



室蘭工業大学

学術資源アーカイブ

Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive



マイクロ波加熱を用いたアスファルト舗装材料原位 置再生工法の開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学地域共同研究開発センター 公開日: 2016-12-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 鏡, 慎, 川口, 秀樹, 溝淵, 優 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009095

マイクロ波加熱を用いたアスファルト舗装材料原位置再生工法の開発

鏡 慎^{*1}・川口 秀樹^{*1}・溝渕 優^{*2}

1 はじめに

道路舗装で広く用いられているアスファルト舗装では新設、補修のいずれにおいても再生材を利用することが多くなってきている。この場合、補修の必要な部分のアスファルト混合物は引きはがされ、プラントに輸送されたのち、重油バーナーによって加熱熔解され、さらに必要に応じて新規の合材などを加えて処理が行われるのが通常である。これはアスファルト混合物の95%を占める骨材が重要な資源であることによる。しかし、現在の重油バーナーによる処理は決して効率が低いとは言えないし、アスファルトは炭化してしまうため再利用できない。一方、この再生と補修を原位置で行うことができれば輸送に伴うエネルギーが不要となることから、路上再生処理法も提案されているが、プラント処理同様効率が低いほか、装置が大規模になるなどのゆえに、本格的に導入されるには至っていない。

これらに対して著者らはマイクロ波加熱によるアスファルト混合物熔解処理を提案している。アスファルト混合物中の骨材は1~2%の水分を含んでいて、一般家庭の電子レンジでも使用されている、2450MHzのマイクロ波のエネルギーをよく吸収する。水分が加熱され温度上昇することで骨材が温度上昇し、その周りに付着しているアスファルトを溶かす。直接加熱であることから加熱効率がよく、バーナー加熱の場合のような過熱によるアスファルトの炭化もない。この技術は、バーナーによる場合よりも装置の小型化が期待できることから原位置での路上再生処理の実現を可能にするものとして大きな期待が持てる。

ところで、マイクロ波によってアスファルト混合物がよく加熱できることは以前から知られていた事実ではあるが、その再生などの処理技術と

しては本格的に採用されてこなかった。これは、原位置から引きはがされてきたアスファルト混合物の塊をプラントにおいてマイクロ波によって安定的に加熱することには、通信分野を主流とするマイクロ波工学の一般的な立場からみて不確定な要素が多いことに原因があった。これに対して、原位置における加熱は、亀裂や凹凸があるにしても引きはがされた場合よりははるかに限定された範囲の加熱対象となることに著者らは着目し、高効率で品位の高いアスファルト混合物再生工法の開発に着手したというのが経緯である。

ここで著者らはマイクロ波をアスファルト舗装面に照射する際に楕円形断面を有する空洞を採用している。これは楕円の短軸付近が焦点を共有する二つの放物線で近似される場合、短軸付近にエネルギーの集中するモードを発生させ易いという事実を利用するものである。マイクロ波電源によってまず空洞を安定なモードで励振し、さらにこの状態を崩さずにマイクロ波を放射することの可能な開口をこの空洞に設けようという考えである。昨年度の報告はこの空洞の特性に関する基本的な解析と実験に関するもので、楕円周辺部に開口を設けてアスファルト舗装を加熱することを意図したものであった。このいわば空洞を立てて使用するのに対して、本報告においては空洞を横倒しにして楕円端面に開口を設けて利用する場合について解説している。これはアスファルト混合物の再生処理だけではなく、アスファルト舗装表面を広く浅く加熱する場合も意図している。

この研究ではFDTD法による解析を基に設計を行っている。この空洞は楕円端面を舗装表層に接する形で設置することを想定していて、構造的には上下2段とし、それらの間に開口を設ける。上部空洞には導波管を接続して2.45GHzのマイクロ波を入射させ、下部空洞は上部との間の開口を通してマイクロ波が供給される。また、下部空洞

