

論文 漏洩導波管のスロット形状が発熱モルタルブロック上面の発熱分布に及ぼす影響

安井 秀幸*1・伊藤 洋介*2・河辺 伸二*3・田口 陽貴*1

要旨：融雪用発熱モルタルブロックシステムは、漏洩導波管に設けられたスロットから発熱モルタルブロックに電波を供給し、電波を熱に変換して融雪する。漏洩導波管のスロットは、管軸に対するスロットの長辺方向の向きによって、電波漏洩特性が変化する。管軸と垂直なスロット又は管軸と平行なスロットを設けた漏洩導波管により各スロットの電波漏洩量と電波の指向性を確認し、発熱測定により発熱モルタルブロック上面の発熱分布の変化を明らかにした。本研究によって、スロット形状を変化させることで、発熱モルタルブロックの発熱範囲をブロック端部方向に広げることが可能にした。

キーワード：発熱、電波、方形導波管、漏洩導波管、スロット、電波漏洩量

1. はじめに

降雪地域において、除雪作業は多大な労力と時間を要する。融雪剤、地下水の散水、電熱線による融雪でこの労力は大きく軽減できる。しかし、これらの融雪方法はランニングコスト等の問題がある¹⁾²⁾。そこで、著者らは新たな融雪方法として、融雪用発熱モルタルブロックシステムについて研究してきた¹⁾。融雪用発熱モルタルブロックシステムを図-1に示す。発振器から発振された2.45GHzの電波は、漏洩導波管の上面に設けられたスロットから漏洩し、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が電波を吸収し、熱に変換することで表層を温め、雪を融かす。

融雪用発熱モルタルブロックシステムの断面を図-2に示す。発熱モルタルブロックは下から基材層、電波吸収材層、電波遮蔽材層の3層により構成される。漏洩導波管から漏洩した電波は、電波吸収性能を持たない基材層を透過し、電波吸収材層に吸収されて熱に変換される。電波遮蔽材層は外部への電波漏洩を防ぐ。漏洩導波管はスロットアレーアンテナの技術²⁾を利用する。漏洩導波管の中央には管軸に対し、長辺方向が垂直なスロット(以下、横スロットという)を連設する。

横スロットを設けた漏洩導波管は、発熱モルタルブロック中央に多くの電波を照射する。そのため、ブロックの端部に電波が照射されず、ブロックの端部の発熱量が小さくなり、雪が残るといった問題がある。そこで、発熱モルタルブロックの広範囲に電波が照射できる漏洩導波管の新たなスロット形状を検討する必要がある。

本研究では、新たなスロット形状として、管軸に対して長辺方向が平行なスロット(以下、縦スロットという)及び従来の横スロットの単一のスロットについて電波漏洩特性を明らかにする。①横スロット及び縦スロット

の電波漏洩性能を把握した上で、②横スロット及び縦スロットから漏洩する電波の指向性の違いを確認し、③横スロット及び縦スロットを設けた漏洩導波管による発熱実験を行って、発熱モルタルブロック上面の発熱分布の変化を明らかにする。これらより、発熱モルタルブロック上面の発熱する範囲をブロック端部方向に向けて広げることが検討される。

2. スロット

漏洩導波管のスロットは、電波を漏洩させるために、漏洩導波管の表面を流れる電流を妨げるように配置³⁾する必要がある。図-3に電波を伝搬するTE₁₀モード³⁾⁴⁾における導波管表面と電流を妨げるように配置された横スロットと縦スロットを示す。スロットは電流を妨げ

