

# 論文 電気炉酸化スラグモルタルの準マイクロ波帯における電波吸収特性

大羽 慧\*1・伊藤 洋介\*2・河辺 伸二\*3

**要旨：**電気炉酸化スラグ（以下、「スラグ」という）は電波を吸収し、発熱する特性を有する。セメントとスラグの混合粉体、及びスラグを骨材としたモルタルの反射減衰量を測定し、スラグの電波吸収特性の変化を確認した。混合粉体及びスラグモルタルはどちらも反射減衰量が高くなる一定の周波数帯（以下、「ピーク」という）が存在し、ピークは供試体の調合及び厚さに影響されることが分かった。また、スラグを骨材としたスラグモルタルと電波をほとんど吸収しない砂を骨材とした砂モルタルを重ね合わせて測定を行ったところ、砂モルタルの厚みによってピークが変化することが分かった。

**キーワード：**電気炉酸化スラグ、モルタル、融雪、電波吸収、発熱

## 1. はじめに

降雪地域において、除雪作業は多大な労力を要する。特に、高齢者にとってその負担は大きい。日本は1995年に高齢社会、2007年に超高齢社会となり、人口に占める高齢者の割合が増え続けている。

一方、一般道路は除雪車によって除雪が可能であっても、各戸敷地内、特に玄関から前面道路までの除雪は手作業で行われることも多い。概念を図-1に示す。

よって、高齢者が自宅周辺、特に玄関から前面道路までの区間を十分に除雪できず、外出が困難になるなどの問題が予想される。

これに対応して、融雪設備等を導入することにより、雪を溶かして除去することも考えられる。従来の融雪方法として、融雪剤の散布や電熱線、地下水を用いた融雪

装置などが挙げられる。しかし、融雪剤はコンクリートや植物への塩害や鉄骨の腐食の原因となる。また、電熱線は断線や漏電の恐れ、メンテナンス性、消費電力の大きさ、立ち上がりの遅さなどに問題がある。地下水による融雪は地盤沈下の恐れや地下水に含まれる鉱物による路面の汚損などの問題がある。

そこで著者らは、これら問題を解決するため、産業廃棄物である電気炉酸化スラグ（以下、「スラグ」という）が、磁性損失によって電波を吸収し発熱する性質<sup>1)</sup>に着目し、これを骨材として用いた発熱モルタルブロックに電波を照射することで融雪する融雪用発熱モルタルブロックシステムを研究してきた<sup>2)</sup>。

本研究は発熱モルタルブロックの電波吸収部分（以下、「発熱体」という）の形状および調合が電波吸収特性に及ぼす影響を確認し、良好な電波吸収特性を示す発熱体を設計するための基礎資料を得ることを目的とする。

## 2. 融雪用発熱モルタルブロックシステム

融雪用発熱モルタルブロックシステムは主に、電波発振器、漏洩導波管、発熱モルタルブロックの3つによって構成される。構成を図-2に示す。

電波発振器は、普及しているため安価に入手できる周波数2.45GHz（準マイクロ波）用のマグネトロンを用いる。漏洩導波管は、ブロックが設置しやすい角形で、2.45GHzの電波を十分に通すことができる外径100×50mmの鋼管を用い、上面に電波漏洩用のスリットを設ける。発熱モルタルブロックは、発熱体、電波を反射する反射材、発熱体を支持する砂モルタルによる複層構造となっている。発熱モルタルブロックの断面を図-3に示す。

電波発振器から出力された電波は漏洩導波管に供給さ

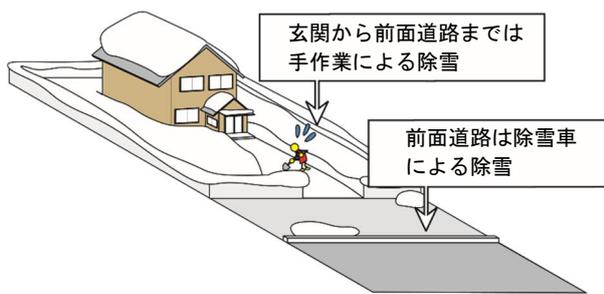


図-1 降雪地域の除雪の現状

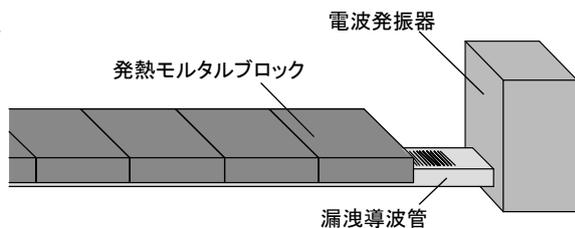


図-2 融雪用発熱モルタルブロックシステム

\*1 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科 (学生会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 助教 修士(工学) (正会員)

