場合で、計算パラメ

ータは、2種類のトンネル断面 ($a_1 \times b_1, a_2 \times b_2$) である。計算結果を Fig.11 に示す。Fig.11 からは、反射損失が小さなトンネル断面の場合の伝搬損失 S_h, S_v は大きな断面の場合の L_h, L_v の何倍にも大きくなっていることが分かる。このことは、周波数を固定した場合に、トンネル内電波伝搬特性に一番大きく影響を与えるのはトンネル断面寸法であることを示している。

Fig.9(c)は、(a)の岩盤・土の誘電率が ϵ_{22} の場合で、そのトンネル内岩盤・土の表面に誘電率 ϵ_1 、厚さ l_1 の表面水層を追加したモデルである。その計算パラメータは、表面水層がある場合と無い場合である。計算結果を Fig.12 に示す。Fig.12 からは、表面水層がある場合の伝搬損失 W_h, W_v は、無い場合の C_h, C_v に比べてともに

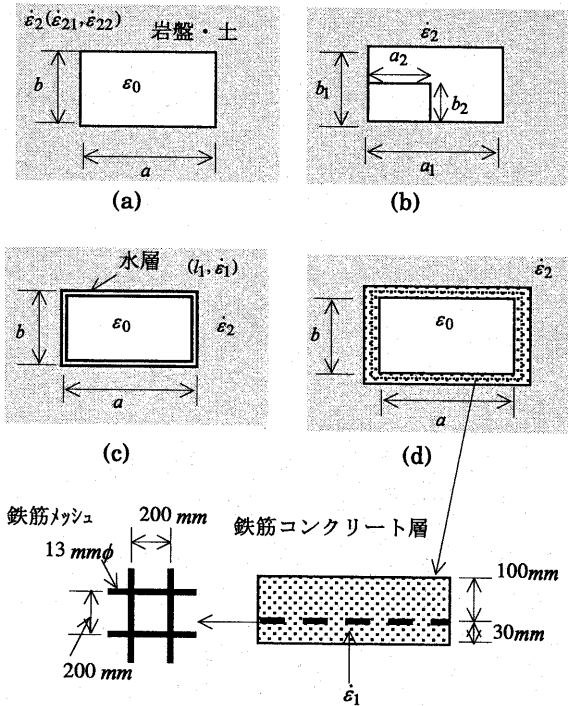


Fig.9 各種トンネル断面計算モデル
(Calculation Example Models)

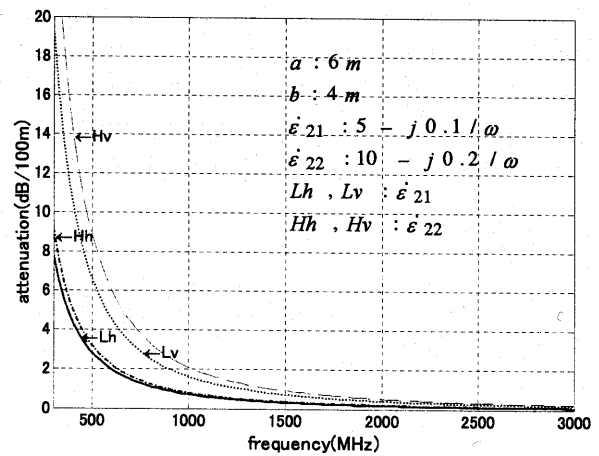


Fig.10 岩盤・土の誘電率を変化した場合の伝搬特性
(Radio Wave Propagation Changing Permittivity of Bedrock and Soil)

非常に大きくなる事が分かる。

Fig.9(d)は、(a)の岩盤・土の誘電率が ϵ_{22} の場合で、トンネル断面

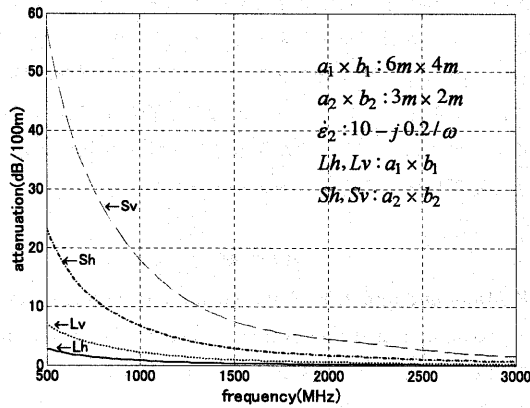


Fig.11 トンネル断面の寸法を変化した場合の伝搬特性 (Radio Wave Propagation Changing Size of Tunnel Sections)

