

屋内電波環境推定のための一般建築材料の透過反射特性に関する実験的検討

—電磁波透過減衰性能測定の概要および複合材料の等価的な電気特性の推定—

吉野 涼二*1 ・ 遠藤 哲夫*1

Keywords : building materials, transmission loss, reflection loss, specific complex dielectric constant

建材, 透過減衰, 反射減衰, 複素比誘電率

1. はじめに

EMC/EMI問題対応技術のうち、電波を利用した各種通信の普及に伴う通話や高速情報伝達障害を対象とした電磁シールド、電波吸収性能の付加が建築物や都市空間に求められるようになってきた。これらに対応する技術においては「高品質」はともより、「低コスト」「短工期」「多様化対応」「リニューアル対応」などのキーワードが重要な要素となっている。上記の要求を満足するためには、施設計画段階における「精度の高い予測、計画技術」や「既存材料や構工法の積極的利用、転用」などがより必要となってくるものと考えている。そこでこの度、一般的建築材料や構造の電波透過特性データの取得を試み、当該結果を、空間性能予測手法として発展しつつあるコンピュータシミュレーションに提供する材料、構造データとしての展開の可能性について検討した。

本報告では、まず複数の材料と複雑な構造により成り立つ一般的建築材料や構造の電波透過特性データの取得方法に関する検討事例とその結果について示した。次に、透過減衰性能測定結果をもとに、等価的な複合材料の複素比誘電率を推定し、そして、推定値の妥当性を検討するために、反射減衰性能を算出した。さらに、反射減衰性能の測定結果と推定した複素比誘電率より求めた計算値とを比較検討し、ほぼ一致する特性が得られた。その結果、壁面、床面等の複合材料に対して透過減衰性能を測定し、ばらつきを考慮することで複合材料の電気的特性が精度良く得られることを明らかにした。

