

氏 名 稲 葉 龍 夫

授 与 学 位 工 学 博 士

学位授与年月日 昭和 56 年 4 月 8 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 25 年 3 月

東北大学工学部通信工学科卒業

学 位 論 文 題 目 トンネル内電波の伝搬特性に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 佐藤利三郎

東北大学教授 重井 芳治 東北大学助教授 千葉 二郎

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 言

トンネル内通信には大別して有線方式と無線方式とがある。有線方式は広く実用化されているが、無線方式の研究はその緒についたばかりである。

第 2 章 トンネル内電波伝搬の実験的研究

実験の対象として、東北新幹線第 2 葉坂トンネル (全長 1470 m) を選び、円形の直線トンネルについてトンネル内電波伝搬の減衰定数を測定した。測定周波数 40, 60, 150, 470, 900 MHz および 1.7 GHz である。以上の各周波数における減衰定数測定結果を、偏波面により水平 (E_x)、垂直 (E_y) および縦方向 (E_z) 成分ごとに整理し、これをもとに減衰定数 (α) - 周波数 (f) の特性曲線として、一つにまとめたものが図 1 である。100 MHz から 1000 MHz の間は $\alpha \propto f^{-2}$ の直線にはば乗るが、100 MHz 以下ではそれを下回り 1000 MHz 以上ではそれを上回った。この結果を用い、円形の直線トンネルにおける減衰定数の実験式として次式が得られた： $\alpha = 1460 (\lambda^2/a^3)$ 。ここで α は減衰定数 (dB/Km)、 λ は波長 (m)、 a は等価半径 (m) [註：トンネルの等価半径とはトンネルの断面積と等しい円の半径のこと]、その適用範囲は $2.65 < a < 4.2$ 、 $150 \text{ MHz} < \text{周波数} < 500 \text{ MHz}$ である。また円形の直線トンネルにおける位相定数を知るため、管内波長の測定も行ったが、その結果は図 2 の通りである。

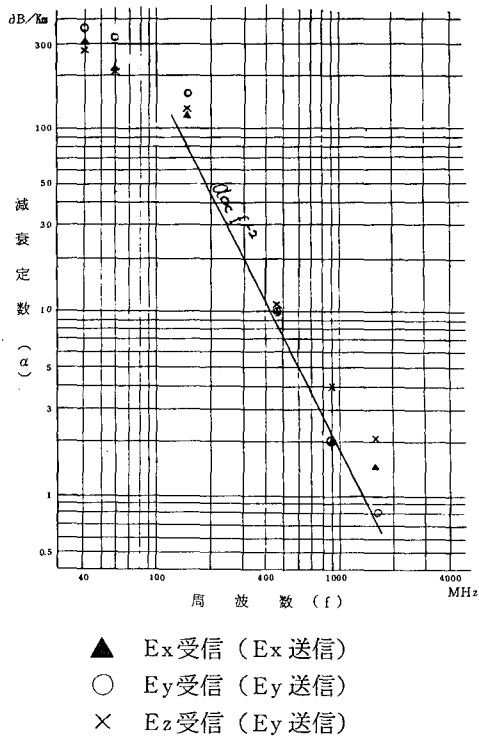


図1 減衰定数 — 周波数特性測定値

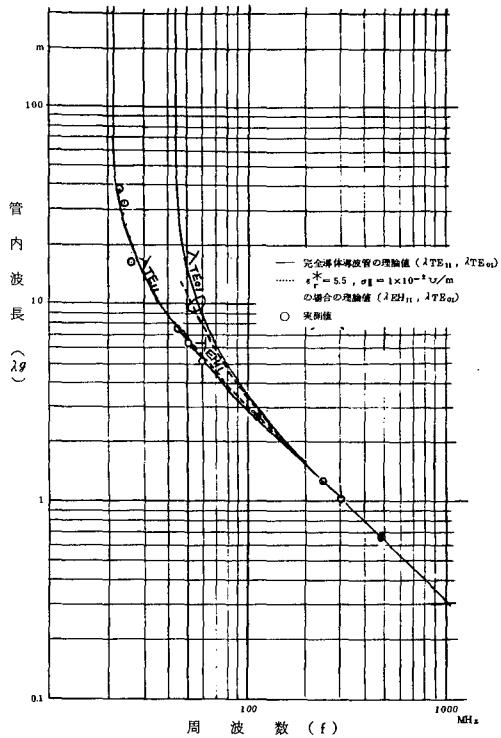


図2 管内波長の実測値と理論値

曲りトンネルにおける減衰定数の測定は、神奈川県相模川流域下水道（直径 2.4 m）の曲率半径 198.7 m、長さ 40 m の区間を対象に、測定周波数 800 MHz、1.7 GHz および 4 GHz で行った。

