

論文 電気炉酸化スラグを用いたウェッジ型モルタルの電波吸収性能及び発熱性能

井上 裕太*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・田口 陽貴*4

要旨:融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収材層に使用される電気炉酸化スラグを骨材としたモルタル(以下,スラグモルタルという)は,平板形状で用いると顕著に電波を吸収する周波数帯(以下,ピークという)の変化で目的とする周波数における電波吸収性能が大幅に低下する。そこで理論上,ピークが変化しても電波吸収性能が低下しにくいウェッジ形状のスラグモルタルを検討する。本研究では,スラグモルタルのウェッジの数が電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにした上で,調合におけるスラグの割合がウェッジ型モルタルの反射減衰量と発熱性能に及ぼす影響を明らかにした。

キーワード:電気炉酸化スラグ,モルタル,ウェッジ,電波吸収,発熱

1. はじめに

降雪地における除雪作業は多大な労力を要し,各戸敷地内の玄関前から前面道路までは住人が自ら除雪を行う。この除雪作業は特に高齢者にとっては重労働である。除雪の労力を軽減するための融雪方法として,電熱線方式や散水方式,融雪剤の散布などが挙げられるが,これらの融雪方法にはそれぞれ問題がある。

著者らは,電波を吸収し,発熱することで雪を融かす融雪用発熱モルタルブロックシステム¹⁾を開発することによって,これらの問題の解決を図ってきた。融雪用発熱モルタルブロック²⁾は,図-1に示す通り,下から基材層,電波吸収材層,電波遮蔽材層の3層から構成される。電波吸収材層には,電波を吸収し,熱に変換する性質を持つ電気炉酸化スラグ(以下,スラグとする)を骨材としたモルタル(以下,スラグモルタルとする)を用いる。

当該システムでは,2.45GHzの電波を下方から照射する。照射された電波は,基材層を透過し,融雪面付近の電波吸収材層で吸収され,熱に変換されるため,素早く融雪を行うことができる。

本研究では,電波吸収性能を反射減衰量で評価する。反射減衰量は物体の複素比誘電率と複素比透磁率等によって定まる。スラグモルタルは図-1に示すように平板形状とした場合,反射減衰量と電波の周波数の関係において,顕著に電波を吸収する周波数帯(以下,ピークとする)が周期的に出現する。融雪用発熱モルタルブロックは十分な発熱性能を得るため,当該システムで使用する2.45GHz近傍でピークが現れるようにスラグの量を調整して調合する³⁾。しかし,ピークは含水率等の変化に影響⁴⁾を受けて推移する。これにより,目的とする周波数における反射減衰量が大幅に減少して十分な発熱

性能が得られなくなる場合がある。

そこで,図-2のように融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収材層のスラグモルタルをウェッジの形状(以下,ウェッジ型モルタルとする)にして,ピーク以外の周波数帯における反射減衰量の底上げを図る。なお,基材層には空気と誘電率がほぼ同等の発泡材料を用いる。

ウェッジ型モルタルの調合が電波吸収性能に及ぼす影響は既往の研究において明らかにされていない。そこで本研究では,特定の長さ範囲内におけるウェッジ型モルタルのウェッジの数が電波吸収性能に及ぼす影響を明らかにして最適なウェッジの数を定めた上,調合がウェッジ型モルタルの電波吸収性能及び発熱性能に及ぼす影響を明らかにする。これにより,ウェッジ型モルタルを設計するための基礎データを得る。

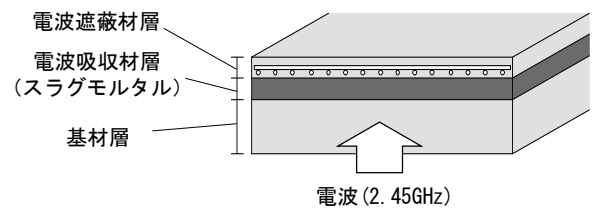


図-1 融雪用発熱モルタルブロックの断面

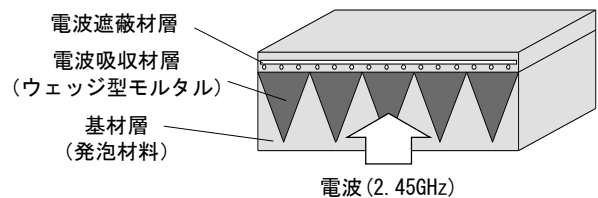


図-2 ウェッジ型モルタルを用いた融雪用発熱モルタルブロックの断面

*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 博(工)(正会員)