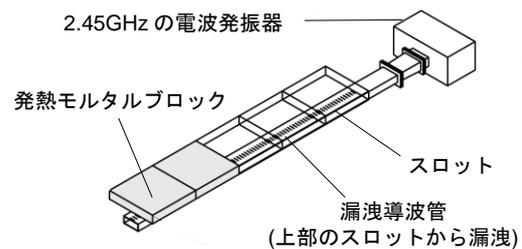


図-1 融雪用発熱モルタルブロックシステム

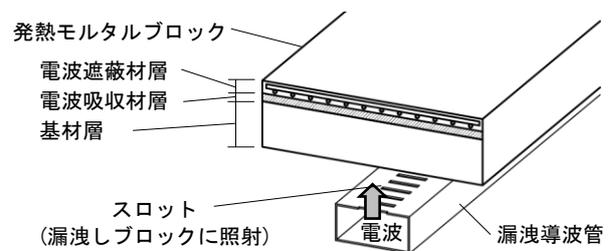


図-2 融雪用発熱モルタルブロックシステムの断面

*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 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)

ることで、電荷が負荷され、電波が漏洩する³⁾。

図-4に各スロットの電波漏洩の様子を示す。横スロットは管軸に沿った方向（以下、管軸方向という）に電波を漏洩するのに対し、縦スロットは管軸に直交する方向に電波を漏洩する。そのため、図-5に示すように横スロットは、発熱モルタルブロックの中央に多くの電波を照射するのに対し、縦スロットは漏洩導波管の管軸方向と直交する方向（以下、ブロック幅方向という）に広く電波を照射するため、発熱モルタルブロックの発熱する範囲をブロック幅方向に大きくできると考える。

3. 測定材料

3.1 スロット板

電波を反射する厚さ 1.5mm のステンレス製の金属板に、電波漏洩用の単一のスロットを設けて図-6に示すスロット板とする。スロット板は 2.45GHz の電波に対応する WRJ-2 規格（内寸が幅 109.22mm×高さ 54.61mm）の同軸導波管変換器の開口部に、金属テープを用いて固定する。スロット板には、長辺方向に対してスロットの長辺が平行になるように幅 5mm、長さ 60mm のスロットを設ける。

3.2 漏洩導波管

漏洩導波管の内寸と外観を図-7に示す。内寸 96.8mm×46.8mm、厚さ 1.5mm の電波を反射するステンレス製の方形導波管の上面に、電波漏洩用のスロットを設けて漏洩導波管とする。漏洩導波管は、電波の安定性向上と測定誤差の低減を図るため、スロット前後 300mm の区間に他のスロットを設けない。

各漏洩導波管上面に設けられたスロットの例を図-8に示す。漏洩導波管は方形導波管の上面に幅 3mm、長さ 60mm の縦スロットを管軸からスロット中央までの距離（以下、オフセット距離という）5mm ごと 5~35mm に設けたもの、方形導波管の上面中央に幅 3mm、長さ 60mm の横スロットを設けたものの 2 種類とする。縦スロットのオフセット距離は、大きくなるにつれて発熱モルタルブロックの発熱箇所がブロックの片方の端部に偏る恐れがある。そのため、本研究では最大のオフセット距離を 35mm とする。また、オフセット距離 0mm は既往の研究²⁾より、ほとんど電波が漏洩しないため検討しない。

スロットの長辺の長さ（以下、スロット長さという）は、必要に応じて金属テープを用いて調整する。本測定では、スロット長さとおffset距離の条件をスロット条件とする。

3.3 発熱モルタルブロック

既往の研究²⁾で用いられた発熱モルタルブロックを使用する。発熱モルタルブロックの形状は縦 300mm×横 300mm の正方形である。基材層は普通ポルトランドセメ

