

# 大型試料に対応した GHz 帯の電磁シールド材評価環境の構築

林 達郎<sup>\*1)</sup>, 高井伸一郎<sup>\*2)</sup>

## Test Environment for the Measurement of Electromagnetic Shielding Effectiveness of Large Size Material at GHz Wave Band.

HAYASHI Tatsuro<sup>\*1)</sup>, TAKAI Shin-ichiro<sup>\*2)</sup>

デジタル無線通信システムの普及とともに、電波の相互干渉に起因する通信不良などの問題が生じている。電磁シールド材はその対策材として広く利用されているが、材料の諸特性を適切に評価するためには対象とする周波数や材料寸法、形状をはじめとする各種条件に適した評価環境を適宜構築する必要がある。

本研究では土木建築材料などとして利用できる大型で厚みや重量のある電磁シールド材の評価を目的に GHz 帯の透過減衰量を測定する環境を構築し、精度の検証と考察を行った。

結果として、構築した評価環境において 2-6GHz における透過減衰量の測定が可能となり、測定ダイナミックレンジは 50dB 以上であることがわかった。また、測定で得られた値から伝送線理論に基づき比誘電率の推定を行ったところ、概ね良好な結果が得られることが確認できた。

### 1. 緒言

各種のデジタル無線通信システムの普及が進むにつれて、電波の相互干渉に起因する通信不良の問題や、電波の不要拡散による情報漏えいの問題が生じている。

電磁シールド材は電波の透過を抑制する材料として、これらの問題の対策に広く利用されており、今後普及が進むスマートハウスやインテリジェントビル、さらには高度道路交通システムなど次世代無線通信システムが活躍する社会を側面から支える機能性材料として不可欠な存在となっている。

一方、電磁シールド材の用途が広がるにつれて、対象とする周波数の帯域は拡大し、また用途ごとに異なる寸法、形状や柔軟性をもつ材料が開発されて、材料特性を適切に評価するためには個々の条件に適した評価環境を適宜構築する必要性が生じている。また、近年の傾向として無線通信で盛んに利用されている GHz 帯を対象とした特性評価の需要が高まっていることが挙げられる。

そこで、本研究では土木建築材料などとして利用できる大型で厚みや重量のある電磁シールド材の評価を目的に GHz 帯の透過減衰量を測定する環境を構築し、精度の検証ならびに考察を行ったので報告する。

### 2. 評価環境

#### 2.1 評価方法の検討

電磁シールド材の性能を表す電磁シールド効果は、電波が材料を透過する際の減衰量、即ち透過減衰量で表すこと

が一般的である。

これまで透過減衰量の測定法としては遠方界の評価向けに MIL-STD-285 (旧米軍規格：シールド室の性能試験方法として規定) や同軸管法<sup>1)</sup>が、また近傍界の評価向けには KEC 法が利用されているが、それぞれに対象とする周波数や試料寸法、形状、重量に制約があり、本研究の対象である大型試料の評価を行うためには、試料を固定する治具の強度不足や、或いは試料を微小形状に再加工する必要が生じるなど多くの課題が残されていた。

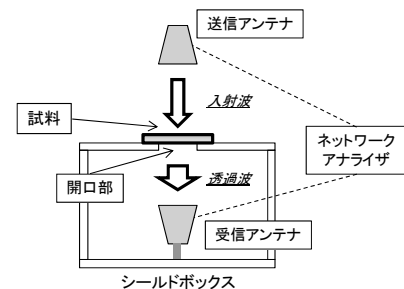


図1 シールドボックスによる評価方法

そこで、本研究では遠方界における GHz 帯の透過減衰量を比較的容易に測定する方法として、図1に示すようなシールドボックスを利用する手法に着目した。この方法は MIL-STD-285 で規定されるシールドルームを小型化してシールドボックスに置き換えたものと考えられ、シールドボックスの内部にあるアンテナと外部のアンテナ間の送受信は上面の開口部を介してのみ行うものである。

