

モルタルを用いた電波吸収材の開発（第3報）

～周辺湿度の変化に対するロバスト性が向上したモルタルの特性～

林 達郎^{*1)}, 高井 伸一郎^{*2)}

Research on Radio Wave Absorber Composed of Mortar (3rd Report)

～Property of Absorber Improved Robustness

against Changes in Ambient Humidity～

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

無線通信の用途やエリアの拡大にともない、電波の相互干渉など諸問題への対策に電波吸収材が利用されている。汎用の建設材料であるモルタルを用いた電波吸収材が実現できれば、屋内外の幅広い用途に利用可能であるが、周辺湿度の変化にともない含水量が変化して、結果的に電波吸収特性に変化が生じやすいことが課題の一つである。前報では、水セメント比の調整やプラスチックの添加により、周辺湿度の変化に対するロバスト性が向上した事例を報告した。本報では、炭素添加率を段階的に変えたときや、前報と異なる種類のプラスチックを添加したときの特性について実験的に検討した。結果として、電波吸収特性が得られる炭素添加率には、一定の変化幅が許容されることがわかった。また、種類が異なるものの比誘電率が近似のプラスチックを添加した事例では、同等の電波吸収特性が得られた。

1. 緒言

電波の反射を抑制する電波吸収材は、電子機器から生じる電磁ノイズに対する規制をはじめ、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が考案され、電子機器の周辺をはじめ我々の身のまわりの様々な場所で利用されている。

筆者らは、汎用の建設材料であるモルタルに着目し、屋内外の幅広い用途に利用可能な、低コスト電波吸収材として構成することを目指している。

初報³⁾では、モルタルに炭素粉末を添加することで導電性を付与した試験体において、20 dB を超える電波吸収特性が得られることを示した。一方、試験体が水分を多く含む湿潤状態（Wet）と、乾燥した気乾状態（Air Dry）では、電波吸収特性のピーク周波数や減衰レベルに大きな差が生じることから、雨水暴露が想定される屋外使用には、周辺湿度の変化に対するロバスト性の向上が課題であると結論に記した。

第2報⁴⁾では、その対策として、モルタルへの含水を抑制する方法を提案した。モルタルに水分が浸入する空隙を減らすため、水セメント比を小さく設計したうえ、細骨材の一部を、吸水しにくいプラスチックに置換した試験体で

は、異なる含水条件下における電波吸収特性に生じる差は小さくなり、ロバスト性の向上が確認された。ただし、良好な電波吸収特性が得られる炭素添加率の変化幅について、検討の余地を残した。

本報では、前報の追加検討として、ロバスト性が向上したモルタルを対象に、炭素添加率を段階的に変えた試験体を用いて、添加率の最適範囲を探索、検討した。

次に、モルタルへのプラスチック添加は、含水を抑制する目的の他に、将来的な廃プラスチック利用法の一つとして検討することができる。またその場合、前報で添加したポリプロピレンに限らず、他の汎用プラスチックが混在することが想定される。そこで、ポリプロピレンとともに廃プラスチックに含まれる可能性が高いポリエチレンを例として採り上げ、ポリプロピレンの代替としてポリエチレンを添加したモルタルにおける電波吸収特性を考察したので、以下に報告する。

2. 実験方法

2.1 目的

ロバスト性が向上したモルタルを対象に、含水状態が変化しても良好な電波吸収特性が得られる炭素添加率の探索を目的とする。

*1) 環境技術支援科（当時：機械・電気・材料グループ）、*2) 村本建設株式会社

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、化学的性質を、図 1 に外観例を示す。

表 1 使用材料と物理的、化学的性質

セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15 g/cm ³ , 比表面積: 3450 cm ² /g
ポリプロピレン (PP)	密度: 0.90 g/cm ³
炭素粉末 (CP)	粒径: 0.3 mm以下, 密度: 2.13 g/cm ³ 比表面積: 1310 cm ² /g
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系化合物
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体



図 1 試験体の外観例

表 2 に試験体の配合仕様を示す。水セメント比は、前報においてロバスト性の向上が確認できた 30 % とした。また、モルタルへの含水をさらに抑制する目的で、ポリプロピレン (PP) の添加率を前報の 20 % から 32 % に高めたうえ、炭素 (CP) の添加率を 3 %, 4 %, 5 %, 6 %, 7 %, 8 % の 6 種類変化させた。

