

導水路トンネルのマイクロ波帯における減衰定数の実験式

非会員 佐々木 範 雄 (東北電力)
 正員 御 供 輝 充 (東北電力)
 正員 千 葉 二 郎 (東北工業大学)

Empirical Formula of the Attenuation Constant of Microwave band in Head Race Tunnels

Norio SASAKI, Non-Member, Terumitsu MITOMO, Member (Tohoku Electric Power Co., Inc.)
 Jiro CHIBA, Member (Tohoku Institute of Technology)

This paper derives an empirical formula of an attenuation constant inside small cross-section tunnels (2m²-13m²) which are used as headraces in hydroelectric power stations. Electric field strength/distance inside the tunnel was measured (1.9GHz-18GHz), and the obtained data was submitted to statistical analysis.

The attenuation constant obtained from linear regression analysis was larger than that reported by researchers.

With the attenuation constant as a criterion variable, multiple regression analysis was conducted. Examining the correlation and regression coefficients gave two parameters with highly partial F values. One is the fundamental attenuation constant term of (λ^2/r^3) , the same as the previously reported parameter, and the other is the additional loss term of $(\lambda^{0.28}/e^{0.66r})$. We proposed.

The parameters yielded an empirical formula which estimates the attenuation constant in the waveband (0.006m $\leq \lambda \leq 1.5$ m) broader than before. $[4175 \cdot (\lambda^2/r^3) + 64.4 \cdot (\lambda^{0.28}/e^{0.66r})]$ The attenuation constant using the empirical formula agreed with that obtained from experiments, confirming the effectiveness of our proposed empirical formula.

It was concluded that the attenuation constant in the Giga-hertz range includes additional loss, resulting in the analysis value larger than the previous value.

キーワード：導水路トンネル，電波伝搬，トンネル通信，マイクロ波，多変量解析

1. まえがき

水力発電においては、導水路として用いられているトンネルの定期検査あるいは補修工事の際、トンネル内にいる人との通信を確保したいという要望がある。すなわち、図1に示す貯水池から水力発電所へ水を導くための導水路トンネルと導水路トンネル外部の相互の通信を確保することが保安面等から要求されている。

導水路の役割上、通常は水が充滿しているため、通信が必要とされるのは定期検査や補修工事のため導水路トンネル内の水を抜水し(トンネル内を空にして)、作業員が入杭した時のみである。このことから、通信方式には通信線を使用しない無線方式とすることが望ましい。

しかし、これまでは有効な無線方式による連絡手段がなかったため、作業員は導水路トンネル内を徒歩で移動し連絡を行うか、あるいは作業終了まで連絡がとれない状態が

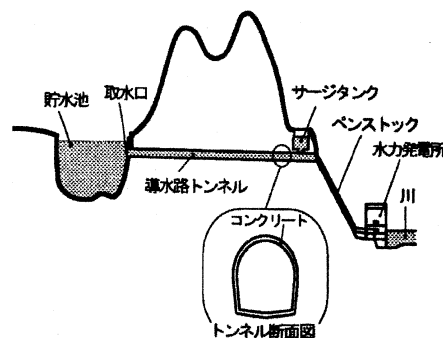


図1 水力発電所 水路縦断面

Fig.1. Aqueduct profile of hydraulic power station.

継続する。このため、導水路トンネル内で酸素欠乏が発生した場合や、作業員の急病時他の異常時に、それら情報を即座に連絡することが出来なく、この点が導水路トンネル内作業のもっとも危険な要因であり、水力発電事業が始まって以来の懸案となっていた。

このことからトンネル自身を電波の導波路として利用するトンネル内無線通信^{(1) (2) (3)}が試みられており、VHF帯、UHF帯での特性が明らかにされている。一方導水路トンネル(断面積2㎡~13㎡程度)のような小断面トンネルにおいて、通信可能な周波数はマイクロ波帯となることを報告⁽⁴⁾しているが、マイクロ波帯での伝搬解析は鉄道トンネル等での報告^{(5) (6)}がなされている程度であり、小断面トンネルをモデルとした伝搬解析は見受けられない。

そこで我々は、導水路トンネルでマイクロ波帯の電波が1キロメートル当たり、いくら減衰して行くかを推定する減衰定数の実験式について検討を行った。これは減衰定数が導水路トンネル用無線システムを構築するにあたり、最も重要な事項となってくるからである。

