

サーモクロミック材料を用いた建築・都市の熱環境改善に関する研究¹

Research on Improvements of Thermal Conditions of Buildings and Urban Areas Using Thermochromic Materials

長島 健² 摂南大学理工学部基礎理工学機構
南知加子³ 摂南大学理工学部住環境デザイン学科
森山正和 摂南大学理工学部住環境デザイン学科

NAGASHIMA, Takeshi Institute for Fundamental Sciences, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
MINAMI, Chikako Department of Living and Environmental Design, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University
MORIYAMA, Masakazu Department of Living and Environmental Design, Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

Abstract

We have studied usefulness of thermochromic materials for improvements of thermal conditions of buildings and urban areas by using computer simulation. The dependences of temperatures and sensible heat flow at a roof and a ceiling on the solar reflectance of the roof were calculated. From the results, characteristics of the thermochromic materials necessary to improve the thermal conditions are discussed. It has been pointed out that vanadium dioxide is one of promising thermochromic materials because it shows metal-insulator transitions with a critical temperature in the vicinity of room temperature, which may lead to large changes in solar reflectivity as a function of the temperature. We estimated the temperature dependence of the solar reflectance of vanadium dioxide by using data in previous literatures, and found that it is unsuitable for the improvements of the thermal conditions.

キーワード: サーモクロミック材料、ヒートアイランド、省エネルギー、シミュレー

¹ 【原稿受付】2016年8月8日、【掲載決定】2016年9月30日

² 【主著者連絡先】長島 健 摂南大学、准教授 e-mail: t-nagash@mpg.setsunan.ac.jp
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8、摂南大学理工学部基礎理工学機構

³ 【現所属】南知加子 高松建設株式会社

ション

Keywords : thermochromic materials, heat island, energy savings, simulation

1. はじめに

近年、都市の気温が上昇している。ヒートアイランド現象や熱帯夜増加の原因の一つとして、都市がコンクリートやアスファルトなどの熱容量の大きい材料で覆われていることがある。昼間の日射熱や人工排熱により都市に熱が蓄積され、熱帯夜やヒートアイランドを引き起こしている。それらを抑制する手法として、建築物に日射反射率が高い高反射率塗料を塗布する方法がある⁽¹⁾。

高反射率塗料を適用することは、夏のヒートアイランド対策と断熱が不十分な場合の省エネルギーに効果的であるが、冬には暖房負荷が大きくなる。そこで、夏には反射率が高く、冬には反射率が低いサーモクロミック材料を適用することで冷暖房負荷を削減し、省エネルギー効果を高め、温熱的に快適な環境をつくることが考えられる。

サーモクロミック材料の建築物への応用はこれまでに提案はされていた⁽²⁾。しかしながら、これまではサーモクロミック材料の作製とその特性に関する報告しかなく、建築物に適用した場合の効果は定量的に議論されていなかった。そこで本研究では、実際の建築物の屋上にサーモクロミック材料を用いた場合の表面温度及び貫流熱流を熱収支計算によって調べた。これにより必要となるサーモクロミック材料の日射反射率の温度特性を明らかにした。材料合成及び物性の分野では反射率を議論する場合、一般に分光反射率が用いられるが、本研究では省エネルギー効果や温熱的環境を問題にするため、分光反射率に太陽光放射強度を乗じた日射反射率を取り扱う。得られた結果を有力な候補材料とされる二酸化バナジウムの日射反射率温度依存性と比較した。

2. 熱収支計算の概要

図1に計算に用いた構造を示す。計算対象構造は摂南大学1号館屋上の構成をもとに決定した。また各部の仕様・特性を表1に示す。サーモクロミック材料は屋上表面に設置するものと仮定した。屋上表面の日射反射率を変化させることでサーモクロミック材料の特性を模擬する。

