論文 電気炉酸化スラグ骨材の焼成による準マイクロ波帯における電波吸 収性能の改善

田口 陽貴*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)は電波を吸収して熱に変換する性質を有する。融雪用の発 熱モルタルブロックの電波吸収材層は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)であ る。スラグモルタルのスラグを焼成し,電波吸収性能の向上を試みた。スラグの焼成によりスラグモルタ ルの複素誘電率と複素透磁率及びスラグモルタルの結晶構造が変化することが分かった。複素誘電率と複 素透磁率の測定結果から最も電波を吸収するスラグモルタルの厚さとそのときの反射減衰量を算出し,ス ラグの焼成でスラグモルタルの電波吸収性能が向上することを見出した。

キーワード:電気炉酸化スラグ,焼成,モルタル,電波吸収,複素誘電率,複素透磁率,結晶構造

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2014年 に高齢化率(総人口に占める65歳以上の人口の割合)が 26.0%まで上昇した¹⁾。

Fig. 1に示すように一般道路は除雪車によって除雪されるが,各戸敷地内,特に玄関から前面道路までの除雪は人力で行われることも多い。これにより,高齢者の外出が困難になるなどの問題が予想される。

除雪の労力を軽減するための融雪方法として,電熱線 や地下水の散水を用いたものがある。しかし,電熱線は 断線を防ぐため地中深くに埋め込まれる。そのため,電 源を入れてから表面に熱が伝わるまでに時間がかかり, 立ち上がりが遅くなる。また,断線した場合にはメンテ ナンスにかかる費用も大きい。散水は地盤沈下や地下水 に含まれる鉱物による路面の変色などの問題がある。

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,電波を吸収して熱に変換する性質に着目し,こ れを骨材として活用した Fig. 2 に示す融雪用の発熱モル タルブロックが研究されている²⁾⁻⁴⁾。発熱モルタルブロッ クは①電波を反射する電波遮蔽材層,②電波吸収性能を 持つ電波吸収材層,③電波吸収性能を持たない基材層の 3 層からなる。電波遮蔽材層には欠損金網⁴⁾,電波吸収材 層には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),基材層には川砂を骨材としたモルタルが 主に用いられる。融雪を行う際は準マイクロ波を発熱モ ルタルブロックの下方から照射する。照射された電波は 基材層を透過し,表層付近に配置された電波吸収材層に より吸収・熱に変換され,この熱を用いて融雪を行う。 このため,従来の融雪装置よりも立ち上がりが早く,電 熱線と違い断線の心配がない。電波遮蔽材層は吸収され

*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 (正会員)
*3 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)



Fig. 1 State of snowfall region Fig. 2 Heating mortar block

なかった電波を反射し,外部への電波の漏洩を防ぐと共 に電波吸収材層に戻して電波吸収性能を高める。

既往の研究では、スラグモルタルの電波吸収性能を示 す反射減衰量が大きくなると発熱性能が向上すること²⁾、 スラグモルタルの電波吸収性能はスラグの成分や調合 によって異なること^{2),3)}が示されている。しかし、スラグ の焼成加工が電波吸収性能に及ぼす影響は検討されて いない。

本研究では、成分の異なる2種のスラグを焼成し、焼 成温度の変化がスラグモルタルの電波吸収特性に及ぼ す影響を明らかにする。本研究により、スラグの焼成加 工によって発熱モルタルブロックの電波吸収性能及び 発熱性能を向上するための基礎データを得る。

