

# モルタルを用いた電波吸収材の開発 ～含水状態の違いが諸特性に与える影響～

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

## Research on Radio Wave Absorber Composed of Mortar ～Effects of Differences in Water Content Condition～

HAYASHI Tatsuro<sup>\*1)</sup>，TAKAI Shinichiro<sup>\*2)</sup>

無線通信を利用する情報端末やサービスの普及に伴い、通信伝送基盤の安定的な運用を支える電磁環境材料の用途拡大が予想される。土木建築の分野で汎用材料であるモルタルを屋内外で利用できる電波吸収材として構成するため、炭素を添加した試験体を用いて、異なる含水状態における諸特性を実験的に検討した。

反射係数の測定結果より、湿潤を除く含水状態において配合が適切となる場合に電波の反射減衰が認められ、電波吸収材として構成できることがわかった。さらに含水状態の違いが複素比誘電率に与える影響を検討し、反射係数との相関を考察した。

### 1. 緒言

無線通信を利用する情報端末やサービスの急速な普及に伴い、電波の過密化による相互干渉や多重反射が生じてシステムの通信速度低下、誤動作などの問題が懸念される。さらに近い将来には自動運転を中心とする新しい道路交通システムやワイヤレスによる電力伝送の普及が予想され、通信やレーダー、無線給電システムといった通信伝送基盤の安定的な運用を支える電磁環境技術の役割はますます複雑、多用化すると考えられる。

任意空間への電波伝搬を妨げる電磁シールド材や、電波の反射を抑制する電波吸収材は、EMC と呼ばれる電子機器から生じる電磁ノイズ規制をはじめ上記問題の解決手段として研究<sup>1)2)</sup>が行われてきた。また、その種類は多岐にわたり、対象とする周波数や用途ごとに見合う素材や形状、寸法の材料が提案、利用されている。

筆者らは土木建築の分野で汎用性が高いモルタルに着目し、屋内外で利用できる低コストの電磁シールド材や電波吸収材として構成することを目指している。これまで、まずモルタルへの導電性付与について検証<sup>3)</sup>し、含水率と抵抗率の関係を明らかにした。次に、炭素を添加したモルタルの電磁シールド効果について検証<sup>4)5)6)</sup>し、炭素添加による効果を実験的に示した。モルタルを用いた電波吸収材については、他に既往の研究例がみられるが、材料の配合や含水状態に関する情報は少なく、実験的なアプローチを通じた基礎的特性の蓄積が望まれる。そこで、本研究では炭素を添加してモルタル全体に導電性を付与した試験体を作

製し、異なる含水状態下における GHz 帯の反射係数（＝電波吸収特性）を測定した。さらに複素比誘電率の値を求め、含水状態の違いが複素比誘電率に与える影響を検討し、反射係数との相関を考察したので以下に報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 目的

形状、大きさ、厚みが同一で、炭素の添加率のみが異なる試験体を用いて、同一周波数帯域における反射係数、複素比誘電率を測定する。また、異なる含水状態下における測定を行い、含水状態が諸特性に与える影響を考察する。

#### 2.2 試験体の仕様

試験体の形状は平板とし、大きさが 300×300 mm、厚みは 10 mm とした。図 1 に外観例を、表 1 に使用材料および使用材料の物理的性質を示す。

セメントは普通ポルトランドセメントを、細骨材には揖斐川産川砂を、炭素は 0.3 mm 以下に粉碎した粉末を使用



図 1 試験体の外観例

<sup>\*1)</sup> 機械・電気・材料グループ，<sup>\*2)</sup> 村本建設株式会社

した。また、モルタル中の空気量は電磁シールドや吸収に影響を及ぼす可能性が考えられるため、排除を目的に消泡材を使用し、空気1%以下となるよう調整した。

表 1 使用材料の物理的性質

|      |                                                                                                             |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント<br>密度: 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3340cm <sup>2</sup> /g                                    |
| 細骨材  | 産地: 揖斐川砂, 表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup><br>絶乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率: 2.59<br>吸水率: 1.17%, 微粒分量: 3.32% |
| 炭素粉末 | 密度: 2.13g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 1308cm <sup>2</sup> /g<br>格子定数: 0.3440~0.3442nm<br>結晶子サイズ: 5nm            |

