

# 論文 電気炉酸化スラグを骨材として用いたモルタルによる広帯域型電波吸収体の研究

伊藤 洋介\*1・河辺 伸二\*2・山下 佳那子\*3・田口 陽貴\*4

**要旨：**電波吸収性能を持つ産業副産物の電気炉酸化スラグを骨材として用いた安価なモルタル（以下、スラグモルタルという）を用いて、厚さを厳密に管理する必要がない広帯域型電波吸収体の開発を検討する。スラグモルタルの厚さを増すことでスラグモルタルの厚さ又は周波数の変化に対して反射減衰量の変化が小さくなった状態を収束とする。本研究において、スラグモルタルの骨材に用いるスラグの種類と粒径，調合，電波吸収材料であるカーボンブラックの混入が収束に及ぼす影響を明らかにすることで、厚さを厳密に管理する必要がない広帯域型電波吸収体の開発のための基礎データを得た。

**キーワード：**電気炉酸化スラグ，モルタル，カーボンブラック，広帯域型電波吸収体，厚さ

## 1. はじめに

無線 LAN や電子レンジなど、電波を活用する機器が多く用いられている。機器間の電波干渉や情報の漏洩を防ぐため、建築側で電波の制御が検討される。しかし、複数の機器に対応する場合、特定の周波数に電波吸収のピークを持つ狭帯域型電波吸収体では十分対応できない場合がある。電波暗室等で用いられる一般的な広帯域型電波吸収体は高価であるため、一般建築物での大量使用は難しい。また、特定の機器を対象とした狭帯域型電波吸収体を用いる場合、その厚さによって電波を吸収できる周波数が変化する。建築現場での厚さの管理は難しいため、電波吸収体を安価に現場施工することは難しい。

本研究は、電波吸収性能を持つ産業副産物の電気炉酸化スラグ（以下、スラグという）を骨材として用いた安価なモルタル（以下、スラグモルタルという）を用いて、厚さを厳密に管理する必要がない広帯域型電波吸収体の開発のための基礎データを得ることを目的とする。

## 2. 設計理論

電波吸収性能に影響を及ぼす複素比誘電率 $\epsilon$ と複素比透磁率 $\mu$ をそれぞれ式(1)<sup>1)</sup>と式(2)<sup>1)</sup>で示す。

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (1)$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' \quad (2)$$

$\epsilon'$ と $\epsilon''$ は複素比誘電率の実部と虚部、 $\mu'$ と $\mu''$ は複素比透磁率の実部と虚部を示し、 $j$ は虚数単位である。電波吸収は電波が媒質内部で減衰することにより起こる。 $\epsilon''$ と $\mu''$ は電波損失項を表す。

自由空間における波長を $\lambda_0$ 、供試体厚さを $d$ 、供試体に照射する電波の入射角度を $\theta$ としたとき、TEモード<sup>1)</sup>に

おける電波の反射係数 $\dot{S}$ は既往の文献<sup>1)</sup>にて示された式(3)で算出でき、電波吸収性能を示す反射減衰量 $RL$ <sup>1)</sup>は反射係数 $\dot{S}$ を用いて式(4)で算出できる。入射角度 $\theta$ は代表値として $5^\circ$ の値を用いる。

$$\dot{S} = \frac{\frac{\dot{\mu}}{\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}} \tanh\left(j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}\right) - \frac{1}{\cos\theta}}{\frac{\dot{\mu}}{\sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}} \tanh\left(j\frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\dot{\epsilon}\dot{\mu} - \sin^2\theta}\right) + \frac{1}{\cos\theta}} \quad (3)$$

$$RL = -20\log_{10}|\dot{S}| \quad (4)$$

電波吸収性能を高めるには、供試体厚さ $d$ と複素比誘電率 $\epsilon$ 、複素比透磁率 $\mu$ を調整して反射係数 $\dot{S}$ を0に近くすることが有効である。波長と周波数は電波の速度が一定であれば反比例の関係にあるため、式(3)と式(4)より、反射減衰量 $RL$ は供試体厚さ $d$ を大きくするほど、供試体厚さと周波数の変化による影響を受けにくくなると考える。予測されるスラグモルタルの反射減衰量 $RL$ と供試体厚さ $d$ 、周波数の関係を概念図で図-1、図-2に示す。