2. 複素誘電率と複素透磁率⁵⁾

本研究において,電波吸収性能は反射減衰量により評価する。反射減衰量は複素誘電率と複素透磁率により算出する。スラグはフェリ磁性をもつ磁性酸化物を含むため,磁性損失材料に分類される。磁性損失材料の誘電率と透磁率は複素数で表される。 ϵ 'と ϵ ''を複素誘電率の実部と虚部, μ 'と μ ''を複素透磁率の実部と虚部,jを虚数単位とすると,複素誘電率 ϵ と複素透磁率 μ はそれぞれ式(1)と式(2)で表される。

$$\dot{\varepsilon} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \tag{1}$$

$$\dot{\mu} = \mu' - j\mu'' \tag{2}$$

入射した電波が電波吸収材の裏面で反射するときの 電波吸収材の反射係数を Ś, 入射する電波の波長を λ [mm], 電波吸収材の厚さを d [mm]とすると, 式(3)と式 (4)から反射減衰量 RL [dB]が求められる。反射減衰量が 大きいほど電波を吸収する。また,入力電力を P [W], 照射時間をt[s],供試体の発熱量をQ[J/W·s]とすると, 式(5)²⁾から反射減衰量 RLと発熱量 Qの関係が示される。 反射減衰量が大きいほど、発熱量も大きくなる。すなわ ち、電波吸収性能が向上すれば発熱性能も向上する。

$$\dot{S} = \frac{\sqrt{\frac{\mu}{\hat{\epsilon}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\hat{\epsilon}\mu}d\right) - 1}{\sqrt{\frac{\mu}{\hat{\epsilon}}} \tanh\left(j\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{\hat{\epsilon}\mu}d\right) + 1}$$
(3)

$$RL = -20\log|\dot{S}| \tag{4}$$

$$Q = \left(1 - 10^{-\frac{RL}{10}}\right) Pt \tag{5}$$

3. 測定概要

3.1 複素誘電率と複素透磁率の測定方法

スラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率は,Sパラ メータ測定法2)及びニコルソン・ロス法によって測定す る。測定装置を Fig. 3 に示す。ネットワークアナライザ (KEYSIGHT 製 E5063A)の Port 1 から電波を送信し、同 軸ケーブルと同軸導波管変換器を介してスラグモルタ ルの供試体に照射する。照射された電波は供試体に対し 反射,透過または吸収される。反射された電波は再び Port 1 で受信され反射係数(S11)が, 透過した電波は Port 2 で 受信され伝送係数(S21)が算出される。

得られた反射係数と伝送係数からニコルソン・ロス法 によりスラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率を算 出する。ニコルソン・ロス法の計算は KEYSIGHT 製のソ フトウェア N1500A 材料測定スイートを用いて行う。

3.2 焼成方法

Fig. 4 のように耐熱容器に質量 700g のスラグを入れ, 電気マッフル炉の中に設置し、焼成を行う。耐熱容器は 400℃における熱伝導率が 4.2W/(m・K)である Al2O3 (ア ルミナ)製の多孔質るつぼを使用する。電気マッフル炉 内に耐熱容器を設置した様子を Photo 1 に示す。耐熱容 器は炉内のほぼ中央に設置する。800℃設定で24時間焼





Fig. 4 **Heat-resistant** container



成した際の電気マッフル炉の昇温過程を Fig. 5 に示す。 3.3 電気炉酸化スラグ ^の

電気炉を用いて再生鉄を生産する際に生じる産業廃 棄物であるスラグAとスラグBの2種を使用する。2種 のスラグは成分と製造過程、粒形が異なる。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Aとスラ グBの成分を,酸化物に換算した質量比でTable 1に示 す。スラグの粒径は 0.3~0.6mm, スラグ A とスラグ B の絶乾密度はそれぞれ 3.59g/cm³, 3.73g/cm³ である。ま た, スラグAは高温溶解状態(1500℃前後)のスラグを 高圧圧送された空気によって破砕粒状化し、水ミスト雰 囲気の中で急冷処理して製造される。そのため粒形は球 形である。一方,スラグBは高温溶解状態のスラグをス ラグパンに注入し急冷固化した後,破砕粒状化するので, 粒形は角形である。

3.4 スラグモルタル

スラグモルタルの調合を Table 2 に示す。融雪の際に 発熱モルタルブロックが吸水し、電波吸収性能が変化す

Table 2 Mix	proportion	of slag mortar	(Weight ratio)
-------------	------------	----------------	----------------

