118. 微小セラミック球の電磁波散乱現象による輻射熱吸収抑制効果の研究

京都大学大学院工学研究科教授　　三ケ田　均

概要

省エネルギーに大きく貢献し得る輻射熱吸収抑制効果を有する微小セラミック球を混入させた塗料の電磁波透過抑制効果を数値的に解明し、メカニズムについての知見を得た。数値計算では，微小セラミック球をランダムに配置するだけでなく，微小セラミック球を混入させた塗料層と鉄層と仮定した屋根や壁の間の媒質境界条件を加味した手法を用い，微小セラミック球を混入させた塗料層透過後の電磁波強度を推定した。今後，より高い輻射熱吸収抑制効果を目指す研究に繋がる成果であると考えられる。

背景および目的

在来型エネルギー資源が減耗する昨今、省エネルギーの徹底的な推進が重要である。第二次オイルショック以降、主なエネルギー資源として使われている石油価格は高騰を続けているにも拘らず、世界のエネルギー需要は増加している。日本では、省エネルギーの推進や石油代替エネルギーとして原子力発電や再生可能エネルギーの利用を促進してきた[1]。しかし、原子力発電については、安全性の確保および放射性廃棄物の処理が深刻な問題となり，現況維持あるいは現在以上の促進は難しい。また、自然エネルギーに関しても、コスト高を反映し、補助金や電力買取制度の補助無しに急速な普及は困難である。現在のエネルギー需要を賄うには、省エネルギーの達成が不可欠である。

省エネルギーを達成する方法の一つとして、輻射熱を抑制する遮熱塗料が注目されている。強い日差しに曝されることで上昇する建物の屋根や外壁の温度上昇を抑制することができれば夏場の室温をエアコンを使用することなく抑えられ、省エネルギーの達成が期待できる。この方法では、冬場には建物屋内から屋外への放射熱を抑える効果も考えられることから、冬の暖房によるエネルギー消費を減らすことも期待できる。実はこの輻射熱の抑制という観点で，過去実験的に確認された現象がある。それは，ミクロン単位の微小セラミック球を混入した塗料を金属の表面に塗ることで、日光照射時の温度上昇が抑制されるのである（図1および2)。残念ながら，この輻射熱抑制効果についての実験は行われているものの，現象の理論的な裏付けがなされていない。そのため，効果は認められるものの，どの程度の大きさの微小セラミック球をどの程度の割合で塗料に混入する必要があるのかなど，今後の効率的な塗料の選択に障害となっている。

