

モルタルを用いた電波吸収材の開発（第2報）

～周辺湿度の変化に対するロバスト性の向上～

林 達郎^{*1)}，高井 伸一郎^{*2)}

Research on Radio Wave Absorber Composed of Mortar (2nd Report)

～Robustness against Changes in Ambient Humidity～

HAYASHI Tatsuro^{*1)}，TAKAI Shinichiro^{*2)}

無線通信が幅広く利用されるようになり、電波の相互干渉など諸問題への対策材料として電波吸収材の需要の拡大が予想される。土木建築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、導電性を付与した試験体により、異なる含水状態における反射係数（＝電波吸収特性）などの特性を測定したところ、含水状態の変化に伴い特性にも変化が生じることを前報で明らかにした。本報では、屋外での使用を考慮して、モルタルに含水しにくいよう改良を施し、周辺湿度の変化に対するロバスト性を確認した結果、水セメント比が小さい試験体において良好な結果を得た。

1. 緒言

電波の反射を抑制する電波吸収材や、任意空間への電波伝搬を防ぐ電磁シールド材は、電子機器から生じる電磁ノイズに関する規制をはじめ、無線通信の過密化で生じる相互干渉など諸問題への対策材料として研究¹⁾²⁾されている。その種類は多岐にわたり、用途や対象周波数に適した構造や素材をもつ材料が考案され、電子機器の周辺や生活空間の様々な場所に使用されている。

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波吸収材として構成することを目指している。モルタルを用いた電波吸収材に関する既往の研究例はみられるが、材料の配合や含水状態に関する情報は少ない。そこで前報³⁾において、モルタルに炭素を添加することで導電性を付与した試験体を作製し、含水状態の違いが電波の反射係数（＝電波吸収特性）などの特性に与える影響を考察した。

その結果、水分を多く含む湿潤状態（Wet）と、乾燥が進んだ気乾状態（Air Dry）では、反射係数のピーク周波数や減衰レベルに差が生じることが明らかになり、雨水暴露が想定される屋外での使用を考慮すると、周辺湿度の変化に対して諸特性が一定に保たれるよう改善が望ましい旨を結言に記した。

本報では、モルタルに含水しにくいよう改良を施し、周辺湿度の変化に対するロバスト性を確認した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 目的

電波吸収材の特性は、主に、使用する材料の比誘電率や比透磁率、厚みや形状などのパラメータにより定まることが知られている。

モルタルを用いた電波吸収材では、周辺湿度の変動により含水状態が変化するため、高い比誘電率（ ≈ 80 ）をもつ水分の増減がモルタル全体の比誘電率を変化させ、さらにこれが反射係数の変化につながると考えられる。

前報では、水セメント比（W/C）を60%で作製した試験体が湿潤、気乾の各状態にあるときの反射係数と比誘電率を示したが、ここで改めて炭素の添加率が2%の例を引用し、図1、図2に示す。反射係数を示す図1の例では、湿潤状態において1.6 GHzと5.5 GHz付近に2つの反射係数のピークがみられるが、気乾状態ではこれらのピークは2.2 GHzと7.0 GHz付近にシフトし、減衰は大きくなる。比誘電率を示す図2の例では、各状態における実数部（Re）の値に約5の差がみられる。

本報では、モルタルに含水しにくいよう改良を施すため、吸水率が極めて小さいプラスチック材料であるポリプロピレンを添加するとともに、水分が浸入する空隙を減らすため、水セメント比が小さい試験体を考案し、作製した。

