

「遮熱塗料 アドグリーンコートが何故世界で通用するか」

日本中央研究所株式会社

1. はじめに

ヒートアイランド対策が叫ばれて久しいが、建築物外皮の遮熱はその解決策として極めて安価で現実的な対策である。弊社ではその課題解決策として、高い熱遮蔽性能を持つ熱遮蔽塗料である「アドグリーンコート」を開発した。

遮熱塗料の市場は、地球温暖化対策としての二酸化炭素排出量の削減課題に加え、震災以来の電気使用量の削減という緊急課題が加わった事により、空調機稼働率の低下を目的とした建物への遮熱対策ニーズが高まった事もあり、急激な需要増加の状態にある。そもそも、遮熱建築物外皮の塗装は、建築後10年～15年程度の期間を経て建材の保護を目的として行われているものである事から、事業所などでは修繕費予算等を積み立てており、従来の塗料と比較しても、負担が2割程度の増加で抑えられる点などから、着手し易い省エネ対策となっている。

「アドグリーンコート」の差別化について言えば、そもそも既存の遮熱塗料はその殆どが断熱的発想により造られていた。つまり、空気層を持つ二酸化ケイ素を塗料内に分散させ、その空気層に断熱的機能を持たせる事により、熱伝導率を低く抑えようとしたものが多かった。しかしながら、空気層を持つ二酸化ケイ素の形状による耐久性の低さ（ガラス玉のイメージ）から、二酸化ケイ素そのものが長期間原型を留める事が困難である事や、二酸化ケイ素に空気層を持たせる為に必要な大きさにより塗膜厚が厚くなり、その施工性の悪さが課題となっていた。その点、ナノサイズでアモルファス形状の略真球状の金属酸化粒子を含む「アドグリーンコート」は塗料の粘度が低く抑えられる為、塗装作業が容易で薄膜塗装が可能となり、更には、無孔質ナノサイズシリカは硬度が高く壊れにくい為、経年による機能性の劣化を低く抑える事が可能となった。

「アドグリーンコート」は建築物外皮用水系塗料として開発され、アクリルシリコン合成樹脂に水・

顔料を始め、分散剤や粘度付与剤など一般的な水系塗料組成物を含む点に大きな違いは無い。但し、唯一他の全ての塗料と異なる成分であるファインセラミックを含んでいる点が明確な差別化要因であるので、その点を中心に説明を進めて行く。

2. 球状金属参加粒子

「アドグリーンコート」は、球状金属酸化粒子を含む無機物粒子が配合されていることを特徴とする。一般的に水系塗料組成物には種々の化合物などが配合されているが、球状金属酸化粒子を含有させることで、高い太陽光反射性を有することが可能になった。

尚且つ、配合される球状金属酸化粒子は真球性の高い無機物粒子である必要がある。なぜならば、種々の実験により、真球性が高い無機物粒子が非常に高濃度で液体中に分散できることを見出し、これにより太陽光の反射性に優れる無機物粒子を大量に含有させることを可能とすることで、熱遮蔽性の向上を可能とさせる事となったからである。特に、前記球状金属酸化粒子は比表面積が $10 \text{ m}^2/\text{g}$ 以下であることが必要である。比表面積をこの範囲に制御することで、より多くの球状金属酸化粒子を水系塗料組成物に含有させることが可能になった。このような球状金属酸化粒子を製造する方法としては、含酸素雰囲気下にて金属粉末を酸化させる方法があり、この方法により得られる球状金属酸化粒子を水系塗料組成物に含有させることとした。

そして球状金属酸化粒子の真球度は0.8以上であることが望ましい。「真球度」とは、SEMで写真を撮り、その観察される粒子の面積と周囲長から、真球度 = $\{4\pi \times \text{面積} \div (\text{周囲長})^2\}$ で算出する。1に近づくほど真球に近い。具体的には画像処理装置を用いて100個の粒子について測定した平均値を採用する。

球状金属酸化粒子の粒径は、体積平均粒径は0.2

μm ～ $1\mu\text{m}$ 程度が好ましい。球状金属酸化物粒子の粒径をこの範囲に制御することで、十分な太陽光の反射性と、乾燥後の塗料被膜の滑らかさが両立できる。これが、従来の断熱系塗料の弱点である施工性の悪さを解決し、薄膜の塗装を可能にした要因の一つである。