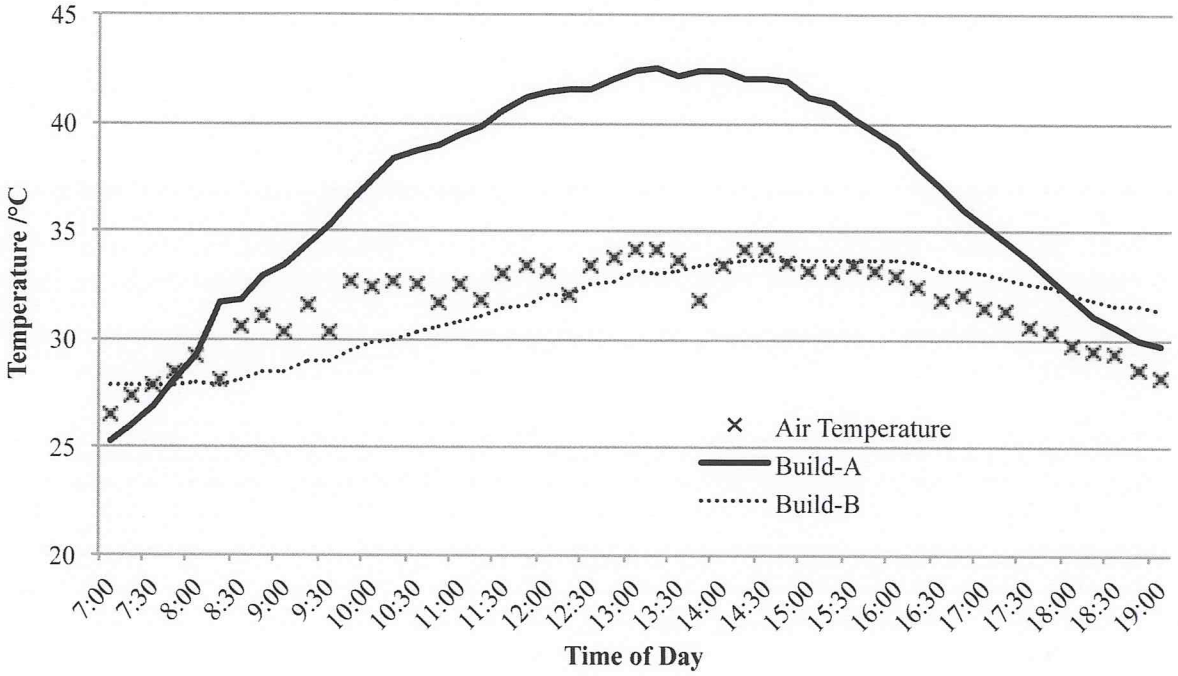

図 1. 微小セラミック球入り塗料塗布前の屋根の温度変化.

2 つの建物（Build-A および Build-B）の屋根の表面において 2007 年 8 月 26 日に測定された表面温度と気温の時間変化（Ohkawa, et al., 2011）. Build-A は塗料未塗布，Build-B は微小セラミック球を混入させた塗料を塗布してある．Build-A と Build-B で表面温度差が約 10 度あることがわかる.

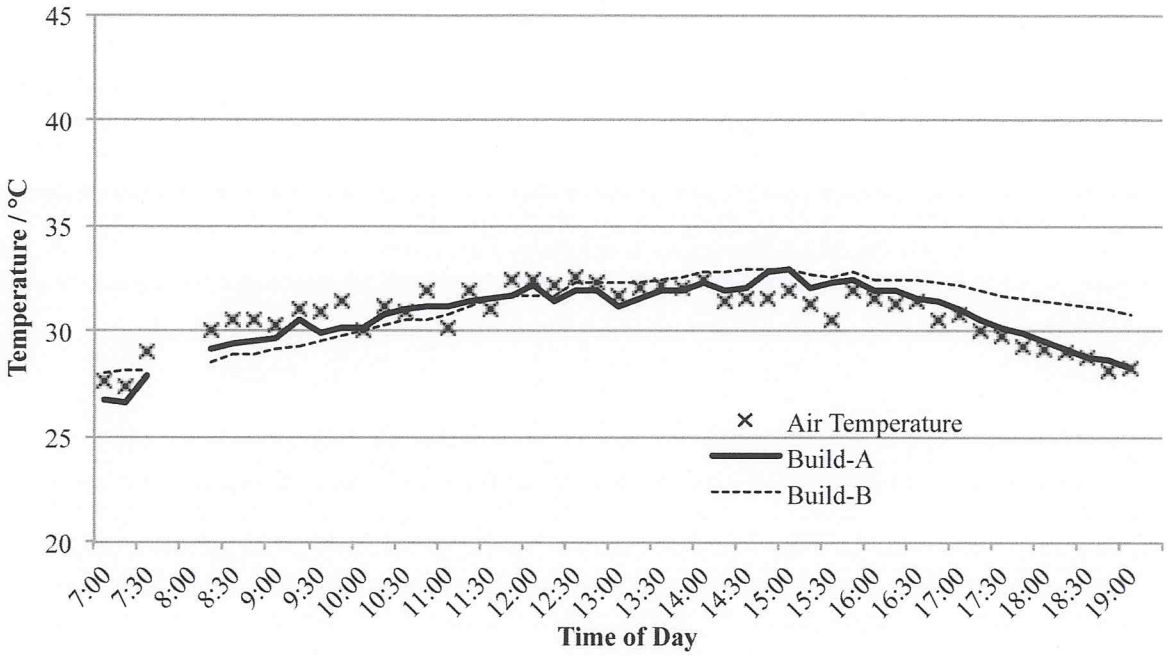

図 2. 微小セラミック球入り塗料塗布後の屋根の温度変化.