供試体厚さを増すことで供試体厚さ又は周波数の変化に対して反射減衰量の変化が小さくなった状態を収束とする。本研究では、スラグモルタルに用いるスラグの種類と粒径，調合，電波吸収材料であるカーボンブラックの混入が収束に及ぼす影響を明らかにする。

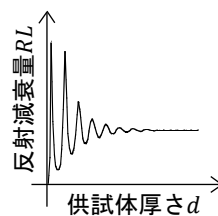


図-1 反射減衰量と供試体厚さの関係

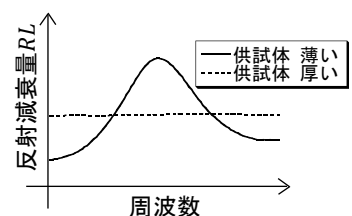


図-2 反射減衰量と周波数の関係

\*1 名古屋工業大学大学院 助教 博(工) (正会員)

\*2 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

\*3 名古屋工業大学 建築・デザイン工学科

\*4 名古屋工業大学大学院 社会工学専攻 (正会員)

### 3. 複素比誘電率と複素比透磁率の測定方法<sup>2),3)</sup>

供試体の複素比誘電率と複素比透磁率は、既往の研究<sup>4)</sup>にて用いられた方形導波管によるモルタルの S パラメータ測定法及びニコルソン・ロス法によって測定する。測定装置を図-3 に示す。本測定はネットワークアナライザ (KEYSIGHT 製 E5063A) のポート 1 及びポート 2 を使用する 2 ポート測定で行う。

ネットワークアナライザのポート 1 から WRJ-2 規格に対応し、無線 LAN や電子レンジの周波数を包含する 1.7~2.6GHz の電波を送信し、同軸ケーブルと同軸導波管変換器を介して供試体に照射する。供試体に反射された電波はポート 1 で受信され、本測定における反射係数  $S_{11}$  が計算される。供試体を透過した電波はポート 2 で受信され、伝送係数  $S_{21}$  が計算される。ネットワークアナライザのポート 1 における入射波を  $\alpha_1$ 、反射波を  $\beta_1$ 、ポート 2 における伝送波を  $\beta_2$  とすると、反射係数  $S_{11}$  及び伝送係数  $S_{21}$  は、式(5)と式(6)により示される。

$$S_{11} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (5)$$

$$S_{21} = \frac{\beta_2}{\alpha_1} \quad (6)$$

反射係数  $S_{11}$  と伝送係数  $S_{21}$  からソフトウェア N1500A 材料測定スイートによるニコルソン・ロス法により複素比誘電率と複素比透磁率を算出する。

## 4. 供試体

### 4.1 電気炉酸化スラグ

電気炉を用いて再生鉄を生産する際に生じる産業副

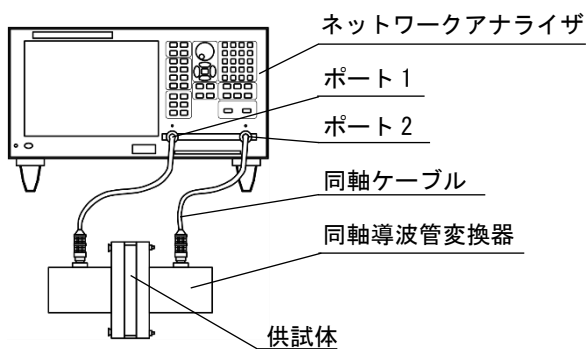


図-3 Sパラメータ測定装置

産物である電気炉酸化スラグのスラグ A とスラグ B を使用する。スラグ A とスラグ B について、蛍光 X 線による無機元素の定性分析により得られた成分を、酸化物に換算した質量比で表-1<sup>5)</sup>に示す。絶乾密度はスラグ A が 3.73g/cm<sup>3</sup>、スラグ B が 3.59g/cm<sup>3</sup> である。スラグの粒径は 1.2~2.5mm (以下、4号という) と、0.3~0.6mm (以下、6号という) の 2 種類を用いる。