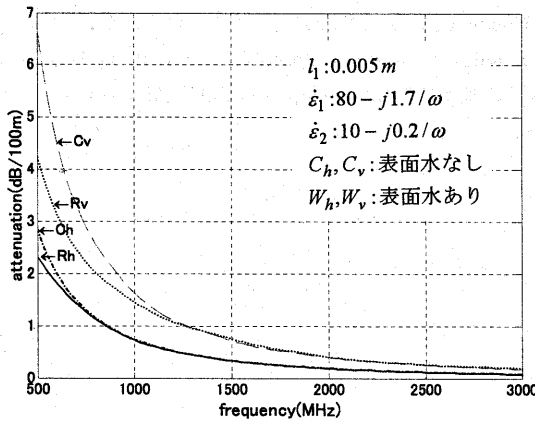


Fig.12 岩盤表面水の有無での伝搬特性 (Radio Wave Propagation in case of Bedrock-surface-water being or not being)

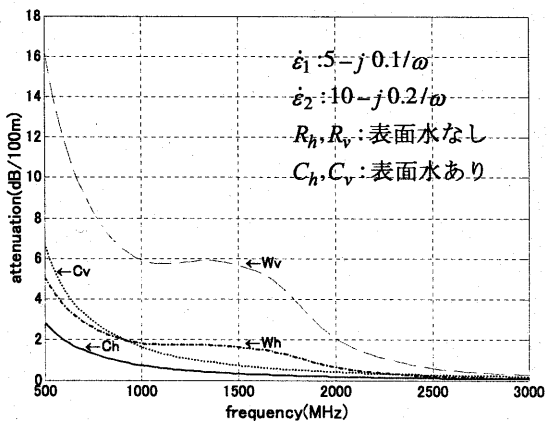


Fig.13 鉄筋コンクリート中のメッシュの有無での伝搬特性 (Radio Wave Propagation in Case of Reinforced Concrete Mesh being or not being)

に鉄筋コンクリート製のセグメントをはめた場合を想定したモデルであり、壁面構造を Fig.4 の多層構造での表面水層をとったものである。

計算パラメータは鉄筋コンクリート中の鉄筋メッシュの有無である。この計算結果を Fig.13 に示す。Fig.13 からは、周波数約 700MHz を境にそれ以下では鉄筋メッシュがある場合の R_h, R_v は、無い場合の C_h, C_v に比べると小さく、すなわち伝搬に有利、その周波数以上では鉄筋メッシュの有無は関係がないことが分かる。

3. 施工中の岩盤トンネルでの検証

本論文の解析法検証のために、掘削中の岩盤トンネル内での伝搬特性を実測し、その同じ条件でのシミュレーションを行った。実測を行ったトンネルの壁は岩盤で、トンネル岩盤天井・側壁の表面には水が伝って流れており、地面は湿潤であった。これをモデル化したものが Fig.11 である。トンネル断面は 2.8m(幅)×3.4m(高さ)、壁面は岩盤でその表面に平均厚さ 0.002m 程度の表面水層があり、地面には 0.005m 程度の表面水層がある。このトンネルの内部を Photo 1 に示す。計算結果と実測結果を Fig.12 に示す。Fig.12 からは計算結果と実測結果はその傾向が合っていることが分かる。

ここで、計算と実測の場合ではその条件が主に次の二つの点で違いがある。一つは、Photo 1 から分かる通り実際のトンネルの壁面には約 1.2m 間隔で 150H の支持工があり、これが電波的には誘導 (伝搬には有利) と散乱 (伝搬に不利) の二つの作用として加わっていると考えられるが、計算では考慮していない。