*1 もの創造系領域

*2 (株)NIPPO コーポレーション

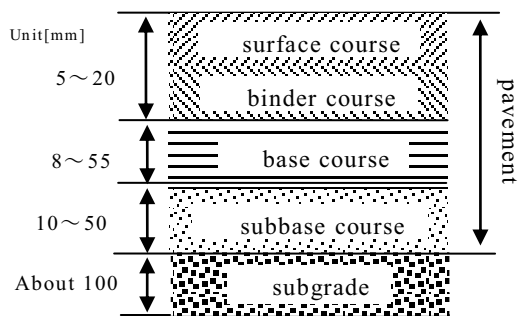


図1 アスファルト舗装の構成

はその舗装表面側の導体端面が取り除かれた半開放空洞とする。

設計の手順としてまず1)密閉した1段の楕円形断面空洞内部の電磁界をFDTD法にて解析し、その結果を2段構造にした場合の基本とした。次に2)空洞内に様々な開口部の形状を変化させ、それが空洞内のモードの形成に及ぼす影響と、開口部より照射されるエネルギー量についての評価を行った。さらに3)マイクロ波をアスファルト混合物に照射したときの温度分布を解析によって求め、実験値との比較を行った。さらには、4)ライン状にマイクロ波を照射することの可能な開口部形状を提案した。

2 アスファルト混合物について

2.1 舗装道路について

アスファルト舗装は図1のように構成されており、一般にアスファルト舗装道路での修繕の際には、このうちの一層及び、修繕が必要な層だけ掘削する。本論文では主に表層を加熱対象とする。

2.2 アスファルト混合物の含有物質

現在の日本の舗装道路では主な材料としてアスファルト混合物が用いられているが、その構は約5%がアスファルト、15~30%が粒径2.5[mm]以下の骨材、65~80%が粒径2.5~20[mm]の骨材となっている。ここで、アスファルト混合物の約9割を占める骨材は含水率が約1~2%であることが判明しており、このことに着目しマイクロ波による加熱が検討されている。

3 Fabry・Perot 共振器

3.1 Fabry・Perot 共振器の楕円近似

Fabry・Perot 共振器は光学の分野で広く応用されているが、今回はこれをマイクロ波加熱器として応用した。このFabry・Perot 共振器の利点としては、電界を一部に集中させることが容易であり、電力密度を高くとることが可能な点や、2次元的に電磁界分布を扱うことが出来る点などが挙げられる。ここではFabry・Perot 共振器を楕円近似

し、長軸長 a と短軸長 b が $a=\sqrt{2}b$ を満たすような楕円に設計した[2], [3](以降、これを楕円型空洞と称す)。この条件の場合、楕円短軸付近が楕円の中心に共通の焦点を持つ2本の放物線を近似するものとなり、短軸付近にエネルギー密度を高くとることが出来る。

3.2 楕円型空洞内の電磁界分布

楕円型空洞に導波管を接続し、 TE_{10} モードの周波数2.45[GHz]マイクロ波を入射させた場合の空洞内部の電界をFDTD法を用いて解析した。図2に解析モデルを示す。本解析モデルでは、解析領域の導波管に当たる部分に12層のPML吸収境界条件を配置した。

この図において、解析領域は $(x \times y \times z) = (680 \times 80 \times 646)$ [mm]である。またセルサイズは $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (2.0, 2.0, 2.0)$ [mm]とした。なお、FDTD法におけるタイムステップはCourant条件を考慮に入れて 3.710×10^{-12} [sec]と設定し、空洞の外壁は完全導体と見なし境界条件を課した。空洞のサイズは、中央に界を集中させるため $a=\sqrt{2}b$ の関係を満たすようx軸(長軸)方向は628[mm]、z軸(短軸)方向は444[mm]、y軸方向は54[mm]とした。空洞内の電界強度を解析した結果を図3に示す。図3より、理論通り短軸付近に強い界が集中することが確認された。これを基に加熱空洞の設計を行う。