### 4.2 カーボンブラック

カーボンブラック (以下、カーボンという) は導電性を有し、電波吸収性能が期待できる。本研究で使用したカーボンの物理的特性を表-2 に示す。

### 4.3 スラグモルタル<sup>6)</sup>

スラグモルタルは骨材として用いるスラグと水、セメントをミキサーで混練して作製する。使用するセメントは普通ポルトランドセメントとする。多量の吸水による電波吸収性能の変化を防止するため、防水剤をセメントに対して 3%用いる。調合は実験ごとに記載する。厚さ 8mm の金属製の導波管内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して、図-4 に示す供試体とする。供試体は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°C 設定の恒温恒湿器で 24 時間乾燥する。

## 5. スラグモルタルの電波吸収性能

### 5.1 実験概要

骨材に用いるスラグの種類と粒径、スラグモルタルの調合の違いが、供試体厚さと反射減衰量、周波数と反射減衰量の関係に及ぼす影響を確認することで、これらが

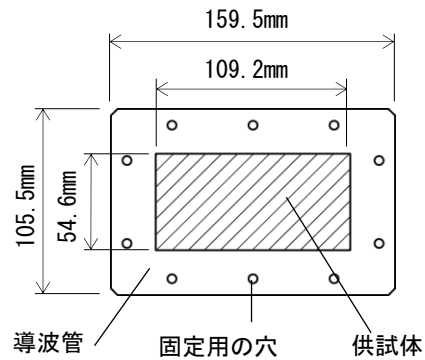


図-4 供試体の上面形状

表-1 電気炉酸化スラグの成分 (質量%)

組成式	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>	合計
スラグ A	20.69	13.63	7.97	3.34	30.79	5.67	10.32	3.55	0.47	0.43	96.86
スラグ B	22.93	18.09	9.84	5.20	29.20	6.24	15.57	3.53	1.71	0.17	99.23

表-2 カーボンブラックの物理的特性

算術平均粒径 (nm)	窒素吸着比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	加熱減量 (赤外線法) (%)	かさ密度 (kg/m <sup>3</sup> )
122	19	0.1	600

表-3 スラグモルタルの調合 (質量比)

スラグ種類	粒径	供試体名称	セメント	スラグ	水	防水剤	高性能 AE 減水剤
スラグ A	4号	スラグ A-4 (2:8)	200	800	90	6	1.4
		スラグ A-6 (5:5)	500	500	225	15	-
	6号	スラグ A-6 (2:8)	200	800	90	6	1.4
		スラグ A-6 (5:5)	500	500	225	15	-
スラグ B	4号	スラグ B-4 (2:8)	200	800	90	6	1.4
		スラグ B-4 (5:5)	500	500	225	15	-
	6号	スラグ B-6 (2:8)	200	800	90	6	1.4
		スラグ B-6 (5:5)	500	500	225	15	-

収束に及ぼす影響を検討する。スラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率を測定し、反射減衰量を算出する。スラグモルタルの調合を表-3 に示す。スラグはスラグ A とスラグ B をそれぞれ用い、粒径は4号と6号、調合はセメント：スラグ=2：8 と 5：5 で、計 8 種類の供試体を作製する。なお、施工性向上のために 2：8 のみ高性能 AE 減水剤をセメントに対して 0.7%用いる。

5.2 実験結果

周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係について、骨材にスラグ A の 4号を用い、調合をセメント：スラグ=5：5 としたスラグモルタル (以降、スラグ A-4 (5：5) のように示す) を図-5 に、スラグ B-4 (5：5) を図-6 に示す。収束する供試体厚さの比較を行うための基準として仮に、供試体厚さ軸において測定範囲内でその値以上に厚くなっても反射減衰量の変化が 0.5dB 以下で、周波数軸において測定範囲内で反射減衰量の変化が 0.5dB 以下となる供試体厚さを収束厚さとする。電波吸収体を薄くできるので、収束厚さは薄い方が好ましい。スラグ A-4 (5：5) の収束厚さは 187mm で、スラグ B-4 (5：5) の収束厚さは 169mm である。スラグ B のスラグモルタルの方がスラグ A のスラグモルタルよりも 18mm 薄い供試体厚さで収束する。