2. 測定の概要

2.1 対象とした建築構造

図-1に示す「軽量間仕切り壁試験体 (PB壁と略記)」

と、図-2に示す「コンクリート壁試験体 (RC壁と略記)」を作製した。

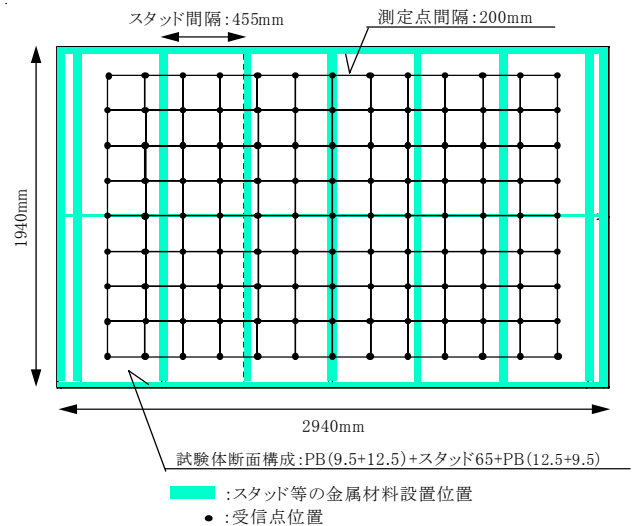


図-1 PB壁試験体概要

Schematic model of plaster board partition

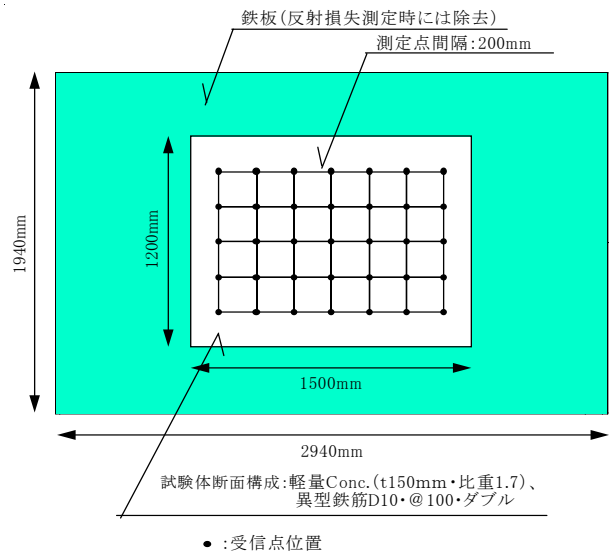


図-2 RC壁試験体概要

Schematic model of reinforced concrete wall

*1 技術センター建築技術開発部ニューフロンティア技術開発室

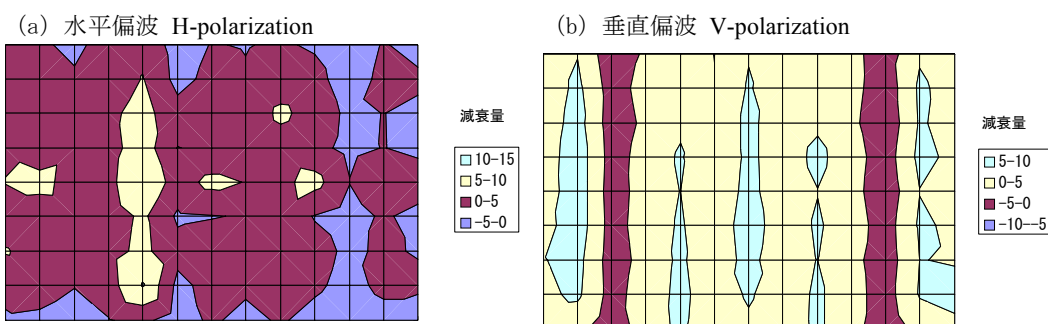


図-3-1 PB壁透過減衰性能分布 (2.5GHz)

Transmission loss distribution of PB pertion(2.5GHz)

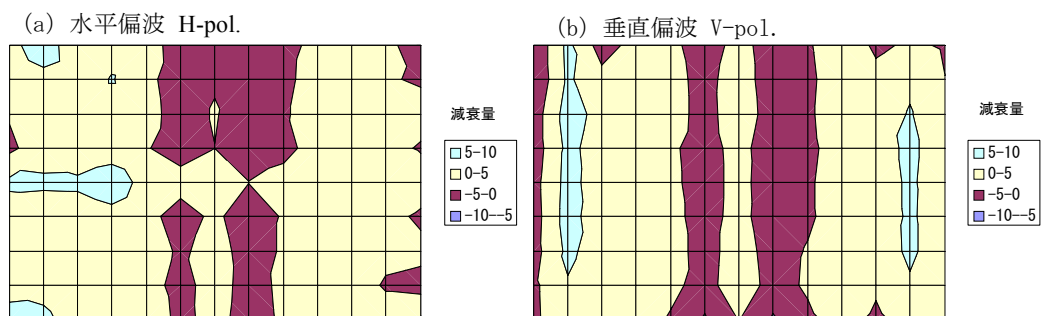


図-3-2 PB壁透過減衰性能分布 (5GHz)

Transmission loss distribution of PB pertion (5GHz)

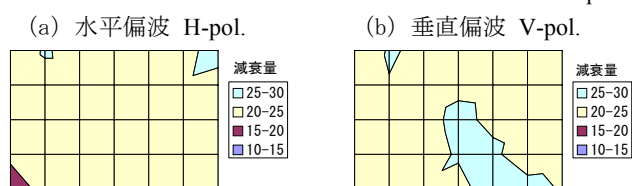


図-4-1 RC壁透過減衰性能分布 (2.5GHz)

Transmission loss distribution of RC wall (2.5GHz)

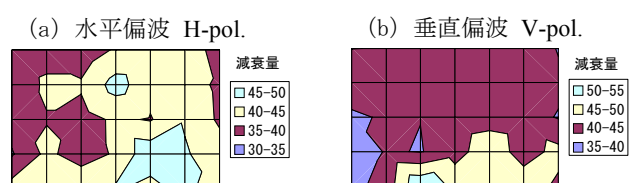


図-4-2 RC壁透過減衰性能分布 (2.5GHz)

Transmission loss distribution of RC wall (5GHz)

「PB壁」は、軽量鉄骨下地材（スタッドおよびランナー）の両面に9.5mmと12mm厚の石膏ボードを2層づつ貼り付けた構造である。

「RC壁」は、150mm厚の軽量コンクリート（比重1.7）内にD10の異型鉄筋を100mm間隔でダブル配筋した構造である。なお、重量の制約から、縦1200mm×横1500mmの寸法とし、その外周を鉄板で覆い試験体とした。