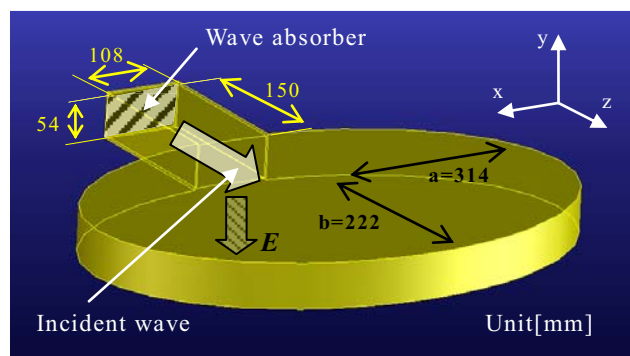


図2 解析モデル

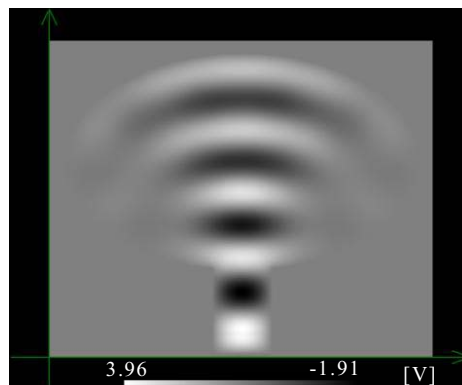


図3 空洞内のx-z平面における電界分布

4 端面に設けた開口部からの電磁界照射

4.1 開口部の形状と空洞内の電磁界分布

広い面積の加熱を実現するため、楕円型空洞の端面に開口部を設け、そこからマイクロ波を照射させることを考える。その際、短軸上に集中する界を利用したいという観点から内部のモードは出来るだけ崩さないことが望ましい。ここでは開口部の形状を変化させたモデルを解析し、開口部の形状と空洞内のモード形成の関係について検証した。図4、図5に解析モデルを示す。このモデルは、図2の楕円型空洞のモデルにマイクロ波を照射させるための開口部と、導波管のy軸方向の

大きさと同じ大きさの下部空洞を取り付けた物である。下部空洞の端面は開放されており、その下には12層のPML吸収境界条件を設定している。このモデルにおいて解析領域は $(x \times y \times z) =$

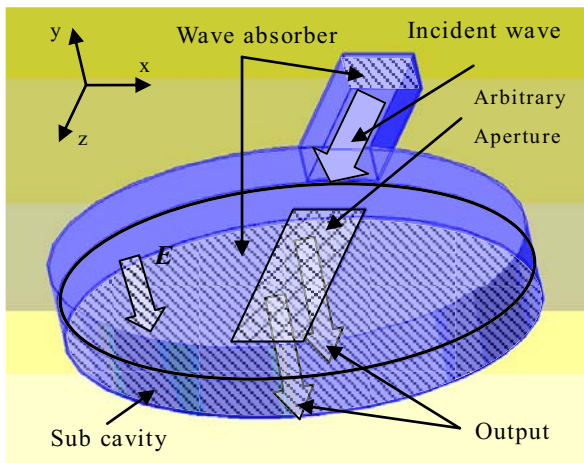


図4 解析モデル

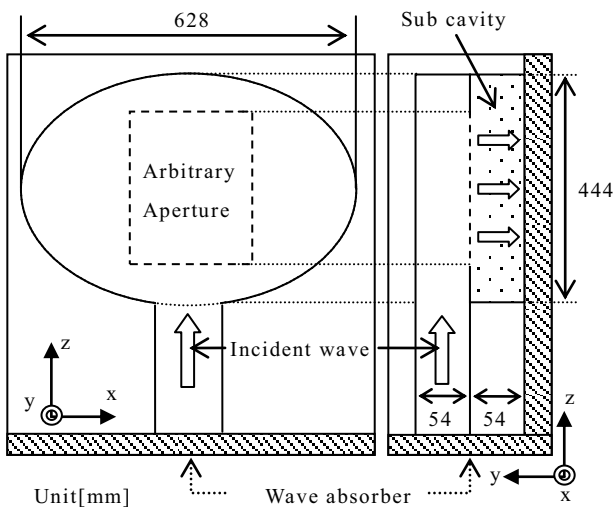
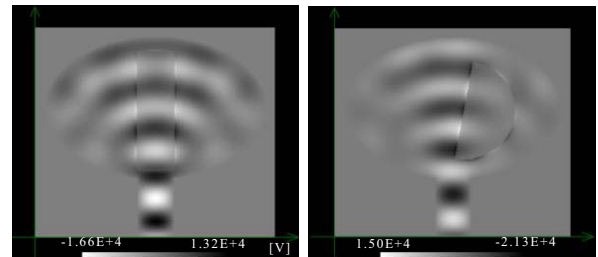


