

メッキした金属板のシールド特性解析法

笠嶋 善 憲*

Method for Calculationg the Shielding Effectiveness of a Gilding Metallic Plate

Yoshinori Kasashima

There have been increasing demand for a radio-wave-shielding system for office rooms. This is required for wireless security of equipment, such as wireless LAN, wireless mikes, etc., and to prevent interference between them. In radio wave shielding methods, rooms are covered inside or outside with metallic foil.

I analyzed the shielding effectiveness of a gilding metallic foil having an arbitrary number of metallic layers to radio frequency wave based on equivalent distributed constant circuits converted to equivalent two-port networks of ABCD-parameters and S-parameters.

1. まえがき

近年、携帯電話、無線 LAN など電波利用が急増し、それに伴う電波障害、情報漏洩などが多く、対策としてオフィスに簡易的な電波シールドが求められている。このようなシールド工法は従来の実験室用のものとは異なり、居住性・施工性・コストなどに重点をおいたもので性能が 30dB 程度と低いものである。そのため壁紙などに金属を蒸着したシートを室内壁・天井にそれらの端を重ね合わせて貼るものが多い。この新しいシールド工法においては材料単体、施工方法の両面で、そのシールド特性に多くの不明な点がある。本稿では材料単体、すなわち壁紙などに金属を蒸着した薄い板（膜）が Schelkunoff の式では 100dB 以上の特性性能があるにもかかわらず、実際には 40~50dB しか得られない点を検討するため多層金属板でのシールド性能の新しい解析法を提案して検討してみた。この解析法は、Schelkunoff の式を発展させたもので、金属 1 層 1 層を等価な 2 端子対回路に置き換え、それを縦続接続、最後に S パラメータ回路として多層金属板のシールド特性を求めるものである。この解析法は便利でかつ役立つものなので紹介する。

2. Schelkunoff のシールド理論式

Fig.1 に示すような厚さ l 導電率 σ 透磁率 μ の無限平面金属板に平面電磁波（角周波数 ω ）が垂直に入射した場合の入射波（ E_i ）、透過波（ E_t ）、反射波（ E_r ）の比、すなわち透過率、反射率は、前面、裏面での境界条件を満足するようにして Maxwell の方程式を解くことにより式 (1)、(2) となる⁽¹⁾。

$$\frac{E_t}{E_i} = \frac{4\beta e^{-\lambda} e^{-jk l}}{(1+\beta)^2 - (1-\beta)^2 e^{-2\lambda}} \quad (1)$$

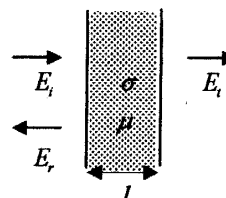


Fig.1 金属板

* 電気電子工学科

$$\frac{E_r}{E_i} = \frac{(\beta^2 - 1)(1 - e^{-2\lambda})}{(1 + \beta)^2 - (1 - \beta)^2 e^{-2\lambda}} \quad (2)$$

ただし、 $\beta = \sqrt{\mu \epsilon_0 \omega / 2 \mu_0 \sigma} (1 - j)$

$\lambda = (1 - j)l / \delta$, $\delta = \sqrt{2 / \mu \sigma \omega}$, $k = \omega / c$

Schelkunoff は式 (1) における透過率、すなわちシールド損失は機能的に 3 種類の損失の合成であり、一般の金属板に電波が入射したときのシールド効果 $S[\text{dB}]$ は式 (3) になるとしている⁽²⁾。

$$S = A + R + M [\text{dB}] \quad (3)$$

このうちの A は、吸収損失で、Fig.2 に示すような漏洩磁界で表され、表皮効果により生じ式 (4) となる。

$$A = -20 \log \frac{H_l}{H_i}$$

$$= -20 \left(-\frac{l}{\delta} \right) \log e = 8.686 \frac{l}{\delta} [\text{dB}] \quad (4)$$