ントを用いたモルタル（以下、普通モルタルという）とする。含水による電波吸収性能の変化を最小限に抑えるため⁵⁾、普通モルタルに防水剤を添加する。表-1に普

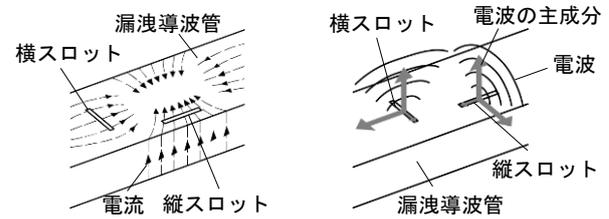


図-3 導波管表面の電流と各スロット

図-4 各スロットの電波漏洩の様子

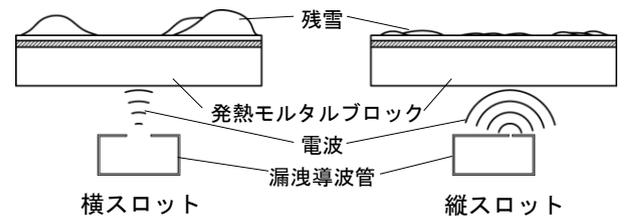


図-5 各スロットの電波漏洩と融雪のイメージ

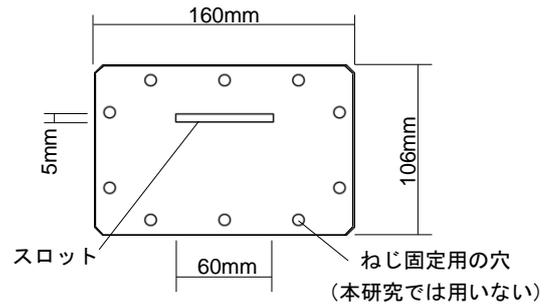


図-6 スロット板

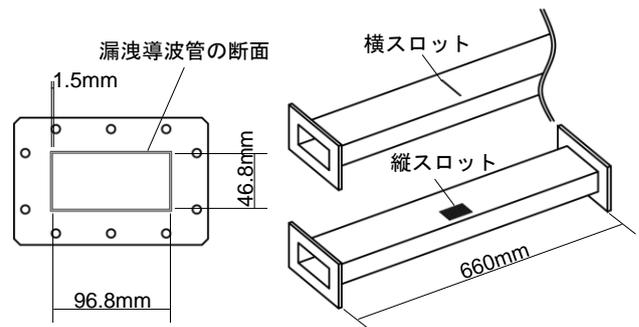


図-7 漏洩導波管の内寸と外観

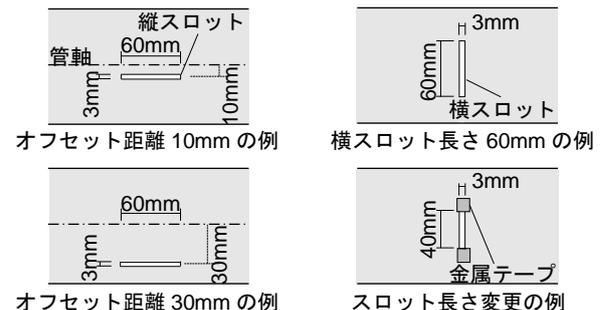


図-8 各漏洩導波管上面に設けられたスロットの例

通モルタルの調査、表-2に防水剤の成分を示す。

電波吸収材層は電波吸収性能を有する電気炉酸化スラグを骨材として用いたスラグモルタルとする。電波吸収材の調査を表-3に、蛍光X線による無機元素の定性分析により得られた電気炉酸化スラグの成分を、酸化物に換算した半定量値（質量比）で表-4⁶⁾に示す。電波遮蔽材層は電波反射性能を有する欠損金網⁷⁾を電波吸収材の上に設置し、普通モルタルを被せる。

発熱モルタルブロックとスロットを60mm以上離すことで、発熱モルタルブロックはスロットの電波漏洩量に影響を及ぼさなくなる²⁾。そこで、発熱モルタルブロックは漏洩導波管の上面より60mm離して設置する。

4. 測定方法

4.1 各スロット条件の電波漏洩量の測定²⁾

スペクトラムアナライザにより、電波が伝播する漏洩導波管のスロットから漏洩する電波（以下、電波漏洩量という）をスロット条件ごとに測定する。電波漏洩量の測定装置を図-9に示す。送信側のスペクトラムアナライザ（ROHDE&SCHWARZ製FSH8）から発振される2.45GHzの出力0dBmの電波は、同軸ケーブル、同軸導波管変換器、テーパー管を介して、漏洩導波管に供給される。漏洩導波管に供給された電波の一部は漏洩導波管の上面に設けられたスロットから漏洩する。