図5 解析モデル

$(680 \times 156 \times 646)$ [mm]である。FDTD法に関する種々のパラメータは3.2の解析で扱った値と同じである。

4.2 解析結果

図6に、1[kW]の電力を入力した際の解析結果の一例を示す。開口部の形状や大きさ、対称性など様々な要素を変化させたモデルを解析したところ、全てのモデルについて、空洞内の電磁界分布は開口部の影響を受けずに短軸上に界が集中するという結果を得た。モードが崩れない理由としては、下部空洞との間に開口を設けてもそれが電界の方向を大きく乱す要素とはならず、上部空洞のマイクロ波の分布にはほとんど影響を与えないためと考えられる。そのため、実際に装置を製作する際に開口部のサイズや対称性などが多少崩れても内部のモード形成には大きな影響を与えないと推測される。また、照射される電力と開口部の面積との関係性を調べるため、矩形の開口部を持つモデルを解析した。その際、開口部のz軸方向の大きさは364[mm]に固定し、x軸方向の大きさのみを変化させた。図7に開口部より照射された電力を示した。図7より、開口部のx軸方向の大きさが導波管と同じサイズである



(a) 開口部 1

(b) 開口部 2

図6 開口部を設けたモデルの電界分布

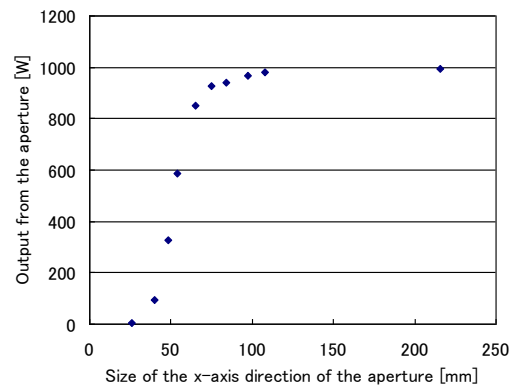


図7 開口部の面積と照射される電力の関係性

108[mm]付近の大きさであれば，出力される電力は入力された電力とほぼ等しいことが示された。

5 アスファルトに与えられる熱量

5.1 解析的検討

4.2 より，端面に開口部を設けても空洞内のモードは維持されることが明らかとなった。そのため，照射面に $(x \times y \times z) = (654 \times 150 \times 620)[\text{mm}]$ のアスファルトを設置し，アスファルトに与えられる熱エネルギーを解析した。解析領域は $(x \times y \times z) = (678 \times 260 \times 644)[\text{mm}]$ である。解析に用いた空洞のモデルは，4.1 で用いたモデルの下部空洞の y 軸方向の大きさを 54[mm]から 10[mm]に縮めた物である。

ここで，表 1 に解析的検討で用いたアスファルト混合物の電気定数及び熱定数を示す。この表 1 において ϵ_r は比誘電率[4]， $c[\text{J/g/K}]$ は比熱[5]， $\rho[\text{kg/m}^3]$ は密度， $\sigma[\text{S/m}]$ は導電率である。なお，密度と導電率に関しては計測及び実験から得られた値を基に設定した。

5.2 実験的検討

図 9 に実験で用いた空洞を，図 10 に測定系を示す。本空洞は，解析モデルと同じサイズの楕円壁を製作し，マイクロ波が漏れないようアルミ板にてサンドウィッチ状に挟んだ後，これを電源と