ただし、 $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} [\text{m}]$

ω : 角周波数 $[\text{rad/s}]$

$\mu = \mu_r \mu_0$: 透磁率 $[\text{H/m}]$

σ : 導電率 $[\text{S/m}]$

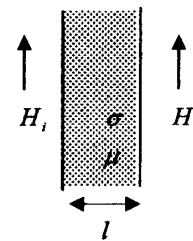


Fig.2 金属板

R は反射損失で、電磁波がそれぞれ特性インピーダンスの異なる空間から金属に入射した場合の境界面の反射により生じ式 (5) なる。

$$R = 20 \log \frac{(Z_0 + Z_s)^2}{4Z_0 Z_s} \quad (5)$$

ただし、 Z_0 : 空間インピーダンス、

Z_s : 金属体固有インピーダンス

電磁波が金属板前面に入射すると、そこで表面反射し、透過波は内部で減衰した後、裏面で反射、一部後方に透過する。裏面で反射した電磁波は前面で反射、一部前方に透過する。これが無限回繰り返され、反射ごとに生じる損失の総和が多重反射損失 M であり、式 (6) となる。

$$M = 20 \log \left\{ 1 - \left(\frac{Z_0 - Z_s}{Z_0 + Z_s} \right)^2 \times 10^{\frac{A}{10}} \right\} \quad (6)$$

ただし、A: 式(4)で示す吸収損失

3. 多層金属板のシールド特性解析法

Fig.3 に導電率の異なる金属の n 層板を示す。特性インピーダンス Z_0 の空間から角周波数 ω の平面波がこの板に垂直に入射した場合のシールド特性を等価な S

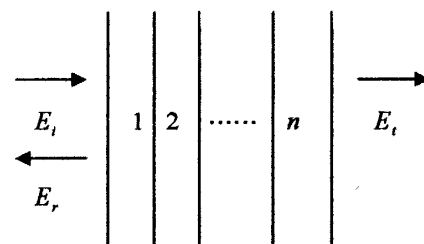


Fig.3 多層金属板

パラメータ回路を用いて求める方法を示す。

各金属層を比誘電率 1 (=誘電率 ϵ_0)、導電率 σ 、比透磁率 1 (=透磁率 μ_0)、長さ l の媒体とし、その分布定数回路を考える。次に分布定数回路と等価な F マトリックス回路を求め、これを n 個縦続接続して 1 つの F マトリックス回路とする。最後にこの F マトリックスを S マトリックスに変換し、そのパラメータの一つである s_{21} から n 層金属板のシールド損失を得る。

3. 1 分布定数回路の定数

導電率 σ の金属板中の伝搬定数 $\dot{\gamma}$ 、特性インピーダンス \dot{Z}_s は式 (7)、(8) となる⁽⁴⁾。

$$\dot{\gamma} = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma + j\omega\epsilon_0)} = j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{1 - j\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)} \quad (7)$$

$$\dot{Z}_s = \frac{j\omega\mu_0}{\dot{\gamma}} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \frac{1}{\sqrt{1 - j\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)}} \quad (8)$$

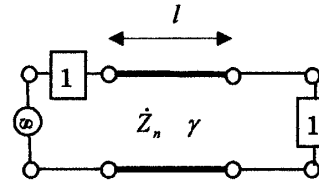


Fig.4 分布定数回路

空間のインピーダンス Z_0 で正規化した場合の金属板中の特性インピーダンス \dot{Z}_n は式 (9) となる。その長さ l の分布定数回路を Fig.4 に示す。

$$\dot{Z}_n = \frac{1}{\sqrt{1 - j\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}\right)}} \quad (9)$$

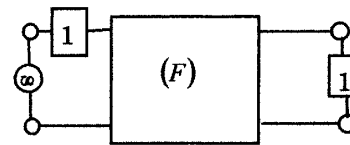


Fig.5 F マトリックス

3. 2 等価な F マトリックス

Fig.4 と等価な F マトリックスは式 (10)、(11) となり、その回路を Fig.5 に示す。

$$[F] = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A &= \cosh(\dot{\theta}) \\ B &= \dot{Z}_n \sinh(\dot{\theta}) \\ C &= \sinh(\dot{\theta}) / \dot{Z}_n \\ D &= \cosh(\dot{\theta}) \end{aligned} \quad (11)$$

ただし、 $\dot{\theta} = \dot{\gamma}l$

3. 3 n 層板の F マトリックス

このように求めた各金属板層の F マトリックスを $(F_1), (F_2), \dots, (F_n)$ とすると n 層板全体では、Fig.6 のように縦続した回路となり、その F マトリックス (F_z) は $(F_1), (F_2), \dots, (F_n)$ の積で式 (12) となり、その回路を Fig.7 に示す。