なお透過減衰量  $T$  はネットワークアナライザを用いて、開口部に試料を設置しないときの透過波  $T_0$  と開口部に試

\*1) 基盤技術・ソリューショングループ (旧機械・電子・情報技術チーム) \*2) 村本建設株式会社

料を設置したときの透過波  $T_s$  を測定し、次式から求めた。

$$T = T_0 - T_s \text{ (dB)}$$

また、本研究ではさらに材料の比誘電率  $\epsilon_y$  の推定を試みた。比誘電率  $\epsilon_y$  は電磁シールド材や電波吸収体などの電磁環境材料を評価するための主要なパラメータであるが、ネットワークアナライザなどを用いても直接的な測定はできない。そこで、測定時に得られる透過係数  $S_{21}$  (透過減衰量と位相差) を用いて計算により求めた。

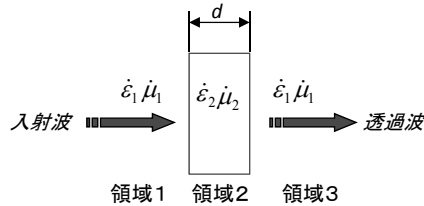


図2 試料周辺における電波条件

本研究では、図2に示す条件下において領域1から領域2を透過して領域3に至るTEMモードの電波の透過係数  $S_{21}$  が次式で表されることを利用し、任意の初期値  $\epsilon_y$  を仮定して得られる計算上の透過係数  $S_{21}$  と実測値の残差の2乗が最小となるようニュートン法による近似計算を繰り返して  $\epsilon_y$  の近似値を推定した<sup>2)</sup>。

$$\dot{S}_{21} = \frac{\text{透過波}}{\text{入射波}} = \frac{\dot{T}_{12} \dot{T}_{23} e^{-j\gamma_2 d}}{1 - \dot{R}_{21} \dot{R}_{23} e^{-2j\gamma_2 d}}$$

$$\text{伝搬定数: } \gamma_2 = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2 \mu_2}$$

$\mu_1 = \mu_2 = 1$  の場合、

$$\dot{R}_{12} = \frac{\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad \dot{R}_{23} = \dot{R}_{21} = \frac{\sqrt{\epsilon_1} - \sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_1} + \sqrt{\epsilon_2}}$$

$$\dot{T}_{12} = \frac{2\sqrt{\epsilon_2}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}} \quad \dot{T}_{23} = \frac{2\sqrt{\epsilon_1}}{\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1}}$$

## 2.2 評価環境の構築

### 2.2.1 シールドボックスの作製

評価環境の構築に際し、対象とする試料の条件として一辺が300mmの正方形で厚みは最大100mm、重量は最大10kgまでを想定して検討を行った。試料を安定して支えられるよう試料設置用の開口部はシールドボックスの上面に配置し、落下等の問題を回避している。

これにより送受信アンテナは図1に示したように垂直方向に対向する配置となるため、上部アンテナはアーチ式支持台の天頂部に下向きに設置し、もうひとつのアンテナはシールドボックスの内部に上向きに設置した。

シールドボックスの外寸は図3に示すように縦×横×

高さが700×600×600mmで、耐荷重性を保つため部分的にフレーム補強を施しながら厚み1mmの鋼板を溶接して作製した。また、試料設置用の上面開口部は一辺が250mmの正方形で、これに加えて内部保守用の開口部を側面に設けている。

