

論文 電気炉酸化スラグを骨材として用いたウェッジ型モルタルの高さと含水状態が電波吸収性能に及ぼす影響

井上 裕太*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・寺西 洗人*4

要旨：降雪地における問題点を解決するため、融雪用発熱モルタルブロックが研究されている。このブロックに用いる電気炉酸化スラグを骨材としたモルタル（以下、スラグモルタルとする）は平板形状の場合、厚さや調合の誤差、含水で反射減衰量が低下するため、これらに影響されにくいウェッジ形状のスラグモルタルを検討する。本研究ではウェッジ形状のスラグモルタルの高さと含水状態を変化させた場合の反射減衰量を測定し、どの含水状態でも発熱の基準を満たす高さ 90mm とすることで、製造精度や環境変化による含水状態の変化で電波吸収性能が低下しにくくなることを明らかにした。

キーワード：電波吸収, モルタル, ウェッジ, 電気炉酸化スラグ, 反射減衰量, 含水状態

1. はじめに

降雪地における住宅敷地内通路の除雪は多大な労力を要し、従来の融雪方法は環境負荷が大きいなどの問題がある。著者らは、電波を吸収して熱に変換することで発熱する発熱モルタルブロックシステムを開発し、問題の解決を図ってきた¹⁾。図-1 に示す発熱モルタルブロック²⁾は、下から基材層、電波吸収材層、電波遮蔽材層の3層構造である。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、基材層と電波遮蔽材層には電波吸収性能の低い山砂を骨材としたモルタル（以下、普通モルタルとする）を用いる。照射された電波は基材層を透過し、電波吸収材層で吸収され発熱する。

発熱モルタルブロックは電波吸収性能が高くなるほど発熱効率が高くなるため、融雪性能が高くなる。本研究では、電波吸収性能を反射減衰量で評価する。図-1 に示すスラグモルタルを平板形状で用いる発熱モルタルブロック（以下、従来型ブロックとする）は、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。従来型ブロックは十分な発熱性能を得るため、ピークが当該システムで使用する周波数2.45GHz近傍で現れるように厚さや調合を設計³⁾する。しかし、スラグモルタルが平板形状のため、製造精度のばらつきで厚さや調合が変化したり、設置後の環境変化で含水したりするとピークが推移⁴⁾して、周波数2.45GHzにおける反射減衰量が減少する。発熱モルタルブロックは周波数2.45GHzにおける反射減衰量が15dB⁵⁾を下回ると発熱効率が低下する

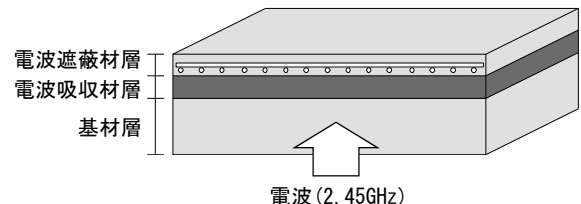


図-1 従来型ブロックの断面

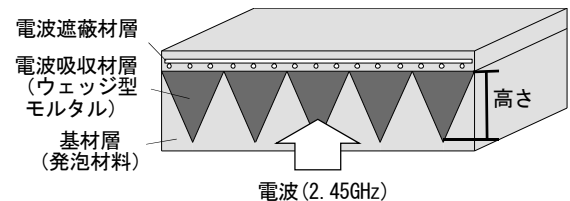


図-2 ウェッジ型ブロックの断面

ため、従来型ブロックでは十分な融雪性能を発揮できなくなる可能性がある。

そこで、形状、調合の誤差および含水に影響を受けにくい発熱モルタルブロックを設計するため、電波吸収材層に用いるスラグモルタルを図-2 に示すウェッジ形状とした（以下、ウェッジ型モルタルとする）発熱モルタルブロック（以下、ウェッジ型ブロックとする）を検討する。ウェッジ型ブロックは平板多層近似によって電波照射側から複素比誘電率及び複素比透磁率が徐々に上昇する多層型電波吸収体に近似⁶⁾できる。そのため、広い周波数帯で高い反射減衰量を得ることができる。また、多層型電波吸収体に近似できるウェッジ型ブロックは、ウェッジ型モルタルの形状や調合、含水状態の変化で複

*1 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋工業大学大学院 准教授 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 社会工学科 (学生会員)