同軸導波管変換器に接続したスロット板のスロットを漏洩導波管のスロットに重ね合わせ、スロットから漏洩する電波を同軸導波管変換器、同軸ケーブルを介して受信側のスペクトラムアナライザ（ROHDE&SCHWARZ製ETH）で受信し、漏洩導波管のスロットごとに電波漏洩量[dBm]を測定する。

漏洩しなかった電波は、漏洩導波管の末端部に設けられたダミーロードに吸収される。また、測定に用いない漏洩導波管のスロットは、金属テープで塞ぎ、電波が漏

表-1 普通モルタルの調査（質量比）

セメント	川砂	水	防水剤
100	300	45.0	3.00

表-2 防水剤の成分（質量比）

高級脂肪酸塩等の混合物	ポリ(オキシレン)ノニルフェニルエーテル	水
30~35	<2.0	64~69

表-3 スラグモルタルの調査（質量比）

セメント	スラグ	水	防水剤
100	150	45.0	3.00

表-4 電気炉酸化スラグの成分（質量比）

組成式	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
平均値	19.53	12.92	5.66	4.57	19.67	24.13	8.4	1.97	0.42	0.33	97.77

洩することを防ぐ。周辺環境による電波の反射を考慮し、屋外で測定を行う。

なお、スロットから漏洩する電波は横スロットと縦スロットで指向性に違いがあり、測定で得られる電波漏洩量は指向性に影響を受ける。このため、本研究において測定で得られた電波漏洩量は、横スロット同士又は縦スロット同士で電波漏洩性能を相対的に比較するためだけに用いる。

4.2 各スロット条件の不要電波量の測定

スペクトラムアナライザにより、スロットから側方に漏洩し、発熱モルタルブロックに照射されない一部の電波（以下、不要電波という）をスロット条件ごとに測定する。不要電波量の測定装置を図-10に示す。送信側のスペクトラムアナライザ（ROHDE&SCHWARZ製FSH8）から発振される2.45GHzの出力1000μWの電波は、同軸ケーブル、同軸導波管変換器、テーパー管を介して、漏洩導波管に供給される。

漏洩導波管に供給された電波の一部は漏洩導波管の上面に設けられたスロットから漏洩する。漏洩導波管のスロットから漏洩した電波の一部は不要電波となる。不要電波はダブルリジッドホーンアンテナ（以下、ホーンアンテナという）、同軸ケーブルを介して受信側のスペクトラムアナライザで受信され、スロット条件ごとに不要電波の電力が測定される。なお、漏洩導波管の末端部はダミーロードを接続し、電波を吸収する。また、測定に用いない漏洩導波管のスロットは、金属テープで塞ぎ、