表 2 試験体の配合仕様 (重量%) と記号

記号	配合	ポリプロピレン PP (%)	炭素粉末 CP (%)
PP+CP3%	32	32	3
PP+CP4%			4
PP+CP5%			5
PP+CP6%			6
PP+CP7%			7
PP+CP8%			8

2.3 材齢の目安と含水状態

図 2 に材齢の目安と含水状態を示す。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。

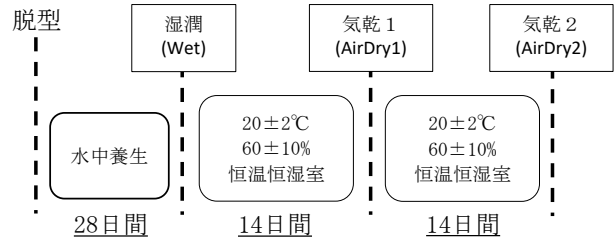


図 2 材齢の目安と含水状態

2.4 測定項目

まず、各含水状態における含水量の変化を定量的に把握するため、乾燥率の測定を行った。

次に、各含水状態において、事実上の電波吸収特性を示す反射係数の測定を行った。さらに、透過係数の測定結果から各含水状態における比誘電率を求めた。

それぞれの測定、計算方法を次節より示す。

2.5 乾燥率の測定

乾燥率 D は、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

電波吸収特性を示す反射係数 R は、図 3 に示す測定系⁵⁾により、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。

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

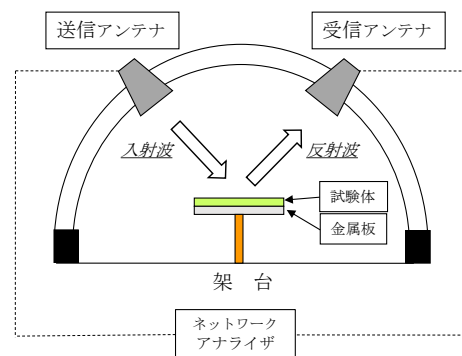


図 3 反射係数の測定系

試験体は一辺が 300 mm であるため、一般には 2 GHz ($\lambda \approx 150$ mm) 以上の周波数が安定した測定帯域⁶⁾となる。ここでは、2 GHz 以下を参考値として取り扱う前提で 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 複素比誘電率の測定

反射係数に影響を与えるパラメータとして考察に利用するため、試験体の複素比誘電率を求めた。高周波における複素比誘電率の直接測定は困難なため、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^{7,8)}により求めた。

透過係数の測定には、図4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^{9,10)}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。

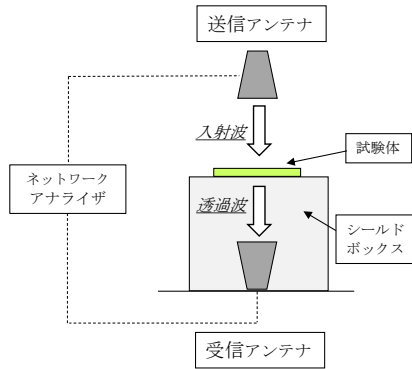


図4 透過係数の測定系

3. 実験結果

3.1 乾燥率

モルタルへの含水をさらに抑制する試みとして、ポリプロピレン添加率を前報の20%から32%に高めた効果を確認する。例として、炭素添加率3%の試験体に着目して、湿潤状態の日を起点に、気乾1、気乾2の状態へ移行したときの乾燥率を図5に示す。また、比較のため、前報におけるポリプロピレン添加率20%、炭素添加率3%の試験体の乾燥率を図中に重ねて示す。

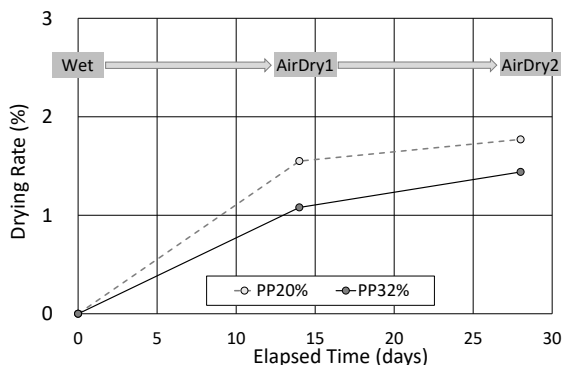


図5 乾燥率の測定結果

いずれも、日数の経過にともない乾燥率が高くなる傾向がみられる。ただし、本報で作製したポリプロピレン添加

率32%の試験体の方が、取れんする乾燥率がわずかに低く、言い換えれば湿潤から気乾2の状態に至るまでの質量差が小さい。このことから、ポリプロピレン添加率を高めたことで、水中養生から取り出した直後の湿潤状態における含水がさらに抑制された結果と推察される。

