

電波吸収舗装道路・建物壁の最適設計理論

Optimum Design Theory to Make Roads and Building Walls Absorb Radio Waves

笠 嶋 善 憲

要 約

本論文は、異なった電気定数の材料を積層にした多層型電波吸収体をこの吸収体中のインピーダンスを縦断方向に多数とり、その値をスミスチャート上にプロットしたインピーダンス軌跡の位置から判断して各層材料の誘電率とその厚さを最適に設計する理論を示す。ここで、この吸収体中縦断面内のインピーダンスは各層を等価な伝送マトリクス回路に置き換えて求めている。そして、ETC誤動作防止用電波吸収舗装道路の最適設計の計算例、及び抵抗膜型電波吸収壁の最適設計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. 最適設計理論
- III. 計算例
- IV. おわりに

I. はじめに

ETC（自動道路料金徴収システム）の誤動作防止用電波吸収舗装道路、テレビ電波反射障害対策用電波吸収壁、電波無響室用電波吸収材などは、異なった誘電率、透磁率の材料を積層にした多層型電波吸収体と呼ばれるものである。この多層型電波吸収体は、電波周波数、入射角、電波モードに対して各層材料の誘電率、透磁率、厚さなどが最適に設計される必要がある。このような電波吸収体の各材料層を等価な伝送マトリクスに置き換えた回路により吸収体を縦断する断面内の各位置のインピーダンスを計算し、その値をスミスチャート上にプロット、その軌跡の位置から判断して電波吸収体を最適に設計する理論とそれを用いた計算例を示す。

II. 最適設計理論

多層型電波吸収体の解析モデルを Fig.1 に示す。これは電気定数の異なった、ここでは透磁率は一定の1と仮定し、誘電率のみを変化させた $a, b, \dots, u$ のボードが層状になっている。Fig.1 の反射損失の計算例を Fig.2 に示す。ここで、Fig.1 の吸収体の裏面から j 番目の p_j 点での図の右側を見たインピーダンスは、求め方は後に示すが、これを z_j とする。このインピーダンス z_j の自由空間に対する複素反射率 $\dot{r}$ の間には次式の関係がある。（以下の全ての式は、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。）

$$\dot{Z}_j = R_j + jX_j \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\dot{r}_j = (\dot{Z}_j - 1) / (\dot{Z}_j + 1) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\dot{r}_j = |\dot{r}_j| e^{j\theta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$dB = 20 \cdot \log_{10} (|\dot{r}_j|) \quad \dots\dots\dots (4)$$

(1)~(4)式はスミスチャート上の関係であり、したがって Fig.1 の吸収体の裏面から表面までの縦断断面方向に $p_1, p_2, \dots, p_n$ を取り、これらの点の Fig.2 の最大吸収周波数 800MHz に対するインピーダンスを計算し、その値をスミスチャート上にプロットすると Fig.3 のようになる。Fig.3 のこのインピーダンス軌跡は、Fig.1 での右側の p_1 から $p_2, \dots, p_j$ と左側の p_m へ進むにしたがって、右回りで移動し、最終点 p_m での円の中心からの半径は吸収体の反射率、反射損失を示す。すなわち、電波吸収体の設計の良否・状態はスミスチャート上で

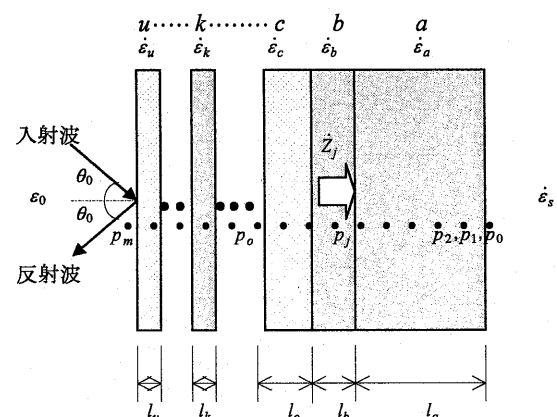


Fig.1 多層電波吸収体の解析モデル
(Analytical Model of Multi Layer Microwave Absorber)

