

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420587

研究課題名(和文)年間を通して理想的な日射反射特性を示す指向性反射材による環境負荷軽減建材の開発

研究課題名(英文) Development of all season environmental load-reducing materials for roofs and outer walls

研究代表者

酒井 英樹 (Sakai, Hideki)

大阪市立大学・大学院生活科学研究科・准教授

研究者番号：90277830

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：入射角度によって反射率が大きく異なる指向性再帰反射構造を考案し、高く昇る夏の太陽光は高反射することで受熱を防ぎ、低い位置に停まる冬の太陽光は吸収することで受熱を促進する建材を開発した。これを屋根や外壁に用いることで、夏場は建物が暖められにくくなることで冷房の使用を減らすことができ、冬場は建物が暖められやすくなることで暖房の使用を減らすことができ、年間を通じて省エネルギーに寄与し、環境負荷を軽減することができる。

研究成果の概要(英文)：We have developed the directional retro-reflective structures whose reflectances depend largely on the incident angle and have proposed to use them as all season environmental load-reducing materials for roofs and outer walls. They can reflect the light from the summer sun high in the sky and prevent from being heated and can absorb the light from the winter sun low in the sky and promote being heated. In consequence, they can reduce the air-conditioning cooling load in summer, and can also reduce the heating load in winter.

研究分野：建築材料

キーワード：環境材料 日射反射率 ヒートアイランド 都市環境 再帰反射

1. 研究開始当初の背景

都市部で年々深刻化する夏季のヒートアイランド現象に対して、路面や建物外皮を高反射化して日射受熱量を減らすことで、地表面の高温化を防ぐ取り組みが、国内外で進められている。改修の際に導入するなど、既存の建物にも適用しやすく、施工後のメンテナンスもほとんど必要ないことから、注目されている。しかし、低層面や壁面を高反射化すると、反射した日射が周辺へ照り返しとなり、周辺の温熱環境をかえって悪化させてしまう、年間を通じて受熱量が軽減されるため、建物では冬季の暖房負荷が増加し、寒冷地では省エネルギーとならないなどの問題が指摘されている。

このような状況において、研究開始当時、再帰反射材と呼ばれる入射した光を再び入射方向へ反射する材料を使うことで、反射日射を太陽方向へ返し、周辺への照り返しを軽減する方法が提案されていた。しかし、再帰反射材によっても、依然として冬季の暖房負荷増加は避けることができず、さらに、車の前照灯や街路灯など下方からの光も光源方向に反射するため、夜間の視認性を阻害してしまうという新たな問題が発生する恐れがあった(図1)。

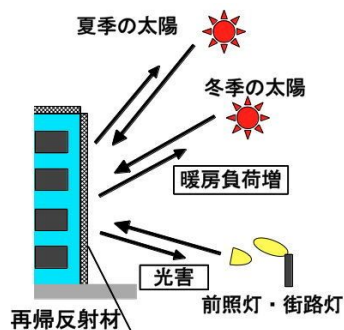


図1 再帰反射材の弊害

2. 研究の目的

環境負荷軽減のためには、図2に示すような、夏季の太陽光のみ再帰反射し、冬季の太陽光、及び下方からの光は吸収するという反射特性が好ましいと考えられる。このような反射指向性は、太陽の位置に応じて、反射ミラーの向きを機械的に制御するなどすれば、技術的には可能である。しかし、機械的な制御は故障の原因となり、路面や建物外皮などの大面積に適用することは現実的ではない。

ここで、太陽は不規則に変動しているわけではなく、年単位で規則的な軌跡を描いている。そこで、入射角によって反射率が変化する

る光学特性(指向性)をもった反射材について、反射することが好ましい夏季の太陽の入射角に対して反射率が高く、吸収することが好ましい冬季の太陽の入射角に対して反射率を低く抑える光学設計が行えれば、材料そのものの受動的な光学特性として理想的な反射特性を実現することが可能となる。問題は、そのような都合のよい指向性を有する反射材が手に入るのか、という点である。これには、通常の再帰反射材の構造が参考になる。そもそも入射した光を入射方向へ反射するという性質を示す光学素子は存在しておらず、再帰反射材は、複数の鏡面反射やレンズの屈折と反射体の組み合わせにより実現されているにすぎない。そして、このように表面に構造をもつ再帰反射材はそもそも指向性(入射角依存性)が大きいことが知られている。