3.2 反射係数

炭素添加率が異なる6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6に示す。

いずれの試験体でも、含水状態に関わらず1.8 GHz~2.4 GHzの帯域において15 dBを超える減衰がみられる。また、含水状態の違いによって生じるピーク周波数のシフトは、約0.3 GHz内に収まっていることから、周辺湿度の変化に対するロバスト性が保たれている。

炭素添加率が3%の試験体では、湿潤で2.2 GHz付近に大きな減衰がみられ、気乾1、気乾2ではピーク周波数が2.4 GHz付近にシフトしている。また、湿潤における減衰が最も大きく、乾燥が進んだ気乾2では小さくなる。

次に、炭素添加率が最も高い8%の試験体では、湿潤で1.8 GHz付近にみられる減衰が、気乾1、気乾2では1.9 GHz付近にシフトしている。ただし、3%の試験体とは逆に、湿潤における減衰が最も小さく、乾燥が進んだ気乾2で減衰が大きくなる傾向にある。

このことは、炭素添加率が3%の試験体では、炭素による導電性が支配的な気乾2において導電性が不足しており、含水による導電性が加わる湿潤で適値であると推察される。

また、同様に考察すると、炭素添加率が8%の試験体では、炭素による導電性が支配的な気乾2において適値となり、含水による導電性が加わる湿潤では過剰であるため、モルタル表面における電波の反射が強まり、減衰が小さくなったと推察される。

炭素添加率が6%の試験体では、いずれの含水状態においても大きな減衰が得られることから、本報における配合仕様において、最も優れた電波吸収性が得られる炭素添加率は6%と考えられる。また、良好な電波吸収性が得られる炭素添加率の範囲は、4%~7%程度と考察できる。

3.3 複素比誘電率

電波吸収材の反射係数に直接的な影響を与えるパラメータとして複素比誘電率が知られている。ここで、最も安定した電波吸収性が得られる炭素添加率が6%の試験体を例に、複素比誘電率を測定した結果を図7に示す。