*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博(正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (学生会員)

2. ウェッジ型電波吸収体

ウェッジ型モルタルはウェッジ型電波吸収体の1種である。図-3にウェッジ型電波吸収体の寸法を示す。ウェッジ型電波吸収体のZ軸方向の長さを a 、X軸方向の長さを b 、Y軸方向の長さを c 、Z軸上の位置 z におけるX軸方向の長さを b_z とする。ウェッジ型電波吸収体を図-4のように十分に薄い層に分割する。分割した各層の複素比誘電率及び複素比透磁率を平均化して、均一な電気特性を持つ平板として扱うことで、ウェッジ型電波吸収体の反射減衰量を近似計算で算出できる⁵⁾。Z軸上の位置 z におけるXY平面内の断面を図-5に示す。この断面における電波吸収材料の占有面積 S_u と空気の占有面積 S_a は、それぞれ式(1)、式(2)で表される。

$$S_u = b_z \times c \quad (1)$$

$$S_a = bc - S_u \quad (2)$$

S_u と S_a を用いて複素比誘電率の平均 ϵ_{eq} 及び複素比透磁率の平均 μ_{eq} を求めると、式(3)、式(4)のように表せる⁵⁾。

$$\epsilon_{eq} = \frac{S_u \cdot \epsilon_r + S_a}{S_u + S_a} \quad (3)$$

$$\mu_{eq} = \frac{S_u \cdot \mu_r + S_a}{S_u + S_a} \quad (4)$$

ここで、 ϵ_r 、 μ_r は電波吸収材料の複素比誘電率及び複素比透磁率である。

多層型電波吸収体の構成を図-6に示す。1層目の規格化入力インピーダンス \dot{Z}_1 及び2層目の規格化入力インピーダンス \dot{Z}_2 は電波の波長 λ 、 n 層目の厚さ d_n 、 n 層目の複素比誘電率 ϵ_{rn} 、及び複素比透磁率 μ_{rn} 、虚数単位 j を用いて式(5)～式(7)で表せる⁶⁾。

$$\dot{Z}_1 = \sqrt{\frac{\mu_{r1}}{\epsilon_{r1}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{r1} \mu_{r1}} \cdot d_1) \quad (5)$$

$$\dot{Z}_2 = \sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{r2} \mu_{r2}} \cdot d_2 + \theta_1) \quad (6)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_{r2}}{\epsilon_{r2}}} \tanh \theta_1 = \dot{Z}_1 \quad (7)$$

これらを N 層まで拡大すると式(8)、式(9)で表せる⁶⁾。

$$\dot{Z}_N = \sqrt{\frac{\mu_{rN}}{\epsilon_{rN}}} \tanh(j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_{rN} \mu_{rN}} \cdot d_N + \theta_{N-1}) \quad (8)$$

$$\sqrt{\frac{\mu_{rN}}{\epsilon_{rN}}} \tanh \theta_{N-1} = \dot{Z}_{N-1} \quad (9)$$

式(5)～式(9)で算出した \dot{Z}_N を用いて反射係数 \dot{S} 及び反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ を式(10)、式(11)で表すことができる⁷⁾。