2007 年 8 月 27 日微小セラミック球入りの塗料を Build-A の屋根に塗布した後，2007 年 8 月 28 日に測定した図 1 の 2 つの建物の屋根表面温度と気温の時間変化（Ohkawa, et al., 2011）．図 1 で気温より 10 度以上上昇した Build-A 屋根の表面温度がほぼ気温と同じ温度に下がったことがわかる．

本研究では、金属に到達する近赤外線領域の電磁波が最も弱くなるような塗料の構成を導き出すことを目指した。解析の具体的な内容としては、入射波として平面電磁波、散乱体モデルとして以下のものを考えた。

1. 空気－塗料境界
2. 塗料層中にランダムに配置された多数の微小球
3. 塗料－金属境界

空気層から電磁波を入射させた際に塗料面との平面境界を透過する電磁波の強度の変化に加え，ランダム配置された微小球により散乱される電磁波の影響などを取り込み，最終的に平面状塗料層を透過する電磁波の強度と微小セラミック球の球径および球径分布との関係を明らかにした。

方法

本研究を遂行するに当たり，先ず，輻射熱抑制効果は、以下の原理を用いて説明できるという仮説を立てた。

1. 屋根や壁など固体の温度は、構成分子の固有振動数に近い日光の近赤外線領域の電磁波入射により励起されることで上昇する。
2. 微小セラミック球の径と入射電磁波の相互作用により発生する散乱現象が 1.の固有振動数励起を抑制している。
3. 塗料内に分布する多数の微小セラミック球が日光の近赤外領域電磁波を散乱させ、日光の輻射時の温度上昇が抑えられる。

いまだ理論的に解明されていない現象の具体的なメカニズムのモデルを絞ることで，この仮説を検証することとした。簡単のため，塗料としてエポキシ樹脂，屋根材として鉄，微小セラミック球として二酸化ケイ素を考え，表1のような誘電率，透磁率，導電率を考え，単一球による電磁波散乱の理論解[2)]をデルタ関数として理論数値計算結果から考察を行うこととした。

表1. 数値シミュレーションにおいて仮定した電磁気学的性質.

	誘電率	透磁率	導電率
空気	$1.00\varepsilon_0$	$1.00\mu_0$	0
エポキシ樹脂	$1.60\varepsilon_0$	$1.00\mu_0$	0
シリカ	$1.45\varepsilon_0$	$1.00\mu_0$	0
鉄	$12.0\varepsilon_0$	$5.00\times10^3\mu_0$	1.03×10^7 S/m

真空中の透磁率 μ_0 は $4\pi\times10^{-7}$H/m、光速 c は 2.99792458x10^{8}m/s、誘電率 ε は $1/(\mu_0 c^2)$ とした.

先ず，空気中に格子状に並べた球の層による散乱（図3）を検討[3)]した後，球がランダムに配置されている場合や、塗料や金属の層が存在する場合（図4）についての検討を行うこととした。

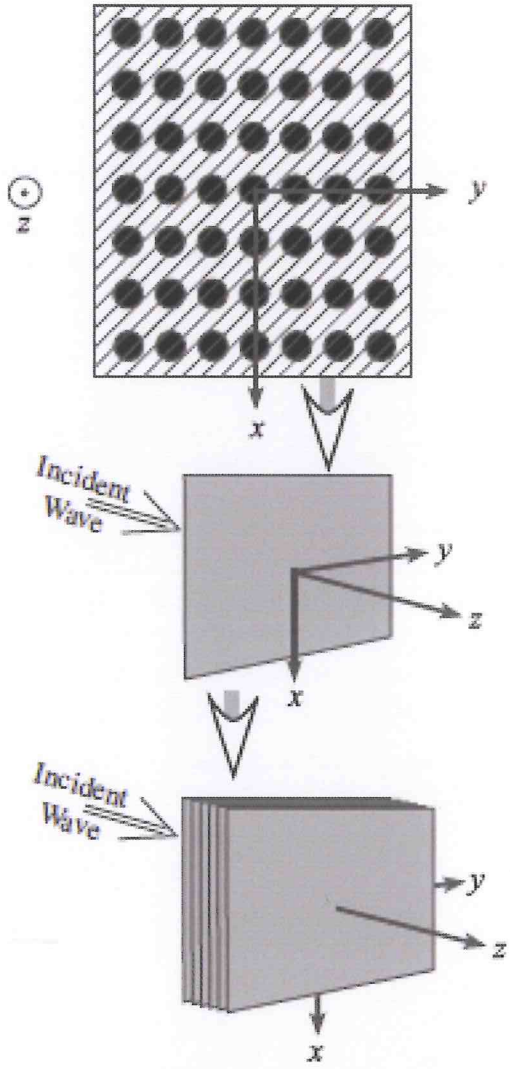

図 3. 空中に格子状に並べられた微小セラミック球の概念図.

格子状分布した微小セラミック球の配置図. 計算では入射方向に薄層が積み重なった構造であるとする近似を用いた.