なお、上部アンテナから試料面までの距離は1040mmで、下部アンテナから試料面までの距離は180mmである。

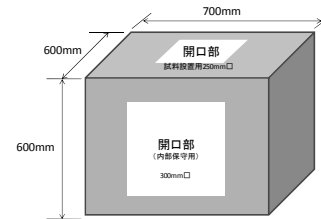


図3 シールドボックスの仕様

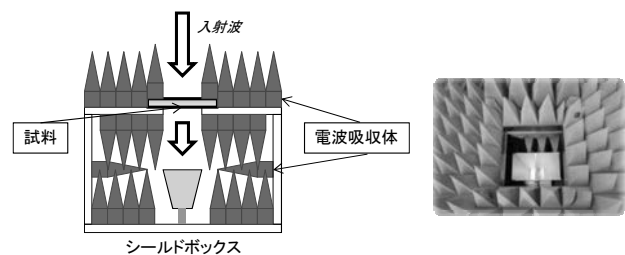
### 2.2.2 測定用の補助部材

シールドボックス内にアンテナを設置して送受信を行う場合、内部で電波の共振が発生して測定精度が低下する恐れがある。そこで、本研究では図4(a)に示すようにシールドボックス内部の底面、壁面、天井面のすべてにピラミッド型電波吸収体を貼付し、共振の発生を抑制した。

また、測定の誤差要因となりやすいシールドボックス上面に発生する不要反射波や、試料の面精度が十分でない場合に試料面とシールドボックス上面との間に生じる隙間からの電波漏れを抑制するため、試料の周囲には密着して電波吸収体を配置した。

加えて、設置した試料の上に図4(b)に示すように電波吸収体の枠を搭載することで、隙間から漏れる電波をさらに抑制して誤差要因の低減を行った。

構築した評価環境の外観を図5に示す。



(a) 水平方向の断面図

(b) 上面の補助部材

図4 測定用の補助部材の構成

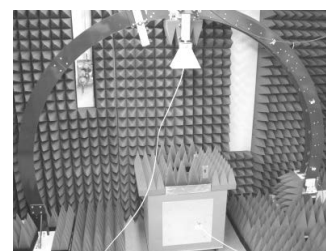


図5 構築した評価環境

### 3. 測定精度の検証と考察

#### 3.1 ダイナミックレンジ

透過減衰量の測定限界を示すダイナミックレンジは, その評価環境においてこの値を超える試料の測定はできないことを示すパラメータとして用いられる。

本研究においてはシールドボックスの構造上の隙間や試料の設置不良から発生する電波の漏れがダイナミックレンジに影響を与えると考えられるため, 2.2.2 で述べたシールドボックスの補助部材をすべて設置した状態と, 上面の補助部材を設置しない状態のそれぞれの場合において, 厚み 2mm の金属板を試料とした透過減衰量  $T$  の測定を行った。

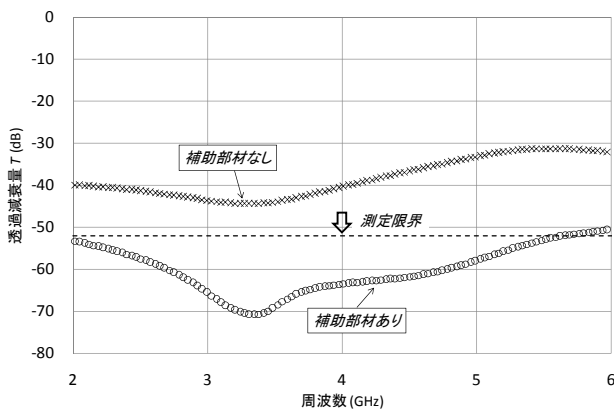


図6 ダイナミックレンジ

結果を図6に示す。これより, 補助部材の設置によりダイナミックレンジが 10-15dB 程度改善していることがわかり, 最終的に評価環境全体のダイナミックレンジは概ね 50dB 以上得られていることが確認できる。

また, 使用した金属板と設置面との隙間をさらに減少させるため導電性テープなどで遮蔽を行えばさらにダイナミックレンジを向上することが可能と考えられる。

#### 3.2 同軸管法で測定した透過減衰量との比較

構築した評価環境の測定精度を検証するため, 同一材料から加工した試料を用いて等価的に遠方界の透過減衰量  $T$  が測定できる同軸管法<sup>2)</sup>による測定結果との比較を行った。