この球状金属酸化物粒子は、含酸素雰囲気化にて金属粉末を酸化させて得られる方法（VMC法）によるものとする。VMC法は、酸素を含む雰囲気中でバーナーにより化学炎を形成し、この化学炎中に目的とする酸化物粒子の一部を構成する金属粉末を粉塵雲が形成される程度の量投入し、爆燃をおこさせて酸化物を得る方法である。VMC法の作用について説明すれば以下になる。

まず、容器中に反応ガスである酸素を含有するガスを充填させ、この反応ガス中で化学炎を形成する。次いで、この化学炎に金属粉末を投入し高濃度（ $500\text{g}/\text{m}^3$ 以上）の粉塵雲を形成する。すると、化学炎により金属粉末表面に熱エネルギーが与えられ、金属粉末の表面温度が上昇し、金属粉末表面から金属の蒸気が周囲に広がる。この金属蒸気が酸素ガスと反応して発火し火炎を生じる。この火炎により生じた熱は、さらに金属粉末の気化を促進し、生じた金属蒸気と反応ガスが混合され、連鎖的に発火伝播する。このとき金属粉末自体も破壊して飛散し、火炎伝播を促す。燃焼後に生成ガスが自然冷却されることにより、酸化物粒子の雲が出来る。得られた酸化物粒子は、バグフィルターや電気集塵機によって捕集される。

このように、VMC法は粉塵爆発の原理を利用するものであり、瞬時に大量の酸化物粒子が得られる。得られる酸化物粒子は、略真球状の形状をなす。目的とする球状金属酸化物粒子の組成に応じて、例えばシリカ粒子を得る場合にはシリコン粉末を投入し、アルミナ粒子を得る場合にはアルミニウム粉末を投入する。投入するシリコン粉末などの粒子径、投入量、火炎温度等を調整することにより、得られる酸化物粒子の粒子径を調整が可能である。更に、水系塗料組成物に含まれるバインダーなどとの密着性を向上させるため、表面処理を施す場合がある。例えば、シラン系、チタネート系、アルミネート系、ジ

ルコネート系の各種カップリング剤、カチオン、アニオン、両性、中性の各種界面活性剤を混合する事が出来る。当然の事ながら、塗料には無機物以外にも一般的に含有される組成物を含有する事は可能である。例えば、バインダーや球状金属酸化物粒子などの無機物粒子を水中に分散させる分散剤、エマルジョン化剤などである。

ちなみに、本水系塗料組成物中の不揮発分は無機物粒子以外の質量を100質量部とした場合に、無機物粒子が60質量部以上であることが望ましい。

球状金属酸化物粒子としての球状シリカは先に述べたように、多くの配合が可能であり、実験によると65質量部までも実用性を保ったまま、配合することが出来た。比較の為、破碎シリカを同様に混入した場合、45質量部を配合すると試験片に塗布した際にぼろぼろで、亀裂、剥がれが生じて実用上、使用が不可能であった。

但し、「アドグリーンコート」に球状金属酸化物粒子としての球状シリカをどの程度含有しているかについては、ここでは触れない事とする。

3. 微小シリカ球による散乱

これら球状金属酸化物粒子を含有させる事で高い太陽光反射性を有する事は先に述べたが、その理論について記述する。

ある物体に、それを構成する原子、分子あるいは結合の固有振動数に近い振動数の電磁波が入射すると原子や分子が共振して激しく運動し、それによって温度が上昇する。その為、物体の固有振動数周辺の振動数を持つ波を遮断することができれば温度上昇を抑制出来るのではないかと考え、光という電磁波について検討した。初めに、温度上昇の抑制には光の錯乱現象が関係しており、セラミック球が光を散乱させる事で塗料の層を透過する光が弱められると仮定した。光は電磁波であるので、位相条件によっては入射波と散乱波が打ち消し合う。そこで、球の大きさや入射波の波長を変えたときの入射波と散乱波の関係を調べ、仮説の検証を行った。

