

マイクロ波による道路舗装上の氷の融解について

北大工学部 正員 〇森 吉 昭 博
北大工学部 正員 深 井 一 郎
古河電工(株) 正員 饒 木 征 勝
北大工学部 正員 菅 原 照 雄

1. まえがき

道路舗装の表面または内部を加熱する方法は温水や電熱を利用するものなど数多くのものが存在する。現行の中で特に舗装内部に電熱線を埋設して舗装表面の雪などを融かす方法が盛んに用いられているが、この方法は電気的には通電加熱と称される部類に属する。これに対し、電子レンジに代表される加熱は誘電加熱(マイクロ波加熱)と称されている。この加熱は被加熱物の内部の分子が超高周波により分極し、振動し、その結果誘電体に損失を生じ、内部に熱が発生することを利用している。日本ではこの周波数は表-1に示すUHF区分の2450 MHz が加熱用として許可されており、主に食品加熱に利用されている。本研究では後者の加熱が原理的には被加熱物の誘電率に依存していることに注目し、先に報告したアスファルト混合物やコンクリートが氷で覆われている場合の氷の融解のみについて検討したものである。このような対象物では氷と其の下層材料との誘電率が著しく異なり、かつ氷の誘電率が極めて小さいため、マイクロ波を照射するとマイクロ波は氷を透過し下層材料を直接加熱する。この際氷は断熱材の働きをしながら境界面から融けていくと思われる。本研究ではこのような構成物の氷の融解をマイクロ波で処理する際の種々の問題点、すなわち、一様加熱、効率にかよひマイクロ波の漏洩とこれら構成物における氷の融解について種々の実験結果から考察を試みたものである。

2. マイクロ波加熱の特徴

表-1 周波数による電波の分類

周波数区分	VLF	LF	MF	HF	VHF	UHF	SHF	EHF
周波数範囲	3 KHz 30 KHz	30 KHz 300 KHz	300 KHz 3 000 KHz (3 MHz)	3 MHz 30 MHz	30 MHz 300 MHz	300 MHz 3 000 MHz (3 GHz)	3 GHz 30 GHz	30 GHz 300 GHz
波長範囲	100 km 10 km	10 km 1 km	1 000 m 100 m	100 m 10 m	10 m 1 m	100 cm 10 cm	10 cm 1 cm	10 mm 1 mm
名称	長波		中波	短波	超短波	超超短波		
	高周波				超高周波			

マイクロ波加熱(誘電加熱)においては被加熱物が毎秒あたり単位体積(1 cm³)中に発生する熱エネルギー、P、(Watt/cm³)は被加熱物の誘電率をε、(クーロン/V・cm)、被加熱物の誘電率をtanδ、周波数をf (Hz)およびマイクロ波の電界の強さをE (V/cm)とすると次式で表わされる。

$$P = \frac{\pi}{9} \varepsilon \cdot \tan \delta \cdot f \cdot E^2 \times 10^{-12} \dots \dots \dots (1)$$

(1)式より同一の物質で発熱量を増加させるには周波数および電界の強さを大きくすればよいことになる。ところが前者は現行日本では2450 MHz のものだけしか許可されていないので、熱エネルギーを大きくするには同一物質の場合後者の場合しか考えられない。一方異種の物質がワット数と同一の条件のもとで加熱されると、発生する熱エネルギーは誘電率と誘電率の積に正比例するが、これらの値は物質により異なるため、物質により発生する熱エネルギーは異なる。表-2は代表的な物質のこれらの値を示す。ここに示された水および氷以外のデータは約20℃における値である。この表から水の誘電率と誘電率の積は極端に大きいことがわかるが、このことは水がこの温度ではマイクロ波により加熱されやすいことを意味している。

以上のデータは温度および周波数を一定に保ったとき得ら

表-2 各種物質の誘電率および誘電率と誘電率の積

物質名	誘電率	誘電率と誘電率の積
氷(-12℃)	3.2	0.003
氷(20℃)	7.7	11.55
原油	92.2	—
ポリエチレン	2.3	0.012
ポリスチレン	2.6~3.0	0.0012~0.0005
塩化ビニル	3~5	0.075~0.25
clay soil	2.27	0.034
loamy soil	2.47	0.016
sandy soil	2.55	0.0158

れたものであるが、図-1、および図-2はこれらを変化させて蒸留水の発生エネルギーを検討したものである。発生エネルギーは約2~3°Cにおいて極大となり0°C以下においては急激に減少する。一方、発生エネルギーの周波数依存性は図-1に示すように温度により異なるが、極大値となるのは周波数が10⁴ MHz 近辺である。図-1には参考のために2450 MHz の周波数を図示した。