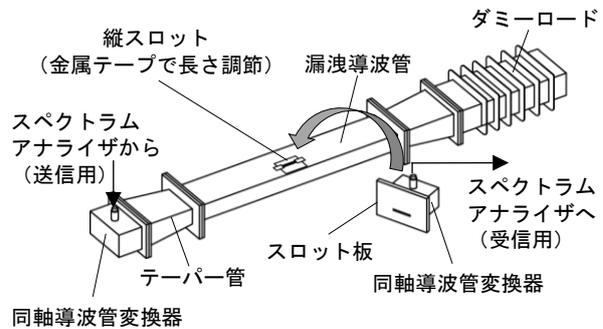


図-9 電波漏洩量の測定装置

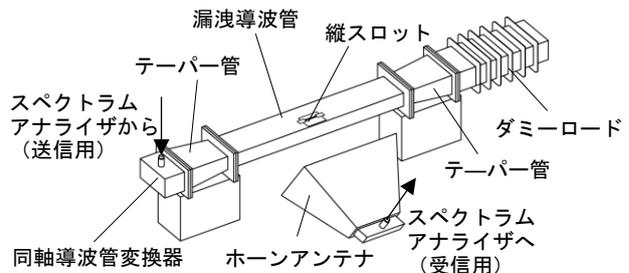


図-10 不要電波量の測定装置

電波が漏洩することを防ぐ。周辺環境による電波の反射を考慮し、屋外で測定を行う。

縦スロットの長辺方向中央に直交する断面を図-11に示す。図-11において、漏洩導波管の縦スロット側の角から垂線を下ろし、漏洩導波管から210mm下の地面にホーンアンテナ端部を合わせ、ホーンアンテナの逆側端部を軸として、漏洩導波管の縦スロット側の角に向けて、ホーンアンテナの開口を立ち上げる。この位置において垂直偏波及び水平偏波を測定し、それぞれの電力値を垂直不要電波量[μW]及び水平不要電波量[μW]とする。

4.3 各スロットを設けた漏洩導波管を用いた融雪用発熱モルタルブロックシステムによる上昇温度の測定

漏洩導波管の電波漏洩量及び合計不要電波量の測定結果を基に、漏洩導波管を用いた融雪用発熱モルタルブロックシステムによるスロット条件ごとの上昇温度の測定を行う。縦スロットを設けた漏洩導波管による上昇温度の測定装置を図-12に示す。発振器にテーパ管、漏洩導波管を連結させる。なお、漏洩導波管の末端部はダミーロードを接続し、電波を吸収する。発熱モルタルブロックはスロット中央の直上に1体のみ設置する。測定に用いない漏洩導波管のスロットは、金属テープで塞ぎ、電波が漏洩することを防ぐ。周辺環境による電波の反射を考慮し、屋外で測定を行う。

発振器はマグネトロンで出力1200W、2.45GHzの電波を発振する。測定時間は20分とし、赤外線サーモグラフィカメラ（日本アビオニクス製 R500EX）を用いて発熱モルタルブロック上面を撮影する。これにより、20分後の発熱モルタルブロック上面の上昇温度を測定する。

5. 各スロット条件の電波漏洩量の測定

5.1 測定条件

縦スロットの長さ（以下、縦スロット長さという）は、各オフセット距離において2mmごと20~60mmまでの電波漏洩量を測定する。横スロットの長さ（以下、横スロット長さという）は、スロット長さのみを縦スロット長さと同様に変更して測定する。

5.2 測定結果と考察

電波漏洩量と横スロット長さ及び各オフセット距離における縦スロット長さの関係を図-13に示す。本測定範囲内において、電波漏洩量はスロット長さ54mmを最大とし、スロット長さが短くなる程、小さくなる。これは2.45GHzの電波に対する共振⁴⁾が2.45GHzの半波長61mm近傍の長さである54mmで生じるためと考える。

また、各縦スロット長さにおいてオフセット距離が大きくなる程、電波漏洩量は大きくなる。これは、オフセット距離が大きい程、縦スロットが多く漏洩導波管表面の電流を妨げるため、多くの電波を漏洩したと考える。

よって、縦スロットは横スロットと同様にスロット長さによって電波漏洩量を調節でき、縦スロット長さだけでなくオフセット距離との組み合わせでも調節できる。

6. 各スロット条件の垂直不要電波量及び水平不要電波量の測定

6.1 測定条件

図-13より、最も電波漏洩量が小さいオフセット距離5mmにおいて最も電波を漏洩する縦スロット長さは54mmである。このスロットの電波漏洩量を基準とし、各オフセット距離で同等の電波漏洩量となる長さの縦スロットを漏洩導波管に設け、垂直不要電波量及び水平不要電波量を測定する。