Cement	Slag aggregate	Water	Waterproof agent
100	150	45	0.3

 Table 3
 Mix proportion of waterproof agent (Weight ratio)

Mixture such as higher fatty acid salt	Poly(oxyethylene) nonylphenyl ether	Water	
30~35	< 2.0	64~69	

Table 1 Chemical c	omponents of	i slag ((Weight	%)
--------------------	--------------	----------	---------	----

Components	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P_2O_5	Total
Slag A	22.93	18.09	9.84	5.20	29.20	6.24	15.57	3.53	1.71	0.17	99.23
Slag B	20.69	13.63	7.97	3.34	30.79	5.67	10.32	3.55	0.47	0.43	96.86

ることを避けるため,防水剤を混入する。防水剤の主な 成分を Table 3 に示す。厚さ 4mm の金属製フランジにス ラグモルタルを充填し,硬化後に表面を研磨して厚さを 一定にする。スラグモルタルの含水による電波吸収性能 への影響を等しくするため,気中養生1日,水中養生5 日の後,100℃設定の恒温恒湿器で24時間乾燥する。

スラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率の測定 1 測定条件

スラグの焼成温度の変化がスラグモルタルの複素誘 電率と複素透磁率に与える影響を明らかにする。

スラグの焼成温度は 200℃, 400℃, 600℃, 800℃, 1,000℃ 設定で, 焼成時間は各 24 時間とする。なお, ス ラグ A は 1,100℃, スラグ B は 900℃ 設定で焼成した場 合, スラグの一部が融解して固まり, 粉砕工程が必要と なる。そのため, 実用性を考慮してスラグ A は 1,000℃ 設定, スラグ B は 800℃ 設定までの焼成とする。

複素誘電率と複素透磁率の数値変化が著しい焼成温 度のスラグモルタル及びその前後の焼成温度のスラグ モルタルのスラグにつき,X線回折(XRD)測定を行い, WPPF(Whole Powder Pattern Fitting)法で定量分析⁷⁾を行う ことで焼成によるスラグの結晶構造の変化を確認する。

4.2 複素誘電率と複素透磁率の測定結果と考察

4.2.1 複素誘電率実部 ε'の測定結果と考察

スラグモルタルの複素誘電率実部 ε'と周波数の関係に

Real part of

ついて, スラグ A を骨材とした場合を Fig. 6 に, スラグ B を骨材とした場合を Fig. 7 に示す。測定範囲内におい て, スラグ A とスラグ B は共に焼成によって複素誘電率 実部 ε'が変化する。また, 2.45GHz におけるスラグモル タルの複素誘電率実部 ε'とスラグの焼成温度の関係を Fig. 8 に示す。複素誘電率実部 ε'について, スラグ A と スラグ B は共に焼成温度が 200℃ のときに減少して, そ の後増加し, 再び減少する。

ところで、式(3)と式(4)に示される通り、スラグモルタ ルの電波吸収性能は複素誘電率と複素透磁率及び厚さ3) に影響を受ける。複素誘電率実部 ε'の影響を確認するた め、1,000℃で焼成したスラグAを骨材としたスラグモ ルタルの周波数2.45GHzにおける測定データを代表値と して、測定データの複素誘電率実部 ε'のみを仮に変数と する。このときの電波を最も吸収するスラグモルタルの 厚さ(以下、マッチング厚さという)と複素誘電率実部 ε'の関係を Fig. 9 に示す。なお,式(3)と式(4)において, スラグモルタルの厚さ d を変化させたとき,厚さ 10mm 近傍で反射減衰量 RL の値が最も大きくなるときの d を マッチング厚さとして算出する。計算範囲内において, 複素誘電率実部 ε'がマッチング厚さに影響し、複素誘電 率実部 ε'が増加すると、マッチング厚さが薄くなる。よ って、スラグを焼成することによりスラグモルタルのマ ッチング厚さを変えることができる。

Fig.9において用いた値で算出した, スラグモルタル



Fig. 6 Real part of complex permittivity of slag A aggregate



Fig. 9 Theoretical value of matching thickness of slag mortar on real part of complex permittivity