素比誘電率及び複素比透磁率が変化しても、電波照射側から複素比誘電率及び複素比透磁率が徐々に上昇する状態に変わらないため、これら変化の影響を受けにくく、ピークの推移による反射減衰量の低下が起こりにくいという特徴がある。

既往の研究⁹⁾では、底面積 300×300mm あたりのウェッジ型モルタルの数（以下、山数とする）や、スラグモルタルの細骨材に用いる山砂とスラグの容積比（以下、砂：スラグ比とする）が電波吸収性能及び発熱性能に及ぼす影響を明らかにした。

本研究では、ウェッジ型モルタルの高さや含水状態がウェッジ型ブロックの反射減衰量に及ぼす影響を明らかにする。これにより、電波吸収性能が高いウェッジ型モルタルの形状を設計し、製造精度のばらつきや環境変化による含水状態の変化があっても、周波数 2.45GHz において発熱の基準である 15dB を上回ることができる発熱モルタルブロックを開発する。

2. 供試体

2.1 モルタル

モルタルの骨材に使用するスラグは粒径 0.3~0.6mm、絶乾密度 3.49g/cm³、砂は愛知県豊田市産の山砂（絶乾密度 2.51 g/cm³、表乾密度 2.55g/cm³、吸水率 1.66%）で、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。スラグの成分を質量比で表-1⁷⁾に示す。

モルタルの調合を表-2 に示す。本研究では、スラグモルタルとして砂：スラグ比=0：10、2：8、4：6の3種類のモルタルを、普通モルタルとして砂：スラグ比=10：0のモルタルを用いた。

モルタルは打設後 1 日気中養生した後、室温 20±5℃の養生室内の水に浸漬させ、水中養生を 7 日間行った。スラグモルタルの含水状態は表乾状態、絶乾状態、気乾状態の3種とし、表乾状態は水中養生後、表面の水分を十分に拭きとった状態とした。絶乾状態は 24 時間ごとに行う質量測定において、質量変化率が 3 回連続して 0.1 %以下になるまで恒温恒湿器を用いて乾燥させた状態とした。気乾状態は絶乾状態にした後、室温 20±5℃、湿度 65±10%の部屋で、24 時間ごとに行う質量測定において、空気中の水分の吸湿による質量上昇率が 3 回連続して 0.1 %以下になるまで静置した状態とした。

モルタルの各砂：スラグ比における含水状態ごとの複素比誘電率の実部(ε')と虚部(ε'')、複素比透磁率の実部

(μ')と虚部(μ'')の測定⁴⁾結果を表-3 に示す。

2.2 従来型ブロック供試体

従来型ブロックは、製造のばらつきや含水によって反射減衰量のピークが推移して、反射減衰量が低下しやすい⁸⁾という問題を持つ。一方、ウェッジ型ブロックは理論上、高さ、調合の誤差や含水によって、反射減衰量のピークが推移しても反射減衰量が低下しにくい。そこで、この従来型ブロックの問題をウェッジ型ブロックで解決できると示すため、比較用に表-3 の複素比誘電率及び複素比透磁率から、各含水状態における従来型ブロックの反射減衰量を算出⁸⁾した。

従来型ブロックにおいて、基材層の普通モルタルの含水と電波吸収材層のスラグモルタルの含水はそれぞれ従来型ブロックの誘電率を上昇させ、反射減衰量に影響⁸⁾を及ぼす。その影響は大きく、普通モルタルが含水変化せず、スラグモルタルのみが含水変化したとしても、ウェッジ型ブロックよりも顕著に反射減衰量に変化⁸⁾すると考える。そこで、従来型ブロックとウェッジ型ブロックを比較するにあたり、従来型ブロックは普通モルタルの含水状態を絶乾状態とし、スラグモルタルの含水状態のみを変えて反射減衰量を算出した。

表-2 モルタルの調合（容積比）

砂：スラグ比	C	W	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
10：0	0.63	1	2.35	0

表-3 モルタルの複素比誘電率実部(ε')と虚部(ε'')、複素比透磁率実部(μ')と虚部(μ'')

含水状態	調合	ε'	ε''	μ'	μ''
絶乾状態	0：10	9.87	1.33	1.05	0.05
	2：8	8.81	1.02	1.04	0.05
	4：6	7.80	0.73	1.04	0.04
	10：0	4.93	0.08	1.08	0.02
気乾状態	0：10	13.29	2.95	1.04	0.05
	2：8	12.11	2.52	1.02	0.05
	4：6	11.08	2.14	1.03	0.04
表乾状態	0：10	17.08	4.34	1.05	0.06
	2：8	16.05	3.89	1.06	0.05
	4：6	14.68	3.25	1.05	0.05