次に、前報と同様に、異なる含水状態における反射係数と比誘電率を測定して各状態間の差を比較し、ロバスト性の向上に寄与したか考察する。

^{*1)} 機械・電気・材料グループ，^{*2)} 村本建設株式会社

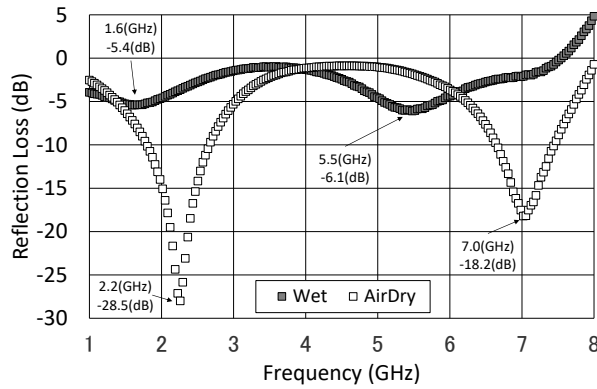


図 1 2 種類の含水状態における反射係数の一例

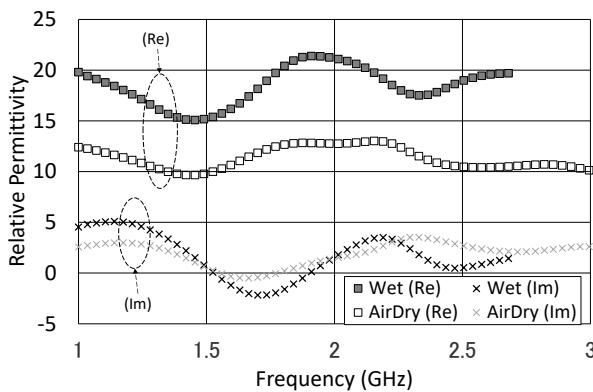


図 2 2 種類の含水状態における比誘電率の一例

2.2 試験体の仕様

試験体の形状は平板とし、大きさは 300 mm×300 mm、厚みは 10 mm とした。表 1 に使用材料と、それらの物理的性質を、また、図 3 に外観例を示す。

表 1 使用材料と物理的性質

セメント	普通ポルトランドセメント 密度：3.15g/cm ³ 、比表面積：3340cm ² /g
細骨材	産地：仁淀川産、表乾密度：2.61g/cm ³ 絶乾密度：2.59g/cm ³ 、粗粒率：2.32 吸水率：0.75%、微粒分量：4.9%
ポリプロピレン	密度：0.9g/cm ³ 平均粒径：3.56mm
炭素粉末	密度：2.13g/cm ³ 結晶子サイズ：5nm



図 3 試験体の外観例

表 2 に試験体の配合を示す。水セメント比(W/C)は 60 %、45 %、30 % の 3 種類変化させた。いずれもポリプロピレンの添加率は 20 %、炭素の添加率は 3 % とした。

表 2 試験体の配合

水セメント比 W/C (%)	ポリプロ ピレン (%)	炭素粉末 (%)	単位量(kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	ポリプロ ピレン	炭素粉末
60	20	3	316	527	749	180	64
45				702	603		
30				1053	313		

2.3 材齢と含水状態

図 4 に材齢と含水状態を示す。試験体を脱型後、水中で 28 日間養生した状態を湿潤 (Wet) とし、その後、温度 20 °C ± 2 °C、湿度 60 % ± 10 % の恒温恒湿室にて 14 日間乾燥した状態を気乾 1 (AirDry1)、さらに同じ環境下で 14 日間乾燥した状態を気乾 2 (AirDry2) とした。

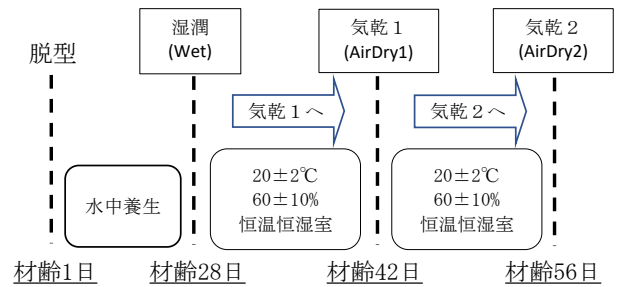


図 4 材齢と含水状態

2.4 測定項目

試験体の含水状態を定量的に把握するため、乾燥率を測定した。電波に関する特性として、湿潤、気乾 1、気乾 2 の各状態における反射係数を測定し、次に比誘電率を求めた。測定方法を次節より示す。

