

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 9 日現在

機関番号：24403

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24651092

研究課題名(和文) 表面と内部構造の最適化による多孔性材料のヒートアイランド熱負荷低減性能の高度化

研究課題名(英文) Advancement of thermal load reduction performance for heat island of porous material by optimization of the surface and the internal structure

研究代表者

吉田 篤正 (YOSHIDA, ATSUMASA)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60174918

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：顔料などが塗膜全体の反射特性に与える影響を調べた。可視光域、近赤外域、日射領域全域に分けて半球反射率を算出し、性能評価を行った。複合顔料及び多層構造塗膜の解析を行った。最後に、サンプルの制作及び計測を行った。解析手法では球形顔料を含む塗膜であれば粒径の制御が行えれば妥当な解析が行えるが、非球形顔料を含む塗膜では波長依存性の正確な再現は困難であることが分かった。粒径および空隙構造の異なる保水性粒状多孔質材料を対象として、蒸発性能に対する粒径の影響を、恒温恒湿槽ならびに風洞を用いて、温度、湿度、風速を制御しつつ乾燥実験を行い、材料の含水量および温度変化を測定することにより蒸発性能を評価した。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the reflection characteristics of paint layer, Radiation Element Method is applied for numerical prediction. TiO_2 , ZnO or Al_2O_3 is used as pigment of painted layer, and the hemispherical spectral reflectance of painted layer including one or two kinds of pigments is evaluated. In addition, the spectral reflectance of painted layer sample is measured by the spectrophotometer with integrating sphere. By comparison with numerical results, the applicability of numerical method is evaluated. One of the effective measures for urban heat island is the water retentive pavement by porous materials. However, the evaporation effect deteriorates due to the unavailability of residual water in pore in drying process. This problem is solved, because the granular water retentive material is active in heat and water transport. In this study, the influence of the particle size and porosity in individual particle on evaporation characteristic is evaluated by drying test.

研究分野：環境学

科研費の分科・細目：環境保全学・環境技術・環境負荷低減

キーワード：環境負荷低減・クローズド化 ヒートアイランド緩和技術 塗膜 半球反射率 散乱 多孔質 粒状蒸発速度

1. 研究開始当初の背景

近年都市域ではヒートアイランド現象が問題となっている。その一因として都市表面においてコンクリートやアスファルトなどの日射吸収率が高く、乾いた人工材料による被覆率が高いことが挙げられる。この改善策として屋上面の高日射反射率化や保水性材料による舗装が挙げられる。保水性材料の多くは焼却残渣や建築廃材などのリサイクル材料が原料として使われた多孔性材料である。高日射反射率や水分蒸発により表面温度の上昇を抑制し、気温上昇に関わる表面から大気への顕熱負荷（ヒートアイランド熱負荷）を低減する効果が期待される。現在の材料には、施工後の経年劣化、反射日射による歩行空間の快適性への影響、蒸発効果を長時間持続できず、保有する水分を十分に活用できていないなどの課題を抱えている。また、製品の性能評価手法ならびに性能表示について未確立であり、十分な普及につながっていない。

2. 研究の目的

高反射率素材を保水性材料上面に被覆することで、日射吸収量の低減と顕熱負荷低減の両方の効果を併せ持つことに加え、日射吸収量が減少することで、結果的に材料の蒸発効果持続性が向上することが期待できる。表面の微細構造と反射特性の関係を明らかにし、巨視的構造も含めて反射特性を制御する材料の組成、空隙率、気孔分布、界面状態、表面積などの諸条件が材料内部および表面の熱および水分移動特性に及ぼす影響について詳細に評価し、蒸発性能に対する支配因子を特定するとともに性能評価に関わる輸送現象モデルを構築する。さらに、このモデルに基づいた多孔性材料の内部構造の最適化、屋外・室内での材料性能評価手法の開発を行う。