マイクロ波加熱は一般の外部加熱と比較すると次のような特徴がある。

長所としては

- (1) 電界の強さを調節すれば被加熱物の深部まで加熱可能である。
- (2) 加熱時間が非常に短い。
- (3) 加熱目的以外のものが加熱されないため熱効率が低い。
- (4) 真空中の物体や包装された物体に対しても加熱可能である。
- (5) 被加熱物の周囲に高温発熱体が存在せず、電波の印加を停止すれば加熱は直ちに停止するため、被加熱物のオーバーヒートが少い。
- (6) 操作が簡単で適応性がある。
- (7) 作業環境性がある。

かあげられる。これに対して、欠点としては

- (1) 装置が比較的高価である。
- (2) 大面積の加熱に対しては一様加熱が難しい。
- (3) 電波漏洩に対し、適切な処理が必要である。

3. マイクロ波加熱の問題点に関する研究

マイクロ波加熱において特に問題となるのは上に掲げた欠点の(2)と(3)である。本研究ではマイクロ波の電界が一樣になれば一様加熱が得られることに留意し、一様電界を得る実験と負荷のある場合の電波漏洩について、2種の混合物について検討した。

図-3に示すような導波管タイプのマイクロ波アプリータでは一様電界を得ることが特に難しくとされており、今までにも導波管の開口部をも含めた形状の研究が数多く存在し種々の検討がなされているが、本研究で主に用いたものは図-3に示す矩形の開口部をもつ導波管である。この導波管を運用したマイクロ波アプリータの導波管開口部方向から本体を写したのが写真-1である。ここでは開口部付近に電波漏洩防止のために金網を2重に張りめぐらしてある。写真-1の下部の図形はこのアプリータに金網を取り付けずに直接この上にベークライト板を置き、その上にゼロックスの粉を撒き、5秒間電源を入れたとき粉がベークライト板に焼きついた模様を示す。この模様は電界の強さに関係すると考えられるので、この図形と導波管の開口部の形状とを比較すると、電界は開口部の左右で著しく絞られているのに反し、上下方向では開口部の端とはほぼ同じであることがわかる。

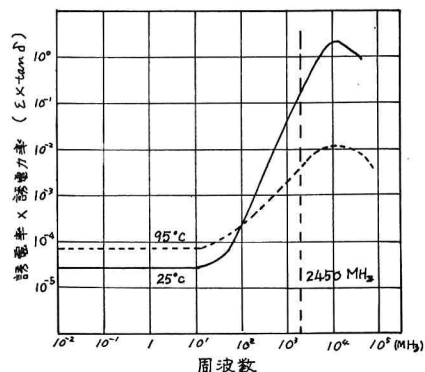


図-1 蒸留水の誘電率と誘電率の積と周波数との関係

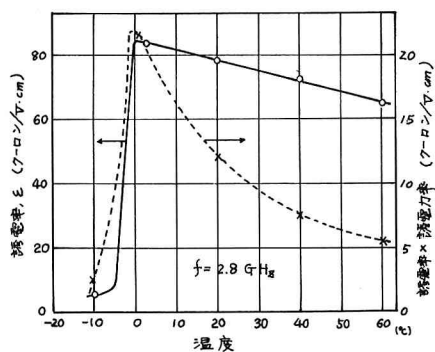


図-2 蒸留水の誘電率および誘電率と誘電率と温度の関係

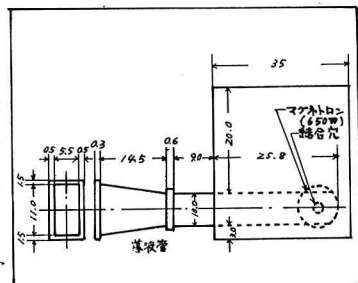


図-3 マイクロ波アプリータの導波管と本体

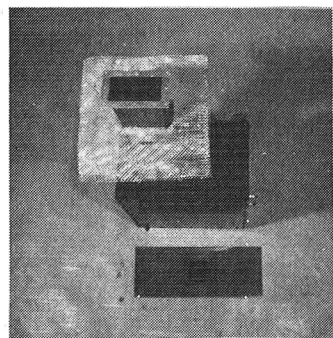


写真-1 マイクロ波アプリータ(金網付)とベークライト板上に焼きついた模様

写真-2の下部の2個の器具は導波管であり、このうち右側の導波管を使用して写真-1と同様にバックライト板とセロックスの粉を用いて電界の一樣性の実験を行、た結果は上部の2個の黒い斑点で示されている。このように導波管の形状を変えると開口部の電界が著しく異なる。