建築物熱収支シミュレーションでは非定常熱湿気同時移動解析プログラム(WUFI)を使用した⁽³⁾。WUFIは、気温及び屋内の温度が時間変化する非定常状態で、熱流及び湿気の移動を考慮して熱伝導方程式を逐次計算し、温度及び熱流の空間分布及びその時間変化を解析する。

シミュレーションに必要な気温データは、図2に示すような2013年2月と8月のデータを使用した。2月及び8月の月平均気温はそれぞれ5.6℃及び30.0℃であった。計算では室内の温度を2月は22℃、8月は26℃に設定した。

以上の条件のもと、温度及び熱流の時間的及び空間的变化を、屋上表面日射反射率を変えながらシミュレーションした。日射反射率 R_{sol} は、構造表面の分光反射率スペクトル $R(\lambda)$ 及び太陽光の分光放射強度スペクトル $\phi_{sol}(\lambda)$ から以下の式で定義される⁽²⁾。ここで λ は光の波長である。式(1)からわかるように日射反射率は太陽光エネルギーの反射率に相当することがわかる。

$$R_{sol} = \frac{\int R(\lambda)\phi_{sol}(\lambda)d\lambda}{\int \phi_{sol}(\lambda)d\lambda} \quad (1)$$

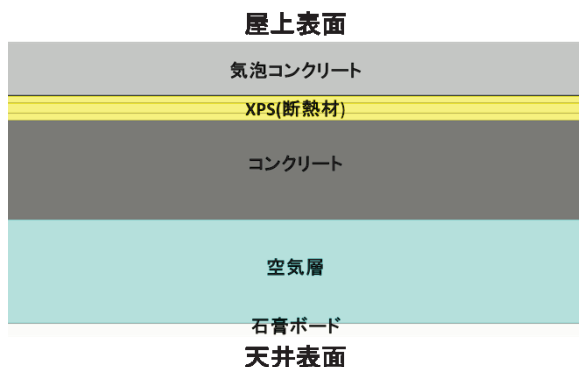


図1 摂南大学1号館屋上の構成

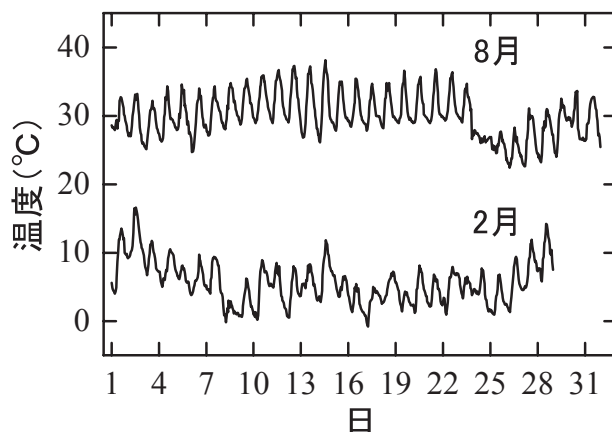


図2 2013年2月(冬)及び8月(夏)の気温

表1 建材の仕様・特性

	厚み (mm)	密度 (kg/m ³)	空隙率	比熱 (J/kg・K)	熱伝導率 (W/m・K)
気泡コンクリート	80	500	0.77	850	0.12
XPS(断熱材)	35	40	0.95	1500	0.03
コンクリート (水セメント比=0.5)	142.5	2300	0.18	850	1.6
空気層	150	1.3	0.999	1000	0.94
室内石膏ボード	21.5	850	0.65	850	0.2

ヒートアイランド抑制効果を調べるために、2月(冬)及び8月(夏)の屋上表面温度及び屋上表面顕熱流を日射反射率を変えながら計算した。別途実施した実験から、摂南大学1号館屋上の気泡コンクリートの日射反射率は約25%、高反射率塗料を塗布した場合は約82%であることがわかっており、日射反射率は材料によって大きく変化する⁽⁴⁾。そこで日射反射率を10%から90%の広い範囲で、10%ずつ変えながら計算をした。