この材料に関わる物理現象は熱伝導、対流伝熱、ふく射伝熱、相変化が共存する伝熱現象である。本研究ではこの複雑な現象を詳細に把握すること、さらにその知見に基づいてより機能性の高い材料の開発のための指針を得ようとするものである。表面の微視的、巨視的構造の検討により反射性能の制御を試みる。現象を把握するため必要な材料内部の熱・水分移動に関する情報を得るため、これまでにない簡便な非破壊計測方法を提案する。材料内部の熱および水分移動特性に与える材料の微視的構造の影響に着目し、材料の内部構造の最適化によって目標を達成することを念頭に、含水状態の材料の熱物性および水分輸送物性を精度よく測定し、その結果に基づく解析手法を確立する。こうして得られた知見・指針に基づく材料開発により、技術的側面ならびに経済的側面の両面でもより効果的なヒートアイランド熱負荷低減、地球温暖化に関わる二酸化炭素削減につながることを期待できる。

3. 研究の方法

散乱・吸収性媒体のふく射特性を明らかにするため、拡散光と直達光の両方が考慮できるなど、柔軟な条件下で解析が行える手法としてふく射要素法を用いて、塗膜を対象としてその日射反射性能を予測した。さらに、分光光度計による実際の塗膜サンプルの半球分光反射率を測定し、その結果と比較することにより予測の妥当性を評価した。

塗膜の半球分光反射率を広さ方向に一樣で深さ方向1次元のモデルを適用した。塗膜上面からは拡散日射、直達日射の両方が入射する。下面は任意の反射特性を持つ基盤を条件として設定でき、基盤の条件として特筆しない場合は黒体基盤とする。太陽光の分光日射強度に関しては Bird モデルを適用した。上部の境界要素において、直達光は天頂角 23.7° で入射するものとし、境界面での鏡面反射率は塗膜（アルキド樹脂 1.5）と空気（1.0）の複素屈折率より、フレネル則から導いた。塗膜の顔料は単分散球形粒子とし、散乱特性は Mie 理論から算出した。この際に Wang らが提唱した ratio method を用いた。

粒径および空隙構造の異なる保水性粒状多孔質材料を対象として、蒸発性能に対する粒径の影響を、恒温恒湿槽ならびに風洞を用いて、温度、湿度、風速を制御しつつ乾燥実験を行い、材料の含水量および温度変化を測定することにより蒸発性能を評価した。

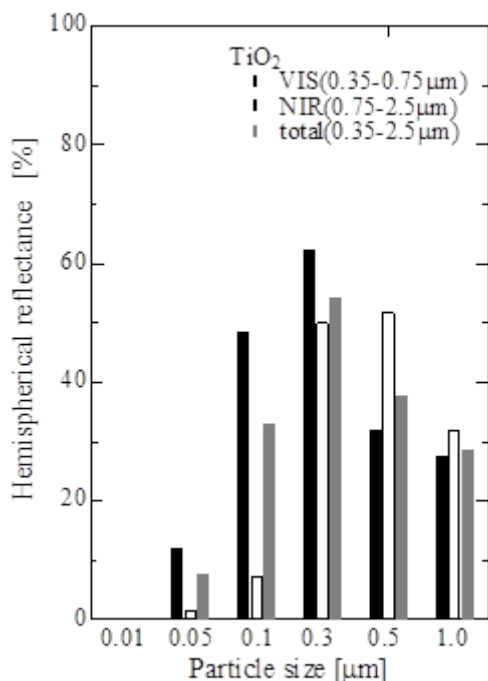
温湿度が一定の条件での実験を行い、粒径の違いにより及ぼす蒸発性能を評価していく。蒸発性能を評価する指標として乾燥速度・含水量・表面温度の変化を測定することで評価を行った。保水性材料として赤玉土を対象とする。赤玉土の粒径の条件を粒径 10mm、1mm、及び粉体の3条件にふるい分けを行う。ふるい分け試験をしてから、乾燥重量を 200g で統一させた場合と、充填層の厚さを 32mm で統一させた場合で乾燥の実験を行なっていく。恒温恒湿内の温度を 40°C 、相対湿度 30% の条件で統一させて、試料層の中心部、壁面部、中心部と壁面部の中間のところに存在する。中間部の表面、中央および底面の温度を T 型熱電対、充填層の試料の重さを電子天秤で測定する。側面の熱流を測定するために側面の温度測定も行う。また試料はあらかじめ恒温槽内で絶乾状態にして、その重量を測定する。この試料を乾燥容器に充填して、一定の水量を含ませる。容器上面をラップで多い断湿させ、恒温槽内が定常状態になるまで放置する。その後、ラップを外して乾燥させる。測定は 1 分間隔である。