表 2 に試験体の配合を示す。水セメント質量比 W/C は 60%, 細骨材とセメントの質量比 S/C=2.6 のモルタルをベースとして、炭素を細骨材の一部を置換して内割混入し、モルタルの体積比で添加率 0, 2, 5, 10% の 4 種類変化させた。

表 2 試験体の配合

| 配合名<br>(炭素添加率) | W(g)<br>水 | C(g)<br>セメント | S(g)<br>細骨材 | CP(g)<br>炭素粉末 |
|----------------|-----------|--------------|-------------|---------------|
| CP-0 (0%)      | 316       | 527          | 1370        | 0             |
| CP-2 (2%)      | 316       | 527          | 1317        | 43            |
| CP-5 (5%)      | 316       | 527          | 1238        | 107           |
| CP-10 (10%)    | 316       | 527          | 1105        | 213           |

### 2.3 材齢と含水状態

図 2 に材齢と含水状態を示す。試験体を水中にて 28 日間養生した状態を湿潤状態とし、その後、温度 20℃±2℃、湿度 60%±10% の恒温恒湿室にて乾燥した状態を気乾状態とした。さらに 110℃ の乾燥炉で乾燥した状態を絶乾状態とした。

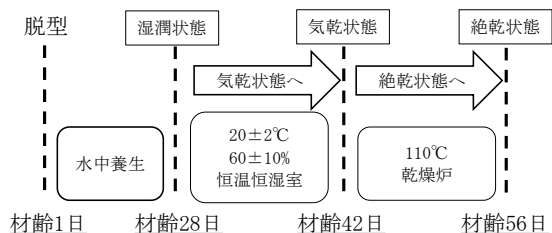


図 2 材齢と含水状態

### 2.4 測定項目

まず試験体の反射係数を測定した。次に、結果の考察に用いる複素比誘電率を推定するために必要となる透過係数を測定した。測定の方法を次節より示す。

### 2.5 反射係数の測定

試験体の反射係数(=電波吸収特性)は、入射波に対して反射波が減衰した量の測定で得られる。実際には図 3 に

示す測定系<sup>7)</sup>により、まず電波の完全反射体とみなす金属板を設置したときの反射波  $R_0$  を測定し、次に金属板上に試験体を設置したときの反射波  $R_s$  を測定して、反射係数  $R$  を次式により求めた。

$$R = R_0 - R_s \quad (dB)$$

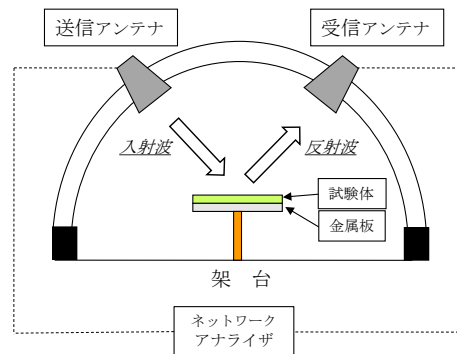


図 3 反射係数の測定系

日本建築学会電磁環境小委員会「室内用電波吸収体性能測定法」<sup>8)</sup>によると、試験体の大きさは波長の 2 倍以上と規定される。本研究における試験体は一边が 300 mm であるため、2 GHz ( $\lambda \approx 150$  mm) 以上の周波数帯域が推奨範囲となるが、2 GHz 以下も参考値として取り扱う前提で帯域 1~8 GHz の測定を行った。なお、試験体への電波入射角度は垂直入射のみとした。

### 2.6 複素比誘電率の推定

一般材料が示す電気的特性には導電率や抵抗率が広く用いられているが、電波吸収体では複素比誘電率や複素比透磁率などの値と、材料厚みがより重要な因子と考えられる。

本研究では前節の測定で得られる反射係数と複素比誘電率の関係を考察するため、すべての試験体を対象に複素比誘電率を求めた。ただし、高周波における複素比誘電率の直接測定は困難であることから、まず推定計算に必要な透過係数を測定し、次に伝送線理論に基づく逆推定問題として近似計算<sup>9),10)</sup>により求めた。透過係数は図 4 に示す 2 台のアンテナとシールドボックスで構成する測定系<sup>11),12)</sup>により測定した。