第 3 章 トンネル内電波伝搬の理論的研究

トンネルのモデルはコンクリートの電気定数を持つ無限に広い媒質の中に、等価半径 a なる無限に長い真直な穴があいているものである。このモデルの厳密解として、次の Stratton の特性方程式の数値解を求めた。

$$\left\{ \begin{array}{cc} \frac{J_m'(ua)}{(ua) J_m(ua)} & \frac{H_m^{(1)'}(va)}{(va) H_m^{(1)}(va)} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{cc} \frac{k_0^2 J_m'(ua)}{(ua) J_m(ua)} & \frac{\nu^2 k_0^2 H_m^{(1)'}(va)}{(va) H_m^{(1)}(va)} \end{array} \right\} = m^2 \gamma^2 \left\{ \frac{1}{(ua)^2} - \frac{1}{(va)^2} \right\}^2$$

ここで $u = \sqrt{k_0^2 - \gamma^2}$, $v = \sqrt{\nu^2 k_0^2 - \gamma^2}$, $k_0 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} = 2\pi/\lambda$: 自由空間の固有伝搬定数,

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m) : 自由空間の誘電率,
 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ (H/m) : 自由空間の透磁率, ω
 $= 2\pi f$ (rad) : 角周波数, f (Hz) : 周波数,
 λ (m) : 波長, $\nu = \sqrt{\epsilon_r / \epsilon_0}$: 外部媒質の複素
 屈折率, ϵ_r (F/m) : 外部媒質の複素誘電率, a
 (m) : 等価半径, m : 整数, $\gamma = \beta + j\alpha$: 伝搬定数,
 β (rad/m) : 位相定数, α (Neper/m) : 減衰定
 数である。位相定数 β , 減衰定数 α の数値解を図3
 に示す。位相定数 β は管内波長 ($2\pi/\beta$) に換算
 の上, 図2で実測値と比較される。近似解は次の
 E.A.J. Marcatili & R.A. Schmeltzer の式に
 よった。すなわち位相定数 β_{mn} (rad/m), 減衰
 定数 α_{mn} (Neper/m) は,

$$\beta_{mn} = \text{Re}(\gamma) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{U_{mn} \lambda}{2\pi a} \right)^2 \right. \\
 \left. \left\{ 1 + \text{Im} \left(\frac{\nu m \lambda}{\pi a} \right) \right\} \right] \\
 \alpha_{mn} = \text{Im}(\gamma) = \left(\frac{U_{mn}}{2\pi} \right)^2 \frac{\lambda^2}{a^3} \text{Re}(\nu m)$$

ここで U_{mn} : $J_{m-1}(x) = 0$ の n 番目の根, νm は TE_{on} ($m=0$) モードでは $1/\sqrt{\nu^2-1}$,
 TM_{on} ($m=0$) モードでは $\nu^2/\sqrt{\nu^2-1}$, EH_{mn} ($m \neq 0$) モードでは $\frac{1}{2}(\nu^2+1)/\sqrt{\nu^2-1}$
 で求められる。

以上により減衰定数の近似解を求めたが, 直接トンネルの場合の計算値を, 数値解とともに図4
 で実験値と比較して示す。

曲りトンネルの減衰定数はやはり, E.A.J. Marcatili & R.A. Schmeltzer の近似式よ
 り求めた。すなわち,

$$\alpha_{mn}(R) = \alpha_{mn}(\infty) \left\{ 1 + \frac{4}{3} \left(\frac{2\pi a}{U_{mn} \lambda} \right)^4 \left(\frac{a}{R} \right)^2 \right. \\
 \left. \left\{ 1 - \frac{m(m-2)}{U_{mn}^2} + \frac{3}{4} \delta_m(\pm 1) \frac{\text{Re} \sqrt{\nu^2-1}}{\text{Re} \frac{\nu^2+1}{\sqrt{\nu^2-1}}} \cos 2\Theta_0 \right\} \right\}$$

ここで $\alpha_{mn}(R)$ は曲率半径 R (m) の場合, $\alpha_{mn}(\infty)$ は真直 ($R = \infty$) な場合の減衰定数
 (Neper/m), $\delta_m(\pm 1)$ は $m = \pm 1$ では 1, $m \neq \pm 1$ では 0, Θ_0 はトンネルのわん曲面に対す
 る界の傾きである。