検証には G.Mie によって導かれた厳密解 (Born and Wolf,1999) を用いて塗料中の各球による散乱波を計算し、重ね合わせる方法を用いた。

セラミック球が光を散乱させることで塗料の層を透過する光が弱められるという仮定を検証するために、1球の場合の散乱については Mie 理論により図 1 のように比誘電率 $\epsilon^{(I)}$ の絶縁体 (I) (波数 $k^{(I)}$) から比誘電率 $\epsilon^{(II)}$ と導電率 σ をもった球 (II) に振幅 I の平面波が図 2 のように入射したときの散乱波は、球を原点とした球座標 (γ 、 θ 、 ϕ) の関数として以下のように表わされる。

$$E_r^{(s)} = \frac{1}{(K^{(1)})^2} \cdot \frac{\cos \phi}{r^2} \sum_{l=1}^{\infty} l(l+1) {}^e B_l \zeta_l^{(1)}(k^{(1)}r) P_l^{(1)}(\cos \theta)$$

$$E_\theta^{(s)} = \frac{1}{K^{(1)}} \cdot \frac{\cos \phi}{r^2} \sum_{l=1}^{\infty} \left[{}^e B_l \zeta_l^{(1)'}(k^{(1)}r) P_l^{(1)'}(\cos \theta) \sin \theta - i^m B_l \zeta_l^{(1)}(k^{(1)}r) P_l^{(1)}(\cos \theta) \frac{1}{\sin \theta} \right]$$

$$E_\phi^{(s)} = \frac{1}{K^{(1)}} \cdot \frac{\sin \phi}{r^2} \sum_{l=1}^{\infty} \left[{}^e B_l \zeta_l^{(1)'}(k^{(1)}r) P_l^{(1)'}(\cos \theta) \frac{1}{\sin \theta} - i^m B_l \zeta_l^{(1)}(k^{(1)}r) P_l^{(1)}(\cos \theta) \sin \theta \right]$$

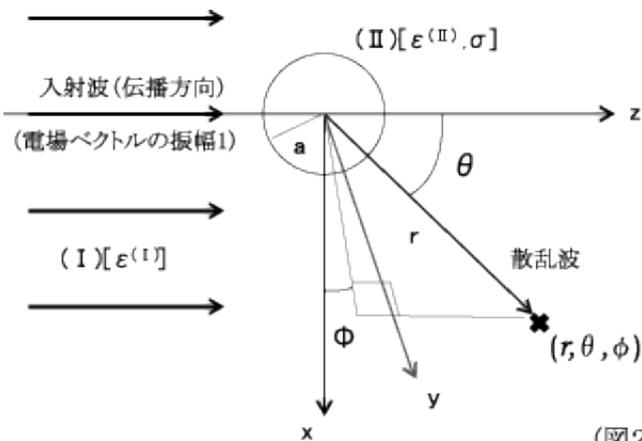
(図1)

但し、 $E^{(s)}$: 散乱波の電場、 ζ : Riccati の第 3 種 Bessel 関数、 P : 随伴 Legendre 関数、 B : 複素係数、 ζ' 、 P' : ζ 、 P のそれぞれの引数に関する微分である。

ここでは、(I) として空気、(II) としてシリカを想定し、

$$\epsilon^{(I)} = 1.0, \quad \epsilon^{(II)} = 11.9, \quad \sigma = 2.52 \times 10^{-4} \text{ (m} \cdot \Omega \text{)}$$

の各値を用いた。また真空中での光速は $c = 3.0 \times 10^8$ (m/s) とした。



(図2)

図 3 は距離 $r = 1000 \mu\text{m}$ での散乱強度であるが、球が他数の条件では球と観測点の距離を小さくにとって計算を行う為、球からの距離が波長より小さい場合の散乱波の強度を調べた。

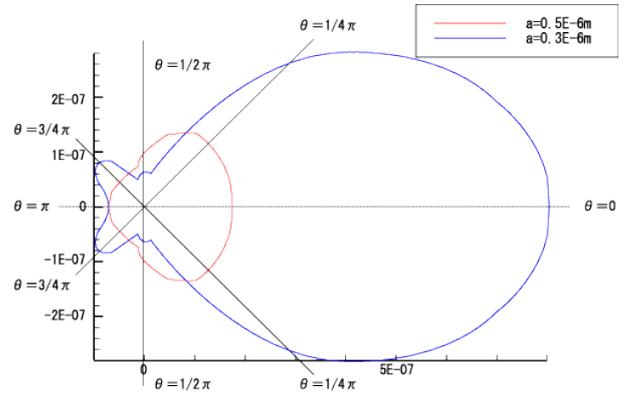


図 3 距離 $r=1000 \mu\text{m}$ での散乱波の強度 (球半径 $a=0.3, 0.5 \mu\text{m}$ の場合)