そこで、本研究では、従来の再帰反射技術を応用し、レンズや反射体を適切に配置することで、年間を通じて理想的な日射反射特性を示す指向性反射材を開発することを目的として、

- (1) 建築外皮に適した指向性反射材の構造の探索、
 - (2) 太陽軌跡の季節変動に対する最適な指向特性の選択、
 - (3) 他のヒートアイランド緩和材との比較、及び、局所気温の低減効果など都市街区に対して与える影響の予測、
- という3つの課題に取り組んだ。

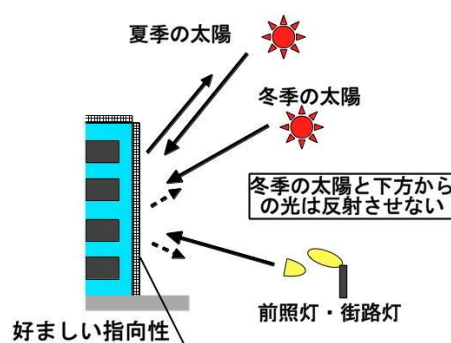


図2 好ましい指向性をもつ反射材

3. 研究の方法

- (1) 建築外皮に適した指向性反射材の構造の探索

現在実用化されている再帰反射構造の1つである球状レンズ(ガラスビーズ)方式では、レンズで屈折・集光した光をレンズの背後に設置した反射体で鏡面反射し、再びレン

ズで屈折することによって、再帰反射を実現している。ここで、入射光の屈折の度合いは入射角とレンズ球面との成す角度により自動的に調整されるため、ある角度で入射した光は、入射位置に係らず、反射体の特定の部位に集光する。つまり、個々の球状レンズについて、入射角と反射体の部位とは 1:1 で対応している。そこで、ある入射角に対応した反射体部位の反射率だけを変えれば、他の入射角には影響を与えず、その入射角に対する再帰反射率だけを独立に調整できる。例えば、建物の南鉛直面に使用することを想定した場合、図3に示すように、夏の太陽高度に対する集光位置を高反射部位（白色）とし、その他の部位を低反射（黒色）とすれば、「夏季の太陽光のみを選択的に再帰反射し、冬季の太陽、および、下方からの光は吸収する」という理想的な指向性をもつ再帰反射材が設計できる。

本研究では、上記の考えに基づき、球状レンズ方式を基本構造とし、反射体の反射率を部位ごとに調整することで指向性を発現させた試験試料を作成し、実際にどの程度の角度分解能で反射率を制御できるかの評価を行った。

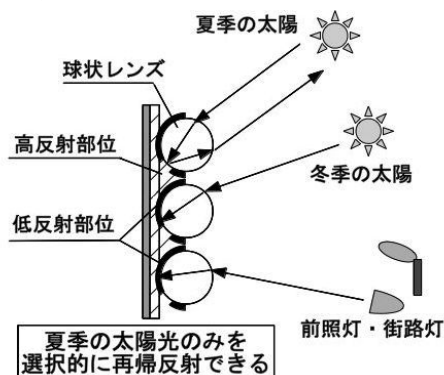


図3 提案する指向性反射材の構造

(2) 太陽軌跡の季節変動に対する最適な指向特性の選択

太陽軌跡の季節変動は、適用地点の緯度によって大きく異なることから、指向性の付与は、適用地点ごとに細かく調整する必要がある。そこで、2つ目の課題として、南鉛直面以外の壁面や屋根面も含めて、夏季の太陽軌跡に対して高反射、冬季の太陽軌跡に対して低反射となる指向性が付与できるかについて確認するとともに、その設計手法をまとめることとした。