周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係について、スラグ A-4 (2：8) を図-7 に、スラグ B-4 (2：8) を図-8 に示す。スラグ A-4 (2：8) の収束厚さは 125mm で、スラグ B-4 (2：8) の収束厚さは 94mm である。図-5～図-8 より、スラグの量を増すと、スラグ A のスラグモルタルは 62mm、スラグ B のスラグモルタルは 75mm 薄い厚さで収束する。

周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係について、スラグ A-6 (2：8) を図-9 に、スラグ B-6 (2：8) を図-10 に示す。スラグ A-6 (2：8) の収束厚さは 180mm であり、スラグ B-6 (2：8) の収束厚さは 91mm である。図-7～図-10 より、スラグの粒径を大きくすると、スラグ A のスラグモルタルは 55mm 薄い厚さで、スラグ B のスラグモルタルは 3mm 厚い厚さで収束する。

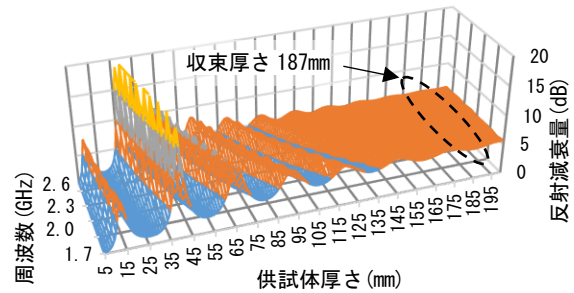


図-5 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ A-4 (5：5)

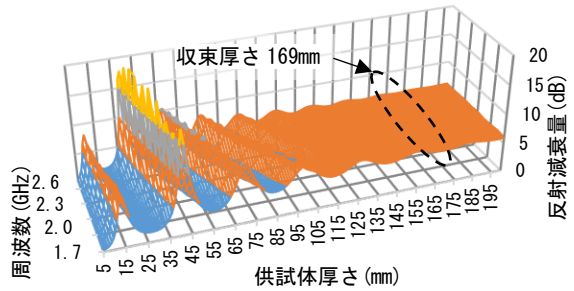


図-6 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ B-4 (5：5)

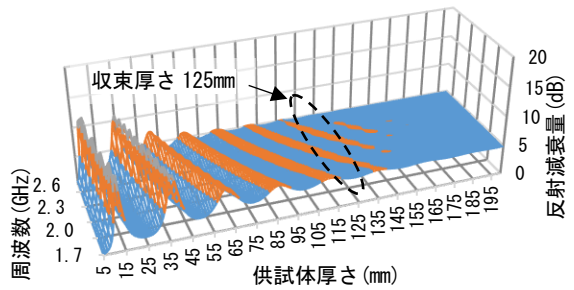


図-7 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ A-4 (2：8)

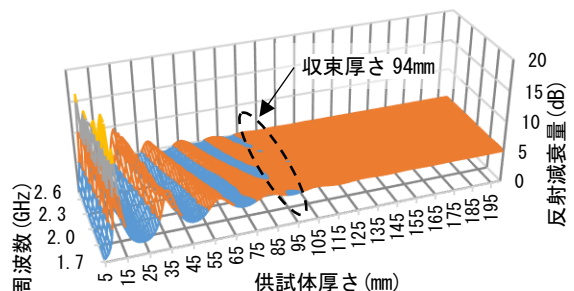


図-8 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ B-4 (2：8)

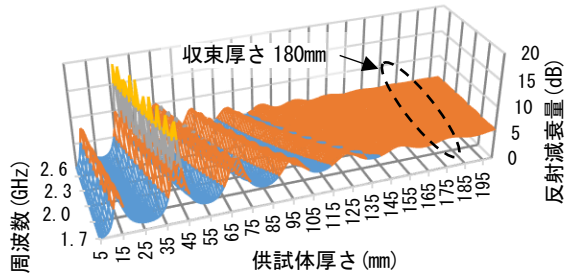


図-9 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ A-6 (2 : 8)