$$\dot{S} = \frac{\dot{Z}_N - 1}{\dot{Z}_N + 1} \quad (10)$$

$$RL = -20 \log_{10} |\dot{S}| \quad (11)$$

以上の式を用いてウェッジ型電波吸収体の反射減衰量を算出すると反射減衰量と周波数の関係は図-7のようになると推定される。平板形状の電波吸収体に比べて、

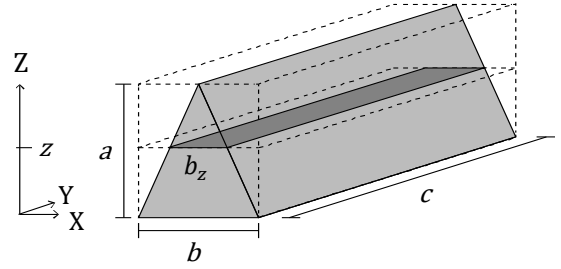


図-3 ウェッジ型電波吸収体の寸法

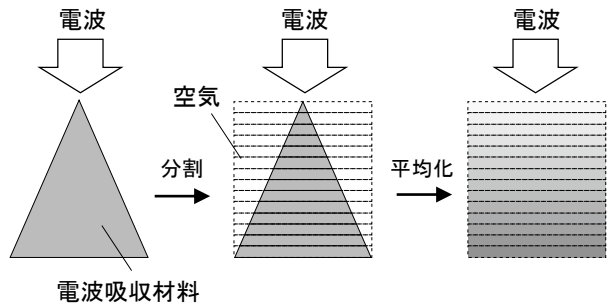


図-4 平板多層近似モデル

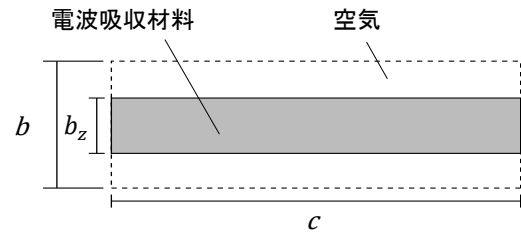


図-5 Z=zにおける断面寸法

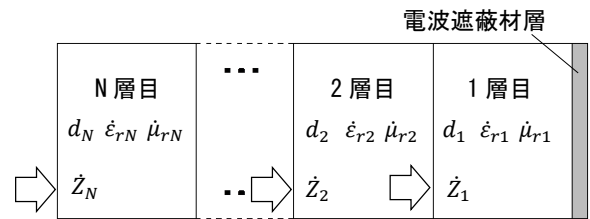


図-6 多層型電波吸収体の構成

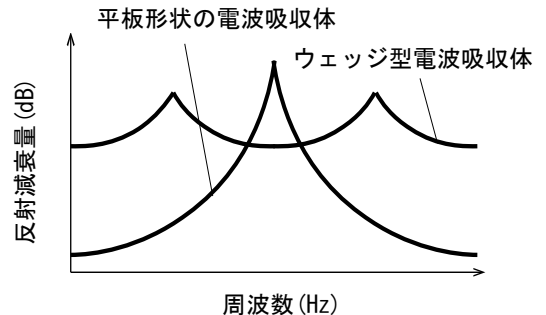


図-7 反射減衰量と周波数の関係 (概念)

ウェッジ型電波吸収体はピークが推移しても、目的とする周波数における顕著な反射減衰量の低下が起こりにくく、電波を照射した際に十分な発熱性能を得やすい。

3. 供試体

図-2の融雪用発熱モルタルブロックの電波吸収材層となるウェッジ型モルタルを供試体とする。ウェッジ型モルタルは電波が照射される側を電波照射側、電波照射側と対向し、融雪用発熱モルタルブロックが融雪する側を底面側とする。寸法は、底面 300mm×300mm、高さ 70mm とする。電波が照射される中心にウェッジの頂部が位置するように1供試体あたりのウェッジの数(以下、山数とする)は奇数とする。

本研究で用いるスラグモルタルの調合を表-1に示す。使用する供試体の山数は、製造上のコストを考慮して9を最大とし、細骨材として用いる山砂とスラグの容積比(以下、砂:スラグ比とする)=0:10の調合で山数1, 3, 5, 7, 9の供試体を作製する。砂:スラグ比の変化と反射減衰量又は上昇温度の関係を明らかにするため、砂:スラグ比=2:8, 4:6の調合でも山数9を作製する。底面の寸法を固定した上で、山数を変化させるため、各山数のウェッジ型モルタル1つ当たりの図-3におけるX軸方向の長さはそれぞれ、300mm, 100mm, 60mm, 43mm, 33mmとなる。