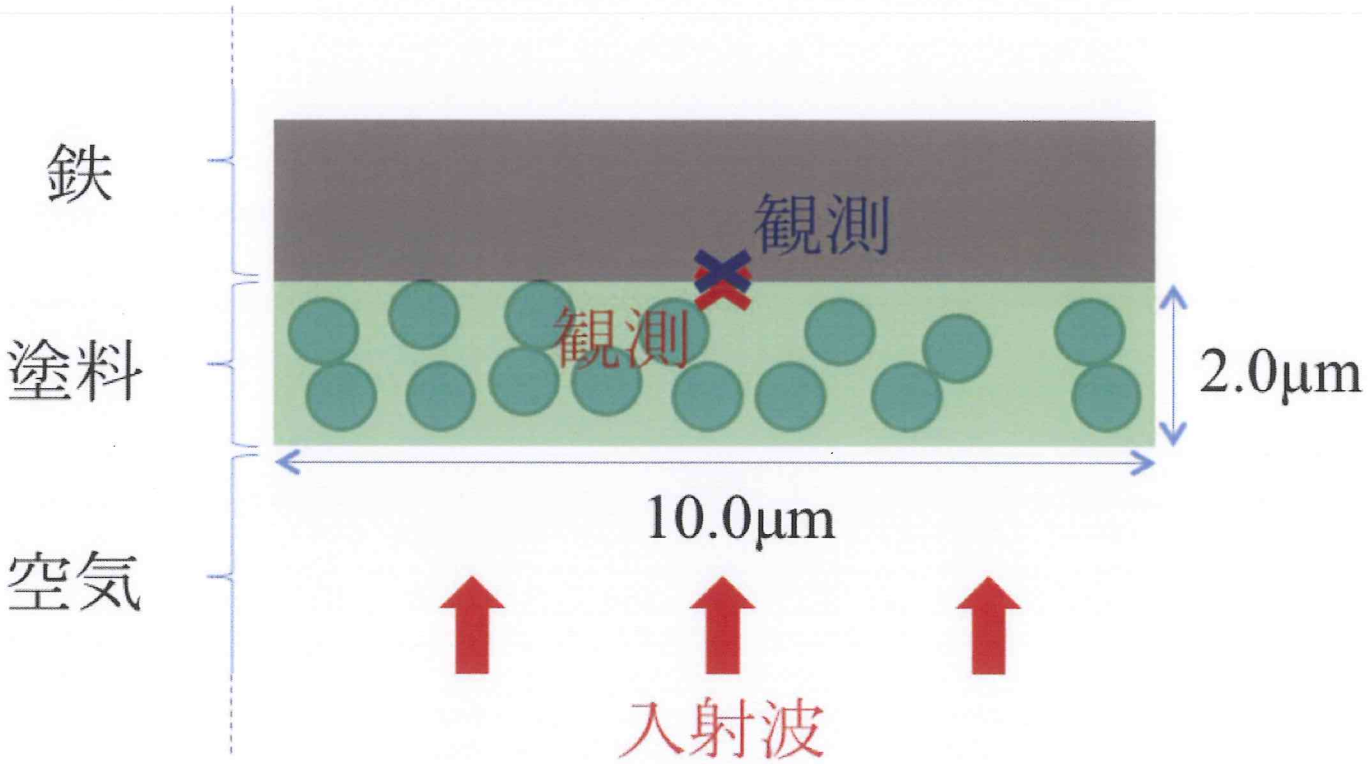

図 4. 屋根金属面，塗料層が存在する場合の概念図.

塗料中に，微小セラミック球がランダムに存在する場合の電磁波入射概念図．鉄の層を考慮したことによる影響を調べるため、波が塗料－鉄境界を透過する直前と直後の 2 点に仮想的観測点を設けた.