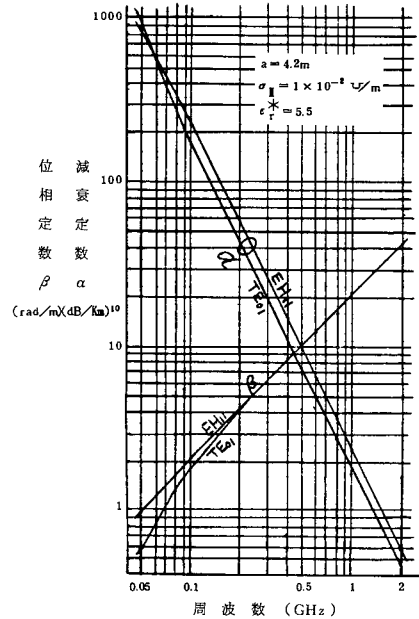


図3 減衰定数, 位相定数の数値解

第4章 壁の媒質定数の測定

S, Roberts & A, von Hippel の方法によりトンネル壁の媒質定数を 4 GHz にて測定し, 比誘電率 5.5, 導電率 $1 \times 10^{-2} \Omega/m$ なる値が得られた。

第5章 実験結果と理論の比較検討

(1) 直線トンネルの減衰定数について

- (a) 図1に示すとおり減衰定数(α)と周波数(f)は $\alpha \propto f^{-2}$ の関係にあり, 理論式と同じ傾向にある (但し極端に低いまた高い周波数を除く)。
- (b) 縦方向 (E_z : 空中線素子がトンネル軸方向と平行におかれた状態) 成分はたとえ存在したとしても小さい。すなわち定在波変動が大きく, また絶対レベルも水平 (E_x) 成分, 垂直 (E_y) 成分より低い。
- (c) TE_{11} , TE_{01} 等低次モードの遮断周波数 (壁面が完全導体の場合の遮断周波数。壁面が導体, 誘電体の中間であるこの場合は, 完全に遮断状態とはならない) 近辺では減衰定数は大きい。一方距離に対し急激に減衰するためか, 定在波動は極めて少ない。
- (d) 周波数が高くなるにつれて定在波変動が大きくなる傾向がある。
- (e) 減衰定数の実験値と理論値の比較を

図4に示す。最も損失の少ないモードである TE_{01} およびハイブリッドモードである EH_{11} モードの理論計算値が実験値に近い値を示す。実線が電子計算機による数値解, 点線が E.A.J. Marcatili & Schmeltzer の手法による漸近解である。

- (f) 以上のように TE_{01} もしくは EH_{11} モードが実験値に近い値を示しているが, TE_{01} モードは単独モードで励振かつ単独モードで伝送しにくいモードであり, またトンネル壁は導体よりむしろ誘電体で, かつ直線偏波で電波を送出しているため, EH_{11} モードが伝搬の主要なモードである可能性が強い。
- (g) 1.7 GHz では減衰定数実測値が, その EH_{11} および TE_{01} モードの理論計算値を上回る。これはトンネル壁面の粗さが波長と同程度になると, 壁面の粗さが損失に寄与するためと考えられる。