蛍光X線による無機元素の定性分析により得られたスラグの成分を酸化物に換算した質量比で表-2⁸⁾に示す。使用するスラグの粒径は0.3~0.6mmで、絶乾密度は3.49g/cm³、セメントは普通ポルトランドセメントとする。供試体は、気中養生1日、水中養生5日の後、恒温恒湿器を用いて、絶乾状態になるまで乾燥させる。

4. 測定方法

4.1 反射減衰量の測定

アーチ型測定装置を図-8に、供試体への電波の入射方向を図-9に示す。本測定では、アーチ型測定装置を用いてSパラメータ測定法により反射減衰量を測定する。電波はネットワークアナライザ(KEYSIGHT製N9951A)から発信され、アンテナ1(ダブルリジッドホーンアンテナ)を介して供試体に照射される。照射された電波は供試体により反射・吸収されるか、供試体を透過する。透過した電波は金属製の供試体設置台に反射され、供試体表面で反射された電波とともにアンテナ1を介してネットワークアナライザで受信される。

このとき、ネットワークアナライザにおける入射波を α_1 、反射波を β_1 とすると反射係数 \dot{S}_{11} は式(12)で示される。

$$\dot{S}_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (12)$$

\dot{S}_{11} はベクトル量であるので実部を a 、虚部を b 、虚数単位を j とすると、式(13)で表せる。これをスカラー量の反射係数 $|\dot{S}_{11}|$ に変換すると式(14)となる。この $|\dot{S}_{11}|$ を用いて式(15)から反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ を算出する⁷⁾。

$$\dot{S}_{11} = a + jb \quad (13)$$

$$|\dot{S}_{11}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (14)$$

$$RL = -20 \log_{10} |\dot{S}_{11}| \quad (15)$$

4.2 散乱量の測定

本測定は、図-8に示すアーチ型測定装置により図-9に示すX軸方向の散乱電波を測定する。ネットワークアナライザから約10dBmの電波を発振し、アンテナ1で供試体に照射する。供試体表面で斜方に反射した電波を

表-1 スラグモルタルの調合(容積比)

砂:スラグ比	セメント	水	山砂	スラグ
0:10	0.63	1	0	2.35
2:8	0.63	1	0.47	1.88
4:6	0.63	1	0.94	1.41

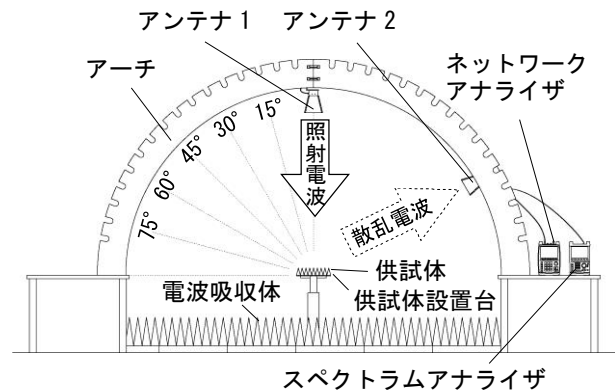


図-8 アーチ型測定装置

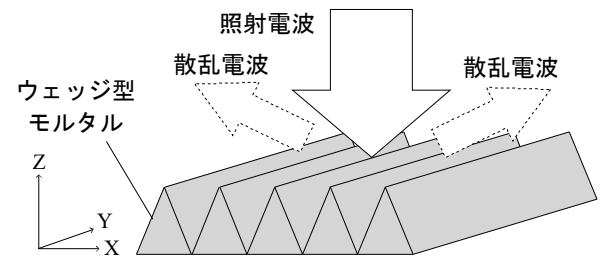


図-9 電波の入射方向

表-2 スラグ成分(質量比)

CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	合計
22.93	18.09	9.84	5.20	29.20	6.24	15.57	3.53	1.71	0.17	99.23

アンテナ 2 で受信し、スペクトラムアナライザで解析する。アンテナ 2 はアンテナ 1 を中心として左右に 15, 30, 45, 60, 75 度の位置に設置する。全位置での反射量の合計をウェッジ型モルタルの散乱量として評価する。