$$[F_z] = [F_1][F_2] \cdots [F_n] \quad (12)$$

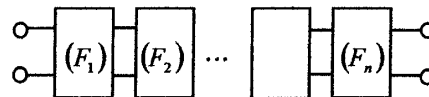


Fig.6 縦続接続

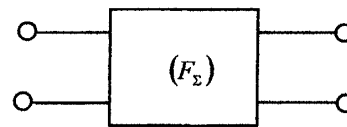


Fig.7 F マトリックス

3. 4 Sマトリックスとシールド損失

Fig.7のFマトリックス回路を等価なSマトリックスに変換したものをFig.8に示す。なお、1次、2次側の a_1, a_2 は入射波電圧、 b_1, b_2 は反射波電圧を示す。そのSマトリックスは式(13)、(14)、(15)となる。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} s_{11} &= (A+B-C-D)/\Delta \\ s_{12} &= 2(AD-BC)/\Delta \\ s_{21} &= 2/\Delta \\ s_{22} &= (-A+B-C+D)/\Delta \\ \Delta &= A+B+C+D \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 s_{21} は透過係数、 s_{11} は反射係数を示すので、n層金属板のシールド損失、反射損失は式(16)、(17)となる。

$$\Gamma_t = 20 \cdot \log_{10}(|s_{21}|) \quad (16)$$

$$\Gamma_r = 20 \cdot \log_{10}(|s_{11}|) \quad (17)$$

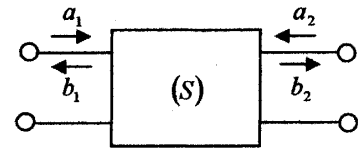


Fig.8 Sマトリックス

Table 1 金属の導電率

金属	導電率 (σ)
銅 (Cu)	$5.92 \times 10^7 (1/\Omega m)$
銀 (Ag)	6.17
アルミニウム (Al)	3.82
黄銅 (Br)	1.54

4. シールド特性の計算例

式(16)を用いた各種シールド特性の計算例を示す。計算に用いる各種金属の導電率をTable 1に示す。

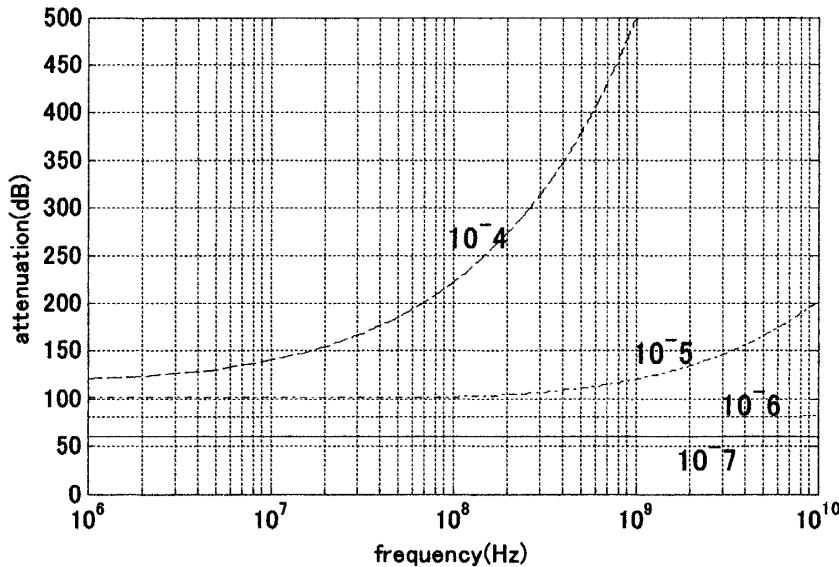


Fig.10 Shielding Characteristics as Changing Frequency in 4 Thicknesses

4. 1 銅板の厚さによるシールド特性

銅板の厚さ $l=0.1, 1, 10, 100\mu m$ をパラメータとした周波数 $f=1M \rightarrow 10GHz$ に対するシールド特性の計算結果を Fig.10 に示す。

4. 2 各種金属板のシールド特性

これは1層、すなわち1枚の金属板の特性で、材料は銅 (Cu)、銀 (Ag)、アルミニウム (Al)、黄銅 (BI) の4種類とする。計算モデルを Fig.11(a),(b)に示す。これら4種類の金属板を厚さ $l=50\mu m$ に固定した場合の周波数 $f=1M \rightarrow 10GHz$ でのシールド特性を Fig.12 (Fig.11(a)に対応) に示す。また、同じ4種類の材料で、周波数 $f=2GHz$ に固定した場合の厚さ $l=0.1\mu \rightarrow 100\mu m$ でのシールド特性を Fig.13 (Fig.11(b)に対応) に示す。