2.5 乾燥率の測定

乾燥率 D は、材齢 28 日に試験体を水中養生から取り出した湿潤状態における質量 M_w を基準とし、以降、経過日における質量 M_d を測定して、次式により求めた。

$$D = \frac{M_w - M_d}{M_w} \times 100 \quad (\%)$$

2.6 反射係数の測定

反射係数 R は、図 5 に示す測定系⁴⁾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、次式により求めた。

$$R = R_0 - R_s \quad (\text{dB})$$

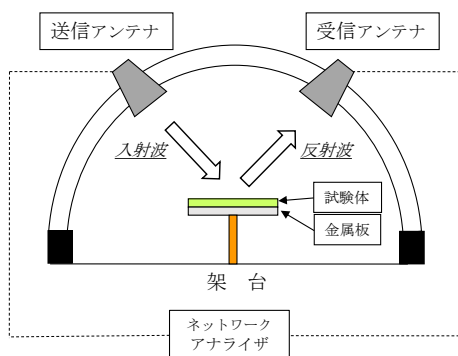


図5 反射係数の測定系

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」⁹⁾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 以下を参考値として取り扱う前提で帯域1 GHz～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。

2.7 比誘電率の測定

反射係数に影響を与えるパラメータとして考察を行うため、試験体の比誘電率を求めた。高周波における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⁹⁾により求めた。

透過係数の測定は、図6に示す自由空間に設置した2台のアンテナとシールドボックスで構成する測定系⁸⁾を用いた。なお、磁性材料は使用しないため、推定計算に用いる比透磁率は1とした。

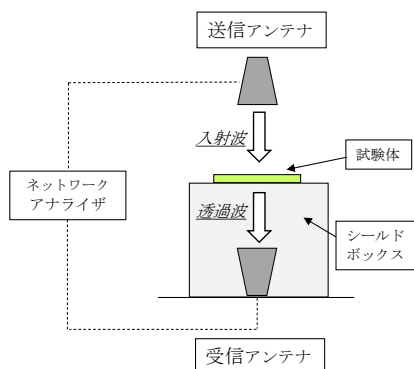


図6 透過係数の測定系

3. 実験結果

3.1 乾燥率

2.5 に従い、水セメント比が異なる3種類の試験体を対象に、水中養生から取り出した日を起点とし、経過日ごと

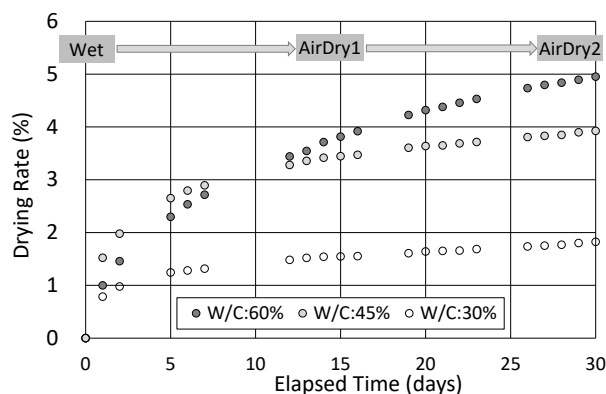


図7 乾燥率の測定結果

に測定した乾燥率を図7に示す。

いずれの試験体も、日数の経過に伴って乾燥率が高くなる傾向がみられる。また、水セメント比が小さいほど、収れんする乾燥率が低く、かつ収れんが早くなる特徴がみられる。

3.2 反射係数

2.6 に従い、水セメント比が異なる3種類の試験体を対象に、湿潤、気乾1、気乾2の各状態における反射係数を測定した結果を図8に示す。

水セメント比が60%の試験体では、湿潤状態で1.9 GHzと5.6 GHz付近に2つのピークがみられるが、これらは乾燥率が約4%となる気乾1では2.1 GHzと6.6 GHz付近にシフトし、乾燥率が約5%の気乾2ではさらに2.5 GHzと7.2 GHz付近にシフトしている。

次に、水セメント比が45%の試験体では、湿潤状態で1.7 GHzと5.3 GHz付近に2つのピークがみられるが、これらは乾燥率が約3.5%となる気乾1では2.0 GHzと6.4 GHz付近にシフトし、乾燥率が約4%の気乾2ではさらに2.0 GHzと6.6 GHz付近にシフトしている。

水セメント比が最も小さい30%の試験体では、湿潤状態で1.9 GHzと6 GHz付近に2つのピークがみられるが、これらは乾燥率が約1.5%となる気乾1では2.0 GHzと6.3 GHz付近にシフトし、乾燥率が約2%の気乾2ではさらに2.0 GHzと6.6 GHz付近にシフトしている。