キーワード：電波，吸収体，スミスチャート，
最適設計，反射損失，多層

のインピーダンス軌跡の最終点 p_m の $1+j0$ からのずれ・位置により判断できるので、吸収体の電波吸収特性を最適に設計するには、まず吸収体を構成する各層材料の厚さ、誘電率を仮定し、電波周波数、入射角、電波モードでのインピーダンス軌跡を計算で求める。そして、そのインピーダンス軌跡の形状から判断して、次の誘電率の値でのインピーダンス軌跡を求める。これを試行錯誤的に繰り返して、最終的に最適な電波吸収壁の各層材料の厚さと誘電率を得る。これが本論文で示す最適設計法である。

次に、Fig.2 の多層型吸収体の入射角 θ_0 、TE モードの場合（ここでは主に TE モードについて示す。）の p_j 点から右を見たインピーダンス z_j を求める。Fig.2 の p_j 点から右側の自由空間に対する反射率を求める伝送マトリックスを用いた等価回路¹⁾を Fig.4 に示す。Fig.4 の回路の1次側、2次側間には次式の関係がある。

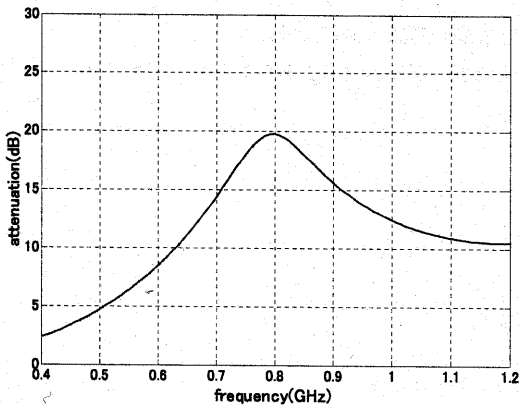


Fig.2 反射損失の周波数特性
 (Calculation Example of Frequency Characteristic of Reflection Loss)

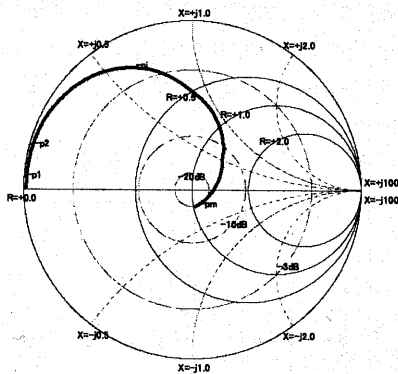


Fig.3 インピーダンス軌跡 (f=800MHz)
 (Impedance Tracks)

$$\begin{bmatrix} V_j \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[F_{ze}] = [F_j][F_{j-1}] \cdots [F_e] \cdots [F_1] = \begin{bmatrix} A_j & B_j \\ C_j & D_j \end{bmatrix} \quad (6)$$

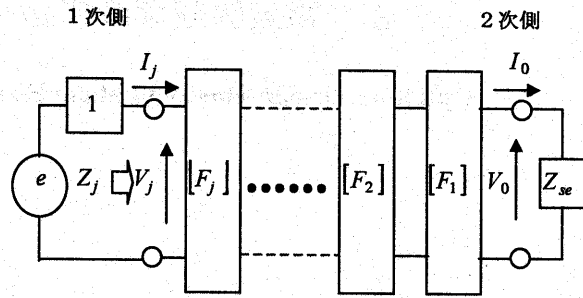


Fig.4 j点から見た等価回路
 (Equivalent Circuit Seen from j Point)

ただし、 $[F_1][F_2] \cdots [F_j]$ は $1, 2, \dots, j$ 点層間の等価伝送マトリックスである。

また、Fig.4 の回路の2次側において次式の関係がある。

$$V_0 = -I_0 \times Z_{se} \quad (7)$$

この Z_{se} は Fig.1 での p_0 より右の誘電率 ϵ_s の無限厚材料（自由空間の場合は $\epsilon_s=1$ ）を見たインピーダンスで、次式となる。

$$r_s = j\sqrt{\epsilon_s} \quad (8)$$

$$Z_{0s} = 1/\sqrt{\epsilon_s} \quad (9)$$

$$\cos \theta_s = \sqrt{1 + (\sin \theta_0 / r_s)^2} \quad (10)$$

$$Z_{se} = Z_{0s} \cos \theta_0 / \cos \theta_s \quad (\text{TE モード}) \quad (11)$$

$$(Z_{sm} = Z_{0s} \cos \theta_s / \cos \theta_0 \quad (\text{TM モード})) \quad (12)$$