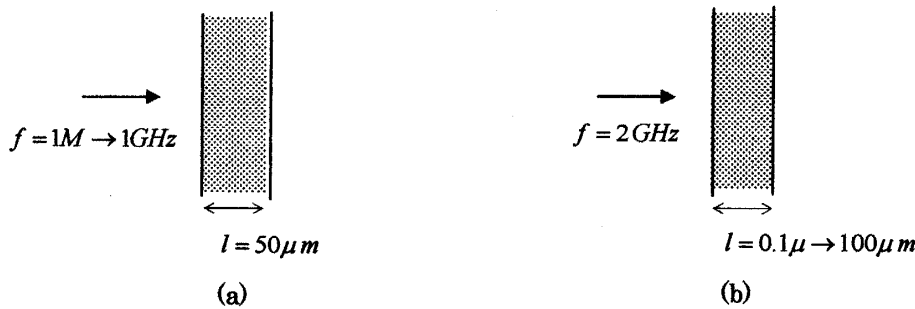


Fig.11 計算モデル

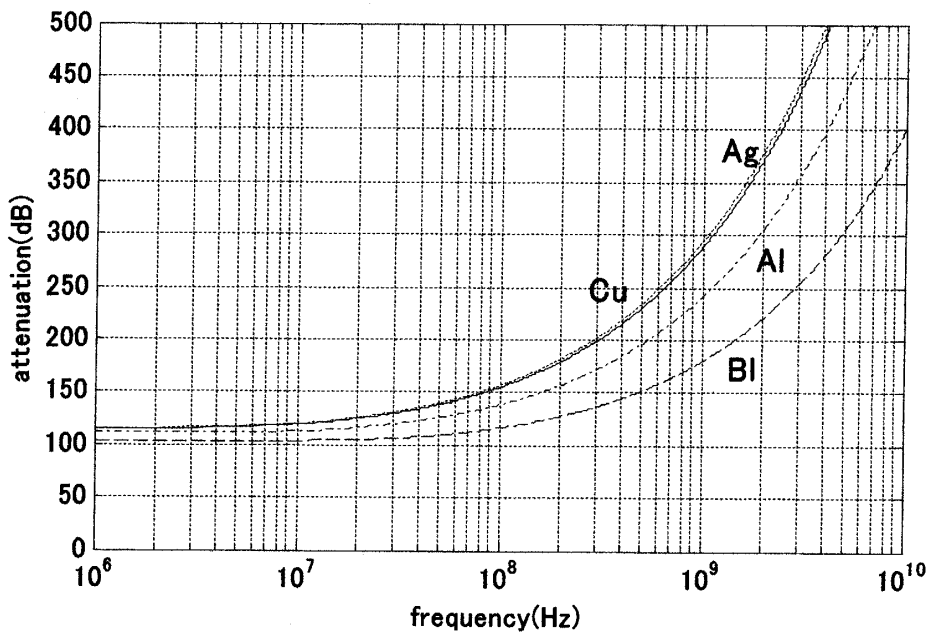


Fig.12 Sheilding Characteristics as Changing Frequency in Thickness of 0.05mm

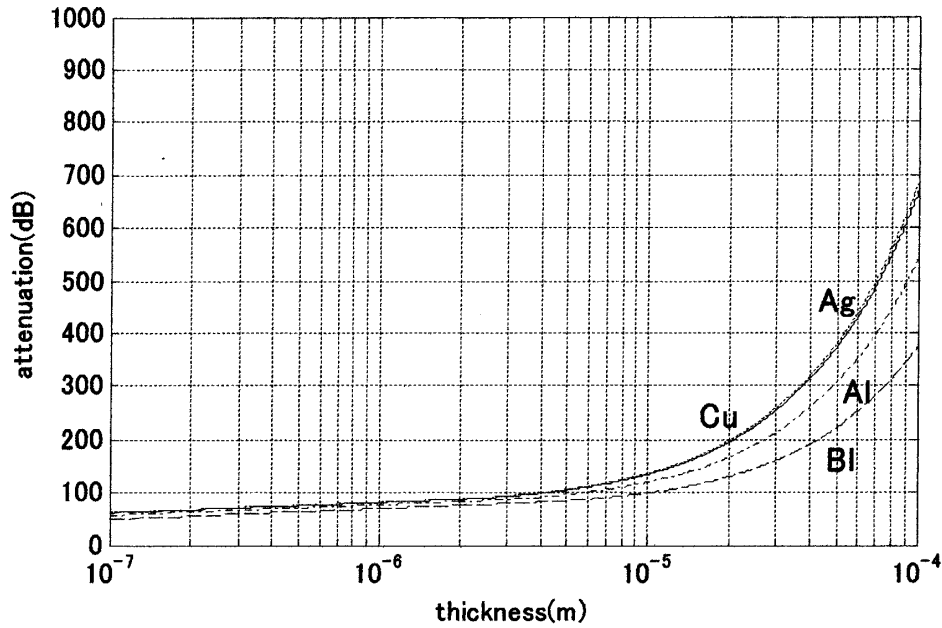


Fig.13 Sheilding Characteristics as Changing Thickness at Frequency of 2GHz

4. 3 メッキした金属板のシールド特性

ここではメッキした金属板を2層の金属板として計算した結果を示す。