図 4、図 5 は球から距離 $r = 0.1 \mu\text{m}$ 離れた点での散乱波の強度である。図 4 は球半径 $a=0.3 \mu\text{m}$ の場合、図 5 は球半径 $a=0.5 \mu\text{m}$ の場合について、散乱波の強度を極座標表示したものである。球の大きさによる散乱強度の違いが図 3 よりも顕著に表れている。これは式 (1) の r 及び r^2 の項の影響によるものである。

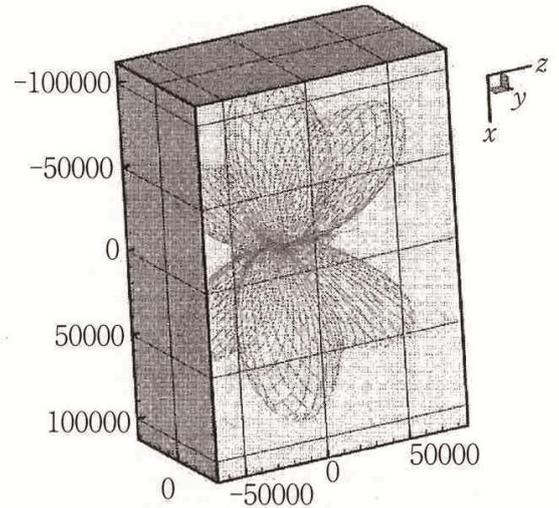


図 4 距離 $r=0.1 \mu\text{m}$ での散乱波の強度 (球半径 $a=0.3 \mu\text{m}$)

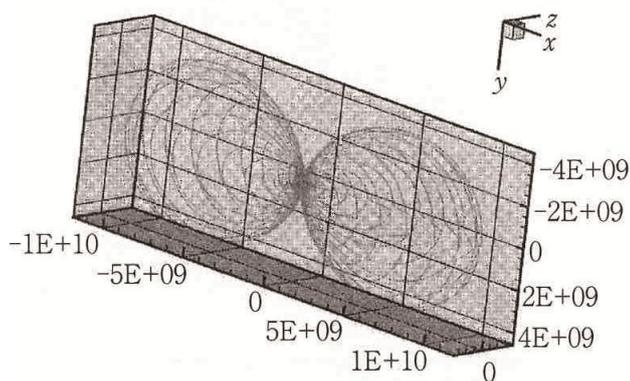


図5 距離 $r=0.1\ \mu\text{m}$ での散乱波の強度
(球半径 $a=0.5\ \mu\text{m}$)

更に、塗料には他数のセラミック球が含まれている為、単球の結果を応用して多数の球による散乱について説明する。入射平面波に対して単球と同様に直行座標を設定し、図6に示すように球を入射波の波面と並行な層状に並べて、各球に座標を与え、 x 、 y 座標が球の中央にあたる場所に観測点を設ける。球と観測点それぞれの座標から球の中心とした観測点の球座標

(r θ 、 ϕ)を出し、これより散乱波を求め、直交座標に変換しなおすという計算を各球について行い、結果を足し合わせた。計算には単球の場合と同じ物性値を用いた。簡素化のため球の層を 0.1mm 四方、1層とした。

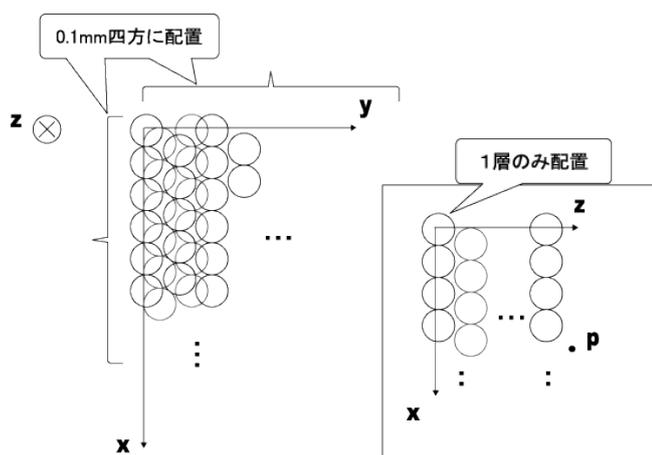


図6 球の並べ方

まず、観測点を球の層を超えた所に設定し、透過した波の分析を試みた。その際、計算した散乱波に入射波を重ね合わせて、合成波の振幅を評価した。図7は入射波の波長 λ に対応する合成波（入射波+散乱波）の振幅を、球の半径 a が $0.3\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ の場合についてプロットしたものである。今回 λ は近