2.2 電波透過減衰性能測定概要

電波透過減衰性能測定は、当社電磁環境実験室¹⁾において、日本建築学会「材料の電磁シールド性能試験方法(案)」²⁾に準拠して、遠方界を対象として実施した。送信位置は試験体中央正面

の表面から3mの位置（送信点固定）とし、受信位置は同一試験体の裏面から0.3m点とした。なお、具体的な受信位置は図-1、図-2に示すように0.2m間隔のメッシュ状（受信点移動）とした。これは、試験体からの透過信号の強さが受信場所毎に異なるものと予測したためである。対象周波数は無線LANや携帯電話に利用される周波数帯を含む800MHz～5GHzとした。

3. 測定結果

受信位置毎の電波透過

減衰量を用いて、等高線表示したものを図-3-1～図-4-2に示す。紙面の都合により、無線LAN周波数帯である2.5GHzおよび5GHzの結果のみ例示した。これらから下記の結果が示された。

○「PB壁」では軽鉄下地付近の受信点で透過減衰量が増加する傾向が認められた。

○「RC壁」では各点の減衰量は比較的均一となり、鉄筋の影響と思われるような傾向は把握できなかった。

さらに、受信点位置の違いによる減衰量のばらつきを図-5、図-6に示した。ここで、減衰量のばらつきの程度を示す指標として全受信点データのうちの90%の値がその範囲内となる「95%値（＝上限値）」「5%値（＝下限値）」と、同80%とした場合の「90%値（＝上限値）」「10%値（＝下限値）」、さらに50%値となる「中央値」、全データの算術平均を求めた「平均値」を求めた。これらから以下の結果が示された。

○中央値、平均値において「PB壁」では概ね1～3dBの範囲に収まり、「RC壁」では周波数が高くなるのに比例して減衰量が13dBから43dBへと増大した。これは含有水分の影響（測定時含水率は6.9%）と推定された。

○「PB壁」では受信位置の違いによる減衰量の差異が10dB程度みられ、電気的特性の異なる各材料の影響が顕著に認められる。なお、「10%値」や「5%値」の多くがマイナスの結果を示した。原因は未確認である。