この場合の母材（2層目）を黄銅としその表面（1層目）に銅、銀、アルミニウム、黄銅の4種類をメッキしたものとする。この計算モデルを Fig.14(a),(b)に示す。

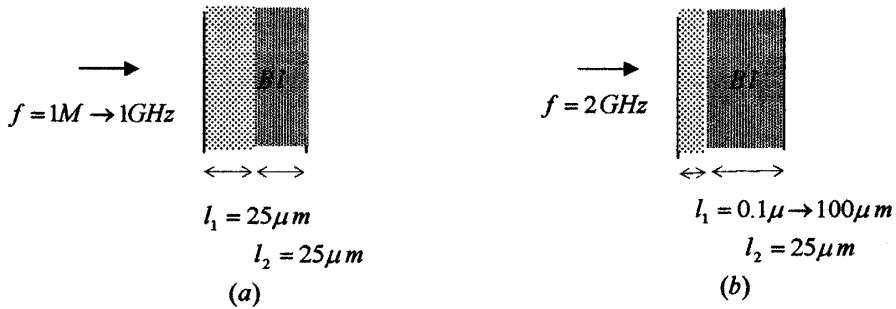


Fig.14 計算モデル

母材の厚さ $l_2 = 25\mu m$ 、メッキ厚さ $l_1 = 25\mu m$ に固定した場合の周波数 $f = 1M \rightarrow 10GHz$ でのシールド特性を Fig.15 (Fig.14(a)に対応) に示す。また、同じ4種類の材料で、周波数 $f = 2GHz$ を固定し、かつ母材の厚さ $l_2 = 25\mu m$ を固定した場合のメッキ厚さ $l_1 = 0.1\mu \rightarrow 100\mu m$ でのシールド特性を Fig.16 (Fig.14(b)に対応) に示す。