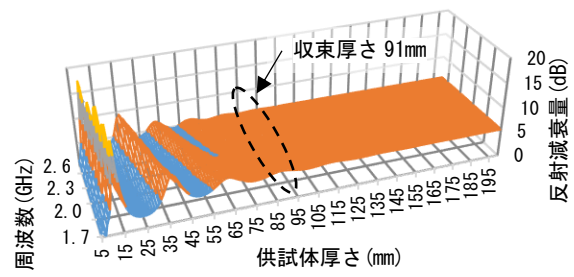


図-10 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
スラグ B-6 (2 : 8)

### 5.3 考察

スラグの種類と粒径，スラグモルタルの調合によって収束厚さが変化するの，これらによりスラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率が変化するためである。スラグ A-4 (5 : 5)，スラグ B-4 (5 : 5)，スラグ A-4 (2 : 8)，スラグ A-6 (2 : 8) について，複素比誘電率・複素比透磁率と周波数の関係を示す。複素比誘電率実部 $\epsilon'$ を図-11に，複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ を図-12に，複素比透磁率虚部 $\mu''$ を図-13に示す。なお，マーカーは5つのデータごとに示す。複素比透磁率実部 $\mu'$ は測定範囲内においてほぼ変化が無かったため検討しない。

スラグは酸化金属を含み，スラグ A とスラグ B は酸化金属の含有比率が異なるため，複素比誘電率と複素比透磁率が異なる。スラグ A-4 (5 : 5) とスラグ B-4 (5 : 5) で示される通り，骨材に用いるスラグの種類を変更することで，供試体の $\epsilon'$ ， $\epsilon''$ と $\mu''$ が変化する。

既往の文献<sup>9)</sup>より，スラグは酸化金属を含むため，セメントよりも $\epsilon'$ と $\epsilon''$ が高い。スラグ A-4 (5 : 5) とスラグ A-4 (2 : 8) で示される通り，調合におけるスラグの割合が高くなるほど，供試体の $\epsilon'$ と $\epsilon''$ が高くなる。スラグ A-4 (2 : 8) とスラグ A-6 (2 : 8) で示される通り，骨材に用いるスラグの粒径が大きくなると，既往の研究<sup>2)</sup>にて示された測定結果と同様，特に $\epsilon'$ と $\epsilon''$ が高くなる。

以上より，骨材に用いるスラグの種類と粒径，スラグモルタルの調合はスラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率を変化させることで，収束に影響を及ぼす。

## 6. 複素比誘電率と複素比透磁率が収束に及ぼす影響

### 6.1 検討概要

スラグモルタルの複素比誘電率実部 $\epsilon'$ ，虚部 $\epsilon''$ ，複素比透磁率実部 $\mu'$ ，虚部 $\mu''$ が収束に影響を及ぼすか検討する。表-4に示すスラグ A-4 (2 : 8) の $\epsilon'$ ， $\epsilon''$ と $\mu''$ の変化が反射減衰量に及ぼす影響を確認するため，これらの値のうち1つを仮に300%に増加させたときの周波数と供試体厚さ，反射減衰量の関係を検討する。なお， $\mu'$ は，測定範囲内においてほぼ変化が無かったため検討しない。