○「RC壁」における減衰量の差異は比較的小さい。鉄

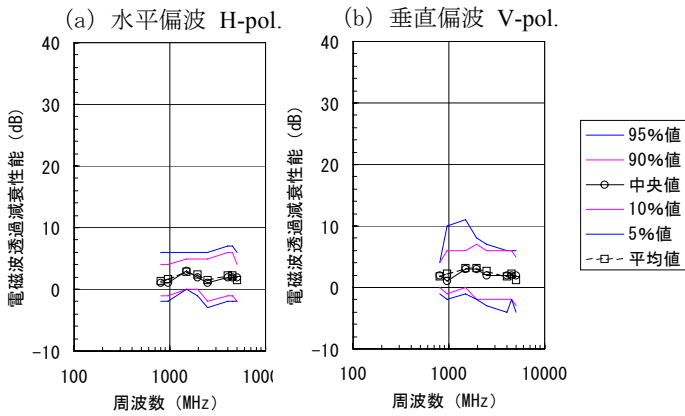


図-5 PB壁透過減衰性能測定結果

Transmission loss of PB pertition

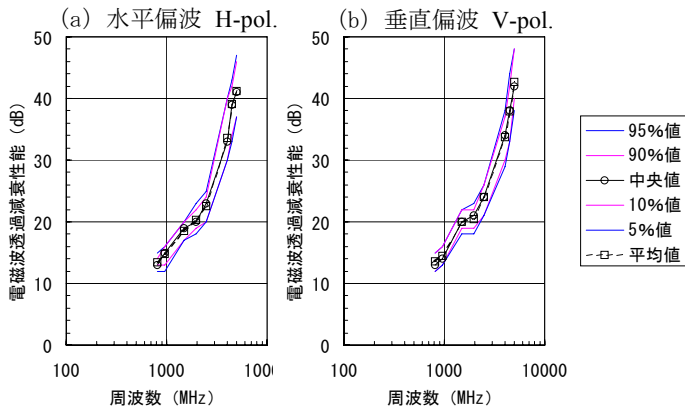


図-6 RC壁透過減衰性能測定結果

Transmission loss of RC wall

筋よりもコンクリートの影響が減衰量に対して支配的なためと思われる。

4. 多層建材モデル内での透過特性及び、反射特性³⁾

建材モデルの透過減衰性能は、誘電体と導電性メッシュを組み合わせた構造の電磁波シールド材と同様に求めることができる。即ち、コンクリート、石膏ボードは誘電体であるため、まず、n層構造からなるモデルの誘電体境界面での電波入射時の電磁界を等価伝送線路として求め、F行列に置き換える。次に、鉄筋やLGSのように本試験体を使用した構造体を完全導体の金属メッシュと仮定し、境界面での電波入射時の電磁界を同様に求め、F行列に置き換える。この場合、誘電体と金属メッシュで構成される複合材料の表裏面の電磁界はそれぞれのF行列の積によって得ることができ、さらに、F行列の要素から、透過減衰性能及び反射減衰性能は算出できる。

5. 透過減衰性能測定結果及び性能推定計算結果

図-7に透過減衰性能測定で得られたRC壁の上限値95%値(=上限値)、5%値(=下限値)及び透過減衰性能測定において送信電波のビーム中心点とした試験体中央部で得られた測定値： ΔL_t (dB)と、これらの透過減衰性能測定結果をもとに推定した透過減衰性能の計算値： Γ_t (dB)を示す。さらに、等価的な複素比誘電率： ϵ を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \epsilon_k &= 5.19 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j3.01 \times (f \times 10^{-6})^{-0.11} \\ \epsilon_k &= 5.00 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j9.90 \times (f \times 10^{-6})^{-0.24} \\ \epsilon_k &= 5.17 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j3.02 \times (f \times 10^{-6})^{-0.08} \end{aligned} \quad (1)$$