3.3 比誘電率

2.7 に従い、水セメント比が異なる3種類の試験体を対象に、湿潤、気乾1、気乾2の各状態における試験体の比誘電率を求めた結果を図9に示す。3 GHzを超える周波数では近似計算が収束せず、安定した値が得られないため、対象周波数を1 GHz～3 GHzに限定した。また、一部の試験体において対象周波数内でも計算が収束しない場合は、図から除いた。

図より、各試験体に共通の特徴として、湿潤状態から気

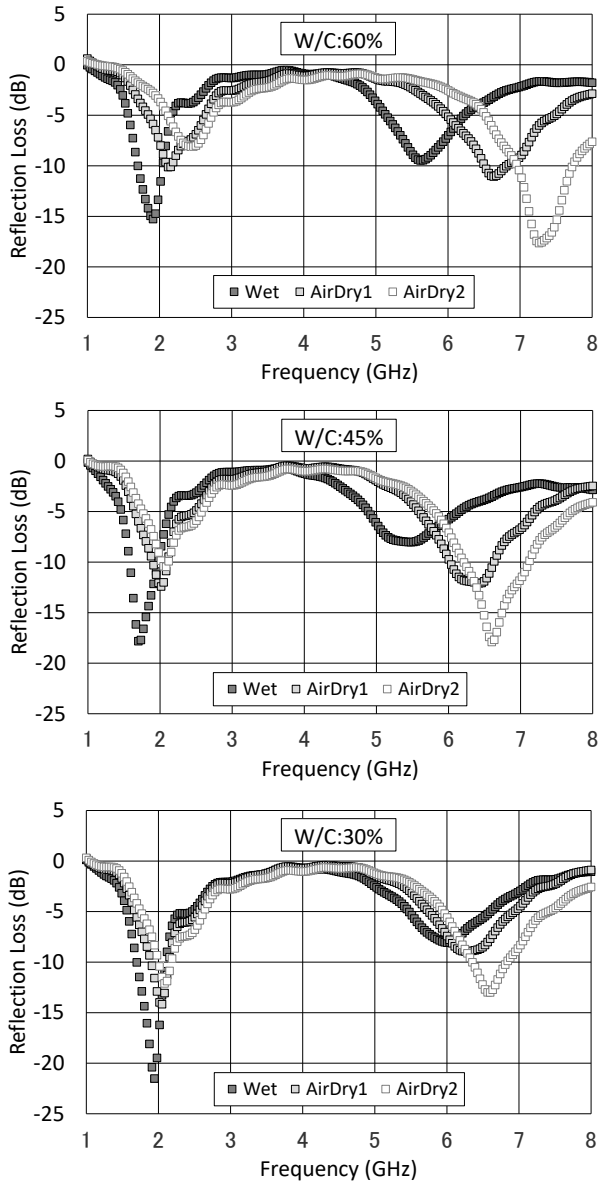


図 8 反射係数の測定結果

乾 1, さらに気乾 2 へと乾燥が進むにつれて, 実数部の値が小さくなる. また, 虚数部については 1 GHz~1.5 GHz 付近で湿潤状態の値が大きい, その他の周波数では含水状態の違いによる有意差はみられない.

なお, 実数部, 虚数部ともに周波数ごとに値の変化がみられるが, これは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 の乾燥率の測定から, 水セメント比が小さいモルタルでは, 乾燥が進行しても質量変化が小さいことを示した. 水セメント比を小さくすることで空隙が減少し, 水分の浸入が抑制された結果と考えられる.

