

令和元年6月24日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06444

研究課題名(和文) ヒートアイランド現象の緩和に有効な表面凹凸再帰構造を持つ舗装体の開発

研究課題名(英文) Development of rough-surface-type retroreflective materials as countermeasures to urban heat islands

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：入射された光を反転して入射方向に反射するという再帰反射性を、既存のプリズム反射方式や球状レンズ(ガラスビーズ)集光方式ではなく、表面凹凸再帰構造という全く新しい方式で実現する新素材を開発した。この素材は、高コストの原因となるプリズムや球状レンズを必要とせず、アスファルト舗装面が元来有する表面形状のみで再帰反射性を発現できるため、技術移転に成功すれば、低コスト、高耐久性で、都市全域への適用が可能な舗装体となることが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、世界各地で夏季のヒートアイランド現象が顕在化しており、その対策が求められているが、本研究成果の導入による直接的効果として、夏季の日中晴天時の舗装路面の表面温度低下(現行の遮熱性舗装と同等以上)、道路面からの照り返し日射量の低減(新規効果)が、さらに、間接的効果として、ヒートアイランド現象の緩和(日中の最高気温の抑制、熱帯夜日数の減少)、道路周辺の光・熱環境の改善、歩行空間の快適性向上(新規効果)が見込まれる。

研究成果の概要(英文)：Retroreflection is a unique optical property in which the incident light returns back in the direction of its source. Up to the present, two main optic structures have been used to achieve this property: ball lens optics constructed using glass beads, and corner cube optics constructed using prisms. In this study, we proposed another completely different retroreflective structure called the rough-surface-type. Its retroreflectivity is caused by a combination of surface roughness and its diffuse reflection. Therefore, it can withstand distortion and is suited for road surfaces.

研究分野：建築・土木材料

キーワード：再帰反射 環境材料 ヒートアイランド 都市環境 日射反射率

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、世界各地で夏季のヒートアイランド現象が顕在化しており、その対策が求められている。その一つとして、地表面被覆を高反射化（遮熱化）して太陽光を反射し、昼間の路面温度の上昇を抑制する遮熱性舗装の導入が国内外の都市部で進められている。しかし、反射した日射が周辺への光害・熱害となることから、過度に高反射化することはできず、効果は限定的である。この解決策として、入射した光を入射方向に反射させる再帰反射技術を使って、日射を太陽方向へ反射させる手法が注目されている。

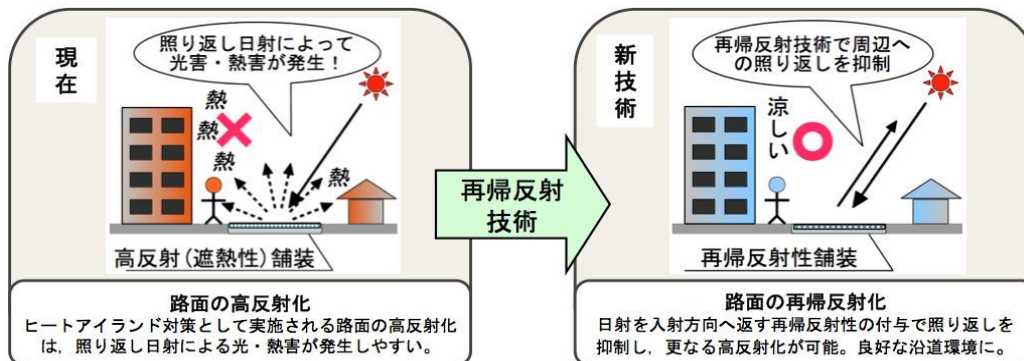


図1 路面の高反射化（左）と路面の再帰反射化（右）

ここで、再帰反射自体は目新しいものではなく、夜間の視認性を高めることを目的として交通標識の基板や安全服のマーカーなどで既に広く使われている。しかし、それらの製品では、プリズム構造を構築したり、球状レンズを配列させたりと精度の高い加工が要求される。よって、建物の屋根面などの一部に小面積で使用するにはよいが、都市全域の路面に大規模に適用することは、コスト及び耐久性の面から現実的ではない、という状況があった。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究では、表面凹凸再帰というこれまでとは全く異なる方式による再帰反射技術に注目し、その有用性の検証を行った。この新技術は、高コストの原因となるプリズムや球状レンズを必要とせず、アスファルト舗装面が元来有する表面形状のみで再帰反射性を発現できるため、技術移転に成功すれば、低コスト、高耐久性で、都市全域への適用が可能な舗装体となることが期待される。

この表面凹凸再帰 - 微細な凹凸構造、又は多孔質構造をもつ表面で再帰反射性が発現する現象 - 自体の発見は古く（1960年代）、例えば、月の砂の表面には微細な凹凸があり、再帰反射性を示すことが観測されている。よって、月表面には再帰反射性があり、反射強度が入射角度に依存しないため、満月は縁が暗くならず、球面には見えない。満月は、まるで“お盆”のように見える。月面には大気が存在しないため、岩石や砂の風化が起こらず、岩石や砂粒子の表面の微細な凹凸形状が保たれているのである。