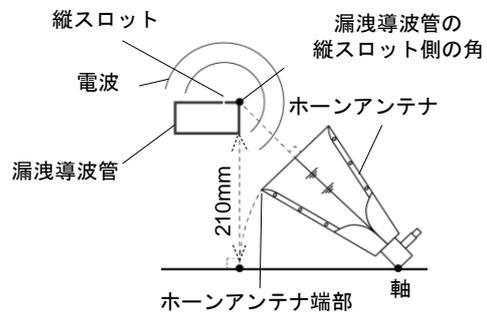


図-11 縦スロットの長辺方向中央の断面

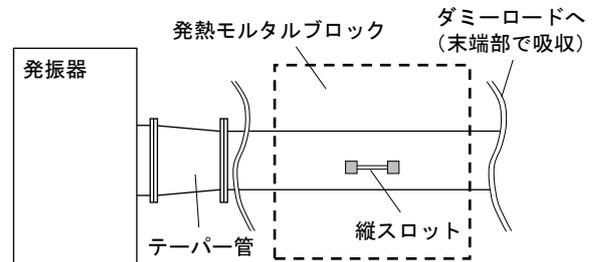


図-12 縦スロットを用いた上昇温度の測定装置の上面

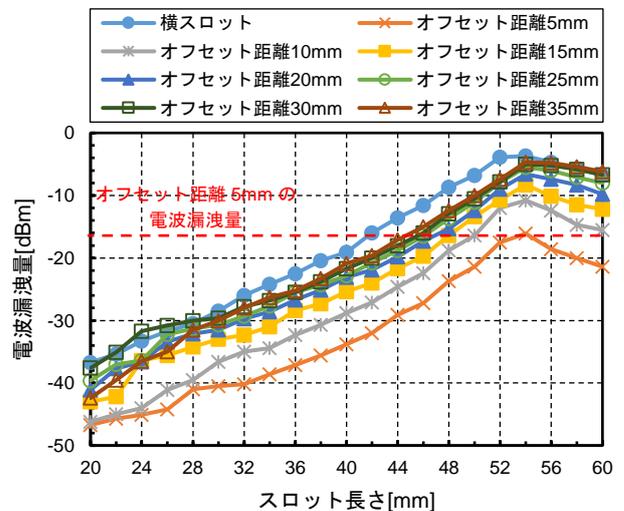


図-13 電波漏洩量と各オフセット距離における縦スロット長さ及び横スロット長さの関係

6.2 測定結果と考察

垂直不要電波量と各スロット条件の関係を図-14 に示す。水平不要電波量はいずれも $0.0003\mu\text{W}$ 以下であり、垂直不要電波量に比べて非常に小さいため、省略する。図-14 より、縦スロットにおける垂直不要電波量とオフセット距離の関係の近似直線を式(1)に示す。

$$y = 0.0059x + 0.0607 \quad (1)$$

垂直不要電波量とオフセット距離の相関係数は $R=0.98$ で、既往の研究⁸⁾で示された目安から高い正の相関があると判断する。これは、オフセット距離が大きくなるにつれ、電波を漏洩するスロットの位置がブロック端部方向に移動することで、漏洩導波管をまわりこむ電波が増加したためと考える。

よって、オフセット距離が大きくなるにつれ、発熱モルタルブロックに照射されない電波が多くなるため、縦スロットを設けた漏洩導波管を設計する際は、オフセット距離が小さいほど良い。

7. 各スロット条件を設けた漏洩導波管を用いた融雪用発熱モルタルブロックシステムによる上昇温度の測定

7.1 測定条件

前章より、オフセット距離は小さいほど良いと分かったため、オフセット距離は本研究の範囲内で最も小さい5mmから順に10mm、15mmの3つを採用する。融雪用発熱モルタルブロックシステムの漏洩導波管として、単一のスロットを設けた漏洩導波管を用いて発熱モルタルブロックに電波を照射し、発熱モルタルブロック上面の20分後の上昇温度の測定を行う。

前章の測定と同様に、各スロット条件はオフセット距離5mm 縦スロット長さ54mmの電波漏洩量を基準とし、縦スロットはオフセット距離10mmでスロット長さ50mm、オフセット距離15mmでスロット長さ48mmとし、横スロットはスロット長さ42mmとする。縦スロットはそれぞれ電波進行方向に対し、管軸の右側に設ける。