\*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

れる。漏洩導波管に供給された電波は、漏洩導波管上面のスリットを通して発熱モルタルブロックに照射される。

発熱モルタルブロックの表層付近に位置する発熱体が電波を吸収し、熱に変換するため、表層は迅速かつ効率的に加熱される。また、発熱体上面に沿わせて反射材を設けることで、発熱体の電波吸収性能を向上し、外部への電波漏洩を防止する。

融雪用発熱モルタルブロックシステムは、発熱モルタルブロックが独立した構造となっているため、破損した場合でも交換が容易でメンテナンス性が高い。また、発熱モルタルブロック自体が発熱するため、発熱部分が断線する心配も無い。

### 3. 電気炉酸化スラグ

スラグは再生鉄を生産する際に生じる産業廃棄物を用いる。本研究では粒度 0.3mm 以下、絶乾密度 3.52～3.89g/cm<sup>3</sup>の電気炉酸化スラグを用いた。スラグの外観を写真-1に、スラグの組成を表-1に示す。スラグは多数の酸化金属を含むが、中でも鉄の酸化物を多く含む。

### 4. Sパラメータ測定法

供試体の電波吸収性能は、ネットワークアナライザによるSパラメータ測定法によって評価する。本測定法により反射減衰量を求め、これを比較する。Sパラメータ

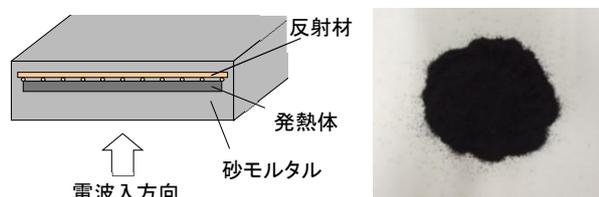


図-3 発熱モルタルブロックの断面



写真-1 電気炉酸化スラグ

表-1 電気炉酸化スラグの組成

|      | 化学組成(%) |                  |      |      |       |                                |                                |                                |                  |                               |       | 合計    |
|------|---------|------------------|------|------|-------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|-------|-------|
|      | CaO     | SiO <sub>2</sub> | MnO  | MgO  | FeO   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | S     |       |
| 平均値  | 19.53   | 12.92            | 5.66 | 4.57 | 19.67 | 24.13                          | 8.40                           | 1.97                           | 0.42             | 0.33                          | 0.030 | 97.77 |
| 標準偏差 | 3.38    | 2.99             | 0.72 | 1.44 | 4.91  | 8.50                           | 3.08                           | 0.37                           | 0.12             | 0.065                         | 0.020 | 0.59  |