比較に用いた材料は表1に示す導電性のゴムシートで, 測定対象周波数は 2-6GHz である。

表1 比較に用いた試料

表面抵抗率( $\Omega \square$ ) ※JISK7194による測定	厚み(mm)
$8.69 \times 10^3$	1

なお, 同軸管法による測定には 7mm と 20mm の 2 種類

の同軸管を用いた。7mm の同軸管では中心導体と外部導体の間にドーナツ状に微細加工した試料を挿入して透過減衰量  $T$  を測定し, 20mm の同軸管では図7に示すような導波管を変形した専用治具にシート状の試料を挿入して透過減衰量  $T$  の測定を行った。

また, 測定に際しては試料1枚のみの状態と, 2枚を重ね合わせた状態の2つの条件において比較を行った。

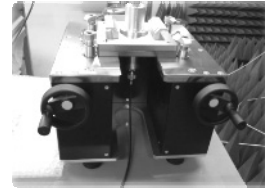
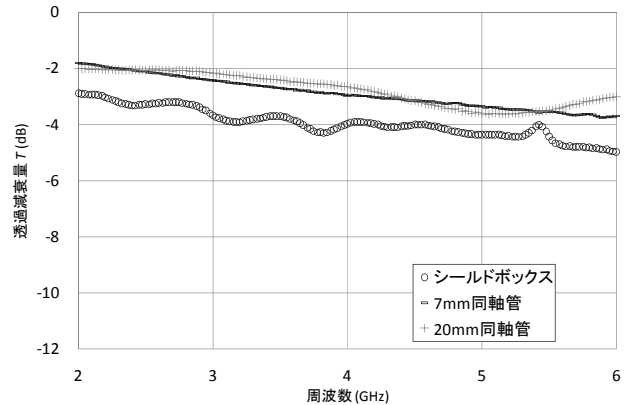
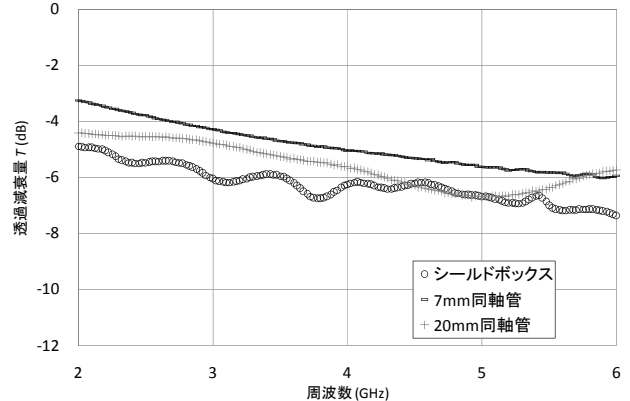


図7 20mm 同軸管の測定治具



(a) 試料 1 枚



(a) 試料 2 枚重ね

図8 導電性ゴムシートの透過減衰量比較

結果を図8に示す。これより, いずれの測定法で得られた結果においても透過減衰量  $T$  の特徴は概ね近似していることがわかる。

細部を観察すれば図8(a)に示す試料1枚の状態では, シールドボックスによる測定結果のほうが同軸管による測定結果より僅かに低い値を示しており, (b)に示す試料2枚重ねの状態でもその差はやや小さくなっているもの

の同様の傾向がみられる。

この原因としては、同軸管の測定では試料の僅かな寸法精度の不足により隙間からの電波もれが生じ易いため、測定値の低下につながったことが一因と考えられる。

また、シールドボックスによる測定結果では数カ所に透過減衰量  $T$  に凹凸がみられるが、これは補助部材を用いても除去できなかった部分的な共振現象によって発生した誤差が含まれたものと考えられる。