本論文では導水路トンネル内で減衰定数の実験式を作成するにあたり、統計的手法を用いて解析を行った。まず、直線導水路トンネルの測定区間で得られた個々の電界強度データを最小二乗法により直線回帰させ、導水路トンネルの大きさや周波数の関係による減衰定数の特性を示した。

次に減衰定数に寄与するパラメータの導入と関数形を決定するため、陸上移動通信等の伝搬損値推定^{(7) (8)}に用いられている多変量解析を使用した。また、導入した各パラメータにより重回帰させ、導水路トンネルのマイクロ波帯における減衰定数の実験式を得た。

2. 電界強度測定

導水路トンネル内で電界強度距離特性を得るために、東北電力管内5箇所の水力発電用直線導水路トンネルで電界強度の測定を行った。測定に使用した導水路トンネルは断面積2.1㎡~13㎡の馬蹄形鉄筋コンクリート内巻き構造である。

測定に用いた装置システムを図2に示す。図2において、送信装置には信号発生装置を、受信装置にはスペクトラムアナライザを、送受信アンテナにはホーンアンテナを使用し、

1.9GHz~18GHzまでの周波数を測定した。これら測定装置は図3に示すように、導水路トンネル内に設置し、送信点から約1,000mまで受信装置を徒歩スピードで移動させ、電界強度を測定した。測定した電界データは、サンプリング周期10msでメモリーレコーダに記録し、合わせて距離マーカ(10m)も記録し、10mの短区間電界強度中央値を求めた。各区間の測定に用いた測定装置の主要諸元を表1に示す。

3. 減衰定数の実験式

ここでは、マイクロ波帯における導水路トンネル内減衰定数を推定するのに必要なパラメータの導入と、実験式を得るため、単回帰分析と多変量解析の重回帰分析を用いて解析を行う。

〈3.1〉 単回帰分析 各測定区間での減衰定数を得るため、19測定区間で得られた、それぞれの短区間電界強度中央値を最小二乗法により直線回帰した。データの処理区間としては各種モードが励振され、電界が大きく乱れている送信アンテナ近傍区間は除き、それ以降の直線的に減衰する区間を用いた。

その回帰結果である表2の減衰定数と、従来の減衰定数

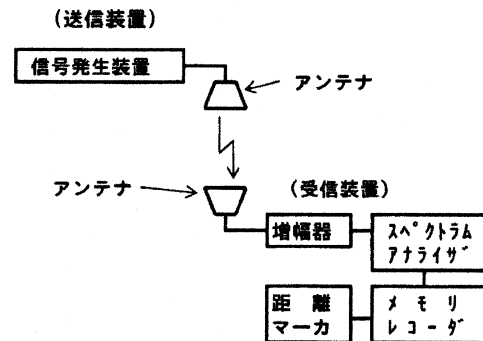


図2 電界強度測定系

Fig.2. Measurement system.

表1 測定諸元

Table 1. Measurement specification.

周波数	1.9GHz~18GHz
導水路断面積	2.1㎡~13㎡
送信出力	10mW
変調方式	無変調搬送波
受信帯域幅	30kHz
送受信アンテナ	ホーンアンテナ 垂直偏波 アンテナ高 80cm

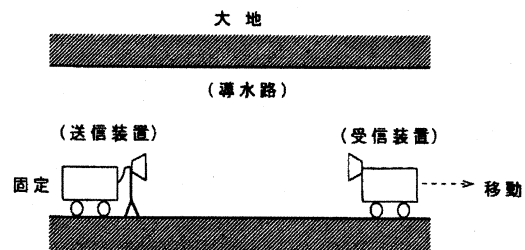


図3 測定装置配置図

Fig.3. Measurement setup.

表2 回帰の結果と比較

Table 2. result of regression and comparison.