写真-3の結果は上で用いた導波管の先端に共振器となるファブリペロと称される写真-2の上部の丸形の器具を取付け、この真中における電界の強さを測定したものである。ファブリペロを取付けたアプリータでは電界が一方向だけ特に一樣であることは注目に値すると思われる。

マイクロ波の漏洩に関しては次のような実験を行、た。写真-4に示すような図-3のタイプの導波管を使用したアプリータ（出力公称650W）の前面に方眼紙をセットし、そのすぐ後にアスファルト混合物の板およびコンクリート板（各々30×30×5cm）を置き、これら物質の表面となる平面上でいかにどのマイクロ波の漏洩があるかを電磁気漏洩探知器（Narda製、測定範囲、0.01~200 mW/cm²）で測定した。

使用した材料の配合は次の通りである。

アスファルト混合物（重量%）		コンクリート（養生7日間）	
13~10	26	セメント（早強セメント）	
10~7	16		6.40 kg
7~5	6.6	89 ⁹⁹ Pen 95	
5~2.5	20	水：	3.08 kg
2.5~1.2	10	砂：	18.9 kg
1.2~0.6	10	砂利：	22.8 kg
0.6~0.3	10		
標準砂	6.4		
細目スラー	6.8		
アスファルト	5.7		

実験にはこの他にマイクロ波の熱効率を増加させる目的で両混合物とも容積で0.5%の針金（直径0.25mm、長さ約1cm）を混入したのもを作製した。

図-5は養生7日後のコンクリートで針金のはいたものとはいいはものとのマイクロ波漏洩の実測値を整理し、等漏洩線として描いたものである。針金のはいたコンクリートでは1mW/cm²の等漏洩線が著しく広がっているようにみえるが、5mW/cm²の等漏洩線では両者の差はほとんどみられないとい、てもよい。

図-4はアスファルト混合物について図-5と同様の処理を行、た結果である。

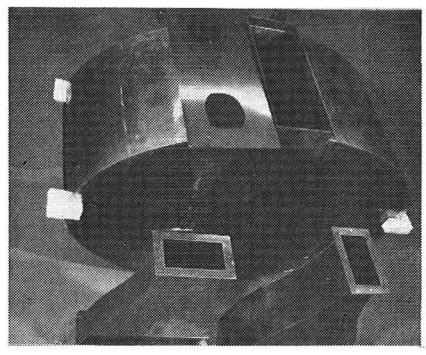


写真-2 上部：ファブリペロとバックライト板に焼いた模様
下部：導波管(2個)

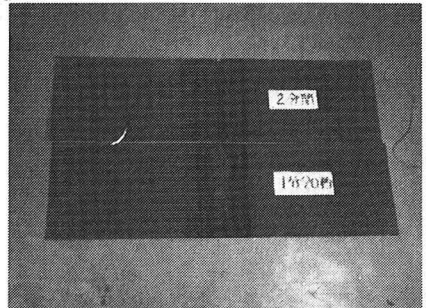


写真-3 ファブリペロの内部でバックライト板に焼いた模様

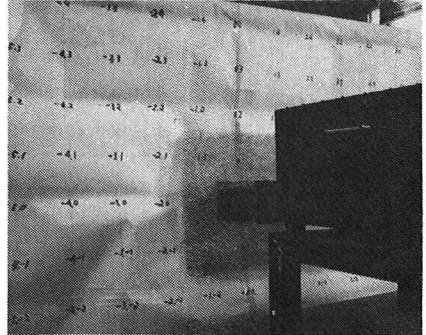


写真-4 マイクロ波漏洩の実験の様子

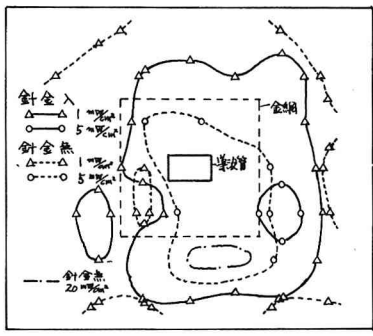


図-4 アスファルト混合物における等漏洩線図

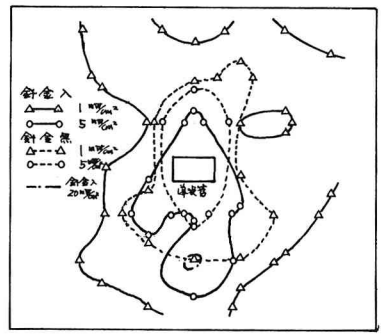


図-5 コンクリートにおける等漏洩線図

アスファルト混合物の場合はマイクロ波の漏洩量が著しく大きく極部的には 100 mW/cm^2 の値に達したので、コンクリート照射のときと異なり、写真-4に示したごとく、導波管の前面に金網（針金の直径 0.6 mm 、矩形の穴の一边長 4 mm ）を2枚重ねて実験を行った。図-4はこの結果を示すが、コンクリートの場合と異なり、アスファルト混合物では針金を混入したことにより、著しく漏洩量が減少すると共に、導波管の形状が異なる。