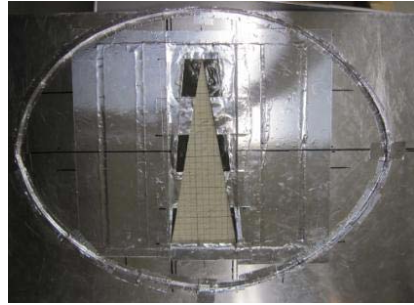


図 9 製作した空洞の一例

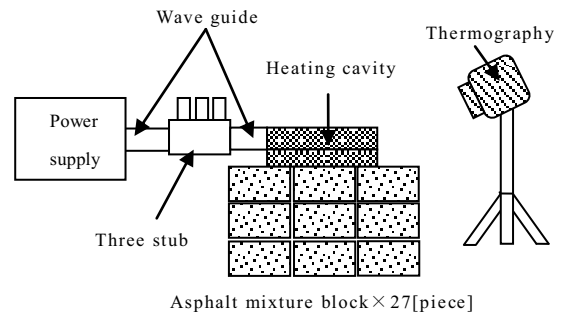


図 10 温度分布の測定系

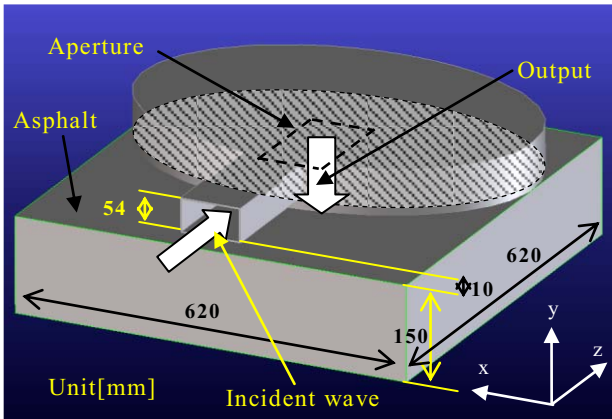
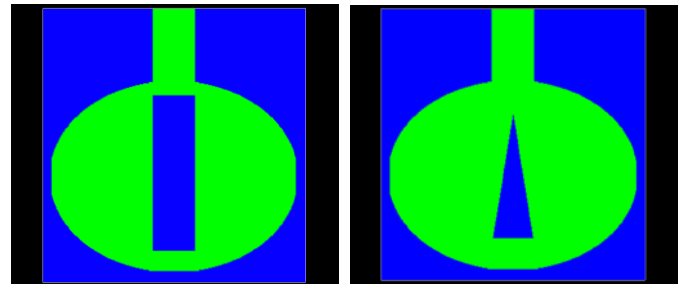


図 8 解析モデル

表 1 アスファルト混合物の定数

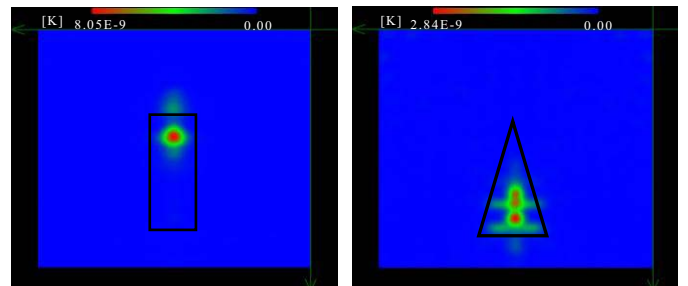
Constants	Value
$c[\text{J/g/K}]$	0.92
$\rho[\text{kg/m}^3]$	1.40×10^3
ϵ_r	2.7
$\sigma[\text{S/m}]$	3.0×10^{-3}