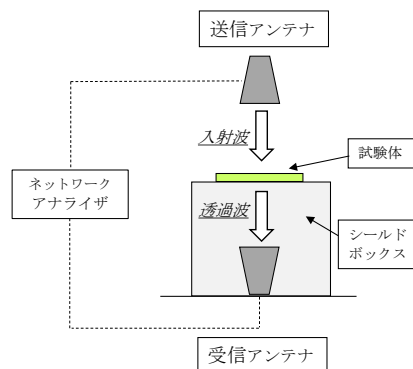


図 4 透過係数の測定系

なお、磁性材料は使用しないため、計算に用いる複素比透磁率は1とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 反射係数

2.5 に従い、湿潤、気乾、絶乾の異なる含水状態における試験体の反射係数を測定した結果を図5に示す。

湿潤状態では炭素を添加しない試験体 CP-0 の 1.7 GHz および 5.9 GHz 付近に-7~-9 dB 程度の減衰がみられるが、他の試験体に顕著な減衰はみられない。

気乾状態では CP-0 の 2.5 GHz 付近に約-19 dB、7.7 GHz

付近に約-10 dB、CP-2 の 2.3 GHz 付近に約-28 dB、7 GHz 付近に約-18 dB の減衰がみられるものの、CP-5 では 1.9 GHz 付近に約-13 dB、6.1 GHz 付近に約-15 dB とやや減衰が小さくなり、CP-10 では目立った減衰はみられない。

絶乾状態では CP-0 に顕著な減衰がみられないが、CP-2 の 2.7 GHz 付近に約-8 dB、CP-5 の 2.4 GHz 付近に約-11 dB、7.9 GHz 付近に約-28 dB、CP-10 の 2.1 GHz 付近に約-24 dB、6.9 GHz 付近に約-6 dB の減衰がみられる。