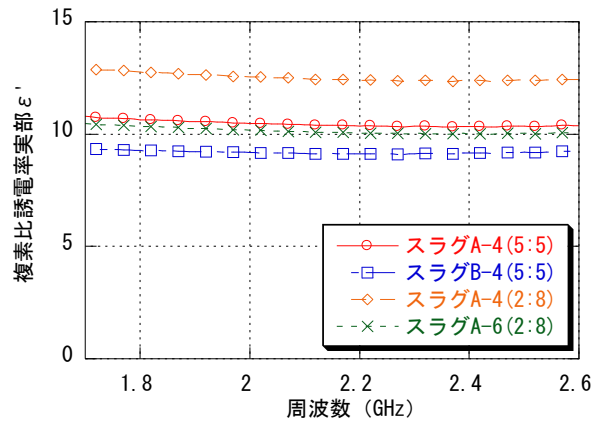


図-11 複素比誘電率実部 $\epsilon'$ と周波数の関係

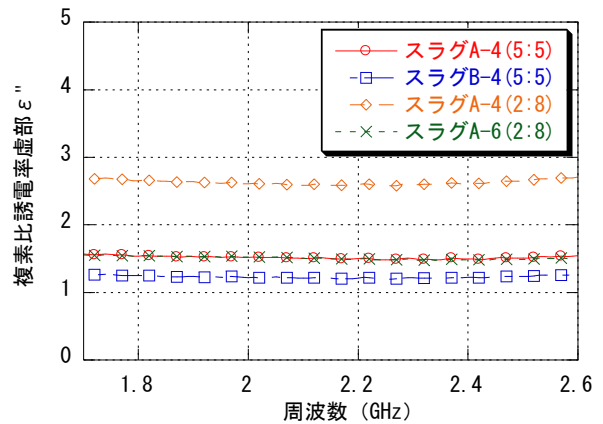


図-12 複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ と周波数の関係

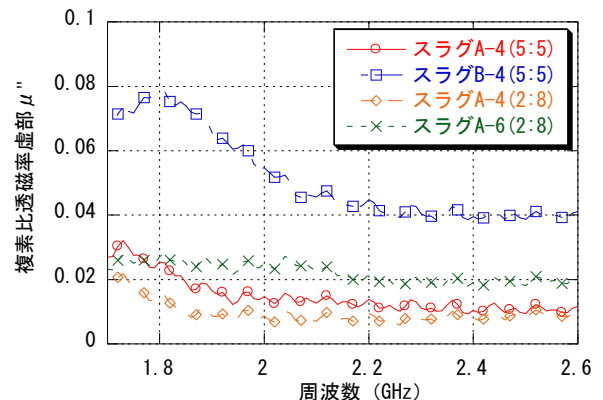


図-13 複素比透磁率虚部 $\mu''$ と周波数の関係

## 6.2 検討結果

複素比誘電率実部 $\epsilon'$ の増加による影響を図-14に、複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ の増加による影響を図-15に、複素比透磁率虚部 $\mu''$ の増加による影響を図-16に示す。

各値増加前のスラグ A-4 (2 : 8) の周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係を示す図-7と図-14より、 $\epsilon'$ を増加すると、収束厚さは125mmから162mmに変化し、37mm厚くなる。また、算定範囲内において供試体厚さ軸方向の全域で反射減衰量の起伏が大きい。 $\epsilon'$ の増加は、特に供試体厚さによる反射減衰量の変化を大きくするため、薄い供試体厚さでの収束を目的とする場合は低いほうが良い。

図-7と図-15より、 $\epsilon''$ を増加すると、収束厚さは125mmから40mmに変化し、65mm薄くなる。 $\epsilon''$ の増加は収束厚さを薄くする。

図-7と図-16より、 $\mu''$ を増加すると、収束厚さは125mmから107mmに変化し、18mm薄くなる。 $\mu''$ の増加は収束厚さを薄くする。

以上より、スラグモルタルの $\epsilon''$ と $\mu''$ を増加することで、収束厚さを薄くできると考える。そこで、 $\epsilon''$ が高い材料として知られるカーボンにスラグモルタルに混入し、スラグモルタルの収束厚さを薄くすることを検討する。

## 7. カーボンとスラグの複素比誘電率虚部

### 7.1 実験概要

カーボンがスラグ A、スラグ B よりも高い複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ を有するか確認する。供試体はスラグ又はカーボンで一部の骨材を置換した川砂を骨材としたモルタル（以下、川砂を骨材としたモルタルを砂モルタルという）とする。調合を表-5に示す。川砂は絶乾密度が2.51g/cm<sup>3</sup>、粗粒率が2.80であり、電波吸収性能をほとんど持たない。砂モルタルの調合はセメント : 川砂 = 1 : 4 とし、セメントに対して15%分の砂をそれぞれスラグ A、スラグ B 又はカーボンで置換する。施工性向上のため、カーボンで置換するときのみ、高性能 AE 減水剤をセメントに対して5.75%用いる。その他はスラグモルタルの作製方法と同じ条件で作製する。