風速が一定の条件でかつ粒径および空隙構造の違いが及ぼす影響について考察をおこなうために、風洞を用いた乾燥実験を行った。含水量変化、乾燥速度変化、温度変化を表現していくことで蒸発性能を評価した。風洞は下流側に設置された誘引式（吸い込み式）である。主流部の流路断面は $180 \times 80\text{mm}$ の長方形で、二つの吸い込みファンにより風

速を 0-5[m/s]の範囲で調節することができる。乾燥室の出入口と実験環境の周囲の相対湿度を測定し、試料の温度変化をK型熱電対、重量変化はロードセルを用いた天秤で測定をする。ヒータ部では抵抗が60の抵抗線を用いて熱源を作成している。ヒータにより空気温度を、超音波霧化ユニットにより湿度を調節する。断熱を行うために試料底面に厚さ30mm、試料側面部に20mmの発泡スチロールを断熱のため貼り付けた。測定試料はゼオライト粒径3mm,15mmと白信楽用粘土3mm,15mm(スチレンビーズなし),15mm(スチレンビーズ3%含む)である。測定条件は温度30,相対湿度30%の条件で実験を行った。鉛直方向の温度を測定するために、K型熱電対を表面から7.5mm間隔に5ヶ所設置した断熱および断湿を行うため、容器上部をラップで覆う。乾燥室入口が所定の温度になるようにヒータに電圧をかけ、超音波霧化ユニットで湿度を調整し温度が定常になるまで放置した。温度が定常になった時点でラップを除去した。各データはデータロガーで測定を行い、測定間隔は5秒とする。

4. 研究成果

散乱・吸収性媒体としてTiO₂粒子、ZnO粒子、Al₂O₃粒子を含む塗膜について粒径の違いが半球分光反射率に与える影響を評価した。粒径が大きくなるにつれて反射率が高くなる波長域が長くなる傾向がある。特にTiO₂顔料は波長依存性が強く、粒径の変化が半球分光反射率に与える影響も大きい。このことから顔料の粒径を調節することにより塗膜の反射率について任意の波長選択性を持たせられる可能性を示唆できた。これらの塗膜について、特定の日射条件に対する可視光域、



粒径が日射反射率に及ぼす効果

近赤外域、日射範囲全域での日射反射率(半球反射率)を算出した。粒径が0.1μmより小さい粒径ではどの波長領域においても著しく反射率が低下し、TiO₂粒子を顔料として用いるには粒径が0.1μm以上必要であると言える。さらに高日射反射率塗膜としての使用を考えると、日射全域射率の高さに加え、近赤外域での反射率が高いことも重要であり、今回の3種類の顔料では粒径が0.3~0.5μm付近で良好な性能を示す傾向にある。この中でも特に粒径が0.3μmのTiO₂顔料粒子を用いた塗膜が最も高い性能を示しているということが分かる。