7.2 測定結果と考察

各スロット条件による20分後の発熱モルタルブロック上面の上昇温度の熱画像を図-15に示す。図-15より、縦スロットはブロック幅方向に広く、横スロットは管軸方向に広く温度が上昇している。ここで、図-15において、発熱モルタルブロック上面のブロック幅方向にA-A'区間、管軸方向にB-B'区間をとる。それぞれの区間における20分後の上昇温度を各スロット条件ごとに図-16に示す。

図-16より、縦スロットにおいて、ブロック幅方向の上昇温度 4°C の範囲は、管軸方向の上昇温度 4°C の範囲に比べ、オフセット距離5mmにおいて35mm、オフセット距離10mmにおいて48mm、オフセット距離15mmに

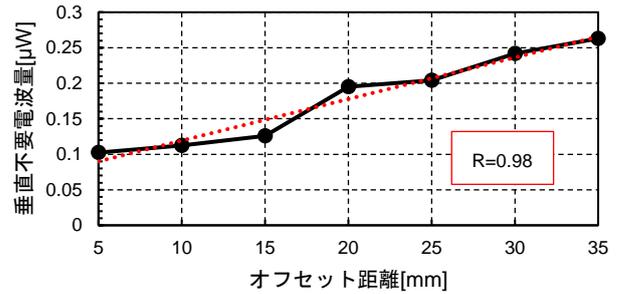
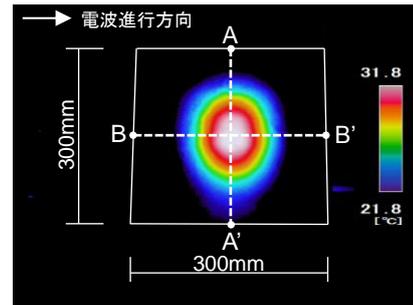
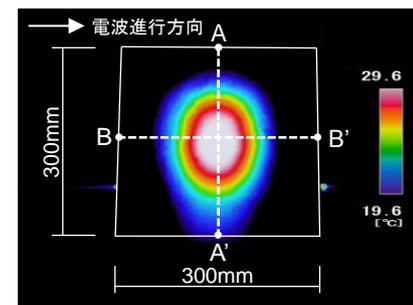