表-4 スラグ A-4 (2 : 8) の複素比誘電率実部 $\epsilon'$ 、虚部 $\epsilon''$ と複素比透磁率虚部 $\mu''$

	1.7GHz	1.8GHz	1.9GHz	2.0GHz	2.1GHz	2.2GHz	2.3GHz	2.4GHz	2.5GHz	2.6GHz
$\epsilon'$	12.9	12.8	12.7	12.6	12.5	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4
$\epsilon''$	2.70	2.65	2.64	2.61	2.59	2.60	2.60	2.61	2.65	2.71
$\mu''$	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

表-5 骨材の一部をスラグ又はカーボンで置換した砂モルタルの調合(質量比)

名称	セメント	砂	スラグ A	スラグ B	カーボン	水	防水剤	高性能 AE 減水剤
スラグ A 置換	100	385	15	-	-	45	3	-
スラグ B 置換			-	15	-			-
カーボン置換			-	-	15			5.75

## 7.2 実験結果と考察

スラグ又はカーボンで一部の骨材を置換した砂モルタルの $\epsilon''$ と周波数の関係を図-17に示す。スラグ A 又はスラグ B で置換した砂モルタルに比べて、カーボンで置換した砂モルタルは $\epsilon''$ が高い。カーボンにスラグモルタルに混入することで、スラグモルタルの $\epsilon''$ を高め、収束厚さを薄くできると考える。

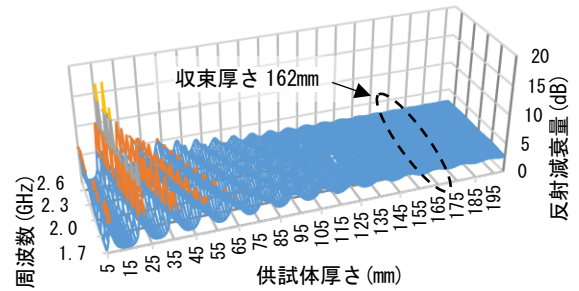


図-14 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  $\epsilon''$ を300%増加 スラグ A-4 (2 : 8)

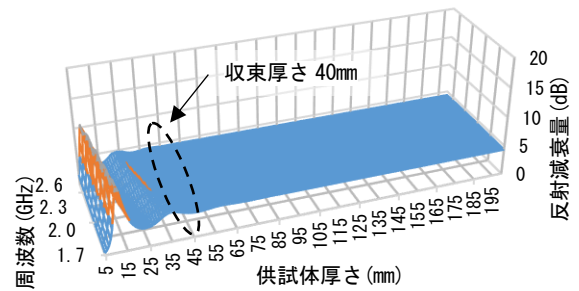


図-15 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  $\epsilon''$ を300%増加 スラグ A-4 (2 : 8)

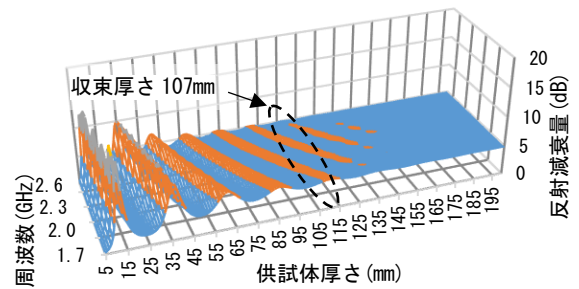


図-16 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  $\mu''$ を300%増加 スラグ A-4 (2 : 8)