### 3.3 比誘電率による比較

構築した評価環境の測定精度を別の視点から検証するため、比誘電率  $\epsilon_v$  が既知の材料を用いて透過係数  $S_{21}$  の測定を行い、ここから 2.1 に示す方法で求めた比誘電率  $\epsilon_v$  の推定値との比較を行った。

比較に用いた試料は表 2 に示す 3 種類の材料を板状に成形したもので、測定対象周波数は 2-5GHz である。

表 2 比較に用いた材料

	名 称	既知の比誘電率	厚み
1	ソーダ石灰ガラス	6-8 (at 1-10MHz) <sup>3)</sup> 6-8(at 10GHz) <sup>4)</sup>	10mm
2	アクリル (ポリアクリレート)	2.58(at 100MHz) <sup>5)</sup> 2.69-j002(at 2GHz) <sup>6)</sup>	2mm
3	発泡スチロール	約 1 (参考値)	24mm

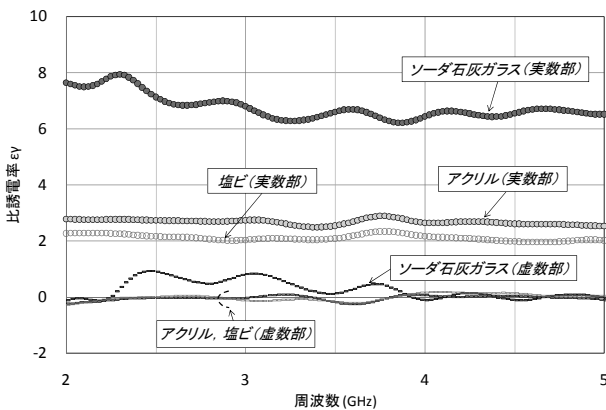


図 9 比誘電率の推定値

測定から得られた比誘電率  $\epsilon_v$  の推定値を図 9 に示す。これより、ソーダ石灰ガラスについては既知の比誘電率(実数)が 6-8 であるのに対して、推定値の実数部の値はいずれの周波数においても 6-8 を示しており、双方の値が良好に近似していることがわかる。

また、アクリルについても既知の比誘電率(実数)が 2.58-2.69 であるのに対して、推定値の実数部の値は平均して約 2.6 を示しており、双方の値が良好に近似している。

参考に測定を行った発泡スチロールについては発泡度

により比誘電率が変化するため一定の比誘電率の報告はみられないが、通常は空気の比誘電率 1 に近い値を示すことが広く知られていることから、ここで得られた推定値の実数部の約 1 が概ね適正であると考えられる。

なお、いずれの材料についても推定値の虚数部の値が 0 付近を示しているが、これは一般に損失成分が少ない材料の比誘電率  $\epsilon_v$  の虚数部が 0 に近いという性質を示している。

さらに細部を観察すれば、2-2.5GHz の範囲においてソーダ石灰ガラスの推定値の実数部が他の周波数帯より高い値を示しているが、この原因としては構築したシールドボックスの上面開口部の寸法が一辺 250mm の正方形であるのに対し 2GHz の電波の波長は約 150mm であることから、開口部寸法によって生じる電波の透過制限が生じて誤差につながった可能性が考えられる。

また、数カ所に比誘電率  $\epsilon_v$  の凹凸がみられるが、これは 3.2 と同様に補助部材を用いても除去できなかった部分的な共振現象によって発生した誤差が含まれたものと考えられる。

### 3.4 土木建築材料の測定

構築した評価環境を用いて、土木建築材料であるモルタルを対象に透過減衰量  $T$  の測定を行った。

測定に用いたモルタルは主として普通ポルトランドセメントと細骨材によるもので、厚みは 10mm と 25mm の 2 種類である。また、測定対象周波数は 2-6GHz で水分含有率は標準的な気乾状態である。結果を図 10 に示す。