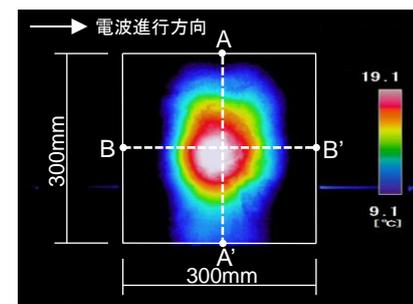
図-14 垂直不要電波量と各スロット条件の関係



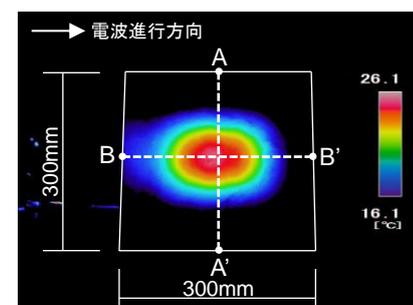
オフセット距離5mm 縦スロット長さ54mm



オフセット距離10mm 縦スロット長さ50mm

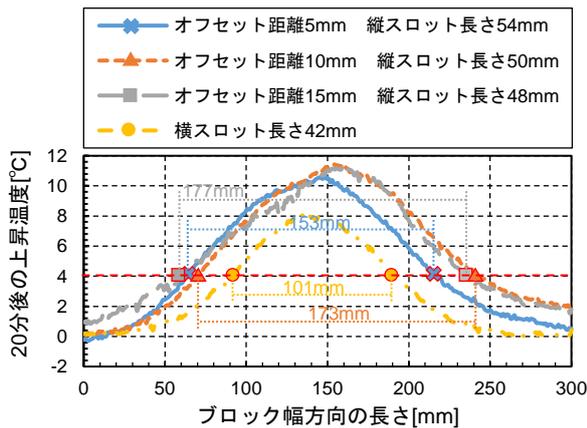


オフセット距離15mm 縦スロット長さ48mm

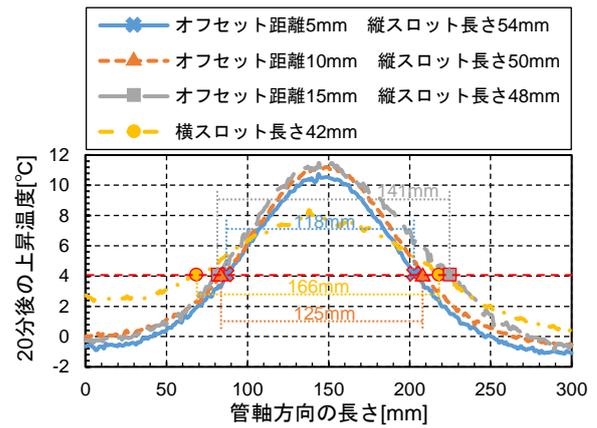


横スロット長さ42mm

図-15 各スロット条件による20分後の発熱モルタルブロック上面の上昇温度の熱画像



A-A' 区間 ブロック幅方向の上昇温度



B-B' 区間 管軸方向の上昇温度

図-16 各スロット条件による各区間の 20 分後の上昇温度

において 36mm 大きくなった。横スロットでは、ブロック幅方向の上昇温度 4°C の範囲が、管軸方向の上昇温度 4°C の範囲に比べ、25mm 小さくなった。縦スロットは発熱がいずれもブロック幅方向に広がっているのに対し、横スロットは管軸方向に広がっている。よって、縦スロットを設けた漏洩導波管を用いることで、従来の横スロットに比べ、発熱モルタルブロック上面の発熱する範囲をブロック端部方向に向けて広げることができる。

また、オフセット距離が大きくなると、ブロック幅方向の上昇温度のピークは、電波進行方向に対して右側に推移した。これは、オフセット距離が大きくなったことで、発熱モルタルブロックの発熱箇所が縦スロット側に推移したためと考える。よって、前章により明らかになった不要電波と本章により明らかになった発熱モルタルブロックの発熱箇所の偏りを考慮すると、本研究の範囲内において、オフセット距離は 5mm が良い。

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) 縦スロットは横スロットと同様にスロット長さによって電波漏洩量を調節でき、縦スロット長さだけでなくオフセット距離との組み合わせでも調節できる。
- (2) オフセット距離が大きくなるにつれ、発熱モルタルブロックに照射されない電波が多くなるため、縦スロットを設けた漏洩導波管を設計する際は、オフセット距離が小さいほど良い。
- (3) 縦スロットを設けた漏洩導波管を用いることで、従来の横スロットに比べ、発熱モルタルブロック上面の発熱する範囲をブロック端部方向に向けて広げることができる。
- (4) 不要電波と発熱モルタルブロックの発熱箇所の偏りを考慮すると、オフセット距離は 5mm が良い。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K06569、新あいち創造研究開発補助金の助成・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。漏洩導波管は有限会社プライムエンジニアリングの高橋孝直氏、測定は株式会社ジーエネックスの野田了誠氏の協力を得ました。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, Vol.69, No.586, pp.1-5, 2004.12
- 2) 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, Vol.82, No. 737, pp.969-978, 2017.7
- 3) 社団法人電子情報通信学会: アンテナ工学ハンドブック第 2 版, オーム社, 2008.7
- 4) 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
- 5) 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, 第 40 巻, No.1, pp.537-542, 2018.7
- 6) 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.30, 2012
- 7) 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システム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
- 8) 水本篤, 竹中理: 研究論文における効果量の報告のために-基礎的概念と注意点-, 英語教育研究, 31, pp.57-66, 2008.3