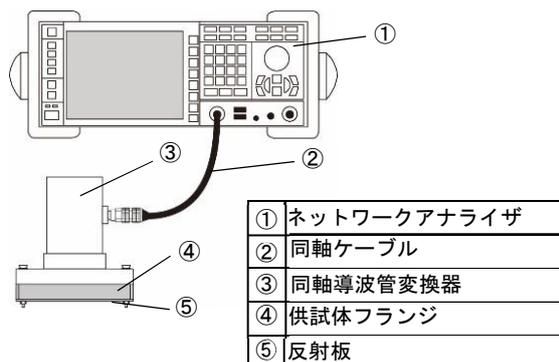


図-4 Sパラメータ測定装置

測定法による反射減衰量測定装置を図-4に示す。

測定は 1port 測定とし、同軸導波管変換器の端面は金属板によって短絡する。ネットワークアナライザの port1 から 1.5GHz～2.7GHz の電波を送信し、同軸ケーブルと同軸導波管変換器を通して、フランジに充填した供試体に照射する。この電波の一部は供試体によって熱に変換されて吸収される。供試体を透過した電波は反射板によって反射され、供試体表面で反射した電波と共に port1 に戻って受信される。ネットワークアナライザにより送信波に対する受信波の割合である反射係数 S が計算される。ベクトル量を複素数で示す S の実部を a、虚部を b とすると、S の絶対値|S|は式(1)で与えられ、式(2)より、電波が供試体によって吸収されて熱になり減衰した割合を示す反射減衰量 RL(dB)を求める<sup>3),4)</sup>。

$$|S| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (1)$$

$$RL = -20 \log|S| \text{ [dB]} \quad (2)$$

本研究では、この反射減衰量の値を比較し、供試体の電波吸収量を評価する。

### 5. セメント・スラグ混合粉体の反射減衰量の測定

#### 5.1 測定概要

発熱体の構成材料であるセメントとスラグを混合した粉体の調査及び供試体厚が電波吸収特性に及ぼす影響を確認し、発熱体の設計の基礎資料を得ることを目的とする。

調査は、粉体のセメントとスラグを質量比 0:10～10:0 まで、スラグを 1/10 ずつセメントに置換した計 11 種類とする(以下、調査は「セメント:スラグ」で示す)。厚さは 1mm ごと、8～16mm までの 9 種類の金属製のフラン

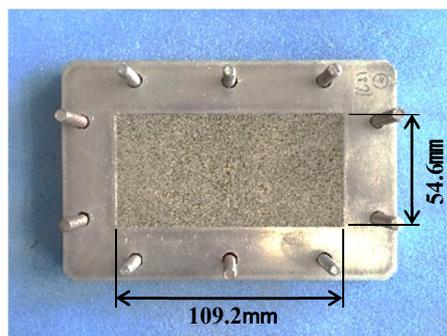


写真-2 混合粉体の供試体

ジに各粉体を充填して表面をすり切って制御する。供試体を写真-2に示す。これらの反射減衰量をSパラメータ測定法により求める。

## 5.2 測定結果と考察

供試体厚 9~11mm における周波数と調合, 反射減衰量の関係を図-5から図-7に示す。図-5では供試体厚 9mm において 2.66GHz, 図-6では供試体厚 10mm において 2.39GHz, 図-7では供試体厚 11mm において 2.09GHz のように, それぞれの供試体厚で反射減衰量が高くなる一定の周波数帯 (以下, 「ピーク」という) が存在することがわかる。ピークは供試体が厚くなるほど, 低周波側に移動する。これは周波数と波長は反比例の関係にあり, 供試体厚と波長の関係の変化が, 電波吸収性能を変化させるためと考える。また, スラッグの割合が大きくなるにつれてピークにおける反射減衰量が高くなることもわかる。スラッグの割合が 6 割以下になると, どの供試体厚においても, ほとんど電波を吸収しない。これは, スラッグには, 調合割合が一定以下になると吸収性能を発揮しなくなる特性があるためと考える。よって混合粉体は, スラッグの割合と充填厚さを制御することで, 任意の周波数における反射減衰量を高めることができる。

周波数 2.45GHz における供試体厚と調合, 反射減衰量の関係を図-8に示す。測定範囲内において, 調合 0:10 で供試体厚 10mm の反射減衰量が最も高く, 18.7dB であった。調合および供試体厚を変化させると反射減衰量は低下し, 調合 4:6~10:0 及び供試体厚 15mm 以上においては, ほとんど電波を吸収しない。

2.45GHz における供試体厚 10mm の反射減衰量と調合の関係を図-9に示す。調合 10:0~5:5 においては, スラッグの質量比増加に対応して, 反射減衰量は緩やかに増加している。しかし, 調合 5:5~0:10 においては, 反射減衰量は急激に増加している。よって, 電波吸収量とスラッグ質量比の関係は, 比例関係にならない。また, セメントとスラッグの混合粉体によって, 一定の電波吸収特性を