いずれの含水状態でも 7.5~8 GHz で反射係数が正となる部分があるが、測定の際の基準面調整が不十分であったため生じた誤差と考えられる。

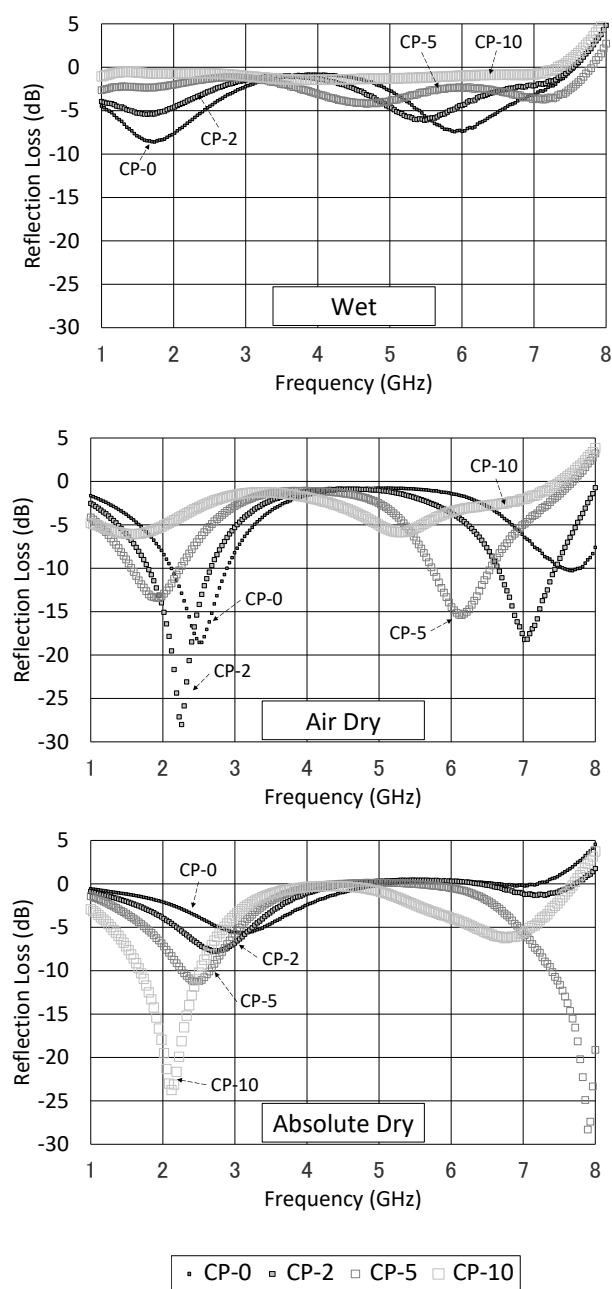


図5 反射係数の測定結果

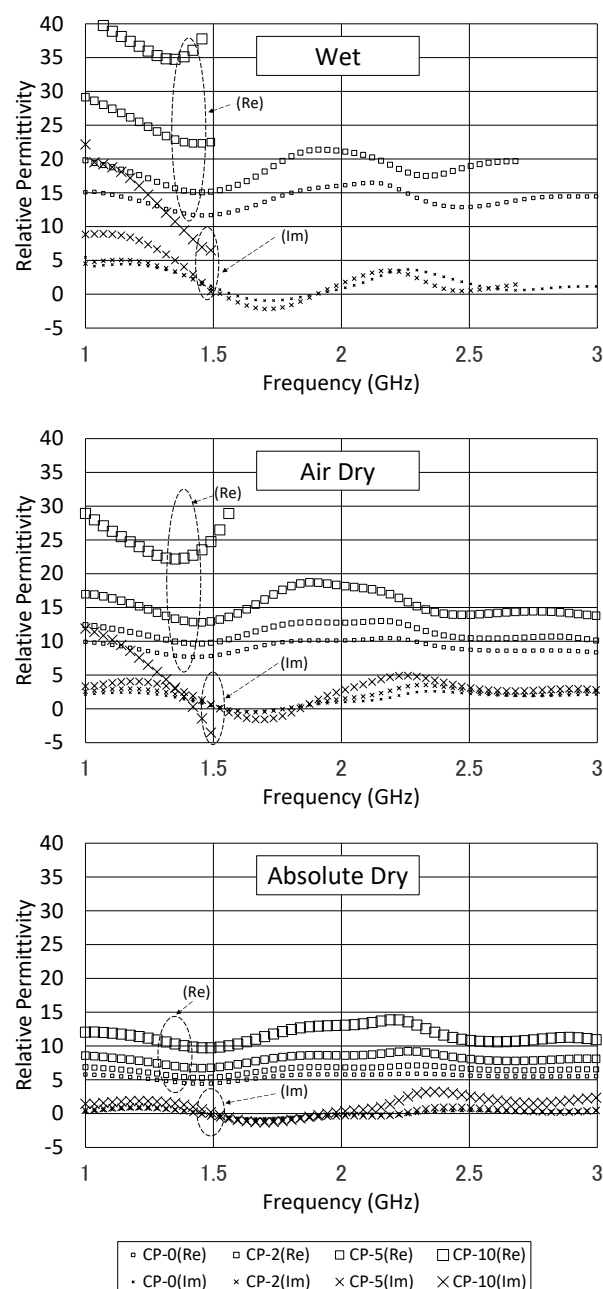


図6 複素比誘電率の推定結果

### 3.2 複素比誘電率

モルタルに近い性質のコンクリートを対象に,  $\text{mHz}$ ～ $\text{MHz}$ における比誘電率を示した研究<sup>13)</sup>によると, 水を十分に含んだ状態で  $1 \text{ mHz}$  の比誘電率は  $10^{10}$  程度で,  $\text{MHz}$  帯に近づくにつれて桁違いに小さくなる. また含水率が低いほど比誘電率が小さくなる傾向が示されている.