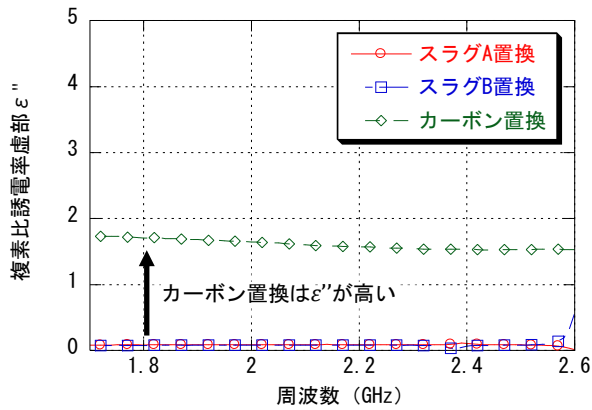


図-17 複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ と周波数の関係

スラグ・カーボンで一部骨材を置換した砂モルタル

## 8. カーボン混入スラグモルタルの電波吸収性能

### 8.1 実験概要

カーボンを混入することでスラグモルタルの収束厚さを薄くできるかについて検討する。調合は表-5 のカーボン置換の砂をスラグで置換したものとする。スラグの成分がカーボンに影響を及ぼし、カーボン混入の効果が変化するかを確認するため、スラグモルタルの骨材にはスラグ A とスラグ B をそれぞれ用いる。スラグ A-4 (2 : 8) とスラグ B-4 (2 : 8) につき、セメントに対して 15% 分の骨材をカーボンで置換する。施工性向上のため、高性能 AE 減水剤をセメントに対して 5.75% 用いる。

### 8.2 実験結果と考察

周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係について、カーボンを混入したスラグ A-4 (2 : 8) を図-18 に、カーボンを混入したスラグ B-4 (2 : 8) を図-19 に示す。カーボンを混入しないスラグ A-4 (2 : 8) は図-7、スラグ B-4 (2 : 8) は図-8 である。

図-7 と図-18 より、スラグ A-4 (2 : 8) はカーボンを混入することで、収束厚さが 125mm から 42mm に変化し、83mm 薄くなる。

図-8 と図-19 より、スラグ B-4 (2 : 8) はカーボンを混入することで、収束厚さが 94mm から 48mm に変化し、46mm 薄くなる。

以上より、スラグモルタルにカーボンを混入することで、骨材のスラグの種類によらず収束厚さを薄くできる。

## 9. まとめ

- 骨材に用いるスラグの種類と粒径、スラグモルタルの調合は、スラグモルタルの複素比誘電率と複素比透磁率を変化させることで収束に影響を及ぼす。
- スラグモルタルの複素比誘電率虚部 $\epsilon''$ と複素比透磁率虚部 $\mu''$ を増加することで、収束厚さを薄くできる。
- スラグモルタルにカーボンを混入することで、骨材のスラグの種類によらず収束厚さを薄くできる。

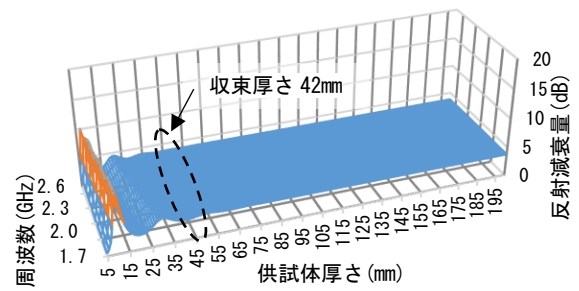


図-18 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
カーボン混入 スラグ A-4 (2 : 8)

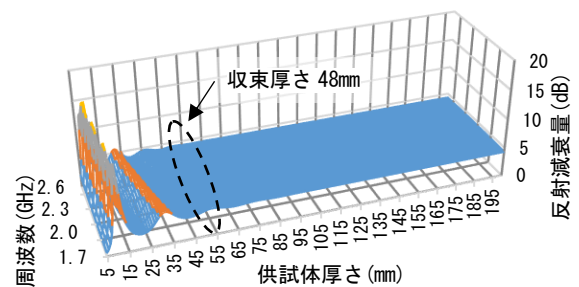


図-19 周波数と供試体厚さ、反射減衰量の関係  
カーボン混入 スラグ B-4 (2 : 8)

## 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。日本板硝子環境アメニティ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

- 電磁波の吸収と遮蔽編集委員会：【新版】電磁波の吸収と遮蔽，オーム社，2014.5
- 伊藤洋介，河辺伸二，吉田成克：電気炉酸化スラグ骨材の粒径による準マイクロ波帯における電波吸収性能の改善，コンクリート工学年次論文集，vol.39, No.1, pp.523-528, 2017.7
- 田口陽貴，伊藤洋介，河辺伸二：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，コンクリート工学年次論文集，vol.39, No.1, pp.517-522, 2017.7
- 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
- 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，2012.10
- 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基材層の厚さが電波吸収性能に与える影響，日本建築学会構造系論文集，No.82(739), pp.1321-1327, 2017.9