区 間	周波数 (GHz)	断面積 (㎡)	減衰定数 (dB/km)	(付1)式 減衰定数 (dB/km)	(付2)式 減衰定数 (dB/km)
導水路①	1.9	4.1	89.3	66.5	39.0
	2.45	4.1	59.8	40.0	23.5
	2.45	4.1	56.8	40.0	23.5
	5.0	4.1	19.3	9.6	5.6
	5.8	4.1	17.4	7.1	4.2
	5.8	4.1	18.8	7.1	4.2
	10.0	4.1	18.0	2.4	1.4
導水路②	2.45	2.1	135.0	109.1	64.0
	2.45	2.1	137.0	109.1	64.0
	12.0	2.1	18.0	4.6	2.7
導水路③	2.45	13.0	19.3	7.1	4.2
	2.45	13.0	21.7	7.1	4.2
	5.0	13.0	13.5	1.7	1.0
	10.0	13.0	6.2	0.4	0.3
導水路④	1.9	12.7	22.0	12.2	7.2
	5.8	12.7	8.1	1.3	0.8
	5.8	12.7	7.0	1.3	0.8
	18.0	12.7	10.1	0.1	0.08
導水路⑤	1.95	3.8	100.0	70.7	41.5

の周波数特性を検討するため、(付1)式、(付2)式の減衰定数値との比較を行った。その結果、周波数がマイクロ波帯に移行するにつれて、本実験で得られた減衰定数は両式の値より大きくなって行く傾向が示された。

これは、波長が短くなることにより、トンネル壁面の粗さの影響が顕著に現れ、減衰量が大きくなったものと考えられる。したがって、マイクロ波帯での減衰定数を推定するためには、これまでの解析パラメータに波長の短い領域での減衰定数を補正する、新たなパラメータを見出すことが必要であると言える。

〈3.2〉 重回帰分析 一般の重回帰分析モデルは説明変数(パラメータ)の数がm個の場合、次式で表現できる。

$$y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_m X_m \dots \dots (1)$$

ここに、y: 目的変数、a: 定数項、 $b_1 \dots b_m$: m個までの各説明変数の係数、 $X_1 \dots X_m$: m個までの各説明変数

そこで、(1)式の定数項および各パラメータの係数を求めるには重回帰分析の正規方程式⁽⁹⁾を解くことにより値が求まる。また、重回帰分析を行うにあたり、各パラメータの関数形を決定し評価する必要がある。このことから、関数形の決定には付録2に示す標準回帰係数 β 、偏相関係数 γ および偏F値を求め、目的変数に最も有意な値を示す関数形を選定する。

〈3.3〉 パラメータの選定 説明変数の選定対象とした3つのパラメータを次に示す。

- (a) 基本減衰定数(α_0): (付1)式の(λ^2/r^3)の項
- (b) 等価半径(r): トンネルの断面積と等しい面積をもつ円の半径(m)
- (c) 波長(λ): 使用周波数の真空中の波長(m)

本減衰定数(α_0)はメガヘルツ帯の周波数で実験的に見出されたパラメータ⁽²⁾である。波長(λ)と等価半径(r)は減衰定数を決定する基本的なパラメータであり、これまで報告されている論文等⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾の知見から、トンネル内の減衰定数はトンネルの大きさと、電波の波長を用いて説明されている。このことから、マイクロ波帯においても、この3つのパラメータを用いることで充分説明はできるものと考えられる。

なお、今回測定に用いた全トンネルは鉄筋コンクリート内巻き構造であり、トンネル壁面はコンクリートの多孔性により水分を含み、水滴が付着している状態となっている。以上のことから、トンネル面媒質の比誘電率は同等とみなし、パラメータとしては考慮しなかった。

〈3.4〉 減衰定数解析結果 減衰定数の実験式の作成に、目的変数として各単回帰式から得られたキロメートルあたりの減衰定数値に加えて、周波数18GHz以上と断面積13㎡以上における減衰定数を補正するため、鉄道総合技術研究所により報告されている50GHzでの減衰定数値⁽¹³⁾(1.3 dB/km, 断面積65㎡)、丹那トンネルでの12.52GHzにおける減衰定数値⁽¹⁴⁾(4.3 dB/km, 断面積45㎡)と、新幹線トンネルでの160MHz, 470MHz, 900MHzにおける減衰定数値⁽³⁾(159, 16.8, 7.1 dB/km, 断面積65㎡)を用い、各パラメータの関数形に、真数、常用対数、指数関数および、べき関数のそれぞれを用いて重回帰分析を行った。

その結果、選定対象とした3つのパラメータの関数形は、基本減衰定数が真数(α_0)、波長がべき関数(λ^x)、等価半径が指数関数(e^{kr})、を用いた場合に、標準回帰係数 β 、偏相関係数 γ および偏F値は最も高い値を示したことから、(2)式に示す関数形で段階的回帰手順⁽¹⁵⁾を用いて、パラメータの導入と有意性の検定を行う。

$$\alpha = b_0 \cdot (\alpha_0) + b_1 \cdot (e^{kr}) + b_2 \cdot (\lambda^x) + a \dots (2)$$