表-1 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

測定範囲内において、絶乾状態では電波吸収材層の割合が砂：スラグ比=0：10、基材層厚さ48mm、電波吸収材層厚さ11mm（以下、最適条件とする）のとき、周波数2.45GHzでピークが得られることが分かった。

そこで、最適条件からのスラグモルタルの含水状態、厚さと割合の変化が従来型ブロックの反射減衰量に及ぼす影響を示すため、従来型ブロックの反射減衰量は、表-4に示す条件の組み合わせでそれぞれ算出した。

2.3 ウェッジ型ブロック供試体

図-2に示すウェッジ型ブロックの基材層は実用時においてウェッジ型モルタルを支持、固定することが目的である。ウェッジ型ブロックの基材層には空気と同等の複素比誘電率及び複素比透磁率を持つ樹脂製発泡材料を用いるため、基材層の有無はウェッジ型ブロックの電波吸収性能に影響を及ぼさないと考える。後述する測定方法ではウェッジ型モルタルの支持、固定は必要ないことから、本実験のウェッジ型ブロック供試体の基材層は省略した。供試体の底面は既往の研究⁹⁾と同様、300×300mmとした。山数は既往の研究⁹⁾より最も電波吸収性能が高い9とした。

ウェッジ型ブロックはウェッジ型モルタルの高さ、割合、含水状態が反射減衰量に及ぼす影響を明らかにするため、表-5に示す条件の組み合わせでそれぞれ供試体を作製した。

なお、2.1節に則り作製した供試体の各含水状態の含水

表-4 従来型ブロック供試体の条件

厚さ	6mm～16mm まで1mm ごと
割合	砂：スラグ比=0：10、2：8、4：6
含水状態	絶乾状態、表乾状態、気乾状態

表-5 ウェッジ型ブロック供試体の条件

高さ	50mm、70mm、90mm
割合	砂：スラグ比=0：10、2：8、4：6
含水状態	絶乾状態、表乾状態、気乾状態

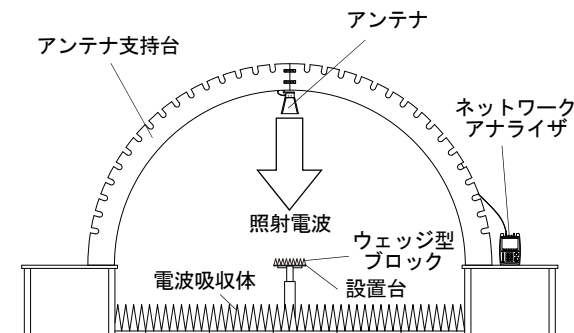


図-3 反射減衰量の測定装置

率は、絶乾状態のウェッジ型モルタルを0%として、気乾状態では約1%、表乾状態では約6%であった。

3. 反射減衰量の測定方法

反射減衰量の測定装置を図-3に示す。本測定では、自由空間法を用いてウェッジ型ブロック供試体の反射減衰量を測定した。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（ダブルリジッドホーンアンテナ）を介してウェッジ型ブロック供試体に照射される。照射された電波はウェッジ型ブロック供試体により反射・吸収されるか、透過する。透過した電波は金属製の設置台で反射され、ウェッジ型ブロック供試体表面で反射された電波と共にアンテナを介してネットワークアナライザで受信、解析される。

ここで、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(1)で示される。

$$\dot{S}_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (1)$$

\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(2)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(3)となる。この $|\dot{S}_{11}|$ を用いて式(4)から反射減衰量 $RL[\text{dB}]$ を算出した。

$$\dot{S}_{11} = a + jb \quad (2)$$

$$|\dot{S}_{11}| = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (3)$$

$$RL[\text{dB}] = -20 \log_{10} |\dot{S}_{11}| \quad (4)$$

4. 測定結果と考察

4.1 従来型ブロックの厚さ、割合、含水状態が反射減衰量に及ぼす影響

2.2節に示す従来型ブロックの電波吸収材層に用いられるスラグモルタルの最適条件から厚さ、割合、含水状態の各条件を1条件ずつ変化させた場合の反射減衰量と周波数の関係について、厚さを変化させた場合を図-4(a)、割合を変化させた場合を図-4(b)、含水状態を変化させた場合を図-4(c)に示す。