Imaginary part of complex permittivity ɛ'

Fig. 10 Theoretical value of return loss of slag mortar on real part of complex permittivity









Fig. 12 Imaginary part of complex permittivity of slag B aggregate



Fig. 13 Imaginary part of complex permittivity of slag mortar





Fig. 16 Imaginary part of complex permeability of slag A aggregate



Fig. 14 Theoretical value of matching thickness of slag mortar on imaginary part of complex permittivity



permeability of slag B aggregate

がマッチング厚さのときの反射減衰量と複素誘電率実 部 ɛ'の関係を Fig. 10 に示す。計算範囲内において, 複素 誘電率実部 ɛ'は反射減衰量にも影響し, 複素誘電率実部 ɛ'が増加すると, 反射減衰量も大きくなる。すなわち, ス ラグを焼成することによりスラグモルタルの反射減衰 量を変えることができる。よって, 複素誘電率実部 ɛ'は マッチング厚さと電波吸収性能に影響する。

4.2.2 複素透磁率実部 µ'の測定結果と考察

スラグ A のスラグモルタルとスラグ B のスラグモル タルの複素透磁率実部 µ'は測定範囲内において, ほぼ 1 で一定である。そのため, 複素透磁率実部 µ'と周波数の 関係を示すデータ等は省略する。

4.2.3 複素誘電率虚部 ε"の測定結果と考察

スラグモルタルの複素誘電率虚部 ε"と周波数の関係 について、スラグ A を骨材とした場合を Fig. 11 に、ス ラグ B を骨材とした場合を Fig. 12 に示す。測定範囲内 において、スラグ A とスラグ B は共に焼成によって複素 誘電率虚部 ε"が変化する。また、2.45GHz におけるスラ グモルタルの複素誘電率虚部 ε"とスラグの焼成温度の 関係を Fig. 13 に示す。複素誘電率虚部 ε"について、ス ラグ A とスラグ B は共に 200℃ で減少する。その後、ス ラグ A は 800℃ で増加し、1,000℃ で減少する。スラグ B は 800℃ で減少する。

複素誘電率虚部 ε''の影響を確認するため, Fig.9にお

いて用いた代表値のうち複素誘電率虚部 ϵ "のみを仮に 変数とする。このときのマッチング厚さと複素誘電率虚 部 ϵ "の関係を Fig. 14 に示す。複素誘電率虚部 ϵ "は値が 変化してもマッチング厚さはほぼ一定であった。よって、 計算範囲内において複素誘電率虚部 ϵ "がマッチング厚 さに与える影響は小さい。

Fig. 14 において用いた値で算出した,スラグモルタル がマッチング厚さのときの反射減衰量と複素誘電率虚 部 ϵ "の関係を Fig. 15 に示す。計算範囲内において,複 素誘電率虚部 ϵ "は反射減衰量に影響する。複素誘電率虚 部 ϵ "の値が 1.7 までの範囲では複素誘電率虚部 ϵ "の増 加により反射減衰量も大きくなる。よって,複素誘電率 虚部 ϵ "は特に電波吸収性能に影響する。

4.2.4 複素透磁率虚部 µ"の測定結果と考察

スラグモルタルの複素透磁率虚部 µ"と周波数の関係 について,スラグ A を骨材とした場合を Fig. 16 に,ス ラグ B を骨材とした場合を Fig. 17 に示す。測定範囲内 において,スラグ A とスラグ B は共に焼成によって複素 透磁率虚部 µ"が変化する。また,2.45GHz におけるスラ グモルタルの複素透磁率虚部 µ"とスラグの焼成温度の 関係を Fig. 18 に示す。複素透磁率虚部 µ"について,ス ラグ A は 1,000℃, スラグ B は 800℃ で焼成したときに 増加する。

複素透磁率虚部μ"の影響を確認するため, Fig.9にお

いて用いた代表値のうち複素透磁率虚部 µ"のみを仮に 変数とする。このときのマッチング厚さと複素透磁率虚 部µ"の関係を Fig. 19 に示す。計算範囲内において,複 素透磁率虚部µ"がマッチング厚さに影響しており,複素 透磁率虚部µ"が増加すると,マッチング厚さが薄くなる。