なお、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。

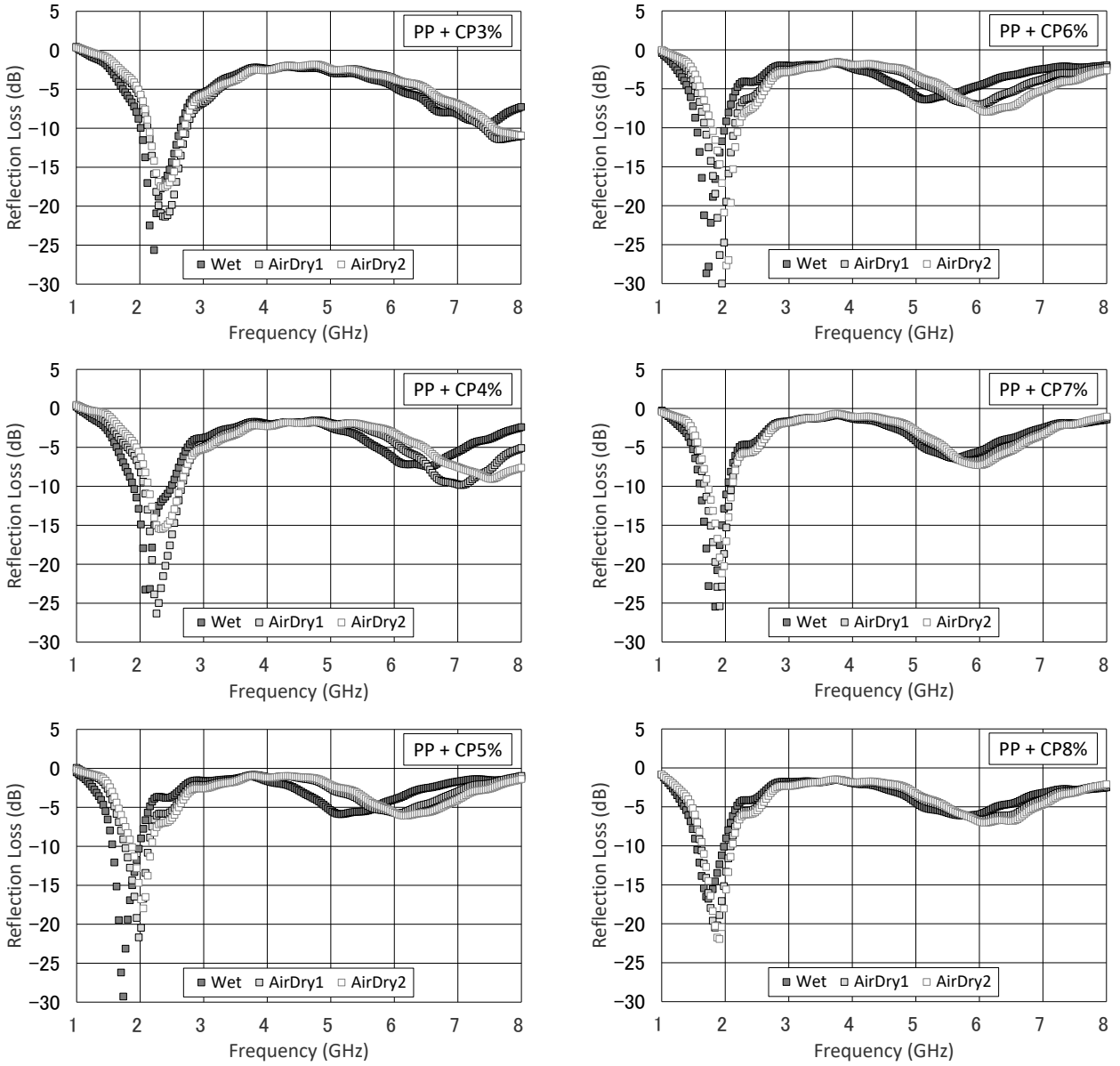


図 6 ポリプロピレンを添加した試験体の反射係数測定結果

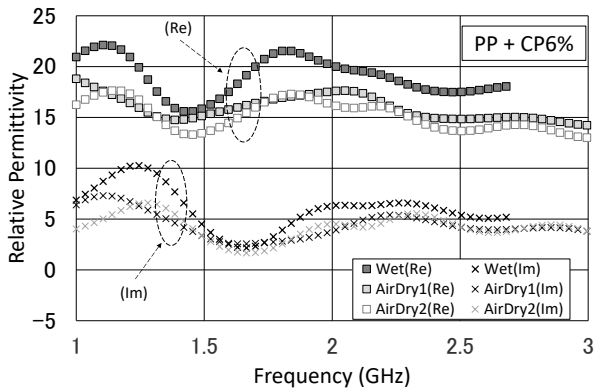


図 7 複素比誘電率 (PP+CP6%) の測定結果

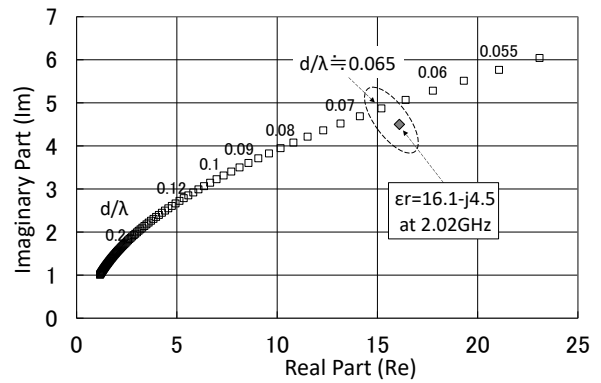


図 8 無反射曲線による考察

図7より、湿潤から気乾1、気乾2へと乾燥が進むにつれて、実数部、虚数部ともに小さくなる傾向がみられる。

次に、炭素添加率が6%の試験体において、2GHz付近にみられる大きな減衰が、複素比誘電率に起因するものであるか、無反射条件の曲線(=無反射曲線)と照らし合わせて考察する。

まず、図6の(PP+CP6%)において、気乾2の状態では2.02GHzに約28dBの減衰を示す箇所に着目する。この周波数におけるモルタルの複素比誘電率は、図7から実数部16.1、虚数部4.5と読み取れる。次に、この値を無反射曲線に重ねて記した結果を図8に示す。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(λ)のパラメータ d/λ である。

図8に記した実数部16.1、虚数部4.5の点は、図中央部付近の無反射曲線の下方に位置しており、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/λ は0.065である。