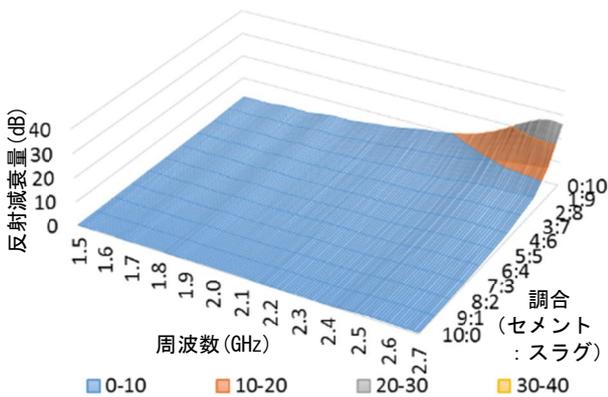


図-5 9mm 厚粉体における調合と周波数, 反射減衰量の関係

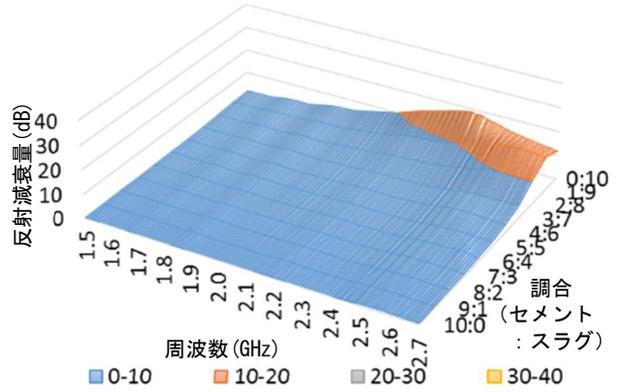


図-6 10mm 厚粉体における調合と周波数, 反射減衰量の関係

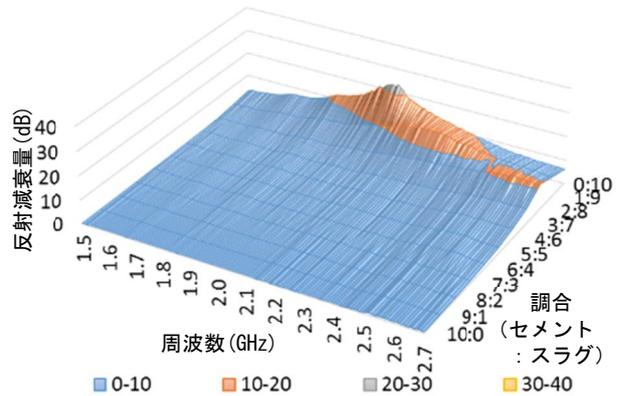


図-7 11mm 厚粉体における調合と周波数, 反射減衰量の関係

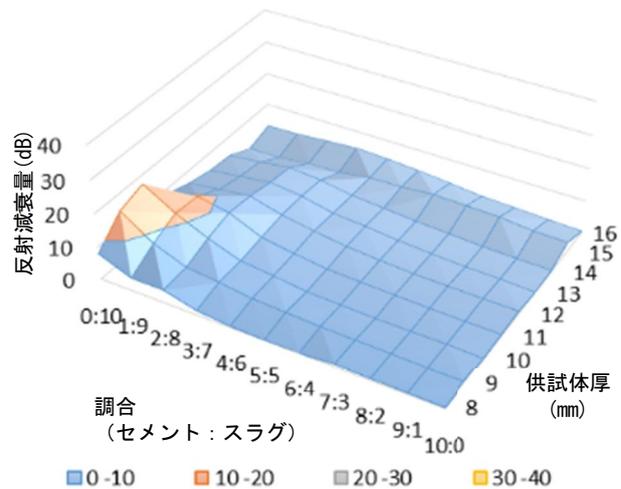


図-8 周波数 2.45GHz における供試体厚と調合, 反射減衰量の関係

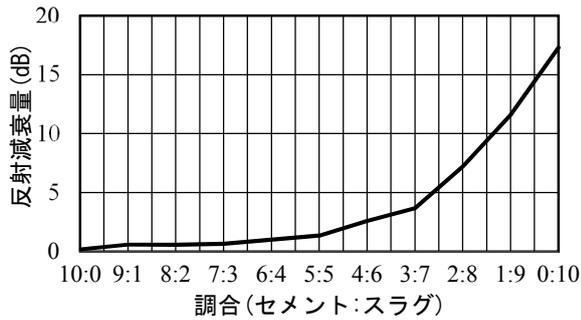


図-9 10mm厚粉体供試体の周波数 2.45GHz  
における調合ごとの反射減衰量

得るためには、少なくともスラグの質量比が6割を超える必要があり、可能な限り、スラグの質量比を高くすることで好適な電波吸収特性が得られると考える。

## 6. スラグモルタルの反射減衰量の測定

### 6.1 測定概要

スラグとセメントを混合した粉体に、水を加えて混練し、所定の養生を行ったモルタル（以下、「スラグモルタル」という）の調合及び供試体厚が電波吸収特性に及ぼす影響を確認する。

調合は、セメントとスラグを質量比 2:8～7:3 まで、スラグを 1/10 ずつセメントに置換した計 6 種類とする。融雪用発熱モルタルブロックの発熱体として、寒冷地において使用することを想定し、凍害防止と多量の吸水による電波吸収特性変化を防止するため、防水剤をセメントに対して 3% 添加する。また、施工性向上のため調合 2:8 のみ高性能 AE 減水剤をセメントに対して 0.7% 添加する。調合を表-2 に、防水剤の主な組成を表-3 に示す。厚さは 1mm ごと、4～14mm までの金属製のフランジにスラグモルタルを充填して、硬化後に表面を研磨することで制御する。気中養生 1 日、水中養生 5 日の後、100℃ の恒温恒湿器で 24 時間乾燥し、これを供試体とする。供試体を写真-3 に示す。これらのスラグモルタルの反射減衰量を S パラメータ測定法により求める。