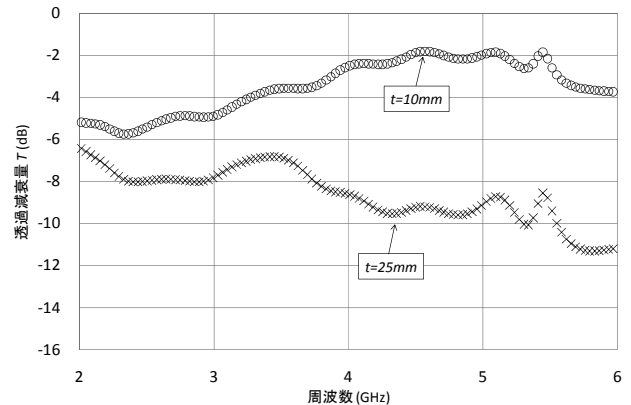


図 10 モルタルの透過減衰量

これより、厚み 10mm の試料においては 2GHz から周波数が高くなるにしたがって効果が減少する傾向が見られる一方、厚み 25mm の試料においては逆に周波数が高くなるにしたがって効果が増す傾向が見られた。

これらの結果は電波の透過減衰が発生する複数の要因、即ち試料の表面における反射や内部に含まれる各種成分による吸収などによってもたらされたものと推察されるが、さらに比誘電率  $\epsilon_v$  の推定を進めることで、電磁シール

ド材として用いるための設計パラメータを得ることができるものと考えられる。

#### 4. 結言

土木建築材料などとして利用できる大型の電磁シールド材の特性評価を目的に GHz 帯の透過減衰量を測定する環境を構築し、精度の検証と考察を行った結果は次のとおりである。

- (1)シールドボックスによる評価手法を採用し、試料設置用の開口部を上面に設けたことで重量のある試料の測定が可能となり、落下などの問題を回避した。
- (2)シールドボックス内部にピラミッド型電波吸収体を貼付したほか、試料設置面にも電波吸収体を配置して誤差要因の低減を図った結果、概ね 50dB 以上のダイナミックレンジが得られた。
- (3)試料と試料設置面の隙間を導電性テープなどで遮蔽することで、さらにダイナミックレンジを向上することが可能と考えられる。
- (4)同一材料を用いて同軸管により測定した透過減衰量  $T$  と、シールドボックスにより測定した透過減衰量  $T$  の比較を行った結果、双方の結果は概ね近似していることがわかった。
- (5)比誘電率が既知の材料を用いて、シールドボックスにより測定した透過係数  $S_{21}$  から比誘電率  $\epsilon_r$  を推定した結果、双方の値は良好に近似していることがわかった。
- (6)土木建築材料であるモルタルを対象に厚みが異なる試料の透過減衰量  $T$  を測定した結果、各々の厚みごとに特徴的な結果が得られた。

以上より、本研究で開発した評価環境は大型試料を対象とした GHz 帯の透過減衰量の測定や比誘電率の推定に利用できることが確認できた。

今後は、さらにダイナミックレンジを向上するための改良やシールドボックス内の共振現象に起因するとみられる誤差の低減について研究を進めたい。

なお、本論文は平成 24 年度に旧奈良県工業技術センターと村本建設株式会社が実施した共同研究の成果から一部を抜粋したものである。

#### 参考文献

- 1)電磁遮蔽&電波吸収実践技術マニュアル, 畠山賢一(監修), pp.24-25, 三松株式会社, 2006
- 2)6)高周波領域における材料定数測定法, 橋本修, 2)pp.139-140, 6)pp.141-142, 森北出版, 2003
- 3)電気材料-新材料利用の方向づけ-, 田中政直, pp.72-73, 東京電機大学出版局, March.2005
- 4)電波吸収体の技術と応用Ⅱ, 橋本修(監修), pp.237-239, シーエムシー出版, 2003
- 5)安田武夫, "プラスチック材料の各動特性の試験法と評価結果", プラスチックス(日本プラスチック工業連盟誌), pp.70-84, 日本工業出版, May.2001