まず、最初に導入するパラメータを得るため統計量 V_1 を求めると、基本減衰定数(α_0)が0.98、偏F値は1322と最も高い相関度を示し、有意水準5%(以降この有意水準で検定を行う)、データ数24、自由度(1,22)とした場合のF値は4.30であるので本パラメータは回帰式中に導入される。

つぎに導入するべきパラメータとして、残りのパラメータで統計量 V_1 を求めると等価半径(r)が導かれ、本パラメータが与えられたときの偏F値70であり、自由度(1,21)とした場合のF値4.32より大きいので、2番目のパラメータとして等価半径(r)が導入される。

最後のパラメータとして波長(λ)を回帰式中に与えられたときの、基本減衰定数(α_0)の偏F値は3995、等価半径

(r)の偏F値は31.9, 波長(λ)の偏F値が8.4であり, 自由度(1,20)とした場合のF値4.35より大きいことから, 全パラメータを回帰式中に導入できることがわかる。

以上の結果, 減衰定数α (dB/km)とすれば次式となる。

$$\alpha = 4563 \cdot (\alpha_b) - 7.3 \cdot (e^{0.22r}) - 4.2 \cdot (\lambda^{1.74}) + 20.9 \dots \dots \dots (3)$$

ここで, (3)式の第1項は主に波長の長い周波数領域での減衰定数を説明するパラメータとして作用し, 第2項と第3項は主に波長の短い周波数領域での基本減衰定数を補正する付加損失として作用するパラメータと言える。

そこで, (3)式の第2項と第3項をこれまでの基本減衰定数と同様, 波長(λ)と等価半径(r)との関係で表現し, マイクロ波帯での付加損失特性を明らかにするため, 次のような付加損失(a_L)のパラメータを仮定した。

$$a_L = \left[\frac{\lambda^x}{e^{kr}} \right] \dots \dots \dots (4)$$

この付加損失(a_L)パラメータと基本減衰定数(α_b)パラメータの二つを用い, (4)式の分子λ^xにおけるx, および分母e^{kr}におけるkを復元処理し, 再度重回帰分析を行った。ここで, 重回帰する仮定として回帰式定数項の符号は正でなければならないこととする。つまり負であると, 実験周波数以上の波長がゼロに漸近して行く周波数領域の減衰定数が負となり, 減衰を表現することが不可能となるためである。

この重回帰分析の結果, 定数項の符号が正の領域において, 最も実測データに当てはまりが良く, 決定係数, 偏F

表3 分散分析表

Table 3. Analysis of variance.

変動要因	平方和	自由度	不偏分散	全F値
回帰	51810	2	25905	3279
残差	166	21	7.9	—
全体	51976	23	—	—

表4 回帰係数

Table 4. Regression coefficient.

変数名	係数	標準回帰係数	偏相関係数	偏F値
α _b	4175	0.932	0.998	4497
a _L	64.4	0.129	0.897	86

表5 回帰の評価

Table 5. Evaluation of regression.

決定係数	重相関係数	標準誤差
0.997	0.998	2.81dB

値, および標準誤差が有意な値を示す(x)は0.28, 等価半径(r)にかかる係数(k)は0.66であることが示された。また, このときの定数項は0.35であるが, 定数の値がゼロ近傍で標準偏差が最も小さくなる傾向が示されているため, 定数項はゼロとみなし, 最終的に得られた減衰定数の実験式は次式となった。

$$\alpha = 4175 \cdot \left[\frac{\lambda^2}{r^3} \right] + 64.4 \cdot \left[\frac{\lambda^{0.28}}{e^{0.66r}} \right] \dots \dots (5)$$

$$(0.8m \leq r \leq 4.55m, 0.006m \leq \lambda \leq 1.5m)$$

本実験式の分散分析を表3に示した。全F値は3279, 有意水準5%, データ数24, 自由度(2,21)とした場合のF値は3.47であるので本実験式は有意であると言える。また, 各パラメータの回帰係数は表4に示すように, 変数(α_b)の標準回帰係数および偏F値は高い値を示し, このパラメータにより減衰定数をほぼ説明していることがわかる。変数(a_L)は標準回帰係数および偏F値は小さいものの, マイクロ波帯に移行するにつれて基本減衰定数を補正する付加損失として支配的に作用するパラメータとなる。また, パラメータ間の相関係数は0.47と, さほど強い相関は見られず, 導入パラメータの有意性が示されている。表5では決定係数と重相関係数は0.99以上の値を示し, 測定値との回帰誤差は標準偏差で2.81dBとなっていることから, 本実験式は広い周波数帯域にわたって減衰定数を推定できると言える。