RC壁の等価的な複素比誘電率は、いずれも実数部が同程度の数値であるが、虚数部は上限値と下限値で2倍程度の差がある。なお、試験体中心部の測定値から推定し

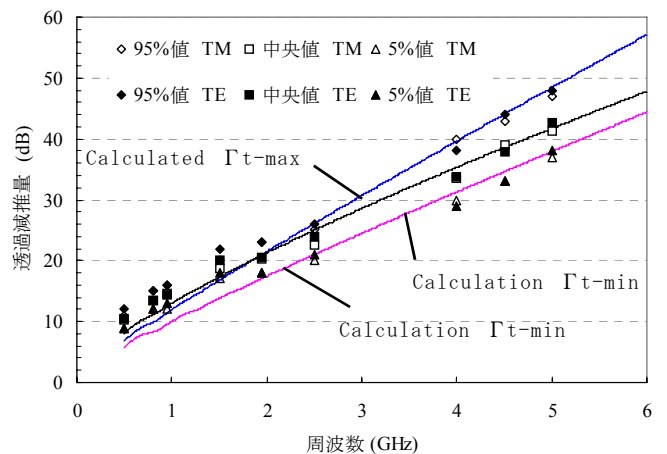


図-7 RC壁の透過減衰性能

Transmission loss of RC wall

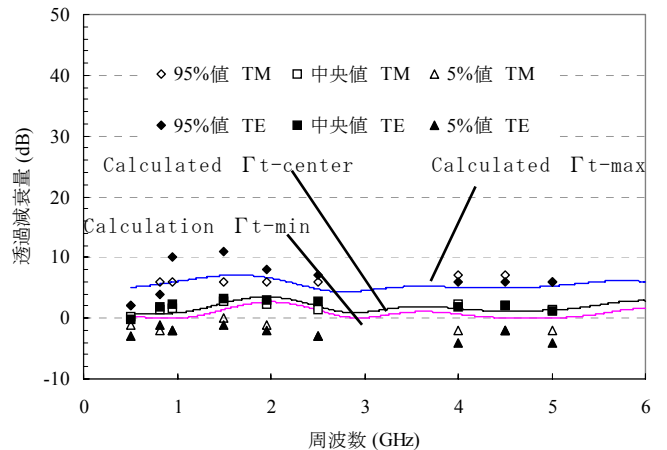


図-8 PB壁の透過減衰性能

Transmission loss of PB pertition

た数値は、実数部、虚数部ともに、その中間的な値であった。また、RC壁の透過減衰性能の決定要因としては、鉄筋の影響も考えられるため、自由空間中に鉄筋メッシュのみ存在する場合の透過減衰量を計算した結果、今回対象とした周波数帯では鉄筋自体が透過減衰性能に及ぼす影響の程度は、非常に小さいことが明らかになった。コンクリートは、セメント、骨材、水、空気を主成分としている。このうち、水は複素比誘電率に大きな影響を及ぼすことが報告されている⁴⁾。コンクリート内において水は、骨材等の気泡に残留することが多く、その分布の不均一な状態がそのまま透過減衰性能のばらつきに繋がったものと考えられる。性能のばらつきの特徴は、2GHz以下の周波数では上限値と下限値の差が数dB程度であるのに対して、5GHzでは差が10dB以上となるといったように周波数に比例してばらつきが大きくなる傾向をもち、周波数に比例した減衰特性をもつ水による影響が、不均一な含水分布をもつRC壁の透過減衰性能にも現れていると考察された。

図-8にPB壁の透過減衰性能上限値、下限値、試験体中央部の測定値及び計算値を示す。さらに、等価的な複素比誘電率を式(2)に示す。

$$\begin{aligned} \hat{\epsilon}_k &= 2.51 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j0.07 \times (f \times 10^{-6})^{-0.29} \\ \hat{\epsilon}_k &= 2.61 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j13.01 \times (f \times 10^{-6})^{-0.58} \quad (2) \\ \hat{\epsilon}_k &= 2.70 \times (f \times 10^{-6})^{-0.01} - j1335 \times (f \times 10^{-6})^{-0.96} \end{aligned}$$

複素比誘電率の虚数部は上限値と下限値で700倍程度の差がある。また、試験体中心部の測定値から推定した数値は、下限値に比べて虚数部が100倍程度であった。この様に、PB壁は、上限値と下限値の差が著しく大きくなった。このうち ϵ_{\min} は、既に報告している石膏ボード単体を自由空間透過減衰法により測定した結果と一致している⁵⁾。したがって、 ϵ_{\min} はLGSの影響を受けずに石膏ボードの部分のみを透過した場合の複素比誘電率を表しているものと考えられる。一方、 ϵ_{\max} 及び ϵ_{center} は、石膏ボードに加えLGSあるいは振れ止めを透過した場合の等価的な複素比誘電率を表しているものと考えられる。また、PB壁の透過減衰性能のばらつきは、周波数によらず上限値と下限値の差が10dB程度であった。これは、どの周波数に対しても遮蔽物としてはたらく金属体のLGSの効果が透過減衰性能にあらわれたことを示唆している。