4.3 発熱性能の測定

発振器と漏洩導波管、ダミーロードを図-10のように接続した発熱装置を用いて、図-11のように設置したウェッジ型モルタルに電波を照射し、ウェッジ型モルタルの断面の発熱量及び最大の上昇温度となる位置（以下、発熱位置とする）を測定する。

中央部は断面の温度が確認できるように、2つのウェッジ型モルタルを長手方向に接続し、接続部分は電波吸収性能に影響を及ぼさないよう、中心位置から長手方向に50mmずらす。使用する漏洩導波管⁹⁾は、内寸46.8×96.8mm、厚さ1.6mmの角形鋼管に長さ30mm、幅5mmのスロットを10mm間隔で設ける。ウェッジ型モルタルは漏洩導波管から60mm離して⁹⁾設置する。

発振器から1kWの電波を10分間発振し、漏洩導波管を介してウェッジ型モルタルに照射する。照射終了後1分以内にウェッジ型モルタルの断面を赤外線サーモグラフィカメラ（日本アビオニクス製 R500EX）で撮影する。測定は各砂：スラグ比で4回ずつ行う。発熱量はウェッジ型モルタルの断面内の最高上昇温度で、発熱位置は底面からの距離で示す。

5. 山数が電波吸収性能に及ぼす影響

反射減衰量の測定と散乱量の測定により、ウェッジ型モルタルの最適な山数を検討する。2.45GHzにおける山数と反射減衰量の関係を図-12に、山数と散乱量の関係を図-13に示す。反射減衰量は山数9で最大の28.6dBとなる。ただし、本測定における反射減衰量は供試体表面で反射し、散乱した電波も含んだ値である。反射減衰量が大きくても、散乱した電波が大きい場合は十分な電波吸収性能があるとは言えない。

そこで図-13より、散乱量を比較する。参考値として、電波暗室で用いられるカーボンを含浸したピラミッド型電波吸収体および既往の研究²⁾で発熱・融雪性能が確認された融雪用発熱モルタルブロック（以下、既往の電波吸収体とする）の散乱量を併せて示す。ウェッジ型モルタルの散乱量は山数1の時が最も多く、既往の電波吸

収体の散乱量より多い-23.2 dBm となる。山数3以上になると既往の電波吸収体の散乱量を下回り、山数9のとき最も小さい-26.5dBmとなる。山数1の場合、電波の入射角度が45度を下回るが、山数3以上では、45度を上回る。これにより山数1の場合、電波が電波照射側に反射するため散乱量が大きくなり、山数3以上であれば、電波が底面側に反射し、両脇に設置されたウェッジ型モルタルで吸収されるため、散乱量は小さくなると考える。