4. 従来の式と本実験式の比較

本論文で作成した(5)式と, 従来の式との比較を行う。まず, 従来の(付1)式は実トンネルを用いて150MHz ~ 900MHz間の周波数で実験的に見出されたものであり, Kの値はトンネル内に導体や障害物がない場合には1460, 普通に実用化されているトンネルでは3975となっている。また, (付2)式は理論的に求めた方形断面の減衰定数解析結果を変形し, 円形断面形状トンネルの減衰定数として近似的に示した式である。なお, (付1)式のKは3975, (付2)式のεは10として比較を行った。

図4に各式の減衰定数の周波数特性を示す。(付1)式の実験範囲は上述のように150MHz ~ 900MHzなので, 900MHz以上の周波数のところは, そのまま延長するものと仮定して画いたものであり, (a)は断面積2.1m²(等価半径0.82m), (b)は断面積4.1m²(等価半径1.14m), (c)は断面積13m²(等価半径2.03m), (d)は断面積65m²(等価半径4.55m)の大きさである。図からわかるように本実験式はメガヘルツ帯の低い周波数領域では, 従来の式と同様な特性(λ²/r³)となり, ギガヘルツ領域では新たに得られた付加損失項[64.4 · (λ^{0.28} / e^{0.66r})]のため減衰定数は従来の式より大きくなる。よってギガヘルツ領域でも実測値とほぼ一致する。また, 本実験式により推定された減衰定数は, 測定周波数の全範囲にわたり実測値とほぼ一致し

ていることもわかる。このことから、高い周波数領域に移行するにつれて減衰定数は波長の0.28乗に比例してくるため、周波数に対する依存度は小さくなり、トンネルの半径に対する依存度が大きい特性となることがわかる。

5. むすび

水力発電用導水路トンネル内減衰定数の実験式を得ることを目的に、断面積2.1㎡～13㎡、周波数1.9GHz～18GHzまでの各周波数で伝搬実験を実施した。その実験で得られたデータを単回帰し、キロメートルあたりの減衰特性を示した。次に実験で得られた減衰量と、これまで報告されている減衰量をもとに多変量解析の重回帰分析を行い、減衰定数に影響を与えるパラメータの導入と関数形の決定を行い、マイクロ波帯における減衰定数の実験式を明らかにした。また、得られた実験式および従来の実験式と実測データとの比較を行った。

主な結果は以下のとおりである。

(1) マイクロ波帯領域における減衰定数は、従来の式が示す値より大きくなることがわかった。

(2) 重回帰分析により得られた減衰定数の実験式は基本減衰定数(λ^2/r^3)と、付加損失($\lambda^{0.28}/e^{0.66r}$)の二つのパラメータで表され、各係数は4175、64.4となる。

(3) 減衰定数の特性は、高い周波数領域に移行するにつれて、周波数に対する依存度は小さくなり、トンネルの大きさに依存する特性となる。

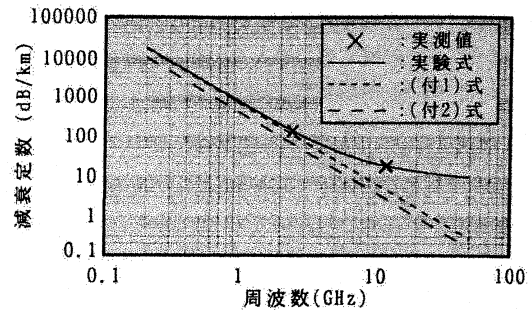
(4) 本実験式の推定減衰定数と実測減衰定数を比較した結果、広い周波数帯域にわたり、ほぼ一致する結果が得られ本実験式の有効性が確認された。