Fig. 19 において用いた値で算出した,スラグモルタル がマッチング厚さのときの反射減衰量と複素透磁率虚 部 µ"の関係を Fig. 20 に示す。計算範囲内において,複 素透磁率虚部 µ"が反射減衰量に影響する。複素透磁率虚 部 µ"の値が 0.5 までの範囲では複素透磁率虚部 µ"の増 加により反射減衰量も大きくなる。よって,複素透磁率 虚部 µ"はマッチング厚さと電波吸収性能に影響する。

以上から,スラグを焼成することで複素誘電率と複素 透磁率を変化させることができ,スラグモルタルのマッ チング厚さと電波吸収性能を変化させることができる。

4.3 WPPF 法による定量分析結果

スラグAでは焼成温度が600℃~1000℃,スラグBでは400℃~800℃で焼成したスラグのスラグモルタルは 複素誘電率と複素透磁率の値の増減が著しい。複素誘電 率と複素透磁率は電波吸収材の結晶構造によって変化 する⁵。そこで、これらの変化の原因を探るため、それぞ れのスラグモルタルのスラグにつき XRD 測定を行い、 WPPF 法による定量分析を行う。なお、本測定では試料 の粉粒体に含まれる代表的な結晶構造を検出する。

未焼成のスラグAと600℃, 800℃, 1,000℃で焼成し たスラグAの分析結果を Table 4 に示す。スラグを焼成 したことにより結晶構造が変化したことが分かる。焼成 温度が600℃から800℃にかけては全体に占める Wustite (FeO)の質量比が減少し, Iron(町)Oxide (Fe₂O₃)は増加する。 焼成温度が 800℃ から 1,000℃ にかけては, Magnetite (Fe₃O₄)が増加する。

未焼成のスラグ B と 400℃, 600℃, 800℃ で焼成した 温度が 600℃ までは主な結晶構造は変化せず, それぞれ の質量比が変化する。Wustite (FeO) は焼成温度が上がる スラグ B の分析結果を Table 5 に示す。未焼成から焼成 ほど減少する。焼成温度が 600℃ から 800℃ にかけては, Magnetite (Fe3O4)が増加する。

Fig. 8, Fig. 13 及び Fig. 18 と Table 4, Table 5 より,



permeability of slag mortar



Imaginary part of complex permeability μ" Fig. 19 Theoretical value of matching thickness of slag mortar on imaginary part of complex permeability



Imaginary part of complex permeability µ" Fig. 20 Theoretical value of return loss of slag mortar on imaginary part of complex permeability

 Table 4
 Result of quantitative analysis by the WPPF method for slag A (Weight %)

	Wustite FeO	Iron(III)Oxide Fe ₂ O ₃	Magnetite Fe ₃ O ₄	Magnesioferrite Aluminian (MgAl _{0.74} Fe _{1.26})O ₄	Magnesium Iron(III) Aluminium Oxide MgFeAlO ₄	Larnite Ca2SiO4	Gehlenite Ca2(Al2SiO7)
Unfired	41.08	-	-	-	18.04	40.88	-
600°C	13.45	15.94	-	70.62	-	-	-
800°C	6.54	42.25	-	24.45	-	20.12	6.64
1,000°C	-	-	39.10	-	-	-	60.90

 Table 5
 Result of quantitative analysis by the WPPF method for slag B (Weight %)

	Wustite FeO	Magnetite Fe ₃ O ₄	Magnesioferrite Aluminian (MgAl _{0.74} Fe _{1.26})O ₄	Gehlenite Ca ₂ (Al ₂ SiO ₇)	Kirschsteinite Ca(Fe _{0.77} Mg _{0.22})(SiO ₄)
Unfired	28.77	-	15.38	11.99	43.86
400°C	19.20	-	21.40	13.60	45.80
600°C	13.06	-	30.91	15.65	40.38
800°C	-	8.90	43.00	19.30	28.80