さらに、冷暖房の省エネルギー効果を調べるために、2月(冬)及び8月(夏)の天井表面温度についても同様の計算をした。

3. 計算結果と考察

3-1 屋上表面温度及び顕熱流

本モデルでは屋上にサーモクロミック材料を設置することを想定している。そこで1号館屋上の構成で2月(冬)及び8月(夏)の1か月間の屋上表面温度を、日射反射率を変えながら計算した結果を図3に示す。図では各日の平均値(日平均)を示している。屋上表面温度は気温によって変化するが、日射反射率によっ

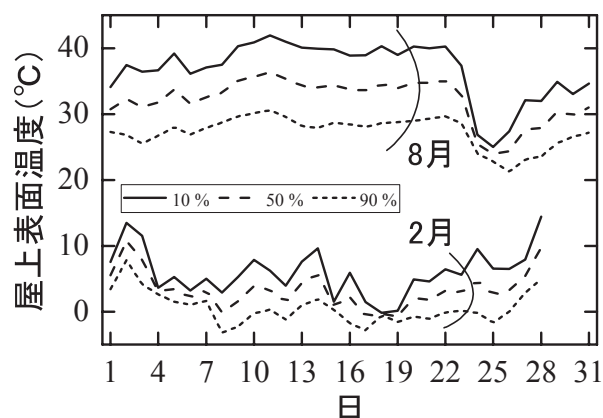


図3 様々な屋上日射反射率を仮定した場合の2月（冬）及び8月（夏）の屋上表面温度の計算結果

でも大きく変化することがわかる。

サーモクロミック材料の日射反射率は温度によって変化する。後に述べる二酸化バナジウムのように、反射率がある温度（閾値温度）より高温あるいは低温で大きく変化する材料を使用する場合、設置場所の温度に応じて適切な閾値温度をもつ材料を選択する必要がある。適切な閾値温度を検討するために屋上表面温度の日射反射率依存性の詳細を計算した。計算では気温として2月及び8月の月平均気温（それぞれ5.6℃及び30.0℃）を仮定した。結果を図4に示す。屋上表面温度は、2月は概ね6℃以下、8月は25℃以上であるため、閾値温度としてはその中間の16℃程度が適切と考えられる。

図5に屋上表面に流入する顕熱流の屋上日射反射率依存性を示す。負の顕熱流は屋上表面から大気へ熱量が放出されていることを示す。屋上表面温度が外気温と等しいとき、顕熱流はゼロになっていることを確認できる。顕熱流の大きさは外気温との温度差にほぼ比例して増大した。