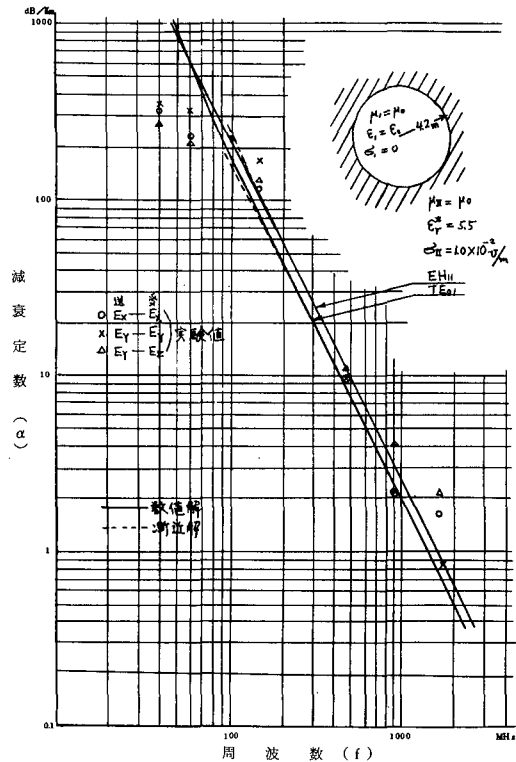


図4 減衰定数の理論値と実験値の比較

またEH₁₁、TE₀₁以外の低次モードの影響も考えられる。

(2) 曲りトンネルの減衰定数について

実験値はTE₀₁モード、EH₁₁モードの理論計算値に近い値が得られた。理論によれば曲りトンネルの減衰定数は、周波数の2乗とトンネル断面半径の3乗に反比例する直線トンネルの減衰定数に、周波数の2乗とトンネル断面半径の3乗に比例しかつトンネルの曲り半径の2乗に反比例する減衰定数補正項が加わる。従って減衰定数が最少となる周波数が存在するが、それが実験により確められた。

(3) 直線トンネルの位相定数について

管内波長に換算して理論計算値と実験値を図2に比較して示す。低い周波数ではTE₁₁モードによる管内波長の値を示し、周波数が高くなるにつれて自由空間波長とも一致して来る。なお考えられる主要伝送モードはEH₁₁モードであるが、図2に示すようにそれはTE₁₁モードの管内波長に極めて近い。主要伝送モードはEH₁₁モードである可能性は、この結果よりも裏付けられる。

(4) トンネル断面電界分布予備実験

予備実験を行ったが、伝送モードの精密な測定は行っていない。特に縦方向(E_z)成分の測定法については吟味の要がある。

第6章 結 言

曲りトンネルにおいては前述のように減衰定数が最小となる周波数が存在するが、国鉄の新幹線を例にあげれば、線路の最小曲率半径が東海道新幹線の場合2500 m、山陽新幹線の場合4000 mである。またトンネルの断面等価半径は4.2 mであるので、曲りの影響を無視出来る周波数範囲は、EH₁₁モードを対象とした場合東海道新幹線では700 MHz以下、山陽新幹線では900 MHz以下となる。それ以上の周波数を使用すれば、トンネル曲りの影響を充分考慮の要がある。

トンネルや地下街、炭鉱や鉱山など、無線方式はその適用対象を考慮の上、周波数の選択により減衰定数の上で大変有利なシステムが構成可能である。

審 査 結 果 の 要 旨

トンネル内の通信には主として有線による通信方式が実用されているが、これには単に業務上の通話のみならず、災害時における保安上の重要な役割がある。災害時の通信を確保するためには、従来の有線方式だけでなく、有線と無線の両方式を併用することが望ましい。しかし、トンネル内の電波伝搬に関する資料が未だ不十分であり、無線による通信方式を確立するに至っていない。

本論文は、無線によるトンネル内通信方式を確立する目的で、実用トンネルにおける電波の伝搬特性に関する実験的研究に理論的検討を加え、トンネル内電波伝搬の特性を明らかにし、無線方式の基礎資料を与えたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒言であり、従来の研究など本論文の背景を述べている。

第2章はトンネル内電波伝搬の実験的研究の成果をまとめたものである。実用の直線トンネルとして東北新幹線第2葉坂トンネルを、また曲線トンネルとして相模川流域下水道を利用し、VHF帯よりSHF帯の広い周波数範囲にわたり、水平および垂直偏波送信に対する伝搬特性を詳細に測定した。その結果、直線トンネル内伝搬では、 100MHz を超える周波数でかなりの変動が現われるが、実用上許容される程度であり、その減衰定数は周波数の2乗に逆比例することを確認している。また曲線トンネルでは減衰が最小となる周波数の存在を確認している。これらは実用トンネルで得られた資料として貴重である。

第3章では、トンネル内電波伝搬の理論的研究について述べている。トンネル断面を円に近似してモード解析を行ったもので、最初は厳密な境界値問題として扱い、次いで近似解を導いている。ここで得られた EH_{11} モードの伝搬特性は、直線および曲線トンネルに対して、前章の実測結果とよく一致しており、実用トンネル内の伝搬は EH_{11} モード単一の伝搬として扱い得ることが結論されている。

第4章はトンネル壁の媒質定数を測定する方法とその結果を述べたものであり、ここで得られた数値が前章で利用されている。

第5章は実験結果と理論の比較検討について述べたものである。

第6章は結言である。

以上要するに、本論文は実用のトンネルについて実験、理論の両面から広い周波数範囲にわたる電波伝搬の検討を行い、トンネル内通信における無線方式確立の基礎資料を与えたもので、通信工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。