ここで、山数を9より多くした場合、より電波吸収性能が高くなる可能性がある。しかし、山数を9より多く

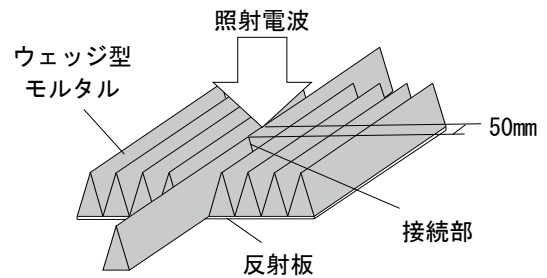


図-11 ウェッジ型モルタルの設置方法

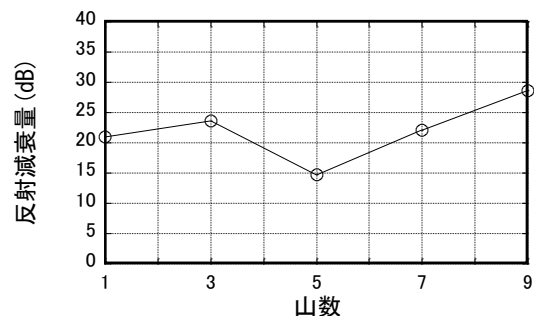


図-12 2.45GHzにおける反射減衰量と山数の関係

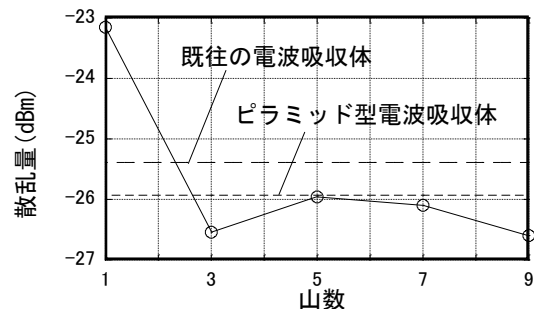


図-13 2.45GHzにおける散乱量と山数の関係

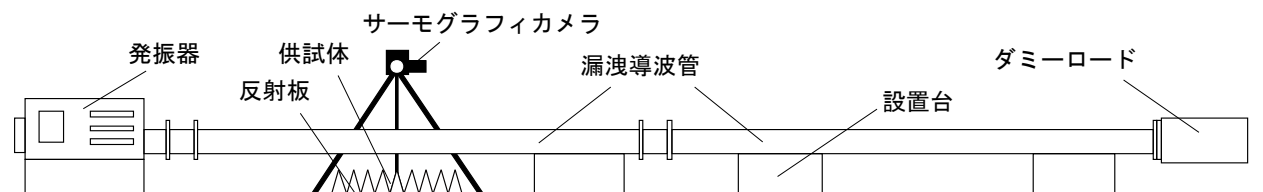


図-10 発熱装置

するとウェッジ型モルタルの型枠への充填が困難になり、著しく製造コストが高くなる。

以上より、ウェッジ型モルタルの山数は最も反射減衰量が大きく、最も散乱量が小さい9が適すると考える。

6. 調合におけるスラグの割合がウェッジ型モルタルの反射減衰量に及ぼす影響

反射減衰量の測定で、スラグの割合がウェッジ型モルタルの反射減衰量に及ぼす影響を検討する。砂：スラグ比ごとの反射減衰量と周波数の関係を図-14に示す。

図-14より、最も大きなピークはスラグの割合が高くなるにつれて低周波に推移しているため、ウェッジ型モルタルの調合におけるスラグの割合はピークに影響を及ぼす。ここで、式(5)～式(11)を用いると、電波吸収材料の複素比誘電率及び複素比透磁率が大きいほど、最大の反射減衰量をとるピークは低周波に推移すると分かる。スラグは山砂と比較して十分に複素比誘電率及び複素比透磁率が大きいので、スラグの割合が高いほどウェッジ型モルタルの複素比誘電率及び複素比透磁率が大きくなり、ピークが低周波に推移したと考える。

ウェッジ型モルタルは調合が変化しても最大の反射減衰量をとるピークが推移するのみで、2.45GHz近傍に存在する最初のピークはほとんど変化しない。よって、ウェッジ型モルタルは調合が変化しても、2.45GHzにおいて、顕著な反射減衰量の低下を生じにくいと考える。

2.45GHzにおいて、砂：スラグ比=0:10で反射減衰量は最大の23.7dBとなる。スラグの割合が低くなると減少し、砂：スラグ比=2:8で19.2dB、4:6で最小の14.5dBとなる。また、スラグの割合が高くなるほど最大の反射減衰量をとるピークが2.45GHzに接近し、スラグの割合が高いほど反射減衰量が高くなる。最も反射減衰量が高い砂：スラグ比=0:10以上に反射減衰量を高めるためには、スラグの焼成¹⁰⁾等で、ウェッジ型モルタルの複素比誘電率及び複素比透磁率を高めることが有効であると考えられる。

7. 調合におけるスラグの割合がウェッジモルタルの発熱性能に及ぼす影響

発熱性能の測定で調合におけるスラグの割合がウェッジ型モルタルの発熱性能に及ぼす影響を検討する。砂：スラグ比=4:6、2:8、0:10のウェッジ型モルタルに電波を照射した後、ウェッジ型モルタルの断面部を赤外線サーモグラフィカメラで撮影したものを写真-1～3に示す。発熱位置を×印で示し、実際の温度を隣に示す。測定開始時のウェッジ型モルタルの温度は砂：スラグ比=4:6が10.4℃、2:8が9.8℃、0:10が9.5℃であった。