したがって、Fig.4 の回路の入力インピーダンス z_j は次式となる。

$$Z_j = R_j + jX_j = \frac{V_j}{I_j} = \frac{A_j Z_{se} + B_j}{C_j Z_{se} + D_j} \quad (13)$$

III. 計算例

1. 電波吸収舗装道路

計算モデルを Fig.5 に示す。すなわち、基盤は無限に厚い大地上に砕石を置いたものであるが、これを誘電率 ϵ_r の無限厚さの層とする。その上に誘電率 ϵ_c の鉄筋コンクリート床版、さらにその上に誘電率 ϵ_m の中間アスファルト電波吸収層、表面に誘電率 ϵ_s の表皮アスファルト電波吸収層とする。なお、この計算モデルでは床版中にシングルの鉄筋メッシュが入っているが、この鉄筋メッシュのインピーダンスはその太さ、メッシュ間隔で求まる伝送マトリックスを Fig.4 の回路の途中に挿入されることになる¹⁾。

電波の入射角が固定 (50°) での周波数を変化した場合の TE, TM モードに対する反射損失の計算例を Fig.6 に、周波数が固定 (5.8GHz) での入射角を変化した場合の TE, TM モードに対する反射損失の計算例を Fig.7 に示す。Fig.7 での (最大) 反射損失である入射角 40° における TE, TM モードに対するインピーダンス軌跡（ここでは電波吸収部である中間層、表層のみの軌跡）を Fig.8,

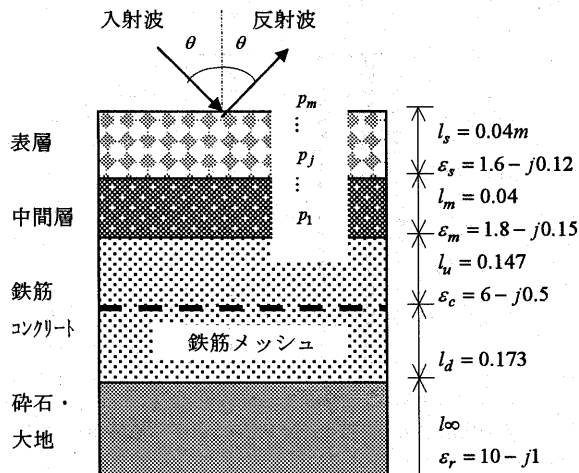


Fig. 5 電波吸収舗装道路
(Electric Wave Absorption Pavement Road)

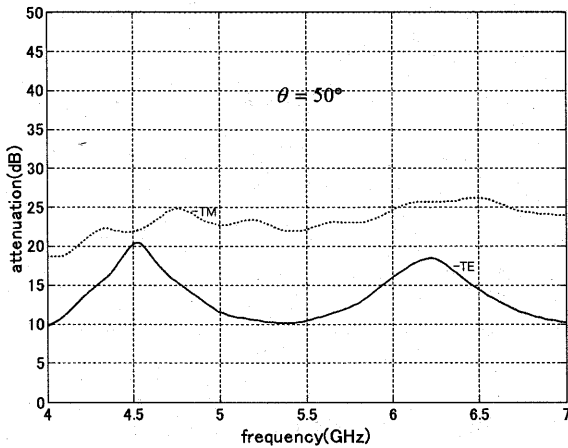


Fig. 6 吸収道路の周波数特性
(Frequency Characteristic of Absorption Road)

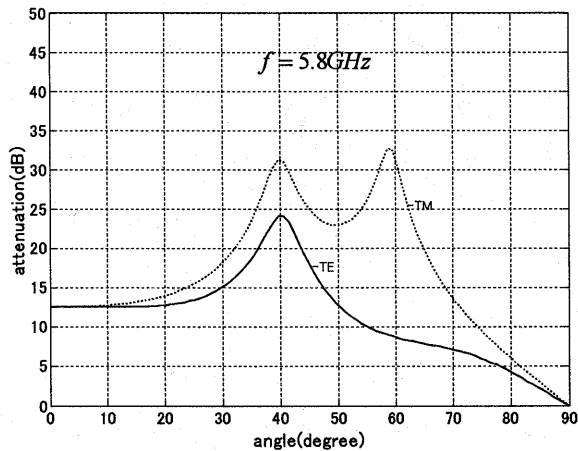


Fig. 7 吸収道路の周波数特性
(Frequency Characteristic of Absorption Road)