本研究ではさらに高周波となる  $\text{GHz}$  帯における比誘電率を求めた. その際, 一般材料と同じくモルタルの比誘電率は複素数となるため, 複素比誘電率の実数部, 虚数部が得られるよう近似計算により求めた. なお,  $3 \text{ GHz}$  を超える周波数では計算が収束せず, 安定した値が得られなかったため,  $1\sim 3 \text{ GHz}$  に限定して値を求めた. また, 炭素添加率が高い試験体では  $3 \text{ GHz}$  以下の帯域でも計算が収束しないことが生じたため, 結果から除いた.

2.6 に従い, 湿潤, 気乾, 絶乾の異なる含水状態における複素比誘電率を推定した結果を図 6 に示す.

湿潤状態では炭素添加率が高い試験体ほど大きな値を示し, CP-10 と CP-0 の実数部に 20 以上の差がみられる. 虚数部も試験体ごとの差があるが, いずれも周波数が高くなるにつれて僅かに小さくなる傾向を示している.

気乾状態では湿潤状態に比べていずれの試験体も実数部, 虚数部ともに小さな値となり, 絶乾状態ではさらに小さくなる傾向がみられる. 低周波と比較して値の大きさは異なるものの, 傾向は同じである.

実数部, 虚数部ともに周波数ごとに値が上昇下降する様子がみられる. これは計算に利用した透過係数を測定する際にコネクタやシールドボックス内で反射, 共振などが生じた影響によるものと考えられる.

## 4. 考察

3.1 より, 湿潤状態におけるいずれの試験体も反射の減衰が不十分であること, また気乾状態では炭素 2 % 添加の CP-2 が, 絶乾状態では炭素 10 % 添加の CP-10 が優れた減衰を示し, 電波吸収材として構成できることがわかる.

導電性の観点で考察すると, 湿潤状態では主に含水成分に起因する導電性が高過ぎること, また気乾状態では含水成分と 2 % 添加した炭素による導電性が, 絶乾状態では 10 % 添加した炭素による導電性が適当な状態にあったものと考えられる.

次に, 3.1 の反射係数と 3.2 の複素比誘電率の相関について考察する. 単層型電波吸収体において, 試験体表面における電波の反射が無い, 即ち反射係数が 0 となる無反射条件を成立させるために, 複素比誘電率がとるべき値を理論式から計算<sup>2)</sup>で求めることができる.

そこで, 3.1 で顕著な減衰が得られた試験体を対象に, 減衰が最大となる点の周波数を確認し, 次に 3.2 から同一試験体かつ同一含水状態, 周波数のときの複素比誘電率を

読み取り, 無反射条件の曲線 (= 無反射曲線) と重ねて表示することで相関を考察した.

例として図 5 における気乾状態の CP-2 が  $2.3 \text{ GHz}$  で約  $-28 \text{ dB}$  の減衰を示した点に着目する. 同条件の CP-2 が示す複素比誘電率を図 6 から実数部 12, 虚数部 3.5 と読み取り, 無反射曲線と重ねて表示した結果を図 7 に示す. なお図中の曲線に添えた数字は, その条件で減衰が得られる試験体厚み ( $d$ ) と波長 ( $\lambda$ ) のパラメータ  $d/\lambda$  である.

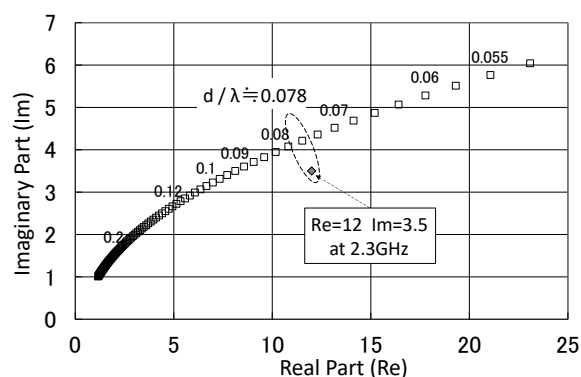


図 7 無反射曲線による検討

着目した点は図中央部付近の無反射曲線の下方向近くに位置しており, 破線で示すように最も近い無反射曲線上のパラメータ  $d/\lambda$  は 0.078 である. これより試験体の厚みが  $10 \text{ mm}$  の場合, 減衰が得られる波長は  $12.8 \text{ cm}$  と求まり, 周波数に変換すると  $2.34 \text{ GHz}$  となる. 図 5 における気乾状態の CP-2 が  $2.3 \text{ GHz}$  で  $30 \text{ dB}$  近い減衰を示したのは, 当該周波数における複素比誘電率が無反射条件に近い値であった結果と考えられる. さらに, 仮に試験体の複素比誘電率の虚数部が約 0.5 大きければ, より無反射条件に近づいて減衰が強まる可能性が示唆される.