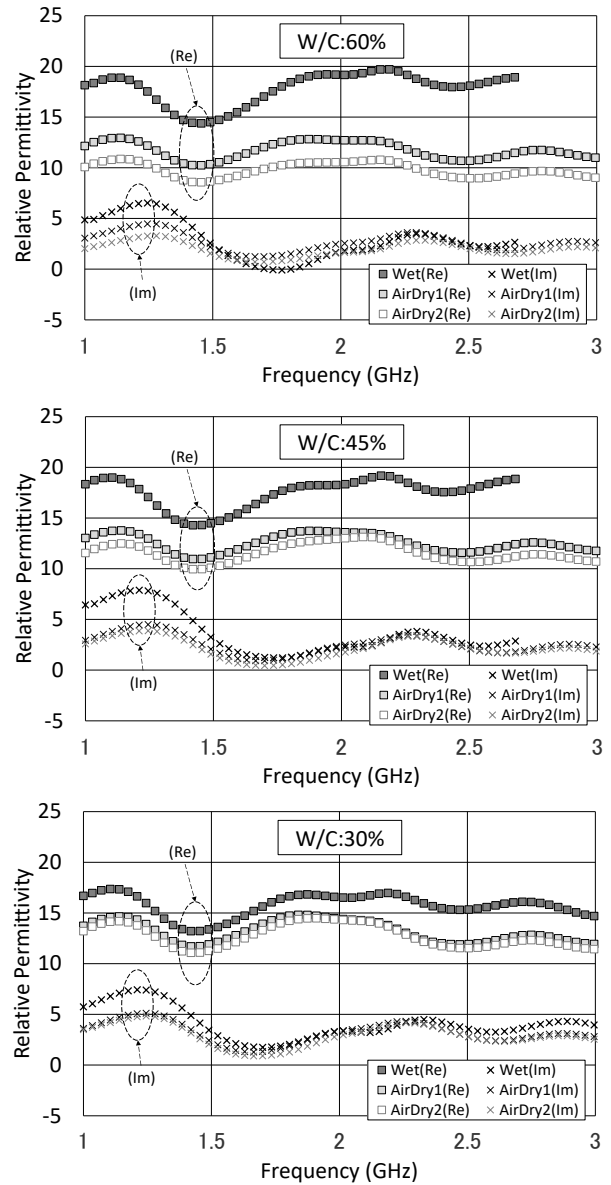


図 9 比誘電率の推定結果

次に 3.2 において, 水セメント比が 60% の試験体に比べて, 45% や 30% の試験体では, 含水状態の変化に対する反射係数の変化が小さいことを示した. 特に, 水セメント比が 30% の試験体では, 2 GHz 近傍のピークに着目すると, 湿潤状態から気乾 2 まで変化したときに生じる周波数のシフトは 0.15 GHz 以内に収まり, かつ, いずれも 10 dB を超える減衰が得られた. 水セメント比が小さいモルタルでは, 周辺湿度が変化しても, 反射係数の変化が抑制されることが明らかである.

最後に, 比誘電率について, 3.3 で示した各含水状態における実数部ならびに虚数部の平均値を求め, さらに各試験体の状態が, 湿潤から気乾 2 に変化したときの変化量を表 3 に記した. 表より, 水セメント比が 60% の試験体では湿潤から気乾 2 に状態が変化したときに生じる実数部の値の低下は 8.0 であるのに対し, 30% の試験体では 3.5 の低

下にとどまっている。水セメント比が小さいモルタルでは、周辺湿度が変化しても水分量の変化が小さく、モルタル全体の比誘電率の変化が抑制されること、さらにこれが前述の反射係数の変化の抑制につながったと考察される。

一方、比誘電率の虚数部は、水セメント比が 60 % の試験体では湿潤から気乾 2 に含水状態が変化したときに生じる値の低下は 2.9 であるのに対し、30 % の試験体では 2.2 の低下であり、水セメント比の違いによる有意差はみられない。

表 3 比誘電率平均値と変化量

水セメント比 W/C(%)	含水状態						(湿潤-気乾2) の変化量	
	湿潤		気乾1		気乾2			
	実数部 (Re)	虚数部 (Im)	実数部 (Re)	虚数部 (Im)	実数部 (Re)	虚数部 (Im)	実数部 (Re)	虚数部 (Im)
60	18.1	4.9	12.1	3.1	10.1	2.0	8.0	2.9
45	18.3	6.4	13.0	2.9	11.6	2.6	6.7	3.8
30	16.7	5.7	13.7	3.6	13.2	3.5	3.5	2.2

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周辺湿度の変化に対するロバスト性の向上について考察した。

モルタルに含水しにくいよう改良を施すため、ポリプロピレンを添加するとともに、水セメント比を小さくする方向に変化させた3種類の試験体を考案し、作製した。

結果として、水セメント比が小さいモルタルでは、周辺湿度が変化しても水分量の変化が小さく、モルタル全体の反射係数や比誘電率の変化が抑制されて、ロバスト性の向上が確認された。

今後、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、ポリプロピレン添加の有効性に関する定量的な評価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の影響などが挙げられる。

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も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) 林達郎, 高井伸一郎: 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～, 奈良県産業振興総合センター研究報告, No.47, pp.11-15, 2021
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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