Fig. 9 に示す。Fig. 8, Fig. 9 のインピーダンス軌跡 $p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m$ はインピーダンス $R=1+j0$ 付近で収斂する渦巻き状になっており、比較的安定した吸収体の設計になっていることが分かる（理想状態は、 $R=1+j0$ を中心に渦巻き状に収斂するもの）。

2. 抵抗膜型電波吸収壁

抵抗膜型電波吸収壁の概要を Fig. 10 に、その断面寸法を Fig. 11 に示す。これは高層ビルによる UHF 帯テレビ電波反射防止用電波吸収壁として実用化しているものである。Fig. 11 は、誘電率 ϵ_c の P C カーテンウォール、その室外側表面に誘電率 ϵ_r の抵抗膜（抵抗膜の抵抗値とキャパシタンス値は等価な誘電率に変換できる。）、その電波の入射角が固定（ 50° ）での周波数を変化した場合の TE, TM モードに対する反射損失の計算例を Fig. 6 に、周波数が固定（ $5.8GHz$ ）での入射角を変化した場合の TE, TM モードに対する反射損失の計算例を Fig. 7 に示す。Fig. 7 での（最大）反射損失である入射角 40° における TE, TM モードに対するインピーダンス軌跡（ここでは電波吸収部である中間層、表層のみの軌跡）を Fig. 8 に示す。実測値の特性は計算値に比べて 30MHz 程度低い方にずれ

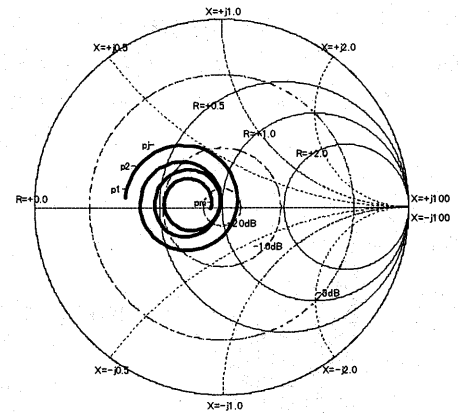


Fig. 8 TE モードのインピーダンス軌跡
(Impedance Tracks in TE Mode)

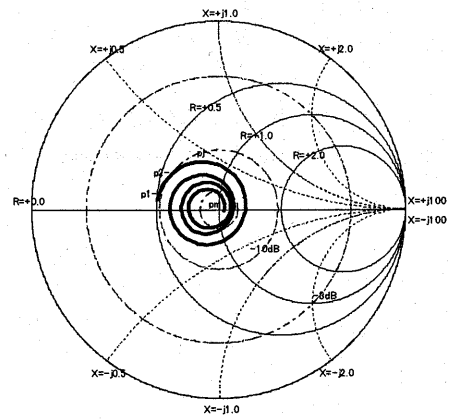


Fig. 9 TM モードのインピーダンス軌跡
(Impedance Tracks in TM Mode)

ているが、これは計測時には壁のコンクリートがまだ完全に乾燥していない、誘電率が計算で使用するものよりも大きかったためであると考えられる。

Fig.12 の計算値での最大反射損失周波数 621MHz でのインピーダンス軌跡を Fig.13 に示す。インピーダンス軌跡 $p_1, p_2, \dots, p_g, p_k, \dots, p_m$ は PC 板かぶりのコンクリート部分はゆっくりと右回りし、薄い抵抗膜でいっきに半径を小さくし、仕上げ材部分でさらにインピーダンス $R=1+j0$ に近づいていることが分かる。このように Fig.12, 13 には計算値は実測値をよく実証している。

IV. おわりに

電波吸収舗装道路、電波吸収壁は、理論的に最適設計が可能である。そして、実際のこれら構造物ではアスファルト・コンクリートに混入する微小な導電性材料の量と分散状態のコントロールが難しく、また供用時に水分の量が変化することなどで最適の誘電率からずれることも考えられるが、これらの種々の要因でどれくらい特性が変化を受けるのかもこの最適設計理論で示すことができ、品質保証範囲を明確にできる。

参考文献

- 1) 笠嶋, 山木; 電波シールド壁の透過・反射損失量の計算方法, 鹿島技術研究所年報, Vol.48, (2000), pp.189-19.