任意の波長依存性を持つ塗膜の設計に関連して、複合顔料および多層構造塗膜を対象とした解析を行い、このような構造が塗膜の反射特性に及ぼす影響について評価した。評価の対象として用いた顔料はTiO₂, ZnO, Al₂O₃であり、近赤外域での反射率が高い傾向にある粒径0.3μmと0.5μmの粒子を選択した。複合顔料塗膜では体積分率0.005のTiO₂を基本とし、そこに他の顔料を体積分率0.005の割合で複合し、合わせて体積分率0.01になるようにした。塗膜厚さは1mmである。例として粒径0.3μmのTiO₂に、他の顔料を組み合わせた時の半球分光反射率の結果で評価した。単一の顔料と異なる波長依存性が見られ、顔料の種類、粒径の組合せにより多様な波長特性を持つ塗膜の生成が期待できる。また、多層構造塗膜の解析例として、上層を厚さ0.5mm、体積分率0.01で粒径0.3μmのTiO₂を含む塗膜とし、下層を厚さ500μm、体積分率0.01でZnOまたはAl₂O₃を含む塗膜とした。下層を含む顔料の種類、粒径が変わっても全体の半球分光反射率の値にほとんど変化が見られない。上層の塗膜の反射特性が強く、下層の条件の違いがそれほど大きく表れない結果となった。

本解析手法における解析結果の評価を行うために塗膜試料を作成し分光光度計による計測を行った。作成した試料の材料、及びその光学特性は次の通りである。顔料は球形のTiO₂粒子と非球形のZnO粒子、Al₂O₃粒子の3種類である。これは顔料の種類の違いによる分光反射率の違いと合わせて、形状の違いによる解析精度への影響を調べることを目的としている。球形粒子であるTiO₂顔料での計測値と解析値の比較では、一部の波長領域で計測値と解析値の波長特性に違いが見られた。実測で用いた顔料粒径が公称値と異なっていると想定し、粒径を変えて解析を行った。この結果から粒径0.2~0.25μmの範囲で、計測された波長依存性と近い特性を表現できていると言える。このことから塗膜調合の際に粒径が変化してしまった可能性が考えられる。非球形粒子では球形顔料のように計測値の波長依存性を再現できなかった。球形顔料に関して粒径の制御が行えれば、本解析手法を用いることで妥当な解析が行えることが示された。一方、非球形の

場合、Mie の理論の適用範囲から外れ、十分な精度での性能予測は困難であることが考えられる。

乾燥が一定の割合で減少している状態が粉末と粒径 1mm の時に、5 時間ほど見られている。この時は定率乾燥が進んでいると考えられている。一定の割合で乾燥が進行した後に粒径 10mm の時は、乾燥開始から一定の割合で減少することはなく、徐々に減少しているために、定率乾燥が見られず減率乾燥の状態が乾燥が進行している。粒径 10mm の時は 20 時間が経過すると赤玉土の粒の内部に存在する水分が 1mm や粉末の状態よりも十分に活用できていない状態で 2 平衡含水率に達する。層の厚さを統一させた時は粒径が細かいほど粒の内部に存在する水分量は多くなるので、一定の割合で乾燥する時間が長くなっている。層を 32mm で固定した時は乾燥重量が大きくなるために粒の内部に存在する水分量が多いので表面が乾燥開始から終了するまでの時間が長くなることわかる。

粒径 15mm の時は含水量が線形的に減少している期間が 2 時間、ゼオライトが 3mm の時は 15 時間ほど温度が一定である結果が見られた。この期間は定率乾燥状態で乾燥が進んでいると考えられている。定率乾燥が終了すると減率乾燥に移行していく。限界含水率は 15mm の時では 0.15[kg/kg]、10mm の時では 0.10[kg/kg] である。材料の初期含水率はともに 0.35[kg/kg] である。粒径が細かくなればなるほど表面積が増えるために水分輸送が活発になったことが原因であると考えられる。粘土およびゼオライトの粒径 15mm の時を比較すると定率乾燥時の乾燥速度は同じであった。定率乾燥期間では表面の自由水が補給される状態なので 15mm で充填されている場合だと乾燥面積がほとんど変わらないので定率乾燥における乾燥速度は同じである。樹脂ビーズを 3% 詰めた時の方が定率乾燥期間は 2 時間長くなっている。初期の含水量が多いため、表面への自由水を補給する時間が長くなっているからであると考えられる。