(a) 開口部 1

(b) 開口部 2

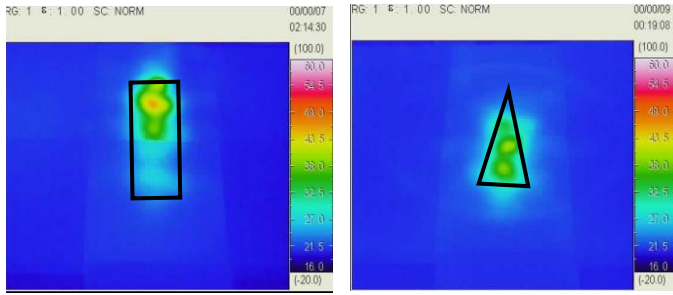
図 11 開口部の形状の一例



(a) 図 10(a)の解析結果

(b) 図 10(b)の解析結果

図 12 アスファルト混合物表面の解析結果



(a) 図 10(a)の測定結果 (b) 図 10(b)の測定結果

図 13 実験によるアスファルト混合物表面の温度分布

ストレート導波管とスリースタブ整合器に接続したものである。空胴の照射面には、1枚当たり $(x \times y \times z) = (300 \times 300 \times 50)$ [mm]のアスファルトを9枚正方形型に並べ、これを計3層設けた。測定では周波数 2.45[GHz]のマイクロ波 1[kW]を180[sec]入力し、その後サーモグラフィにてアスファルト混合物1層目の表面の温度分布を測定した。

5.3 解析結果と実験結果の比較

図 11 に解析及び実験を行った空胴の例を2つ挙げる。図 12 には、図 11 で挙げたモデルのFDTD法による1層目のアスファルト混合物表面における温度分布の解析結果を示す。なお、解析時間は 72×10^{-9} [sec]である。また図 13 には、加熱実験を行った際の1層目のアスファルト混合物表面の温度分布をサーモグラフィを用いて測定した結果を示す。

図 12 において、短軸上に矩形の開口部を設けた場合、開口部の大きさに関わらず図 12(a)が示すように、与えられる熱は導波管側に近い入り口の1カ所に集中し、開口部全体から均一にマイクロ波を放射させることが出来なかった。一方、二等辺三角形型の開口部のモデルは、頂点付近からはエネルギーは放射されていない。しかし、開口部のx軸方向の大きさがある程度大きくなった部分から先はエネルギーが照射されている事が確認できる。このことから、開口部をマイクロ波が放射されにくい大きさから放射されやすい大きさに変化させることで、照射されるエネルギーを1点に集中することを防ぐことが出来ると推測される。

更に、これらの解析結果を図 13 の実験的結果と比較する。温度分布に関しては、解析的検討は熱伝導を考慮していないため、実験結果と比べ多少違いが見られるものの分布の形状はほぼ一致している。上昇温度に関しては、解析的検討にお

いて線形的に温度が上昇すると仮定した場合、実験結果と比較すると50%程小さい値となってしまった。これは比熱にアスファルト混合物ではなくアスファルトの比熱を用いたこと等が原因であると考えられる。そのため本解析においては温度分布に関してはその有用性を確認出来たが、上昇温度の把握には比熱を始めとするアスファルト混合物の種々の定数を見直す必要がある。

5.4 新たな開口部の提案

ここではアスファルトを効率的に加熱すべく、ライン状にマイクロ波を照射させ、それを垂直方向に走査することで広い面積の加熱を実現できるモデルを考える。そのため、これまでに解析した結果を考慮し次のような3つの開口部を考えた。一つ目は、開口部のx軸方向の大きさを48[mm]から108[mm]まで三次の補間スプラインにて徐々に広げたモデルである。二つ目は、x軸方向の大きさが48[mm]の矩形型開口部のz軸方向に延びる辺をsin関数を用いた曲線に置き換え、電界の強い部分の開口部を狭くし、電界の弱い部分を広くしたモデルである。また三つめは、二つめの開口部の位置をずらし、電界の強い部分の開口部を広くしてある。これらのモデルを5.1と同様の解析を行い、アスファルトの温度解析を行った。モデル図とその解析結果を以下に示す。図 14 の形状では、開口部が広がった部分に若干の温度上昇が見られるものの、矩形の開口部と同じように開口部の入り口付近にエネルギーが集中している。しかし図 15 では、エネルギーは開口部に沿ってライン状に分布している。これは電界の強い部分からのマイクロ波照射を阻害することで、次の開口部で放射されるエネルギーが残るためと考えられる。図 16 では、ライン状の加熱が出来ているものの、図 15 のような均一な加熱が出来ていない。これは初めの広い開口部の部分にエネルギーが集中してしまい、それ以降の開口部にエネルギーが行き渡らないためと思われる。なお、図 15 に対応する実験を行い、解析結果を裏付ける結果を得ている。