アスファルト混合物およびコンクリートがマイクロ波照射によりどの程度加熱されるかについて検討した結果は表-3に示す。ここでは両混合物ともに導波管の前面に2枚の金網を施して実験を行っている、4種の供試体の温度はマイクロ波を30秒間照射し、その後1分間照射を停止し、その後また30秒間照射するという方法でマイクロ波照射停止時間内に、デジタル温度計（ $0 \sim 1200^\circ\text{C}$ 、最小目盛 1°C 、横河製）を使用して測定した。これよりアスファルト混合物に針金を混入した供試体は著しく、加熱されやすいことがわかるが、この最大温度は表面 5 mm 以内であり、それより深い部分では 60°C 程度、また底部では 20°C と室温と同一であった。このようにコンクリートとアスファルト混合物の針金入りの供試体に著しい温度差がみられるのはマイクロ波照射によりアスファルト混合物中のアスファルトが局部的に熱せられ、その結果その部分のアスファルトの誘電率率、 $\tan \delta$ が急激に増加するためであろうと推定される。

表-3 各混合物の加熱温度 (20°C)

混合物 \ 加熱時間	30秒	1分	1分30秒
コンクリート (針金なし)	30	43	53
コンクリート (針金あり)	55	70	75
アスファルト混合物 (針金なし)	25	36	42
アスファルト混合物 (針金あり)	121	—	—

4. 氷の融解

表-4 下層材の表面温度と氷の融解度
(氷温 -12°C) (2分間照射)

混合物	温度 ($^\circ\text{C}$)	氷の径 (cm)
コンクリート (針金なし)	10	約4
コンクリート (針金あり)	50以上	約10
アスファルト混合物 (針金なし)	18	約4
アスファルト混合物 (針金あり)	130	約10

氷の融解に関する実験は3に使用した供試体上に厚さ約 5 mm の氷を張り、写真-1に示すマイクロ波アプリケーションータを使用した。この実験の様子は写真-5に、またこの結果は表-4と写真-6に示す。写真-6の上段はアスファルト混合物であり、下段はコンクリートである。また左側の2枚は共に針金の入った供試体である。いずれの氷も程度の差はあるが融け、特に針金入りアスファルト混合物では比較的短時間で融けた。

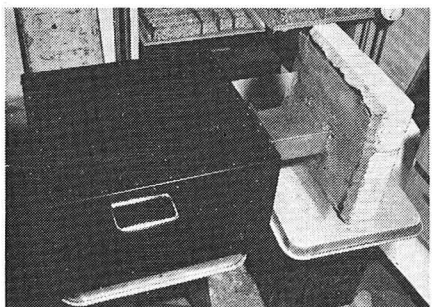


写真-5 氷の融解の実験の様子

5. 結論

1. マイクロ波アプリケーションータによる比較的大面積照射時の一様電界は導波管の形状を適当に選り、ファブリオタイプの共振器を採用することにより可能であると思われる。
2. マイクロ波の漏洩に対しては金網等の遮断物で十分処理可能と思われる。
3. アスファルト混合物中に針金の入ったものは、マイクロ波照射により表面が特に照射されるため、上面の氷は融けやすい。

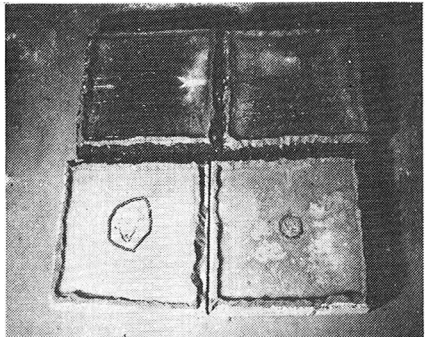


写真-6 4種の供試体上の氷の融解状況

参考文献

1. 森吉昭博, 深井一郎, 菅原照雄: 第12回日本道路学会一般論文集, pp 219~220, 1975
2. Bengtsson, Ohlsson: IEEE Proc. pp 45, Jan. 1974
3. R.G. Sawyer, L.L. Boyko, G.M. Hund: Syracuse university Research Corporation, HPR-3(1), pp 77~81, 1973.