各図より、矢印で示す従来型ブロックの最適条件では、周波数2.45GHzにおいて、36.5dBの反射減衰量が得られる。しかし、従来型ブロックは形状や割合、含水状態の変化で複素比誘電率及び複素比透磁率の変化の影響を受けやすいため、最適条件から厚さが1mmでも変化すると、または割合が砂：スラグ比=4：6まで変化すると、または含水状態が気乾状態、表乾状態に変化すると、発熱の基準である15dBを下回る。

よって、従来型ブロックでは電波吸収材層に用いられるスラグモルタルの厚さ、割合の誤差、含水状態の変化で反射減衰量が低下するため、従来型ブロックは製造精度や環境変化による含水状態の変化に影響を受けやすい

と考える。

4.2 ウェッジ型ブロックの調合及び高さが反射減衰量に及ぼす影響

ウェッジ型ブロックの絶乾状態における砂：スラグ比ごとの反射減衰量と周波数の関係について、高さ 50mm を図-5(a)に、70mm を図-5(b)に、90mm を図-5(c)に示す。

高さ 50mm ではどの調合を用いても、周波数 2.45GHz において発熱の基準である 15dB を上回っていない。高さ 70mm では砂：スラグ比=4:6において周波数 2.45GHz において僅かに 15dB を上回っていないが、砂：スラグ比=0:10, 2:8 においては上回る。高さ 90mm ではどの調合でも周波数 2.45GHz を含む 2.00~5.00GHz で 15dB を上回る。よって、絶乾状態ではウェッジ型モルタルの高さは 90mm が良いと考える。

さらに図-5 から、どの高さでもウェッジ型ブロックのスラグモルタルに占めるスラグの割合が高くなるにつれて、周波数 2.45GHz における反射減衰量は高くなり、図中に円で囲んで示したピークは低周波の方に推移する。

これはスラグの割合が高くなり、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上昇したことによる影響⁶⁾である。

また図-5 から、どの調合でもウェッジ型ブロックの高さが高くなるにつれて、およそすべての周波数で反射減衰量は高くなる。高さが高くなるほど、ウェッジ型モルタルを平板多層近似⁷⁾した多層型電波吸収体の 1 層ごとの複素比誘電率及び複素比透磁率の変化量が小さくなる。これにより、電波とウェッジ型ブロックが各周波数に対して整合しやすくなるため、反射減衰量が高くなると考える。

4.3 ウェッジ型ブロックの含水状態が反射減衰量に及ぼす影響及びウェッジ型ブロックと従来型ブロックの比較

スラグモルタルの調合が砂：スラグ比=0:10 におけるウェッジ型ブロックの含水状態ごとの反射減衰量と周波数の関係について、高さ 50mm を図-6(a)に、70mm を図-6(b)に、90mm を図-6(c)に示す。砂：スラグ比=2:8 におけるウェッジ型ブロックの含水状態ごとの反射減衰量と周波数の関係について、高さ 50mm を図-7