### 6.2 測定結果と考察

供試体厚 7～9mm における調合と周波数、反射減衰量の関係を図-10 から図-12 に示す。図-10 から図-12 より、混合粉体の供試体の場合と同様に、それぞれの供試体厚でピークが存在することがわかる。ピークは供試体が厚くなるほど低周波側に移動する。また、調合が 4:6 の時に他の調合のピークと比較して反射減衰量が最も高くなることもわかる。よって、スラグモルタルは、調合におけるスラグの割合と充填厚みを制御することで、任意の周波数における反射減衰量を高めることができる。また、混合粉体と異なり、必ずしもスラグが多いほど反射減衰量は高くなっていないこともわかる。

表-2 モルタルの調合（質量比）

| 調合名   | セメント | スラグ | 水    | 防水剤  | 高性能 AE 減水剤 |
|-------|------|-----|------|------|------------|
| 2 : 8 | 2    | 8   | 0.9  | 0.06 | 0.014      |
| 3 : 7 | 3    | 7   | 1.35 | 0.09 | —          |
| 4 : 6 | 4    | 6   | 1.8  | 0.12 | —          |
| 5 : 5 | 5    | 5   | 2.25 | 0.15 | —          |
| 6 : 4 | 6    | 4   | 2.7  | 0.18 | —          |
| 7 : 3 | 7    | 3   | 3.15 | 0.21 | —          |

表-3 防水剤の組成（質量比）

| 高級脂肪酸塩等の混合物<br>ポリ(オキシエチレン)＝ノニルフェニル | エーテル | 水     |
|------------------------------------|------|-------|
| 30～35                              | <20  | 64～69 |