結果および考察

微小セラミック球の大きさと輻射熱抑制効果の関係を調べるため，図 3 に示した格子状に配置したモデルで数値計算を行ったところ，図 5 の結果が得られた。これは，微小セラミック球の数が散乱効果に大きく影響することを示している。しかしながら，格子点配置ということで，具体的な球の大きさおよび入射波の波長との関係を明確化するには到らず，次に微小セラミック球をランダム配置させ，塗料内での微小セラミック球の体積比を一定とするモデルで検討を行うこととした。

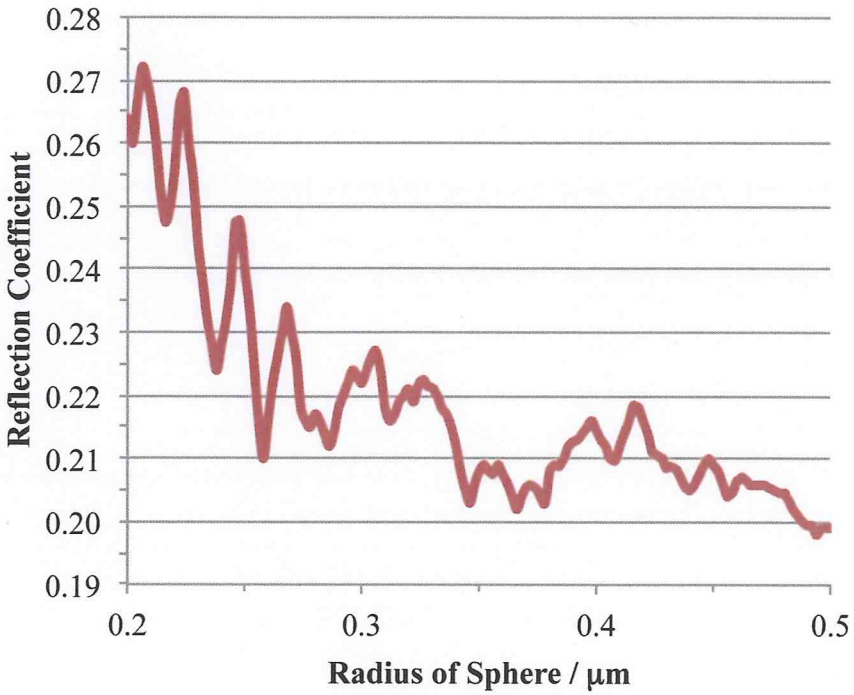

図 5. 空中に固定された格子状配列の微小セラミック球で推定した反射係数.

空中に格子状に並べられた微小セラミック球による散乱効果を，反射係数で示す図（Ohkawa, et al., 2011）．入射波として，太陽光の 0.7～2.5μm の波長域を考えている．球径が小さくなる程，一定領域を占めるセラミック球の数が増え，反射効果が増大する．

ランダム配置させた微小セラミック球に対する入射波の散乱特性を検討するため，図 4 に示した波長毎に観測された透過波強度を計算した。球の配置の違いによる計算結果のばらつきを考慮するために、球のランダム配置および各散乱波の計算を 100 回行い、その平均および標準偏差を求めた。図 6 および 7 の各図の縦軸は，塗料層を透過した電磁波強度、横軸は入射波の波長である。ランダム分布の差異によるばらつきを示すため，実線で平均値を，点線で実線上下両側に標準偏差分を加味した値を図示している。簡単のため，図 4 の塗料・鉄境界を透過した後の計算結果を示している。