以上の結果から、マイクロ波帯の周波数を使用した場合、本実験式で減衰定数を推定することが可能であり、導水路無線システムの構築の際に有用であると考えられる。

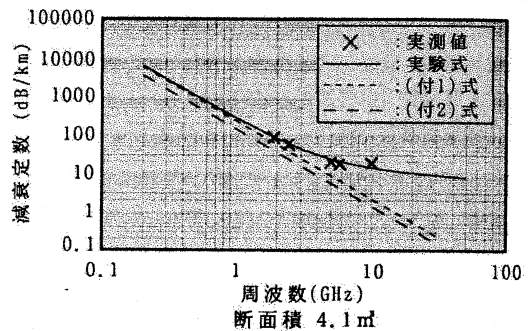
(平成12年04月05日受付, 平成12年07月24日再受付)

文献

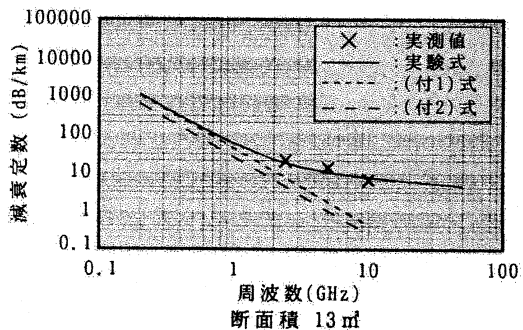
- (1) 千葉二郎:「螺旋に関する研究」, 東北大学大学院工学研究科修士論文, 105, 32&185, (1957)
- (2) 稲葉龍夫, 桑本良知, 坂野取, 千葉二郎, 佐藤利三郎:「円形コンクリートトンネルの減衰定数の実験式」, 信学論(B), J62-B, 1, pp. 85-86, (1979)
- (3) 千葉二郎:「交通安全・災害の防止を目的とするトンネル内通信に関する基礎的研究」, 国際交通安全学会研究研修成果報告集, 3, 14-23, (1982)
- (4) 佐々木範雄, 御供輝充, 渋谷隆雄:「水力発電用導水路トンネルにおける通信について」, 電学論, 116-C, pp. 873-874, (1996)
- (5) Chiba, Inaba, Kuwamoto, Banno and Sato: "Radio communication in tunnels", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., MTT-26, 6, pp. 439-443 (June 1978)



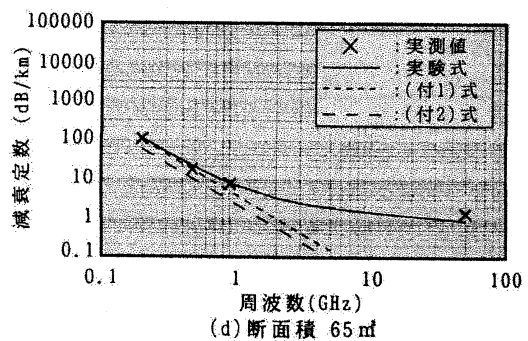
(a) 断面積 2.1 ㎡



断面積 4.1 ㎡



断面積 13 ㎡



(d) 断面積 65 ㎡

図4 トンネルの減衰定数の周波数特性

Fig. 4. Frequency characteristics of the attenuation constant of tunnels.

(6) 弓削哲也:「マイクロ波を使用する列車無線の研究」, JREA, VOL. 26, No. 12, pp. 15268-15271, (1983)

(7) 坂上修二, 久保井潔:「市街地構造を考慮した伝搬損の推定」, 信学論(B-II), J74-BII, 1, pp. 17-25, (1991)

(8) 市坪信一, 木村正弘:「800MHz帯市街地伝搬構造のモデル」, 信学論(B-II), J75-BII, 9, pp. 638-646, (1992)

(9) 森田優三・久次智雄:「新統計概論」, 日本評論社, pp. 87-90, (1993)

(10) 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 & Propagat., AP-23, 2, pp. 192-205, (March 1975)

(11) Marcatili, E. A. J. and Schmeltzer, R. A.: "Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers", Bell Syst. Tech. J., 43, 2, pp. 1783-1809, (July 1964)

(12) 山口芳雄, 阿部武雄, 関口利男:「任意断面をもつトンネル内電波減衰定数の近似式について」, 信学論(B), J67-B, no. 3, pp. 352-353, (1984)