単一顔料、単一層塗膜において、顔料の種類、粒径、塗膜厚さ、基盤の反射特性が塗膜全体の反射特性に与える影響を調べた。さらにこれらの塗膜に関して可視光域、近赤外域、日射領域全域に分けて半球反射率を算出し、高日射反射率塗膜としての性能評価を行った。今回解析を行ったサンプルの中では粒径 0.3 μ m の TiO₂ 粒子を顔料として含む塗膜が最も高い性能を示した。続いて、任意の性能を持つ塗膜設計への応用を目的として複合顔料及び多層構造塗膜の解析を行った。複合顔料を用いることで単一顔料塗膜では見られなかった分光特性が見られ、また組み合わせる種類の違いによる波長特性の多様性も確認できた。一方、今回行った解析では多層構造を持たせることによる分光特性の多様性向上はあまり見られなかった。最後に、本解析手法の解析結果の評価を行うためにサ

ンプルの制作及び計測を行った。この計測結果との比較では、解析手法では球形顔料を含む塗膜であれば粒径の制御が行えれば妥当な解析が行えるが、非球形顔料を含む塗膜では波長依存性の正確な再現は困難であることが分かった。

恒温恒湿槽および風洞を用いた乾燥実験を行い、以下の知見を得た。粒径の異なる赤玉土を恒温恒湿実験で用いると粒径が細くなるにつれて定率乾燥期間が長くなり、表面温度の低減効果が期待できる。一定の風速が流れている条件で、セラミック 3mm と 15mm の条件で風洞を用いた定率乾燥期間が長く、また材料内部の水分は粒径が細かい方が十分に利用できた。これは粒径が細くなる方が材料の表面積が増加して水分輸送が活発になるからである。空隙内部構造を変化させた時に、空隙の割合が大きいほど定率乾燥が長い期間見られた。ビーズの揮発によりできた気孔に自由水が含まれるためである。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Satoshi NISHIMURA, Shinichi KINOSHITA, Atsumasa YOSHIDA, Numerical Prediction on Solar Reflection Characteristics of Cool Painting Related to the Performance Optimization, Proceedings of the 4th International Symposium on Micro and Nano Technology, 査読有, 2013, CD-ROM (19 pages).

Satoshi Nishimura, Shinichi Kinoshita, Atsumasa Yoshida, Numerical Analysis on Solar Reflection Characteristics of Painted Layer Considering Anisotropic Scattering, Proceedings of the 3rd International Forum on Heat Transfer, 査読無, 2012, USB-Flash (4 pages).

[学会発表](計 5 件)

西村悟志, 吉田篤正, 木下進一, 高日射反射率塗膜の性能予測に関する数値シミュレーション, 日本機械学会関西支部第 89 期定時総会講演会論文集, 2014.3.11, 大阪, p.(10)-13.

片山拓哉, 安井頼一, 吉田篤正, 木下進一, 粒状保水性材料の蒸発特性に及ぼす粒子内部および粒子間空隙構造の影響, 空気調和・衛生工学会第 43 回近畿支部学術研究発表会論文集, 2014.3.18-19, 大阪, pp.161-164.

木下進一, 西村悟志, 吉田篤正, 高日射反射率塗膜の性能設計に関わる数値予測に関する研究, 第 34 回日本熱物性シンポジウム論文集, 2013.11-20-22, 富山, pp.48-50.

西村悟志，木下進一，吉田篤正，高日射反射率塗膜の反射特性予測に関する研究，第 50 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，2013.5.29-31，仙台，pp.180-181.

片山拓哉，吉田篤正，木下進一，粒状保水性多孔質の蒸発特性に関する実験的研究，日本機械学会熱工学コンファレンス 2012 講演論文集，2012.11.17-18，熊本，pp.283-284.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等 該当なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

吉田篤正 (YOSHIDA Atsumasa)
大阪府立大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：60174918

(2)研究分担者

木下進一 (KINOSHITA Shinichi)
大阪府立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：70263209

(3)連携研究者

該当なし