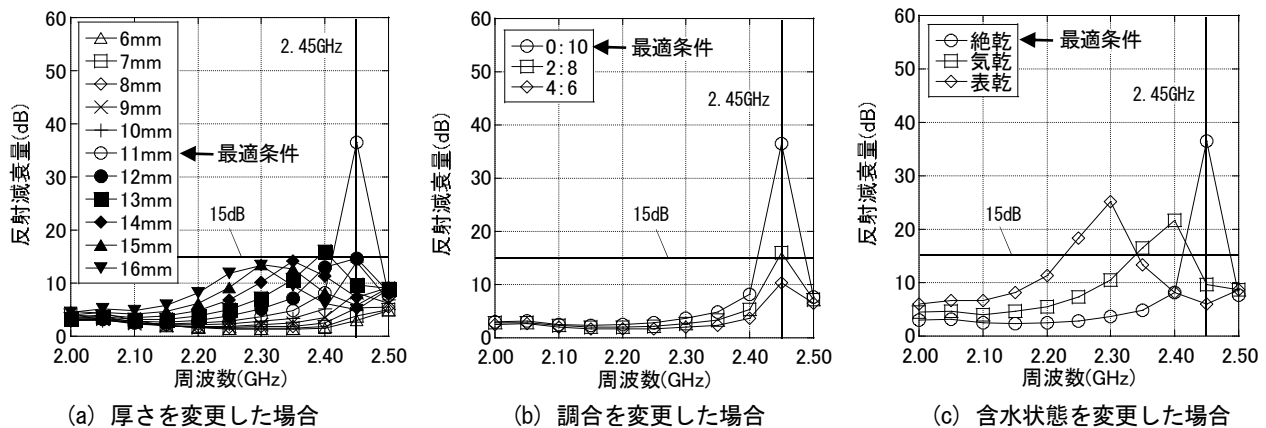


図-4 従来型ブロックのスラグモルタルの最適条件から各条件を変化させた場合の反射減衰量と周波数の関係

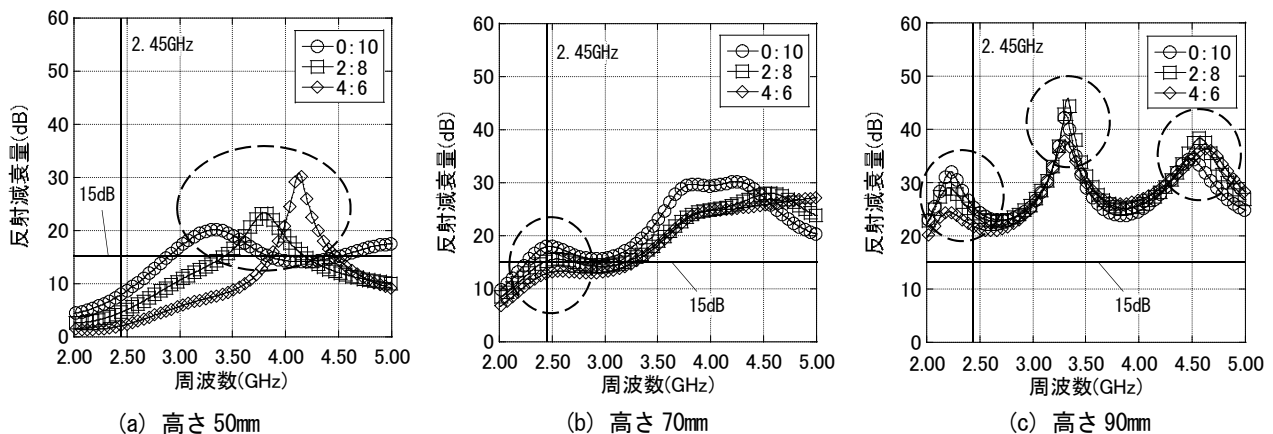


図-5 絶乾状態における高さごとの反射減衰量と周波数の関係(砂：スラグ比の比較)

(a)に、70mmを図-7(b)に、90mmを図-7(c)に示す。
 砂：スラグ比=4：6におけるウェッジ型ブロックの含水状態ごとの反射減衰量と周波数の関係について、高さ50mmを図-8(a)に、70mmを図-8(b)に、90mmを図-8(c)に示す。