6. 反射減衰性能測定結果及び性能推定計算結果

式(1)及び式(2)に示す等価的な複素比誘電率の妥当性を検証するため、タイムドメイン法⁶⁾によって求めた入射角

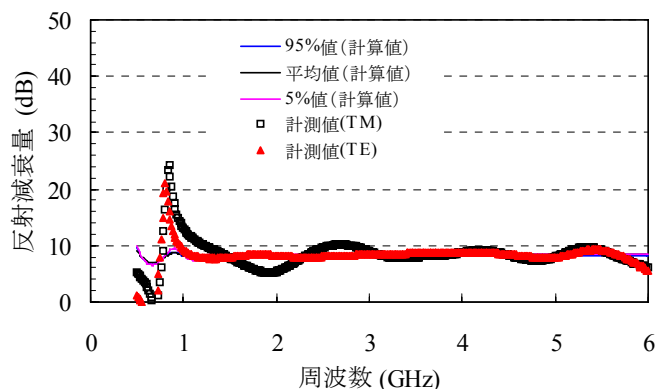


図-9 RC壁の反射減衰性能
Reflection loss of RC wall

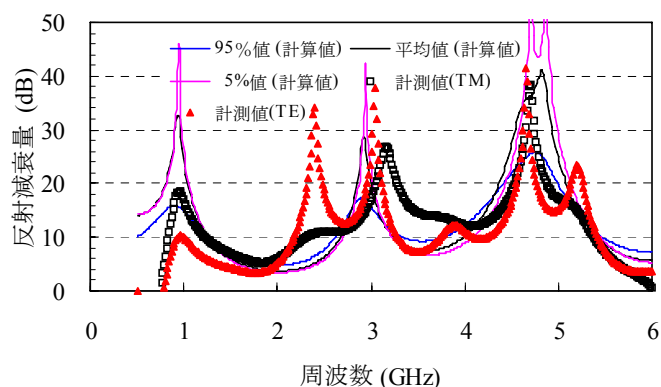


図-10 PB壁の反射減衰性能
Reflection loss of PB partition

度0度における反射減衰性能の測定値： ΔL_r と複素比誘電率より求めた反射減衰性能計算値： Γ_r の比較を行った。RC壁の反射減衰性能測定値及び計算値を図-9に示す。式(1)に示す上限値、下限値、試験体中央部の等価的な複素比誘電率から算出した反射減衰性能計算値は、いずれも測定値とほぼ一致した特性となった。

図-10にPB壁の反射減衰性能測定値及び計算値を示す。式(2)に示す ϵ_{\min} から算出した計算値は、測定値のプロファイルをよくあらわしており、特に最大透過電波の量を把握することが可能となる。 ϵ_{\max} から算出した計算値は、測定値の最小反射減衰特性をあらわしており、最大反射電波の量を把握することが可能となる。さらに、 ϵ_{center} から算出した反射減衰特性は、4.5GHz以下では測定値と一致した特性であるが、それ以上の周波数帯では、測定値に比べると低い特性となっており、中間的な特性となっている。PB壁の様に、複合材料の透過減衰性能およびばらつきを決定する要因が、石膏ボード及びLGSといった電気的特性が異なる2種類以上の材料で決定される場合には、どの材料が電気的特性を決定するのかを見極める必要があることを示す結果となった。

7. まとめ

電磁波透過減衰性能測定の実施により下記のことが明らかになった。

○電気的特性の異なる複数の材料から構成される建築構造の電波透過減衰特性の検討には、当提案のような、透過側における複数箇所受信による透過減衰量のばらつきの把握が有効と考えられる。

また、下記の追加検討事項が示された。

○一部の透過減衰量においてマイナス値が得られたことの原因。

○透過減衰量への材料内の含水率影響度。

さらに、複合材料としての等価的な電気的特性を把握するためには、透過減衰性能のばらつきの程度を実験的に評価することが等価的な反射減衰性能を高い精度で得ることに重要であることが明らかになった。また、この様にして得られた複合材料の等価的な複素比誘電率を把握することで、面的、厚み的に様々な条件を持つ建築の壁面、床面等の透過反射特性を評価できることが明らかになった。この電気的特性から屋内でのレイトレース法などを用いた電波環境シミュレーションが効率的に行うことが可能になる。

本報告は、(株)NTTドコモ ワイヤレス研究所様よりの2002年度委託契約に基づき、2002年10月から2003年5月まで実施した受託研究成果の一部を用いて執筆した。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐川祐一郎他：「電磁環境実験室」大成建設技術研究所報、1997.
- 2) 影山健二：「材料の電磁シールド性能測定法」日本建築学会電磁環境小委員会第4回シンポジウム資料、2000. 11.
- 3) 遠藤哲夫，藤森成一：石膏ボード型電磁シールド材に関する研究，日本建築学会計画系論文集，AIJ02，No. 6 pp. 1043-1049, 2002. 6.
- 4) 大桃重一郎，遠藤哲夫：高機能繊維補強構造物の電磁気特性評価，日本建築学会1999年度大会学術講演梗概集，D-1，環境工学 I，pp1159-1160，1999.
- 5) 橋本修，佐藤篤樹他：C帯における自由空間透過法による複素比誘電率測定に関する研究，EMCJ論文誌Vol. J86-B，No. 7，pp. 1089-1095，2003.
- 6) 三枝健二他：電波吸収体性能測定法，日本建築学会電磁環境小委員会第4回シンポジウム資料，2000. 1.