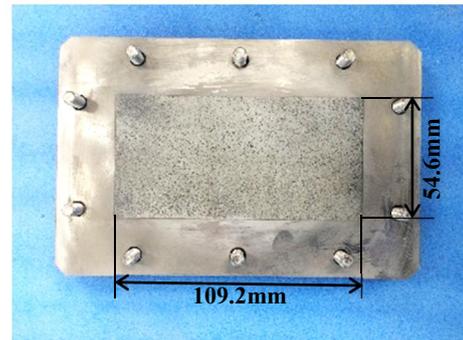


写真-3 スラグモルタルの供試体

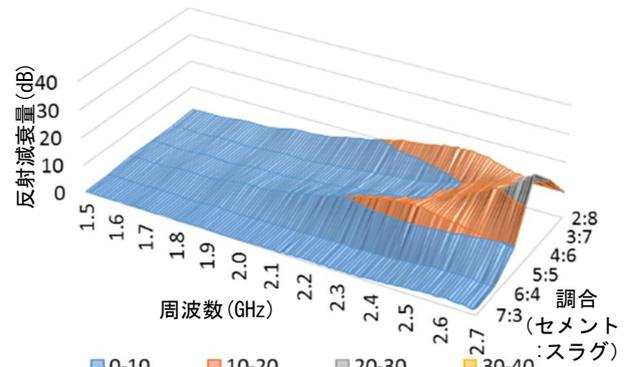


図-10 7mm厚モルタルにおける調合と  
周波数、反射減衰量の関係

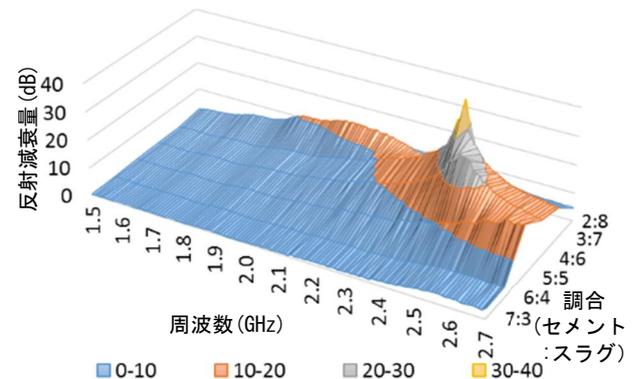


図-11 8mm厚モルタルにおける調合と  
周波数、反射減衰量の関係

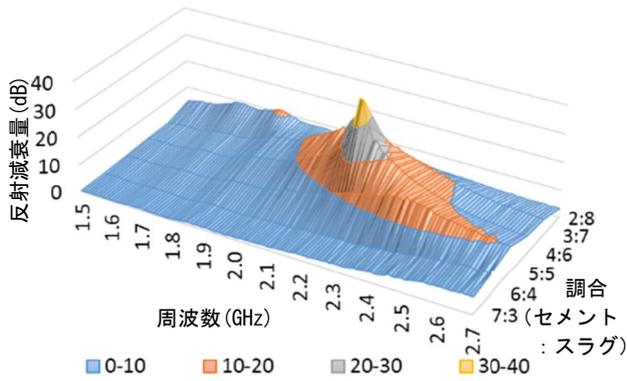


図-12 9mm厚モルタルにおける調合と周波数、反射減衰量の関係

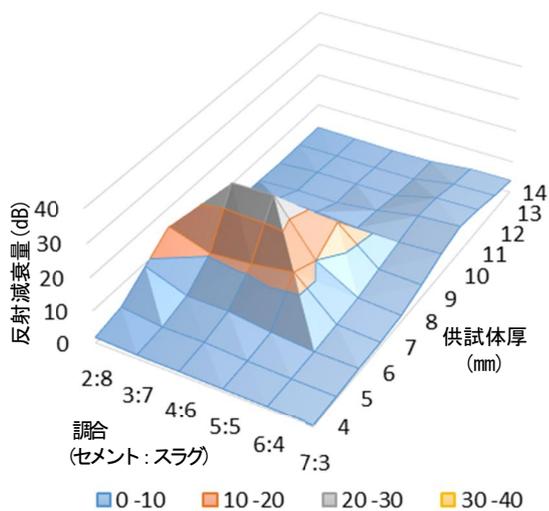


図-13 周波数 2.45GHz における供試体厚と調合、反射減衰量の関係

周波数 2.45GHz における供試体厚と調合、反射減衰量の関係を図-13 に示す。測定範囲内において、調合 4:6 で供試体厚 8mm の反射減衰量が最も高く、25.8dB であった。調合および供試体厚を変化させると反射減衰量は低下し、調合 6:4、7:3 及び供試体厚 6mm 以下、11mm 以上においてはほとんど電波を吸収しない。