(13) 佐々木伸, 山村博, 川村武彦:「ミリ波による対列車通信」, 鉄道総研報告, no. 5, pp. 17-25, (1989)

(14) 丸浜徹朗, 石原嘉夫, 森田正典, 清水秀夫, 黒田隆二, 富沢理:「13GC帯のトンネル内伝搬特性」, 電気通信学会大, pp. 197, (1961)

(15) Norman R. DRAPER:「応用回帰分析」, 森北出版, pp. 178-194, (1989)

付 録

1. トンネルの減衰定数

トンネルの減衰定数を実験により150MHz~900MHzの間で求めた実験式⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾によれば, トンネル断面積と等しい面積を持つ円の半径を等価半径 r (m) とし, 波長を λ (m) とすると, 減衰定数 α (dB/km) は次式で与えられる。

$$\alpha = K \cdot \left[\frac{\lambda^2}{r^3} \right] \dots \dots \dots (付1)$$

ここに, K : 損失係数でトンネル内に導体や障害物がない場合1460, 通常のトンネルでは3975
 また, 導波管理論の解析法で得られた結果⁽¹⁾⁽²⁾を
 変形した近似式⁽³⁾による円形断面の減衰定数 α_c (dB/m) は次式で与えられる。

$$\alpha_c \approx 5.09 \lambda^2 \cdot \left[\frac{\epsilon_r}{d^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} + \frac{1}{d^3 \sqrt{\epsilon_r - 1}} \right] \dots \dots \dots (付2)$$

ここに, d : トンネルの直径(m), ϵ_r : トンネル媒質の比誘電率

2. 重回帰分析の各係数の算出

標準回帰係数 β は各説明変数の平均値を0, 標準偏差を1に標準化した場合の回帰係数であり, j 番目の標準回帰係数は次式で与えられる。

$$\beta_j = b_j \cdot \sqrt{\frac{\sum X_j^2 - (\sum X_j)^2 / N}{\sum y^2 - (\sum y)^2 / N}} \quad (j=1 \dots m) \dots \dots \dots (付5)$$

ここに, N : 変数の実測個数

偏相関係数は相関を求める変数以外の影響を一定とした場合の相関係数であり, 各変数間の関係の強さがわかる。例として4変数とした場合の目的変数 y と説明変数 X_1 との偏相関係数は次式で与えられる。

$$\gamma_{yx_1 \cdot x_2 x_3} = \frac{\gamma_{yx_1 \cdot x_3} - \gamma_{yx_2 \cdot x_3} \gamma_{x_1 x_2 \cdot x_3}}{\sqrt{(1 - \gamma_{yx_1 \cdot x_3}^2)(1 - \gamma_{x_1 x_2 \cdot x_3}^2)}} \dots \dots \dots (付6)$$

ここに, 右辺の各項は3変数扱いの関係変数間の偏相関係数を表し, 単純相関係数からの積み上げ計算から求められる。

なお, (付5)式, (付6)式の値は-1~1の間をとり, 絶対値が大きいかほど目的変数に与える影響が大きいことになる。

偏 F 値は, 各変数の相対的効果が他の変数の効果より目的変数に与える影響の度合いを検定するための値であり, j 番目の偏 F 値は次式で与えられる。

$$F_j = \frac{\gamma_{yx_j}^2}{(1 - \gamma_{yx_j}^2) / (N - m - 1)} \quad (j=1 \dots m) \dots \dots \dots (付7)$$

ここに, γ_{yx_j} : j 番目の説明変数と目的変数の偏相関係数

佐々木 範雄



(非会員) 1958年3月18日生まれ。1976年3月青森工業高校電子科卒業。同年東北電力(株)入社。導水路無線に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

御供 輝充



(正員) 1964年10月24日生まれ。1988年3月信州大学工学部電気科卒業。同年東北電力(株)入社。導水路無線に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。

千葉 二郎



(正員) 1932年1月29日生まれ。1960年3月東北大学大学院工学研究科電気及通信工学専攻博士課程修了。同年東北大学助手、その後助教授を経て平成2年教授、平成5年大学院情報科学研究科教授、平成7年3月東北大学定年退官、同年4月より東北工業大学教授、現在に至る。工学博士。トンネル内通信の研究に従事。ケンタッキーコーネル賞、テレコムシステム技術賞、科学技術庁長官賞、河北文化賞受賞、著書「電磁気学演習」電気書院ほか3点。