これより試験体の厚みが10mmの場合に減衰が得られる波長は理論的に15.4cmと求まり、周波数に変換すると1.95GHzとなる。

図6の(PP+CP6%)において、大きな減衰がみられたことは、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。

4. 考察

最後に、ポリプロピレンとともに廃プラスチックに含まれる可能性が高いポリエチレンを例として採り上げ、ポリプロピレンの代替にポリエチレンを添加したモルタルによる電波吸収特性を考察する。これらのプラスチックは、いずれも比誘電率が2.3前後であることが知られている。

公平な比較のため、試験体に添加するプラスチックの種類を除き、使用材料は表1のとおりとした。試験体の形状、大きさ、厚みも同一である。

試験体の作製に際し、水セメント比は30%、ポリエチレン(PE)添加率は32%で統一したうえ、炭素添加率を5%、6%の2種類で変化させた。

炭素添加率が異なる2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9に示す。これより、図6のポリプロピレンを添加した試験体と比較して、炭素添加率がいずれの試験体についても、減衰がみられる周波数や減衰量に大きな違いはみられない。

モルタルへの含水を抑制するために添加するプラスチックは、比誘電率の値が近ければ、モルタル全体の複素比誘電率に影響を与えないため、結果的に電波吸収特性にも大きな差が生じなかった事例と捉えることができる。

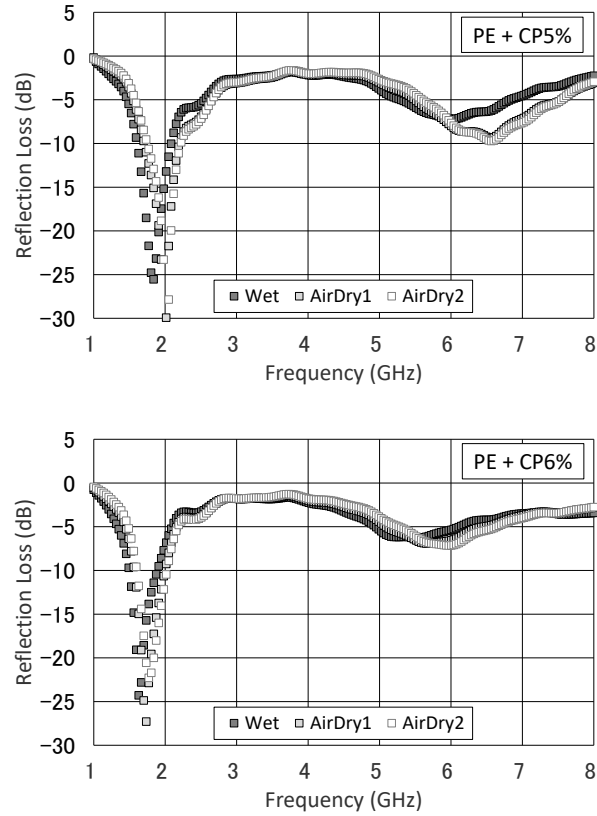


図9 ポリエチレンを添加した試験体の反射係数測定結果

5. 結言

ロバスト性が向上したモルタルを対象に、いずれの含水状態においても良好な電波吸収特性が得られる炭素添加率を探索、検討した。結果として、本報の設計条件下において最も優れた電波吸収性が得られる炭素添加率は6%で、良好な電波吸収性が得られる炭素添加率の範囲は4%~7%であった。ただし、炭素の添加がモルタル全体の導電性や複素比誘電率に与える効果については、使用材料によって大きく変化することから、材料設計ノウハウとして一般化するためには、含水状態ごとの体積抵抗率などのパラメータを追加検討して蓄積する必要がある。

ポリプロピレンの代替としてポリエチレンを添加したモルタルの電波吸収特性を考察した結果からは、比誘電率が近似のプラスチックを添加する場合に、同等の電波吸収特性が得られる事例を示した。将来的な廃プラスチック利用法の一つとして、さらに検討を進めたい。

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ご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, p.11-15, 2021
- 4) 林達郎, 高井伸一郎 : 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～, 奈良県産業振興総合センター研究報告, No.48, p.6-10, 2022
- 5) 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, p.20-22, 2006
- 6) 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
- 7) 橋本修 : 高周波領域における材料定数測定法, p.139-140, 森北出版, 2003
- 8) 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, 2016
- 9) 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, p.1-5, 2013
- 10) 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, G7-1, 平成25年電気関係学会関西連合大会, 2013