図4に示すように、屋上表面温度は日射反射率に大きく依存する。屋上表面温度は日射反射率の増大とと

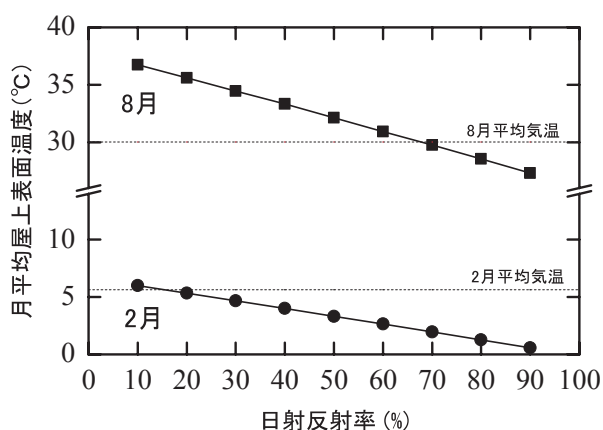


図4 2月（冬）及び8月（夏）の月平均屋上表面温度の屋上日射反射率依存性

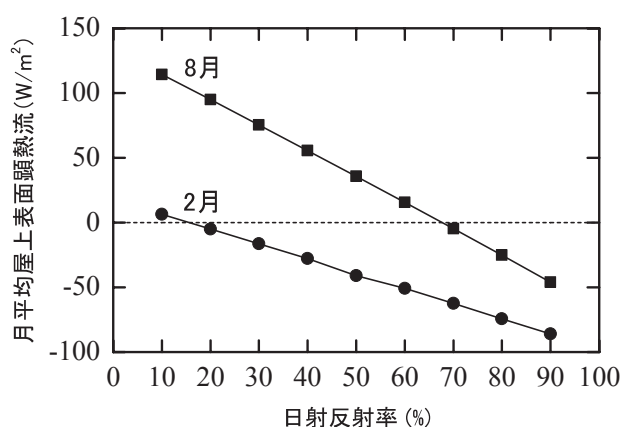


図5 2月（冬）及び8月（夏）の月平均屋上表面顕熱流の屋上日射反射率依存性

もにほぼ線形に減少し、8月では屋上表面度は日射反射率10%のときに比べ、90%のときは10℃程度低下している。2月では日射反射率10%のときに比べ、90%では5℃程度低下する。

ここで特に夏（8月）において日射反射率が熱収支及び大気温度に及ぼす影響を考察する。低日射反射率の場合、例えばコンクリートの25%の場合では、太陽光エネルギーの約75%が屋上に吸収されて熱に変わり、屋上表面温度が上昇する。図4より、このときの温度上昇は外気温から5℃弱だが、図5から1m²あたり80W程度の熱量が放出されて大気温度が上昇し、ヒートアイランド効果が加速される。日射反射率が70%以上の高反射率材料を屋上に設置したときは、屋上表面温度は外気温より低くなっており、屋上表面によって大気温度が上昇することはない。反射された太陽光は天空に放出される。大気による太陽光の吸収は小さいため、反射された太陽光による大気温度上昇は小さい。このように屋上日射反射率が高いほど夏のヒートアイランド対策に有効である。日射反射率が70%以上であれば、屋上表面顕熱流が負になるため効果が期待できる。

以上より、ヒートアイランド対策のためには、サーモクロミック材料として、16℃以上で日射反射率が70%以上になる材料が望まれる。

3-2 天井表面温度

サーモクロミック材料による屋内冷暖房の省エネルギー効果を調べるために、1号館屋上の構成で2月（冬）及び8月（夏）の月平均天井表面温度の日射反射率依存性の計算結果を図6に示す。天井表面温度は日射反射率が10%から90%まで増大するとともに減少するが、その大きさは2月で0.5℃、8月で0.7℃程度であった。天井表面温度は屋上日射反射率にあまり依存しないことがわかる。これは今回の計算モデルでは屋内と屋外の断熱が良好なためと考えられる。このような状況では省エネルギーの観点からはサーモクロミック材料は特に必要ではない。サーモクロミック材料が必要とされるのは、少しでも省エネルギー効果を得たい場合、あるいは断熱が不十分な建築物の場合と考えられる。このときサーモクロミック材料の特性としては低温時（屋上表面温度16℃以下）の日射反射率ができるだけ低い材料が望ましい。