スラグ A においては複素誘電率実部 ε 'の増加には Iron(**II**)Oxide (Fe₂O₃)の増加が影響すると考える。スラグ A とスラグ B の双方においては複素誘電率実部 ε 'と複素 誘電率虚部 ε ''の減少及び複素透磁率虚部 μ ''の増加には Magnetite (Fe₃O₄)の増加が影響すると考える。

以上から,焼成によってスラグの結晶構造が変化して おり,焼成によるスラグの結晶構造の変化がスラグモル タルの複素誘電率と複素透磁率の変化に影響すると考 える。

5. スラグAとスラグBをそれぞれ骨材として用いたス ラグモルタルの反射減衰量とマッチング厚さの算出

4 章において求めたスラグモルタルの複素誘電率と複 素透磁率の測定結果から,式(3)と式(4)を用いて 2.45GHz における反射減衰量 *RL* を算出し,スラグの焼成がスラ グモルタルの電波吸収性能に与える影響を検討する。

スラグモルタルがマッチング厚さのときの反射減衰 量 *RL* とスラグの焼成温度の関係を Fig. 21 に示す。なお, 各点に示す数値はマッチング厚さである。スラグ A の場 合,焼成したスラグのスラグモルタルよりも未焼成のス ラグのスラグモルタルの方が反射減衰量は大きい。スラ グ B の場合,200°C で焼成したスラグのスラグモルタル は未焼成のスラグのスラグモルタルよりも反射減衰量 が大きく,34.84dB である。よって,スラグの焼成によ り,スラグモルタルのマッチング厚さとそのときの反射 減衰量が変化する。スラグの焼成によるスラグモルタル の電波吸収性能の変化はスラグの種類により異なる。ま た,スラグ A のように焼成によりスラグモルタルの電波 吸収性能が低下する場合もある。

以上から,骨材として用いるスラグの種類によっては 焼成により,スラグモルタルの電波吸収性能を向上させ ることができる。

6. 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) スラグを焼成することでスラグモルタルの複素誘 電率と複素透磁率を変化させることができ、スラグ モルタルのマッチング厚さと電波吸収性能を変化 させることができる。
- (2) 焼成によってスラグの結晶構造が変化しており、焼成によるスラグの結晶構造の変化がスラグモルタルの複素誘電率と複素透磁率の変化に影響すると考える。
- (3) 200℃で焼成したスラグBのスラグモルタルは未焼 成のスラグBのスラグモルタルよりも反射減衰量が 大きく, 34.84dBである。
- (4) スラグの焼成によるスラグモルタルの電波吸収性



Fig. 21 Theoretical value of return loss and matching thickness on slag mortar

能の変化はスラグの種類により異なる。

(5) 骨材として用いるスラグの種類によっては焼成に より、スラグモルタルの電波吸収性能を向上させる ことができる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K18183、JP16K06569 の助成・支援を受けたものです。名古屋工業大学池田哲 夫名誉教授及びテン株式会社の協力を得ました。ここに 謝意を表します。

参考文献

- 内閣府:平成27年版高齢社会白書(概要版),第1 章第1節
- 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) 大羽慧、伊藤洋介、河辺伸二: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、コ ンクリート工学年次論文集、第38巻、pp.657-662、 2016.6
- 伊藤洋介,河辺伸二,大羽慧:準マイクロ波による 融雪用発熱モルタルブロックの電波遮蔽材に関す る研究,日本建築学会構造系論文集, Vol.82, No.731, pp.1-10, 2017.1
- 5) 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会:電磁波の遮蔽と吸 収,オーム社,2014.5
- 株式会社星野産商:電気炉酸化スラグ骨材の特殊機 能材としての利用技術, pp.76-77, 2012.10
- 7) 林茂雄: 全粉末パターンフィッティング法を用いた セラミックス材料の定量分析とその精度に関する 研究, 名古屋工業大学学術機関リポジトリ, pp.8-9, 2001