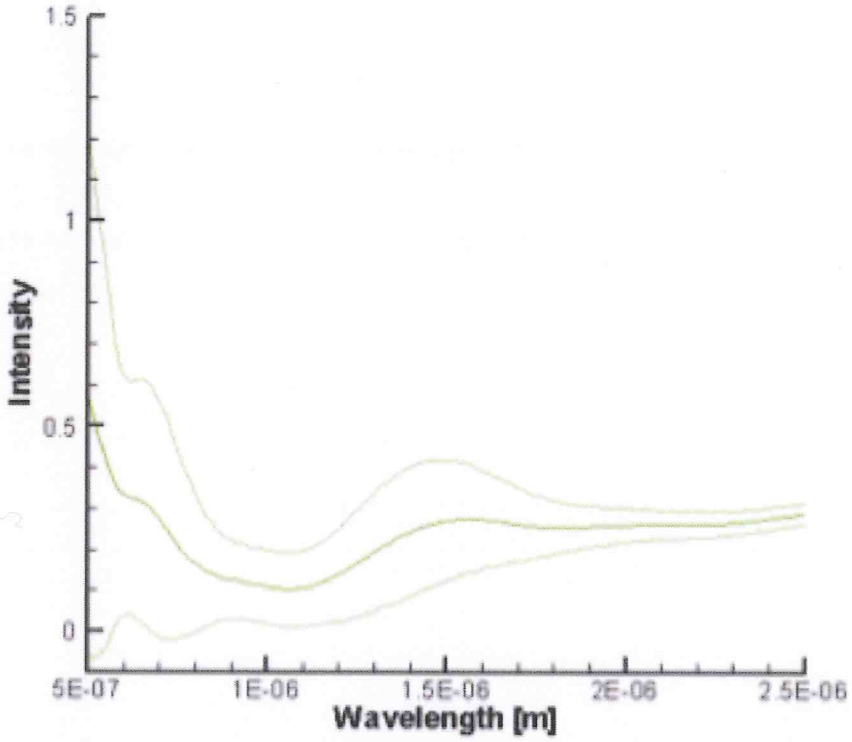

図 6. 微小セラミック球の球径を 0.5μm とした際の鉄面に入射する近赤外線透過波強度.
微小セラミック球の直径に相当する入射波波長 1.0μm 付近の近赤外線が選択的に減衰していることがわかる.

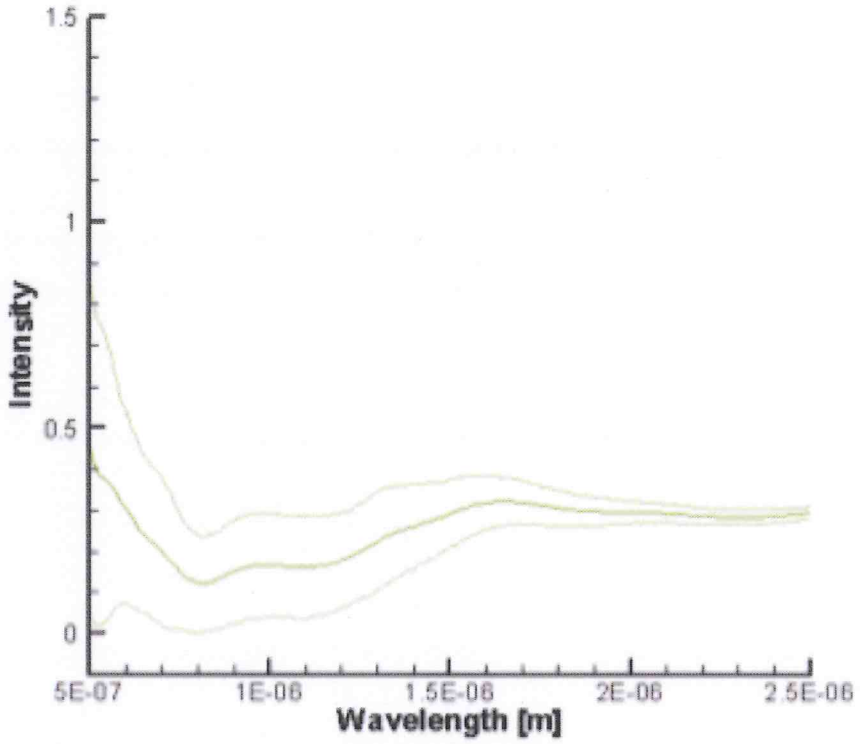

図 7. 微小セラミック球の球径を 0.4μm とした際の鉄面に入射する近赤外線透過波強度.
微小セラミック球の直径に相当する入射波波長 0.8μm 付近の近赤外線が選択的に減衰していることがわかる.

以上の数値計算結果から，単一の球径の微小セラミック球をランダム配置させた場合，微小セラミック球の直径に相当する波長域の近赤外線が減衰を受けるという結果が得られた。即ち，屋根や壁などの固体表面の吸収波長域のうち輻射熱に関係する波長が分かれば，最も効率的な輻射熱抑制効果を有する微小セラミック球の球径を推定することが可能であることが判明した。

最後に，単一球径の微小セラミック球を揃えるという条件を緩和するため，セラミック球の球径がある分布を有する場合についての効果を検討した。図 8 は，単一球径の場合とワイブル分布で球径が分布する場合の透過波強度の差異を示している。球径に分布がある場合，減衰を受ける波長域がやや広がりを持つように見えるが，両者の差異は極めて小さいことが分かる。これにより，ある程度不揃いな球径の微小セラミック球を使っても，輻射熱の吸収を抑制する効果が見込めることが推察される。