## 7. スラグモルタルと砂モルタルの重ね合わせ測定

### 7.1 測定概要

発熱モルタルブロックの構成を想定し、発熱体であるスラグモルタルと発熱体下部を支持するための砂モルタルを重ねた状態で、電波吸収特性を評価し、砂モルタルの厚さが電波吸収特性に及ぼす影響を確認する。評価は S パラメータ測定法により求められる反射減衰量によって行う。

試験装置を図-14 に示す。上から、同軸導波管変換機、砂モルタルが充填された砂モルタルフランジ、スラグモルタルが充填されたスラグモルタルフランジ、短絡のた

めの反射板の順に重ねる。この状態で S パラメータ測定法による反射減衰量測定を行うと、ネットワークアナライザから出力された電波は、砂モルタル、発熱体であるスラグモルタルを通じて反射板で反射されることになる。よって、発熱モルタルブロックに電波が照射された場合を想定した測定ができる。

スラグモルタルフランジは前章において良好な結果が得られた調合 4:6、厚さ 8mm の供試体を用いる。砂モルタルフランジに用いる砂モルタルの調合はセメント:砂=1:3 とし、水セメント比を 45% とする。また、凍害防止と多量の吸水による電波吸収特性変化を防止するため、防水剤をセメントに対して 3% 添加する。砂モルタルの調合を表-4 に示す。4~14mm までの金属製のフランジに砂モルタルを充填して、硬化後に表面を研磨し、気中養生 1 日、水中養生 5 日の後、100℃の恒温恒湿器で 24 時間乾燥して、これを砂モルタルフランジとする。砂モルタルフランジを写真-4 に示す。砂モルタルフランジは組み合わせることで、砂モルタルの厚さを 4~41mm まで変更できる。

なお、データは省略するが、砂モルタルはスラグモルタルと異なり、スラグのように電波を吸収する材料が混入されていないため、単独ではほとんど電波を吸収することができない。

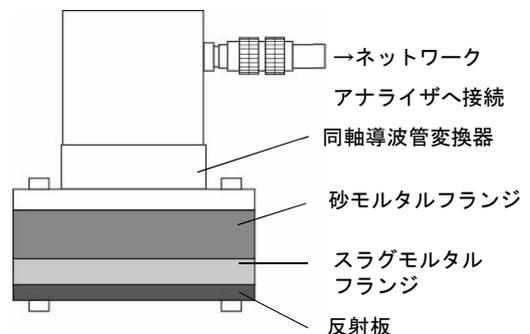


図-14 スラグモルタルと砂モルタルの重ね合わせ測定装置

表-4 砂モルタルの調合(質量比)