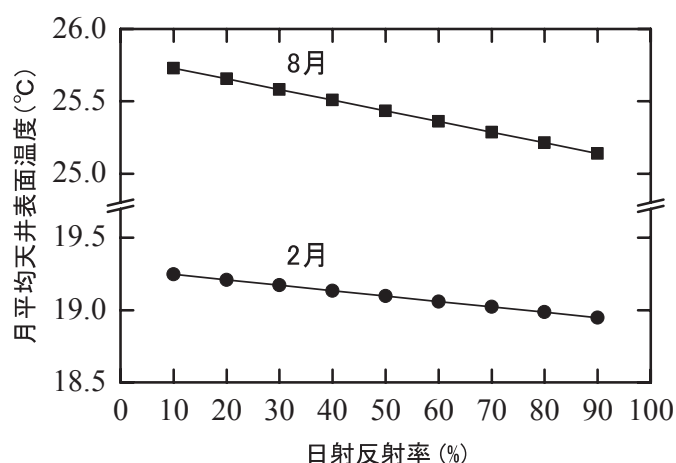


図6 月平均天井表面温度の屋上日射反射率依存性

3-3 サーモクロミック材料特性の考察

以上の検討結果を参考に、サーモクロミック材料の日射反射率の温度変化特性の必要条件をまとめると

1. 閾値温度は16℃程度
2. 高温での日射反射率は70%以上
3. 低温での日射反射率はより小さいことが望ましい。

温度により色が変化するようなサーモクロミック材料は数種類あるが、いずれも有機物で耐候性が低い。建築物に適用できるサーモクロミック材料として、二酸化バナジウム VO_2 を検討する。無機物のため耐候性に優れると予想されることと、適当な温度で反射率や透過率に変化が生じることが期待されるためである。

二酸化バナジウムは室温では絶縁体的性質を持つ。温度が上昇して転移温度以上になると、金属的になる。転移温度は純粋な単結晶では64℃程度である。バナジウムをタングステン等で一部を置換することで、転移温度を最低で-50～-60℃程度まで低下させることができる。 VO_2 は転移温度を境に、低温相の単斜晶から高温相の正方晶ルチル型構造へ変化するとともに、電子エネルギーバンド構造が変化し、金属-絶縁体相転移を示すことが知られている。絶縁相と金属相との直流電気抵抗の比は 10^5 程度になることが知られており、相転移により電気的性質が大きく変化する。相転移に伴う構造変化により体積が0.044%だけしか変化しない。非常に小さな原子変位のため、金属-絶縁体相転移に要する時間は 10^{-12} s オーダー以下と非常に高速であり、外気温や室温の変化に追従できる⁶⁾。

一般に絶縁体では光を透過あるいは吸収しやすく、反射率は比較的小さい傾向がある。 VO_2 の金属相（高温相）では、自由電子が存在するために分光反射率が増大するものと期待される。ガラス基板上の厚さ75 nm の二酸化バナジウム薄膜の20及び80℃での分光反射率スペクトル $R(\lambda)$ が文献(2)に報告されている。20及び80℃がそれぞれ絶縁相及び金属相に対応する。文献(2)の分光反射率スペクトル $R(\lambda)$ と、大気を透過して地表に到達する太陽光の分光放射強度スペクトル $\phi_{sol}(\lambda)$ を用い、式(1)によって日射反射率を求めた。 $\phi_{sol}(\lambda)$ には米国材料試験協会によるデータ（ASTM G173-03）を用いた⁶⁾。これは南中時かつ太陽高度37度のときに観測される太陽光の分光放射強度スペクトルである。実際には季節によって南中時の太陽高度は変化する。このため $\phi_{sol}(\lambda)$ は季節によって変化するが、ここでは二酸化バナジウム膜の日射反射率の温度変化に注目し、 $\phi_{sol}(\lambda)$ は気温あるいは季節によらず同一の値を用いた。可視・紫外領域（280～780 nm）、赤外領域（780～2440 nm）及び全波長領域（280～2440 nm）で日射反射率平均値を求めた結果を表2に示す。