(3) 他のヒートアイランド緩和材との比較、

及び、局所気温の低減効果など都市街区に対して与える影響の予測

課題1, 2で明らかとなった日射反射特性、熱物性データを元に、提案する指向性反射材を、通常の日射高反射材、保水性建材、緑化など、他のヒートアイランド緩和材と比較し、材料単体としての優位性の実証を行う。さらに、ヒートアイランド対策として、最終的に求められる一定面積に対して適用した場合に、都市街区に対して与える影響（局所気温の低減効果など）を予測するための放射環境シミュレーション手法の開発を行う。そして、その有用性を検証し、環境負荷軽減建材として好ましい反射指向性（夏の太陽軌跡に対して反射率が高く、冬の太陽軌跡に対して反射率が低くなる）を有する新建材として提案する。

4. 研究成果

(1) 建築外皮に適した指向性反射材の構造の探索

図3の構造において、高反射部位に白色塗膜（日射反射率 70.9%）を、低反射部位に黒色塗膜（日射反射率 3.5%）を用いた試験体を作成し、入射角による日射反射率の変化を、屋外暴露試験による温度測定から求めた。既報において、直径 12.5mm の球状レンズ（無着色透明ソーダ石灰ガラス、屈折率 1.5）を用いて 10 度程度の角度分解能で反射率を制御できることを示したが、角度分解能はレンズの大きさに依らずほぼ一定であった。光学特性として、10 度の角度分解能は決して高いとは言えず、レンズ素材に特殊な高屈折率ガラスを用いるなどすれば、分解能を改善できる余地はある。しかし、南中時の太陽高度の季節変動の最大差は 46.8 度であり、指向性反射材への適用を考えた場合、少なくとも南面については、夏冬で最適な反射率を設定することは可能であり、建築物という大面積への適用を念頭においていることから、以下の課題では、安価で一般的なソーダガラスで実現できる範囲で議論を行った。

(2) 太陽軌跡の季節変動に対する最適な指向特性の選択

指向特性の選択方法を、南鉛直面に加えて、東鉛直面、西鉛直面、及び、水平面に太陽光の直達成分が球状レンズによって集光する位置を計算し、検討した。その結果、毎月 21 日を基準日として、6 月の集光位置から 3 月

と9月の集光位置までを高反射(白色)とし、3月と9月の集光位置から2月と10月の集光位置までを中反射とし、2月と10月の集光位置から12月の集光位置までを低反射(黒色)とする3領域を設定することで、良好に反射率の設計ができ、日射反射率一定の建材と比較して、夏冷たく、冬暖かい、という年間を通して理想的な日射反射特性を付与できることが分かった(図4)。

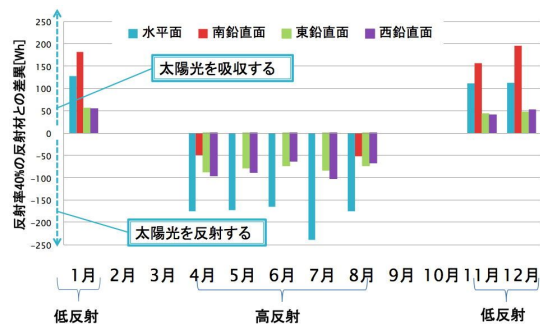


図4 指向性反射材の日射吸収量

(3)他のヒートアイランド緩和材との比較、及び、局所気温の低減効果など都市街区に対して与える影響の予測

従来の高反射化が、保水化や緑化など、他のヒートアイランド対策に劣る点として、周辺へ照り返し日射量の増加により、周辺の温熱環境を悪化させたり、まぶしく視認性を阻害したりすることが指摘されているが、本研究で試作した指向性反射材を用いて、確認したところ、夏季の太陽光を選択的に再帰反射しており、その他の季節の太陽光、及び、下方からの光は、高反射せず、照り返しを抑制するとともに、視認性の阻害なども低減できることが明らかとなった(図5)。