これらの結果より、開口部の形状を変えることで、端面より照射されるエネルギーの分布を変化させることが可能であることが明らかとなった。

6 むすび

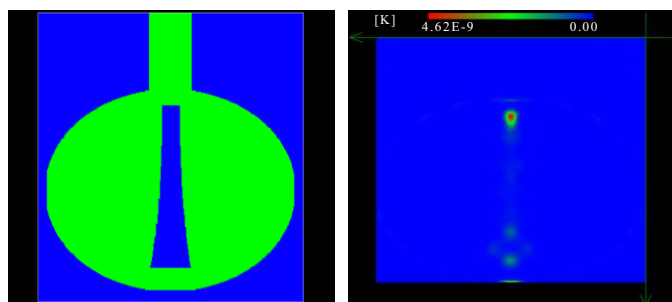
本論文ではマイクロ波を用いたアスファルト加熱を実現すべく、楕円型空胴の空胴内における電磁界分布と空胴の端面に設けた開口部からの

電磁界放射，及びアスファルト混合物に与えられた温度分布についてFDTD法を用いて解析を行った。結果として，ライン状に電磁界を放射させる開口部を設計できた。

今後はより正確な上昇温度の把握と，空胴のサイズを拡大した場合についての検討を行いたい。

文献

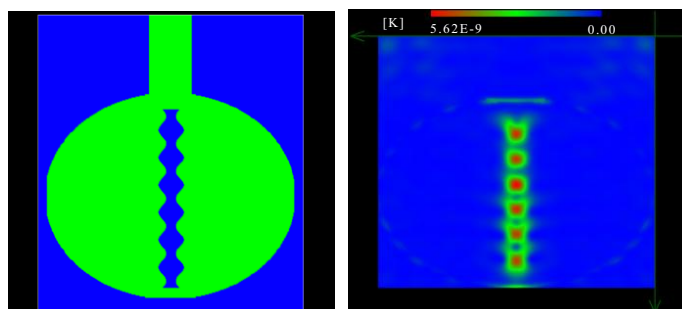
- (1) 奥平真誠，神谷恵三，谷口豊明，野村健一郎，橋本修治，松本孝之，"アスファルト舗装の設計・施行ノウハウ"，藤波督，飯田章夫(編)，近代図書，(1996)，p9-13，p192-223.
- (2) 榎戸武揚，"異方性媒質を含む開放型共振器及び導波系に関する研究"，学位論文，(1971)，p52-93.
- (3) 三輪昌寛，鏡慎，川口秀樹，尾本志展，"アスファルト混合物のマイクロ波加熱"，電気・情報通信学会マイクロ波研究会，信学技法，vol.107，no.1，EMT2007-12 (2007，August)，p71-74.
- (4) 国立天文台編，"理科年表 平成 21 年"，丸善株式会社，(2008).
- (5) 日本機械学会，"伝熱工学資料 改訂版第 4 版"，丸善株式会社，(1986).



(a) 開口部 1

(b) 図 14(a)の解析結果

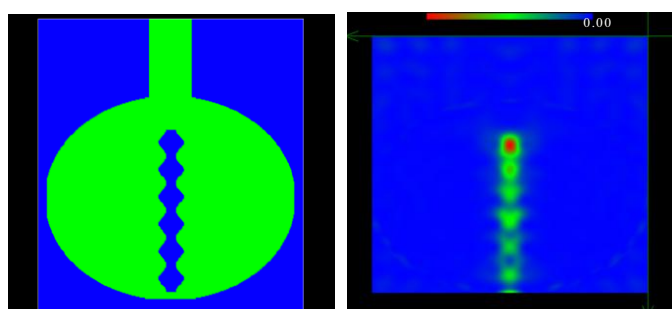
図 14 3 次の補間スプラインによる開口部



(a) 開口部 2

(b) 図 15(a)の解析結果

図 15 正弦関数を用いた曲線による開口部



(a) 開口部 3

(b) 図 16(a)の解析結果

図 16 開口部 2 の位置をずらしたモデル