無反射曲線は, 所望の周波数で減衰を得るための設計支援として有効であるが, 3.2 で得られた複素比誘電率は, 帯域が限定されたうえ精度も十分でないため, さらに測定技術の向上が必要である. 今後も研究を進めたい.

## 5. 結言

モルタルを屋内外で利用できる電波吸収材として構成するため, 実験的なアプローチを通して配合や含水状態に関する検討を行った.

反射係数の測定結果から, 湿潤状態では炭素の添加率に関わらず, いずれの試験体も顕著な減衰は得られなかったが, 気乾状態や絶乾状態では, 特定の添加率において減衰が確認され, 電波吸収材として構成できることがわかった.

また, 測定した透過係数から推定した複素比誘電率より, 試験体の含水が少ないほど実数部, 虚数部ともに値が小さくなり, 低周波と似た傾向を示すことがわかった.

さらに, 顕著な減衰が得られた試験体を対象に, 減衰が

最大となる点の複素比誘電率を無反射曲線と重ねて表示することで、反射係数と複素比誘電率の相関を示した。

モルタルを用いた電波吸収材の実用化に向けて検討すべき課題として、含水状態の違いにより生ずる特性変化の抑制や、試験体表面の平滑性、厚みのばらつきが反射係数に与える影響、さらに乾燥により生じる反りによる影響などの検討を進める必要がある。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、摂南大学理工学部都市環境工学科の熊野知司教授ならびに研究室の皆様に多大なご協力を頂きました。

なお、本研究で使用したアンテナおよびネットワークアナライザは、公益財団法人 JKA の「機械工業振興補助事業」により導入、設置したものである。



## 参考文献

- 1) 畠山賢一，小塚洋司：電磁遮蔽&電波吸収実践技術マニュアル，三松，2006
- 2) 橋本修：電波吸収体入門，森北出版，1997
- 3) 高井伸一郎，熊野知司，陰山恵子，井上正一：導電性の高い炭素粒子を添加したモルタルの各種物性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.35-40，2012
- 4) 高井伸一郎，熊野知司，井上正一，林達郎：導電性材料を添加したモルタルの電磁波特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1369-1374，2013
- 5) 藤原正佑，熊野知司，高井伸一郎，林達郎：炭素を添加したモルタルの電磁波遮蔽性に関する実験的検討，土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，pp.113-114，2014
- 6) 林達郎，高井伸一郎：炭素を添加したモルタルの電磁波遮へい性に関する研究（第 1 報），奈良県産業振興総合センター研究報告，No.41，pp.23-28，2015
- 7) 林達郎，山本政男，植村哲，足立茂寛：高機能電磁波吸収材料の開発（第 1 報），奈良県工業技術センター研究報告，No.32，pp.20-22，2006
- 8) 日本建築学会電磁環境小委員会：室内用電波吸収体性能測定法，2003
- 9) 橋本修：高周波領域における材料定数測定法，pp.139-140，森北出版，2003
- 10) 林達郎，高井伸一郎：モルタルの含水状態が電波吸収特性に与える影響について，G7-1，平成 28 年電気関係学会関西連合大会
- 11) 林達郎，高井伸一郎：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，奈良県産業振興総合センター研究報告，No.39，pp.1-5，2013
- 12) 林達郎，高井伸一郎：大型試料向けの GHz 帯透過減衰量測定環境の構築と導電性炭素を配合したモルタルの特性について，G-7，平成 25 年電気関係学会関西連合大会
- 13) 野田一弘，河野広隆，久田真，森濱和正：交流作用時の硬化コンクリートの電氣的性質に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.575-580，2003