砂：スラグ比=0:10のとき最大上昇温度は最も高い4.6℃となる。スラグ量が低くなるにつれて徐々に上昇温度が低下し、砂：スラグ比=4:6で最大上昇温度は2.7℃となる。この差は2.45GHzにおける反射減衰量の差によって生じたと考えられる。なお、反射減衰量には散乱量による減衰分が含まれるため、反射減衰量の差から想定される以上に最大上昇温度の差は大きくなっている。

次に、スラグの割合の変化が発熱位置に及ぼす影響を検討する。写真-1～3に示すA-A'線における温度の分布を図-15に、砂：スラグ比ごとの発熱位置を図-16に示す。なお、図-16の図中に示す線は各砂：スラグ比における4回の測定の平均値を示す。ウェッジ型モルタル

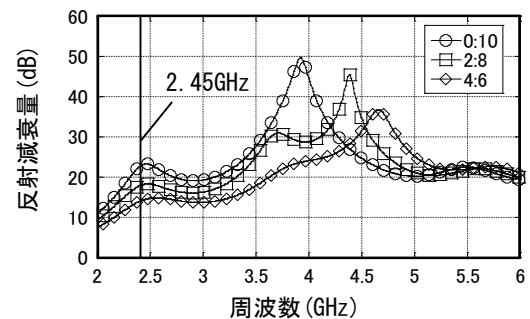


図-14 反射減衰量と周波数の関係

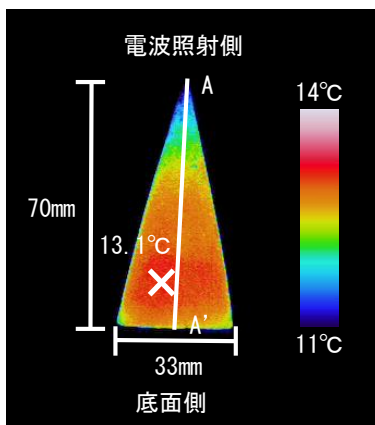


写真-1 砂：スラグ比=4:6のウェッジ型モルタル断面

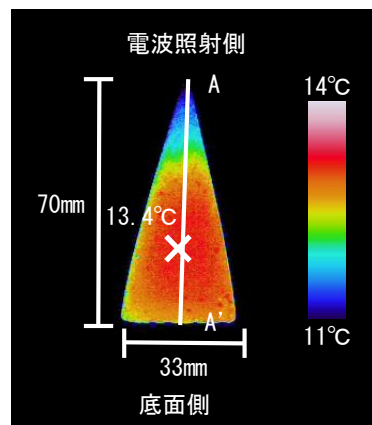


写真-2 砂：スラグ比=2:8のウェッジ型モルタル断面

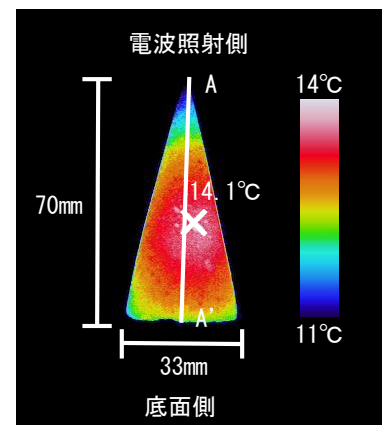


写真-3 砂：スラグ比=0:10のウェッジ型モルタル断面

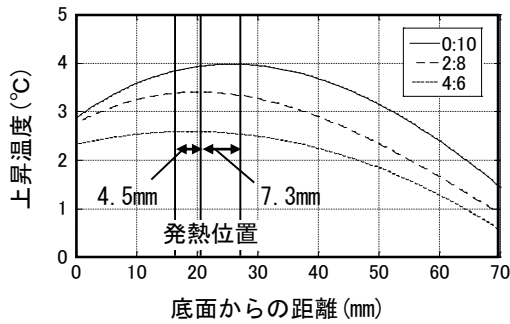


図-15 A-A' 線における温度分布

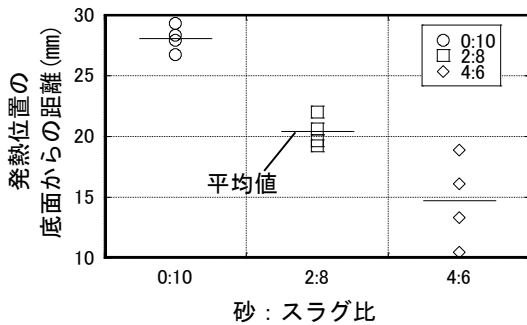


図-16 発熱位置と砂 : スラグ比の関係

の発熱位置は、スラグの割合が低いほど底面側に推移することが分かる。

式(5)～式(11)より、特定の周波数の電波を吸収する場合、その周波数に対応した複素比誘電率及び複素比透磁率の部分で吸収される。ウェッジ型モルタルの場合、スラグ量を増やすと全体の複素比誘電率及び複素比透磁率が上昇し、式(1)～式(4)から、対応する複素比誘電率及び複素比透磁率の部分が電波照射側に推移するため、発熱位置も電波照射側に推移すると考える。

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) ウェッジ型モルタルの山数は最も反射減衰量が高く、最も散乱量が小さい9が適す。
- 2) ウェッジ型モルタルの調合におけるスラグの割合はピークに影響を及ぼす。
- 3) ウェッジ型モルタルは調合が変化しても、2.45GHzにおいて、顕著な反射減衰量の低下を生じにくい。
- 4) 2.45GHzにおいて、砂 : スラグ比=0:10 で反射減衰量は最大の 23.7dB となる。
- 5) スラグの割合が高くなるほど最大の反射減衰量をとるピークが 2.45GHz に接近し、スラグの割合が高いほど反射減衰量が高くなる。
- 6) ウェッジ型モルタルは反射減衰量の差によって上昇温度に差が生じる。
- 7) ウェッジ型モルタルの発熱位置は、スラグの割合が低いほど底面側に推移する。

謝辞