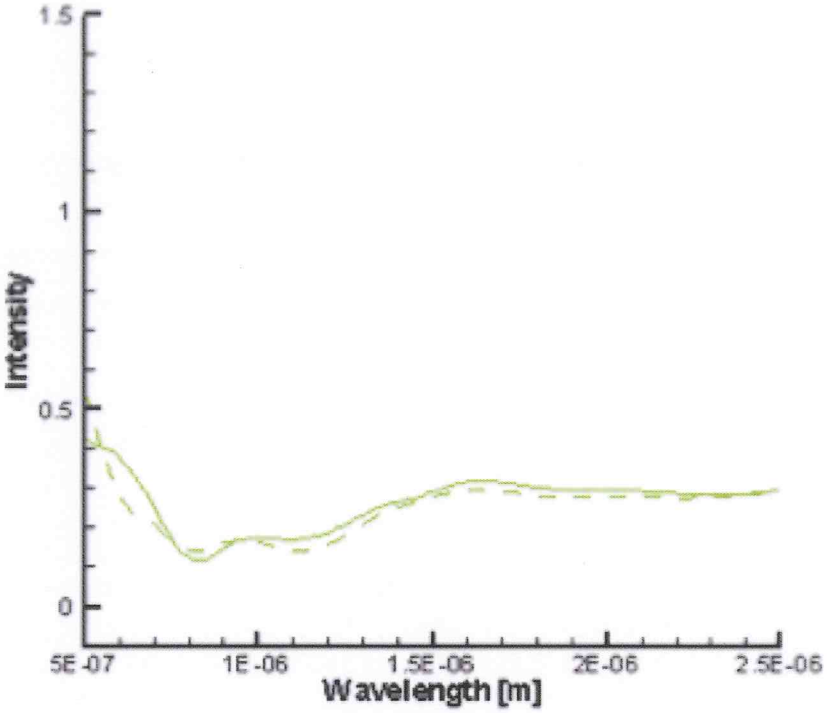

図 8. 球径分布の差異による，透過波強度の変化.

微小セラミック球が 0.4μm の単一球径である場合（実線）と，0.2～0.6μm のワイブル分布を呈している場合（破線）の比較．後者にやや減衰波長域の広がりが見えるものの，両者に差異が小さいことが分かる．最も減衰を受ける波長も 0.8μm と，前者の球直径あるいは後者の平均球直径となる。

まとめ

本研究を遂行した結果、微小セラミック球による電磁波散乱特性が球径，球周辺の媒質（塗料）の関数であること，微小セラミック球を含む塗料層が球直径周辺の波長域の電磁波を選択的に減衰させることがわかった。今後、より輻射熱吸収抑制効果の高い遮熱塗料を開発するに当たり、重要な結果となった。更に、球径にばらつきを与えた場合でも、その平均の大きさの球の散乱特性とほぼかわらない結果が得られることがわかった。塗料に混入させる微小セラミック球の製作に当たり、球の大きさを厳密に揃える必要がない可能性も示すことができた。

省エネルギーを推進することは地球環境問題の解決にも繋がる。地球環境問題に影響すると考えられている CO2 等の温室効果ガスの排出を 6%削減することが京都議定書により義務付けられている。日本において、CO2 排出量の事業用発電が占める割合は 2009 年現在で 30.5%である（温室効果ガスインベントリオフィス, 2011）。省エネルギーが促進されることができるのであれば、全発電量が抑えられ、CO2 の排出を減少することができる。

（完）

発表論文

1） Ohkawa, E., Mikada, H., Goto, T., Onishi, K., Takekawa, J., Taniguchi, K., Ashida, Y., 2011, Suppression of insolation heating using paint admixed with silica spheres - An approach from infrared band electromagnetic scattering, *Physics and Chemistry of the Earth*, **36**, 1412-1418, doi:10.1016/j.pce.2011.03.011.

2） Mikada, H., Ohkawa, E., Goto, T., Takekawa, J., Morino, S., Taniguchi, K., Ashida, Y., 2011, Suppression of insolation heating based on physical laws -New paradigm in air conditioning-, *Proceedings of The 10th SEGJ International Symposium -Imaging and Interpretation-*, 372-375.

引用文献

1） 資源エネルギー庁 (2010)：エネルギー白書 2010.

2） Born, M., and Wolf, E. (1999)：Principles of Optics, 7th edition, Cambridge University Press.

3） Ohkawa, E., Mikada, H., Goto, T., Onishi, K., Takekawa, J., Taniguchi, K., Ashida, Y., 2011, Suppression of insolation heating using paint admixed with silica spheres - An approach from infrared band electromagnetic scattering, *Physics and Chemistry of the Earth*, **36**, 1412-1418, doi:10.1016/j.pce.2011.03.011.