表2 ガラス基板上二酸化バナジウム膜の日射反射率

	280～780 nm	780～2440 nm	全波長領域
絶縁相(20℃)	38 %	36 %	37 %
金属相(80℃)	29 %	29 %	29 %

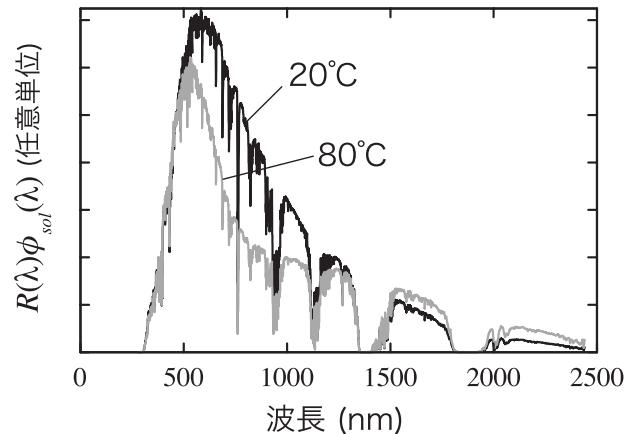


図7 二酸化バナジウム薄膜の分光反射率 R と太陽光放射強度 ϕ_{sol} の積の波長依存性

絶縁相と金属相とで日射反射率は7～9%の差しかない。予想に反し、低温の絶縁相のほうが日射反射率が高い。この原因を考察するために、20 及び 80 °Cにおける式(1)の分子の被積分関数 $R(\lambda)$ $\phi_{sol}(\lambda)$ (分光反射率と太陽光放射強度の積) の波長依存性を図7に示す。

高温の金属相で分光反射率 $R(\lambda)$ は約 1500 nm 以上の波長で増大しているものの、この波長領域の太陽光は弱く $\phi_{sol}(\lambda)$ の値が小さい。 $\phi_{sol}(\lambda)$ は波長 1000 nm 以下の領域に強い成分を持つが、この波長領域では金属相の反射率が低温の絶縁相よりも小さくなっている。これによって金属相 (80 °C) での $R(\lambda) \phi_{sol}(\lambda)$ が絶縁相の値よりも低下している。

以上のように、今回の検討では、二酸化バナジウム薄膜は日射反射率の温度依存性の観点からはサーモクロミック材料としては不適当であることがわかった。計算に用いた試料は 75 nm と膜厚が薄く、基板による歪み等により膜質が低下していた可能性がある。厚いバルクについて検討するとともに他物質の探索の必要がある。

4. まとめ

サーモクロミック材料の建築物適用可能性を調べるため、様々な屋上日射反射率を仮定して、屋上及び天井表面温度及び顕熱流を熱収支計算に基づきシミュレーションした。結果からヒートアイランド抑制効果及び省エネルギー効果を得るのに必要なサーモクロミック材料の日射反射率の温度特性を明らかにした。

文献で報告されている二酸化バナジウム薄膜データから日射反射率を計算したところ、高温相で反射率が低下し、熱環境改善のために期待される特性でないことがわかった。今後、二酸化バナジウム膜質の最適化の検討を含め、建築物に使用可能なサーモクロミック材料の探索が必要である。一方で、本研究のように材料物性に直接的に依存する手法でなく、適当な表面構造を付与することで夏と冬の太陽高度に応じて反射率が変化するような屋上及び壁面の検討も進める。

謝辞

本研究は2015年度摂南大学融合科学研究所研究課題として遂行された。屋上日射反射率の実験補助及び有益な議論をして頂いた摂南大学大学院社会開発工学専攻森山研究室の中林俊喜氏に感謝致します。

参考文献

- (1) 日本建築学会編, 「クールルーフガイドブック」, 地人書館, (2013).
- (2) Jin, P., Xu, G., Tazawa, M., and Yoshimura, K., “Design, formation and characterization of a novel multifunctional window with VO₂ and TiO₂ coatings,” *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.*, 77(2003), pp. 455–459.
- (3) 「WUFI (ヴーフィ) とは」, http://f-ei.jp/archives/wufi_pro/000045.html (2016 年 9 月 24 日閲覧)
- (4) 南知加子, 「高反射率塗料によるヒートアイランド対策及び省エネルギーの効果に関する研究」, 摂南大学卒業論文, 第 2 章, (2016).
- (5) Garry, G., Durand, O., and Lordereau, A., “Structural, electrical and optical properties of pulsed laser deposited VO₂ thin films on R- and C-sapphire planes,” *Thin Solid Films*, 453–454(2004), pp. 427–430 及びこの中の参考文献。
- (6) 「Reference Solar Spectral Irradiance: ASTM G-173」, <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/astmg173/astmg173.html> (2016 年 9 月 24 日閲覧)