赤外の波長帯の範囲で計算した。図7から散乱波の挙動には入射波の波長 λ が影響することが分かる。また球半径 a を変える事による変化も認められる。これらの結果から、どの波長 λ でも同じように散乱するわけではなく、 λ によって違う散乱強度になり、その変化の仕方が a によって変わるとい事が解って頂けると思う。

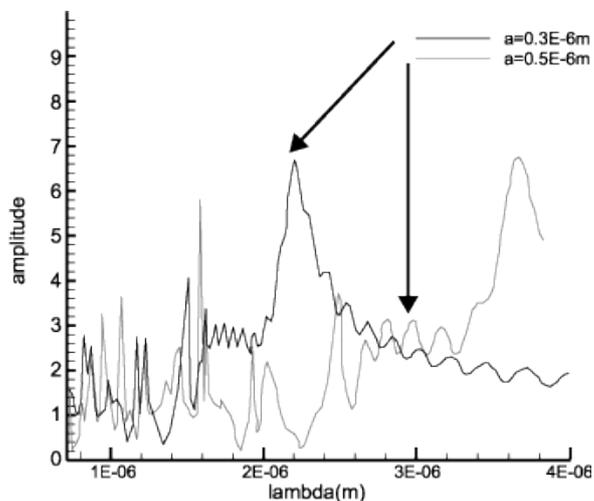


図7 合成波の振幅（透過）

次に、観測点を球の層の手前に設定し、反射した波の分析を見て頂く。こちらは散乱波の振幅のみを評価した。図8は、入射波の波長 λ に対応する散乱波の振幅を、球の半径 a が $0.3\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ の場合についてプロットしたものである。今回も λ は近赤外の波長帯の範囲で示してある。図8より透過の場合と同様に散乱波の振幅に入射波の波長 λ と球半径 a が影響している事が分かる。また、各々の球半径 a に対し、散乱強度が強くなる波長 λ の範囲がそれぞれ存在することが分かる。

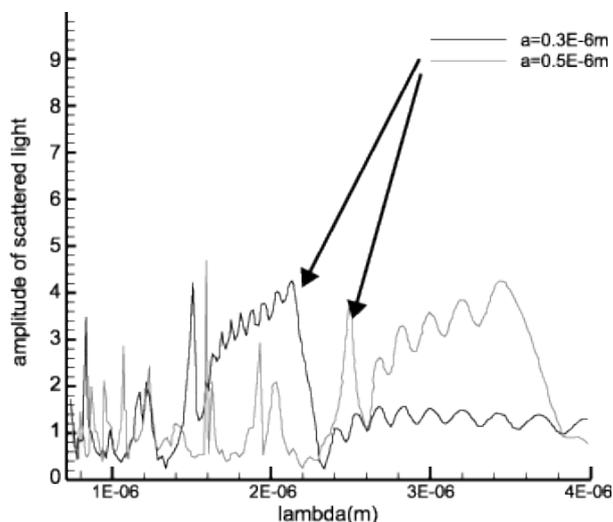


図8 散乱波の振幅（反射）

4. おわりに

一般に金属板を太陽光に防露するとその温度は上昇する。塗装によりその温度上昇を抑制する塗料は様々開発されており、実験的な考察はこれまでも多数行われてきたが、理論的にはほとんど解明されていない。しかし、効果的で高性能な塗料の開発においては温度上昇抑制効果を理論的に解明する事が重要である。はじめに、球状シリカ粒子が光を散乱させることで金属結合の固有振動数に近い波長帯の電磁波が透過しにくくなり、その結果温度上昇が抑制されると仮定し、球の大きさや入射波の波長を変えた時の入射波と散乱波の関係を調べて検証を行った。結果として入射波と散乱波が強め合う場合と弱め合う場合の存在を確認し、球のサイズに対応して入射波が弱められる波長帯の特定が可能となった。これらの検証結果に基づき、「アドグリーンコート」に含有する球状酸化物粒子のサイズ・含有量等を定め、考えられる最も温度抑制効果の高い塗料を開発した。

(備考)

・微小セラミック球による電磁波散乱を用いた輻射熱抑制効果の研究については、京都大学大学院応用地球物理学教授の三ヶ田先生が継続して研究を続けられており、昨年オランダの科学誌

「Physics and Chemistry of the Earth」に論文を発表された。原題は

「Suppression of insolation heating using paint admixed with silica spheres-

An approach from infrared band electromagnetic scattering」

である。本文より三ヶ田教授のご理解を頂戴し、一部抜粋した。