図-6～図-8に円で囲んで示したピークは高さ、調査

に関わらず概ね含水しているほど低周波に推移する。これは、水の誘電率が大きいため、含水によりウェッジ型モルタルの誘電率が上昇したことによる影響であると考える。

高さ50mmでは調査、含水状態によらず、反射減衰量のピークが存在する周波数以外、発熱の基準である15dB

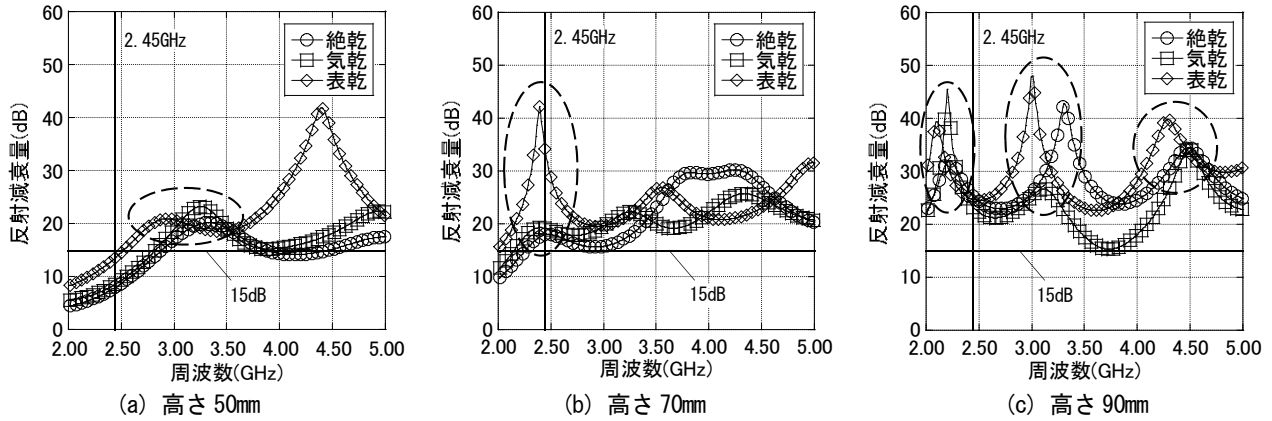


図-6 砂：スラグ比=0：10における高さごとの反射減衰量と周波数の関係（含水状態の比較）

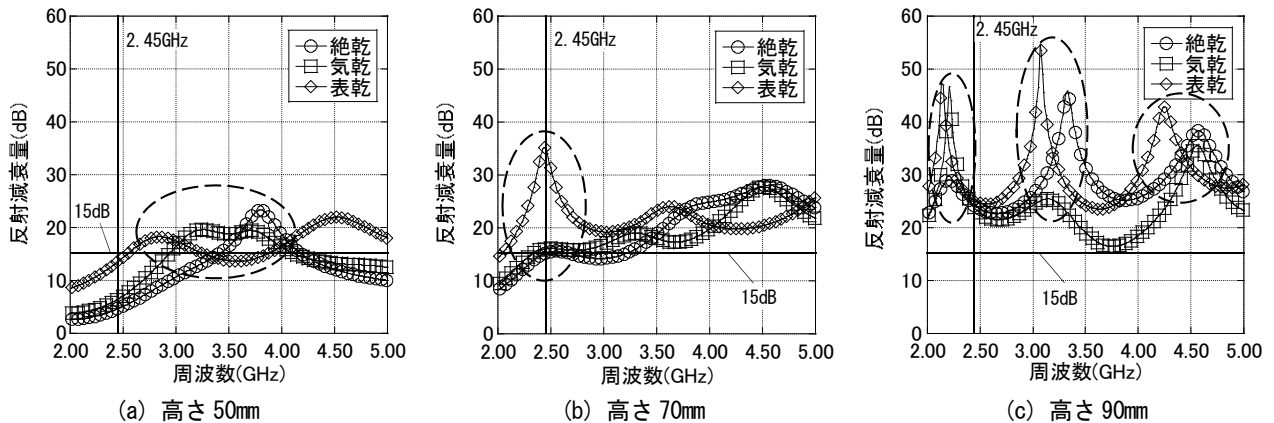


図-7 砂：スラグ比=2：8における高さごとの反射減衰量と周波数の関係（含水状態の比較）

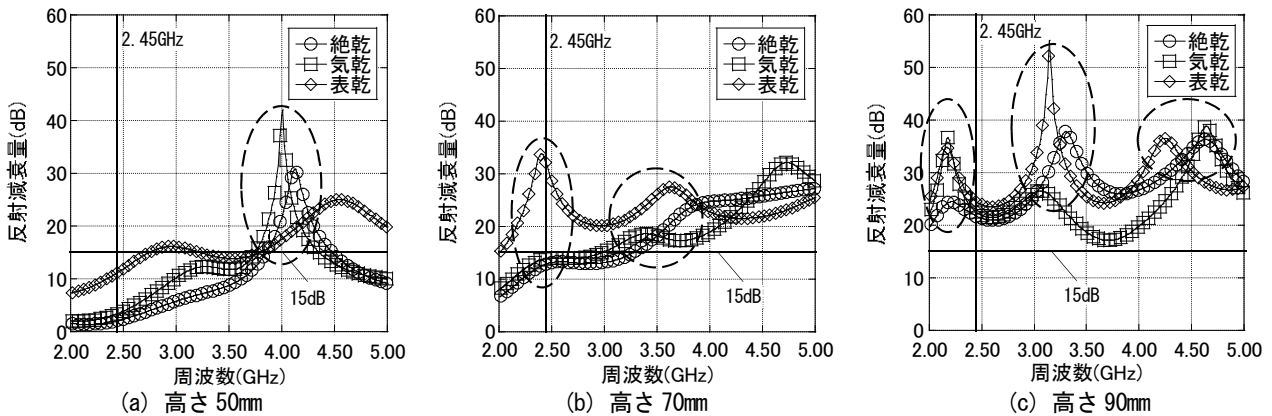


図-8 砂：スラグ比=4：6における高さごとの反射減衰量と周波数の関係（含水状態の比較）

を下回る。高さ 70mm では砂：スラグ比=0：10，2：8 の場合は 2.45GHz を含む 2.00～5.00GHz の多くの周波数で 15dB を上回り，砂：スラグ比=4：6 の場合は表乾状態の全ての周波数で発熱の基準である 15dB を上回る。高さ 90mm では調合，含水状態によらず，2.00～5.00GHz の全ての周波数で発熱の基準である 15dB を上回る。

以上より，ウェッジ型モルタルは高さ 90mm が最適である。また，高さ 70mm の場合でも，調合が砂：スラグ比=0：10，2：8 の場合，含水状態によらず，周波数 2.45GHz を含む測定範囲内の多くの周波数で 15dB を上回る。

一方で 4.1 節より，従来型ブロックは最適条件から厚さ，調合，含水状態が変化すると，反射減衰量が低下し，周波数 2.45GHz において 15dB を下回るため，従来型ブロックは，製造精度や環境変化による含水状態の変化に影響を受けやすいと言える。

よって，ウェッジ型モルタルを用いるウェッジ型ブロックは，従来型ブロックと比較して，電波吸収材層の調合，含水状態が変化しても，反射減衰量が低下しにくいいため，製造精度や環境変化による含水状態の変化に影響を受けにくいと言える。

以上より，ウェッジ型モルタルを用いて，製造精度のばらつきや環境変化による含水状態の変化があっても，周波数 2.45GHz において発熱の基準である 15dB を上回ることができる発熱モルタルブロックを開発した。

5. まとめ

本研究の範囲内において，以下のことが分かった。

- 1) 絶乾状態では，ウェッジ型ブロックのスラグの割合が高くなるにつれて，また，高さが高くなるにつれて周波数 2.45GHz における反射減衰量は高くなる。
- 2) 高さ 50mm では調合，含水状態によらず，反射減衰量のピークが存在する周波数以外，発熱の基準である 15dB を下回る。