| セメント | 砂 | 水    | 防水剤  |
|------|---|------|------|
| 1    | 3 | 0.45 | 0.03 |

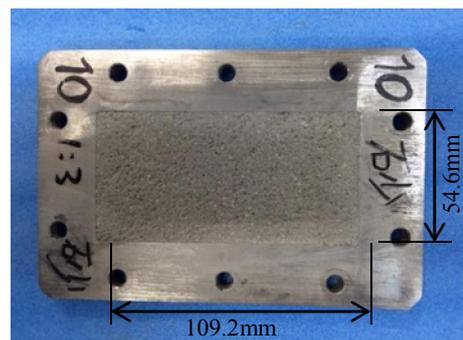


写真-4 フランジに充填した砂モルタル

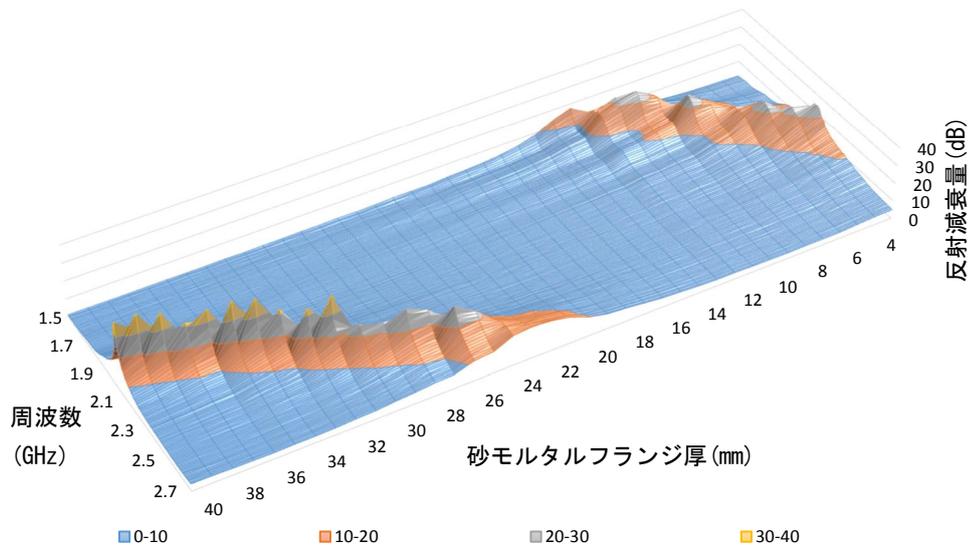


図-15 8mm厚4:6モルタルと砂モルタルの重ね合わせにおける砂モルタルフランジ厚と周波数、反射減衰量の関係

## 7.2 測定結果と考察

砂モルタルフランジ厚 4~41mm における調合と周波数、反射減衰量の関係を図-15 に示す。測定範囲内において、特定の供試体厚で特定の周波数に電波吸収のピークが存在する。このピークは砂モルタルが厚くなるほど低周波側に移動する。よって、砂モルタルは単独ではほとんど電波を吸収することができないが、スラグモルタルと重ね合わせる場合、その電波吸収特性に著しい影響を及ぼすと言える。

砂モルタルの厚さが増しても、ピークの反射減衰量に顕著な減少傾向は見られない。よって、砂モルタルの厚さを制御することで、スラグモルタルと砂モルタルを重ね合わせた際の、スラグモルタルの電波吸収性能の顕著な低下を防ぐことができる。2.45GHz においては、厚さ 29mm で最も高い反射減衰量が得られる。

ピークは砂モルタル厚 15mm を境に測定範囲内に存在しなくなり、21mm を境にもう一度現れ始めている。よって、ピークは砂モルタルの厚みに対して周期性を有する可能性がある。この周期性は、入射波が形成する定在波の波長と供試体厚の関係に起因すると考える。周期性を有する場合、周期に合わせて発熱モルタルブロックの設計を行えば、要求される強度を満足する厚さの発熱モルタルブロックを設計できる。

なお、砂モルタルの厚みが一定量増すごとにピークが移動する割合は、砂モルタルが厚くなるほど小さくなっている。

## 8. まとめ

本研究の測定範囲内において、以下のことが分かった。

- 1) 混合粉体は、セメント:スラグ=0:10 で供試体厚

10mm の反射減衰量が最も高く、18.7dB であった。

- 2) スラグモルタルは、調合 4:6 で供試体厚 8mm の反射減衰量が最も高く、25.8dB であった。
- 3) 混合粉体とスラグモルタルは、共にピークを有し、調合と供試体厚に影響を受ける。
- 4) 砂モルタルは単独ではほとんど電波を吸収しないが、スラグモルタルと重ね合わせる場合、その電波吸収特性に著しい影響を及ぼす。
- 5) 砂モルタルの厚さを制御することで、スラグモルタルと砂モルタルを重ね合わせた際の電波吸収性能の顕著な低下を防ぐことができる。2.45GHz においては、厚さ 29mm で最も高い反射減衰量が得られる。
- 6) スラグモルタルと砂モルタルを重ね合わせる場合、反射減衰量のピークは砂モルタルの厚みに対して周期性を有する可能性がある。

## 謝辞

本研究は平成 27 年度建設技術研究開発助成制度「政策課題解決型技術開発公募」(国土交通省)による助成金で行いました。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 電気炉酸化スラグ骨材の特殊機能材としての利用技術,株式会社星野産商,p.30,2012
- 2) 河辺伸二,池田哲夫,伊藤洋介:準マイクロ波による融雪用発熱モルタルブロックの研究,日本建築学会構造系論文集, No.586, pp.1~5, 2004.12
- 3) 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会:電磁波の吸収と遮蔽,オーム社,2014.5
- 4) 内藤喜之:電波吸収体,オーム社,1988