ただし、局所気温の低減効果など都市街区に対して与える影響は、建物の配置や気候の設定によって大きく左右されることから、客観的な指標として使用するには難があり、導入効果の定量予測方法については、引き続き継続して研究を行うこととした。

本研究で注目した反射指向性に対して、これまでも先駆的な研究は存在するが、材料構造が複雑に成りがちで、効果の確認や設計自体も難しいことから、例えば、蛍光灯など室内照明シミュレーションですら、内壁の指向性をきちんと取り扱うことは少なく、拡散反射と仮定するなど一般的なであった。近年のコンピュータの性能向上により、指向性を取り入れた照明シミュレーションがやっと

実用の域になってきた段階である。このような状況において、本研究で提案する従来にない新構造で日射反射指向性を自在に調整することが可能となれば、日射を含む温熱環境においても、指向性を積極的に活用するきっかけとなり、材料特性の最適設計により省エネルギー対策が一段と進むことが期待される。

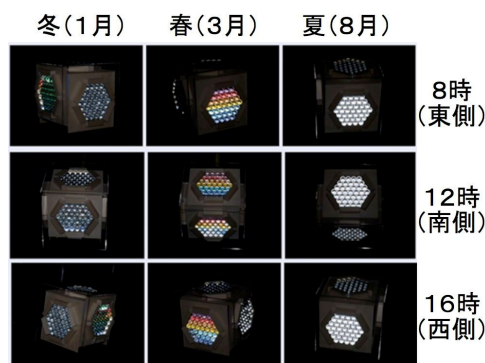


図5 指向性反射材を用いた建物模型

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

J.Yuan, K.Emura, H.Sakai, C.Farnham, S.Lu, Optical analysis of glass bead retro-reflective materials for urban heat island mitigation, Solar Energy, 査読有, Vol.132, 2016, pp.203-213
doi:10.1016/j.solener.2016.03.011

〔学会発表〕(計7件)

磯見麻衣, 酒井英樹, 伊與田浩志, 配光による光沢感の違い:面光源と点光源との比較実験, 日本色彩学会関西支部大会, 2016.3.5, 大阪電気通信大学(大阪府・寝屋川市)

伊與田浩志, 酒井英樹, 高山正宏, 仲森裕司, アクリルドームとデジタルカメラを用いた色情報記録装置の開発, 日本色彩学会, 2015.9.26, 山形大学(山形県・山形市)

H.Sakai, H.Iyota, Evaluation of shutter speed of digital cameras for color measurement, The 2nd Asia Color Association Conference, 2014.9.6, Taipei (Taiwan R.O.C.)

酒井英樹, 表面凹凸構造による再帰反射発現の原理とその設計, 日本ヒートアイラン

ド学会，2014.7.26，佐賀大学（佐賀県・佐賀市）

酒井英樹，伊與田浩志，光沢・半光沢・光沢なし - 光沢感の分類基準の検討，日本色彩学会，2014.5.25，福岡大学（福岡県・福岡市）

H.Sakai， S.Yoshikawa， H.Iyota ， Accuracy of Color Measurement by Using Digital Cameras and the Standard Color Chart， The 1st Asia Color Association Conference， 2013.12.12， Thanyaburi (Thailand)

酒井英樹，伊與田浩志，省エネルギー性と意匠性を備えた指向性再帰反射材を外壁に用いた家，日本色彩学会，2013.5.26，早稲田大学（東京都・新宿区）

〔その他〕

酒井英樹，再帰反射技術によるヒートアイランド対策の可能性，特集「グリーン・コーンバーティング」，コンバーテック 2016年2月号，加工技術研究会 pp.56-59

酒井英樹，都市を冷やす「日射照り返し抑制効果を持つ太陽熱高反射材の開発」，<http://colorscience.sakura.ne.jp/heat/heat.htm>（参照日 2016年5月5日）

6．研究組織

(1)研究代表者

酒井 英樹 (SAKAI HIDEKI)

大阪市立大学・大学院生活科学研究科・准教授

研究者番号：90277830