本研究の一部は、公益財団法人鉄鋼環境基金研究助成金、JSPS 科研費 JP16K06569 の助成・支援を受けたものです。名古屋工業大学池田哲夫名誉教授およびテン株式会社の協力を得ました。供試体作製について株式会社ホクコンの協力を得ました。測定について日本板硝子環境アメニティ株式会社堀之内淳様の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Ito, Y. and Kawabe, S.: DEVELOPMENT OF A HEATING MORTAR BLOCK SYSTEM FOR SNOW MELTING THROUGH QUASI MICROWAVES, SynerCrete'18, Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Vol. 1, pp.147-152, Oct.2018
- 3) Ito, Y., Kawabe, S. and Ohba, S.: Effects of Thickness of the Base Layer on the Electromagnetic Absorption in Heating Mortar Blocks for Snow Melting through Quasi Microwave, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp.170-178, Apr.2018
- 4) 田口陽貴, 伊藤洋介, 河辺伸二, 安井幸秀 : 電気炉酸化スラグを骨材として用いたモルタルの含水及び材齢が電波吸収性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.1, pp.537-542, 2018.7
- 5) 安齋弘樹, 才川亮, 水本哲弥, 内藤喜之 : ピラミッド形電波吸収体の特性解析—近似モデルと TE 波への適用—, 電子情報通信学会論文誌, B-II, Vol.J78-B-II, No.3, pp.191-199, 1995.3
- 6) 内藤喜之 : 電波吸収体, オーム社, 1987.4
- 7) 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会 : 【新版】電磁波の遮蔽と吸収, オーム社, 2014.5
- 8) 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, pp.76-77, 2012.10
- 9) 伊藤洋介, 河辺伸二, 大羽慧, 安齋弘樹 : 準マイクロ波による融雪用発熱モルタルブロックシステムの漏洩導波管に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 737, pp. 969-978, 2017.7
- 10) Taguchi, H., Ito, Y. and Kawabe, S.: IMPROVEMENT OF THE MICROWAVE ABSORPTION CHARACTERISTICS BY SINTERING SLAG AS AGGREGATE, SynerCrete'18, Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Vol.1, pp.225-230, Oct.2018