他の一つは実測では指向性のアンテナ (八木アンテナ) を使用し

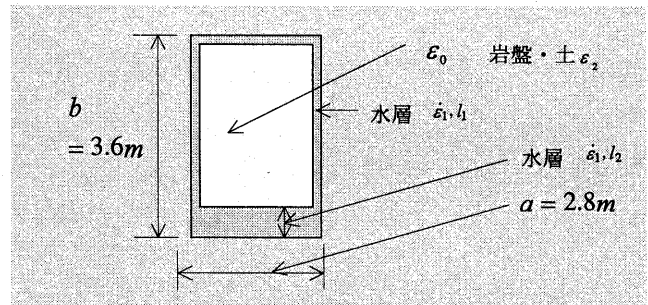


Fig.14 掘削中の岩盤トンネル断面 (Cross-section of tunnel being excavated through bedrock)

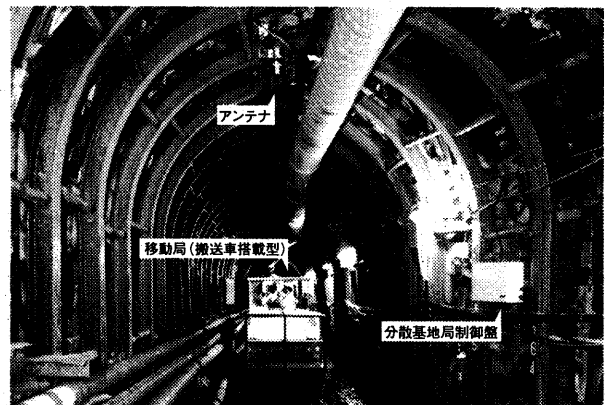


Photo 1 実測トンネル断面 (Measurement Tunnel Section)

ており、高い周波数帯の場合は、電波が直接受信アンテナに到達している割合が若干多い。すなわち伝送損失が少なくなっているが、計算では考慮していない。

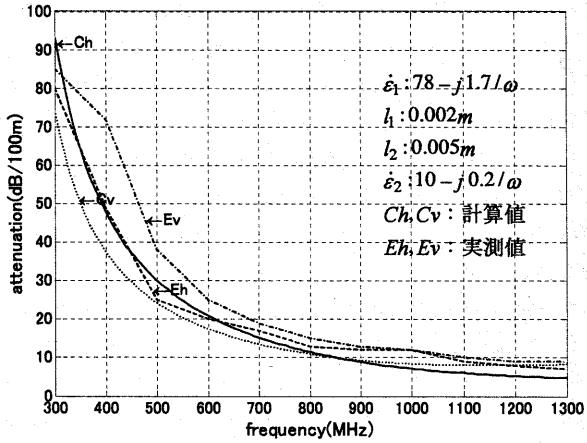


Fig.15 掘削中のトンネルの電波伝搬 (実測, 計算結果)
(Radio Wave Propagation in a Tunnel under Digging)

IV. まとめ

本論文では、トンネル断面寸法に比べて小さい波長電波のトンネル内伝搬特性の解析を、幾何光学的近似の伝搬ルートと多層構造壁の伝送マトリクス等価回路から求める反射損失を組み合わせて行った。解析は、概ね妥当性があると考えている。この理論計算の使用においては、岩盤・土・コンクリートなどの誘電率が含水率によって大きく変化するので、トンネル壁面を構成する材料の誘電率には実際のものに近い値を入力することが重要である。

参考文献

- 1) S. F. Mahmoud and J. R. Wait ; Geometrical optical approach for electromagnetic propagation in rectangular mine tunnels, Radio Sci., vol. 9, no. 12, (1974), pp. 1147-1158.
- 2) A. G. Emslie, L. L. Robert, and P. F. Strong ; Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels, IEEE Trans. Antennas Propagation, vol. AP-23, no. 2, (1975), pp.192-205.
- 3) Y. Kasashima, K. Yamaki,; Method for Calculating the Transmission Loss of a Radio-Wave-Shielding Wall, Proc. of the IEEE 2002 Int. Symp, on EMC, Minneapolis, August 2002.