- 3) 高さ 70mm では砂：スラグ比=0：10，2：8 の場合 2.45GHz を含む 2.00～5.00GHz の多くの周波数で 15dB を上回り，砂：スラグ比=4：6 の場合は表乾状態の場合でのみ周波数 2.45GHz において 15dB を上回る。
- 4) 高さ 90mm では調合，含水状態によらず，2.00～5.00GHz の全ての周波数で発熱の基準である 15dB を上回る。
- 5) ウェッジ型モルタルは高さ 90mm で，調合と含水状態によらず，周波数 2.00～5.00GHz において発熱の基準である 15dB を上回るため，ウェッジ型モルタルの高さは 90mm が最適である。
- 6) ウェッジ型ブロックは，従来型ブロックと比較して，電波吸収材層の調合，含水状態が変化しても，反射減

衰量が低下しにくい。

- 7) ウェッジ型モルタルを用いて，製造精度のばらつきや環境変化による含水状態の変化があっても，周波数 2.45GHz において発熱の基準である 15dB を上回ることができる発熱モルタルブロックを開発した。

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 JP19K04708 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，テン株式会社，日本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) Yosuke Ito, Shinji Kawabe : DEVELOPMENT OF A HEATING MORTAR BLOCK SYSTEM FOR SNOW MELTING THROUGH QUASI MICROWAVES, Proceeding of Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Vol.1, pp.147-152, 2018.10
- 3) Yosuke Ito, Shinji Kawabe and Satoshi Ohba : Effect 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, 2018.4
- 4) 田口陽貴，伊藤洋介，河辺伸二，安井秀幸：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) 安斎弘樹，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) 井上裕太，伊藤洋介，河辺伸二，田口陽貴：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.467-472，2019.7
- 7) 株式会社星野産商：ウインドスターズ販促資料，2015.6
- 8) 伊藤洋介，河辺伸二，田口陽貴：電気炉酸化スラグを骨材として用いた融雪用発熱モルタルブロックの含水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.41，No.1，pp.461-466，2019.7