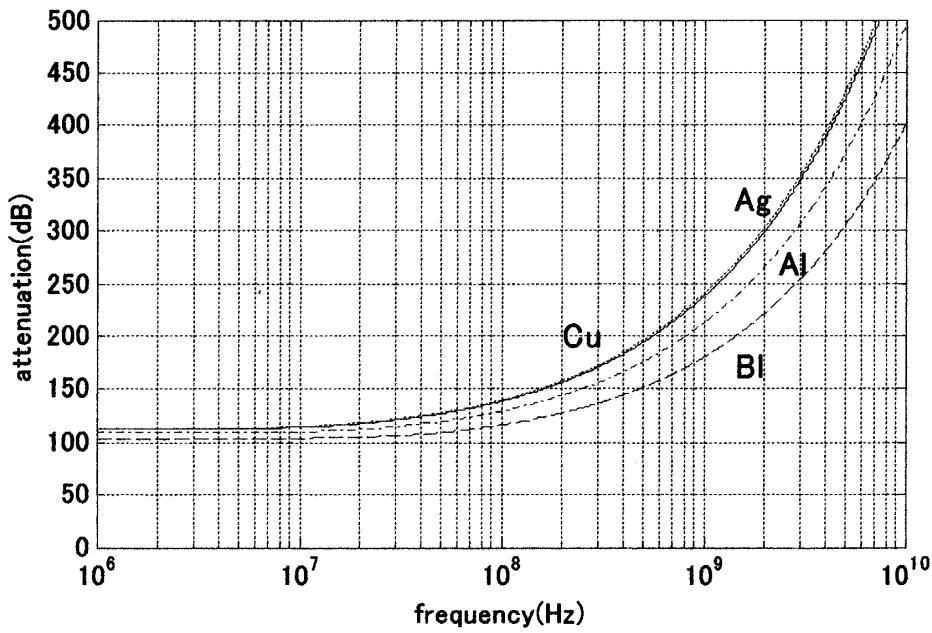


Fig.15 Shielding Characteristics as Changing Frequency in Thickness of 0.05mm

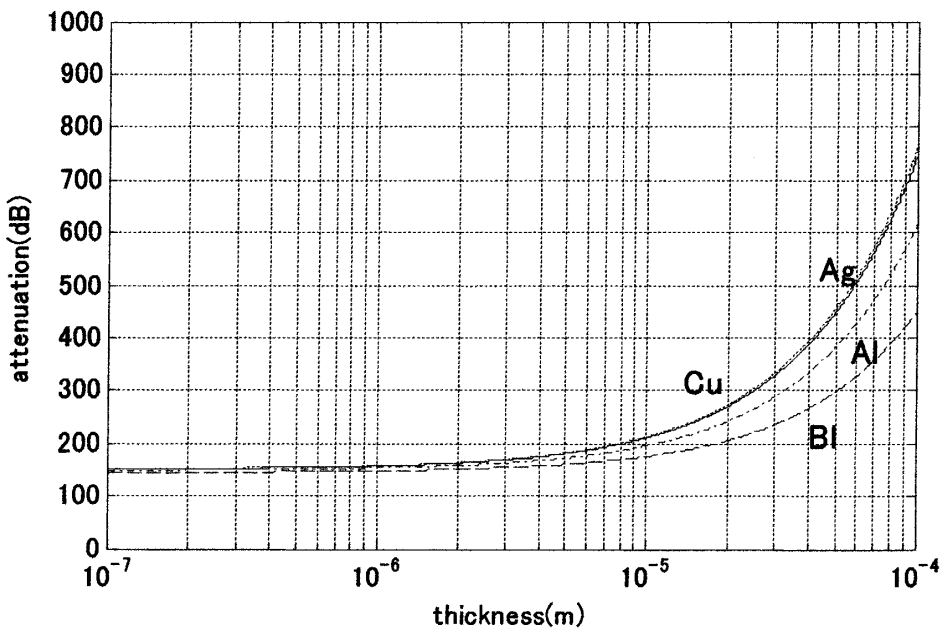


Fig.16 Shielding Characteristics as Changing Thickness at Frequency of 2GHz

この2層金属板の計算結果 (Fig.15) を1層金属板のもの (Fig.12) と比較すると、母材に異種の金属をメッキしたものは、その導電率の違いによる若干の特性の変化は見られるが、同じ厚さの母材単体のもとの差は少ない。これは当然のことであり、このことは解析法とプログラムの正しさを示すものである。先の

Schelkunoff の式の解析では A (吸収損失)、B (反射損失)、M (多重反射損失) を別々に求め合計する必要があり、また多層にする場合は単純には計算できない。しかし、この新しい解析法では一度にシールド損失の合計値が得られ、また多層金属板でも簡単に計算できる。さらに、本稿では行わなかったが、この解析法においては電波の斜入射特性の計算も可能である。

以上のように金属板による電磁波シールド特性は、1層であれ多層であれ極めて薄い $0.1\mu\text{m}$ でも約60dB程度の計算結果 (Fig.13) が得られる。しかし、実際に施工されている薄い金属板を用いるシールド材では、多くはその厚さが今回の計算の場合の100倍近い数十 μm であるが十分なシールド特性が得られていない。その原因は、実際の場合には金属板が完全な平面でない、電磁波が完全に平面波でない、電磁波源がシールド材に近くて入射時の空間特性インピーダンスが $z_0 = 377\Omega$ でないなどがあり、そして最大のものはこのようなシールド材の施工方法 (重ね合わせ接続法方法) にあると考えられている。

5. 結言

本稿では、Schelkunoff のシールド計算式を発展させた多層金属板のシールドの S パラメータを用いた特性解析法を示した。最近の研究で Schelkunoff の計算式では、厚さ1mm前後の銅板のシールド特性が実験値と合わないことが分かってきた。また、その原因も徐々に分かってきている⁽³⁾。 今後は本計算方法もそれらの研究成果を取り入れ、改良していく必要があると考えている。

参考文献

- (1) 後藤憲一、山崎修一郎：詳解電磁気学演習、共立出版、p334、昭和57年3月
- (2) 荒木庸夫：電磁妨害と防止対策、東京電機大学出版局、pp129-138、1991.1
- (3) ノイズ対策最新技術編集委員会：ノイズ対策最新技術、総合技術出版、pp26-27、1986.10
- (4) 山田昌一郎：基礎電磁気学 (改訂版)、電気学会、p329、2002.12

(平成17年12月12日受理)