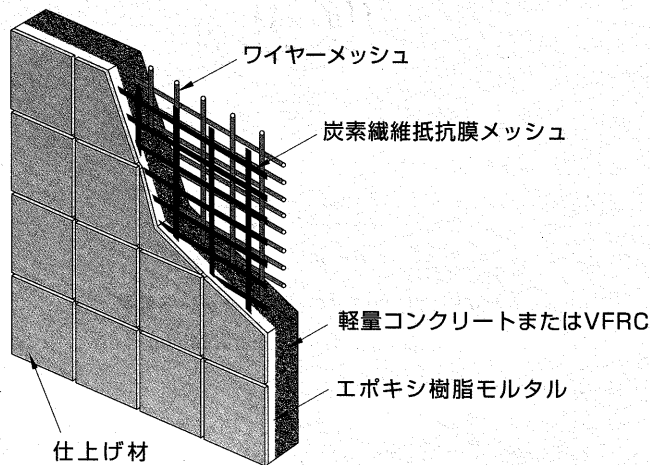


Fig.10 抵抗膜型電波吸収壁の概要
(Outline of Resistance Sheet Type Absorption Wall)

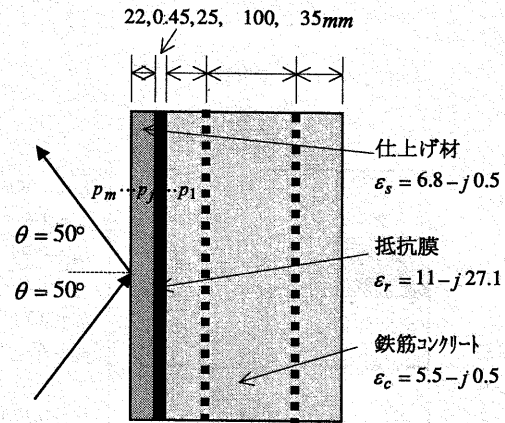


Fig.11 電波吸収壁の断面寸法
(Section Size of Electric Wave Absorption Wall)

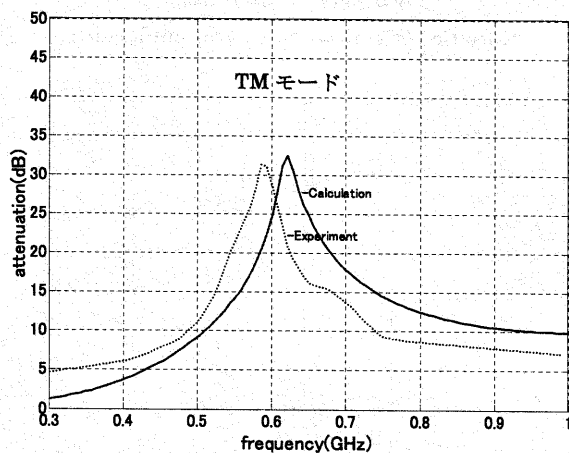


Fig.12 計算と実測結果 (周波数特性)
(Measurement and Calculation Result)

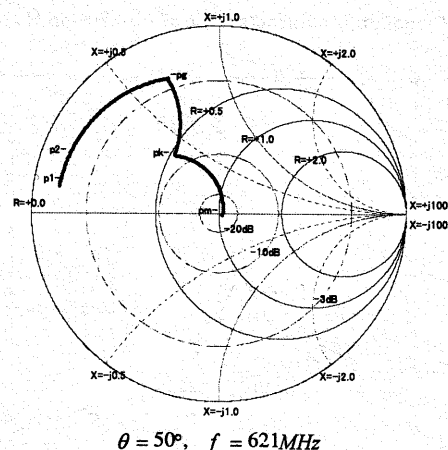


Fig.13 インピーダンス軌跡
(Impedance Tracks of Absorption Wall)