しかし、この表面凹凸再帰は、これまで応用が考えられていなかったことから、再帰反射発現に必要な条件の解明など詳細な研究はされていない。そこで、本研究は、これまで全く注目されていなかったこの現象に着目し、再帰反射発現に最適な表面凹凸形状を探索し、かつ、その構造を人工的に作り出すことを目指した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 表面凹凸再帰の光学シミュレーション技術の確立

現在実用化されている再帰反射材の構造として、プリズム反射方式（図2左）では、直交する3、4枚の反射体での複数回の鏡面反射の組み合わせによって、球状レンズ（ガラスビーズ）集光方式（図2右）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、それぞれ再帰反射を実現している。両方式とも、鏡面反射という入射角と反射角が厳密に定まる現象を利用しているため、反射体が傾いたり、歪んだりすると、再帰反射性能が著しく低下するため、高精度な加工・製造が求められる。

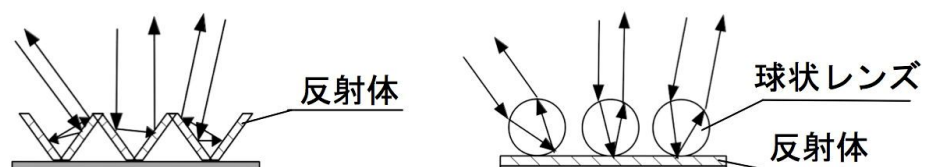


図2 プリズム反射方式（左）と球状レンズ集光方式（右）の再帰反射構造

一方、表面凹凸再帰方式では、鏡面反射ではなく、拡散反射によって再帰反射が発現する。

凹凸を有する拡散反射面に光が入射した場合、その一次拡散光は、凹凸を構成する微小局面面（図3左の実線）を基準にすると、全方位に拡散反射されるが、凹凸をならした平均的な表面（図3左の破線）を基準にすると、入射方向から大きく外れた方向への反射は凸部に遮られるため、入射方向への拡散反射成分が多くなる。その結果、図3左の細線で示すように、局面面の反射率が低く、一次拡散光が支配的な場合は、再帰反射性が発現する。

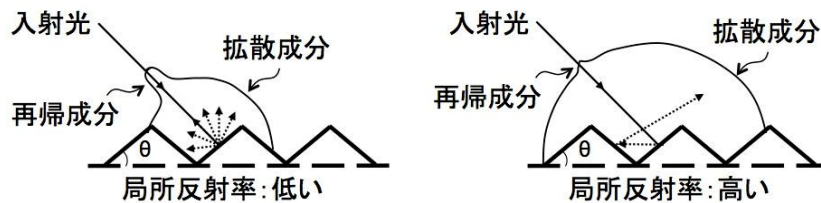


図3 表面凹凸再帰による再帰反射の発現（左）とその消滅（右）

この現象が複雑なのは、局面面の反射率を高くしていくと、図3右に示すように、局面面間で二次、三次と高次の相互拡散反射を繰り返すことで入射方向の情報が徐々に失われていき、最終的には再帰反射性が消滅してしまう点である。（注：図3の実線で示す表面凹凸形状は、説明のために単純化して描いている。）

よって、過度の高反射化は原理的に不可能であり、他の方式に比べて再帰反射性能は劣る。しかし、入射角と反射角との関係性の低い拡散反射を利用しているため、構造の崩れの影響を受けにくいという特徴を持ち、車両などの荷重により変形や摩耗し易い道路面への適用が可能である。ただし、従来方式の再帰（図2）は鏡面反射のみであり、光を光線として扱う比較的簡単な計算で設計が行えたのに対して、表面凹凸再帰（図3）は、複雑な表面形状における拡散反射という複雑な光学シミュレーションを必要とする点が難点である。

そこで、まずは、表面凹凸再帰の光学設計に必要な光学シミュレーション技術の確立を1つめの課題とした。本研究で目指す近赤外線を含む日射に対する高精度の光学シミュレーションは一般的ではないが、照明分野、つまり、可視光に対する高精度シミュレーションは、既に広く利用されており、多数の研究者によってその妥当性が検証された光学シミュレーションソフトが存在する。本研究では、その中でもとくに定評があり、また、ソースコードが公開されている米国ローレンス・バークレー国立研究所開発の Radiance を流用し、これを近赤外線を含む日射に適用できるように取り扱える波長範囲の拡大を行った。

## (2) 再帰反射に最適な表面凹凸形状の探索

舗装体の母材の凹凸成分、骨材の粒子径、塗膜の厚みを主なパラメータとして、それらの組み合わせによる再帰反射性能を、(1)で確立したシミュレーション技術で網羅的に調べること、各パラメータの再帰反射への寄与率を解析し、最適な表面凹凸形状の探索を行った。ただし、シミュレーションはあくまで理論的な予測であるため、その妥当性については、舗装体サンプルを試作し、その再帰反射率を実測し、サンプルで使われている母材、骨材、塗膜からシミュレーションによって再現した再帰反射率と比較することで検証を行った。

## (3) 施工現場（屋外）での再帰反射率の測定技術の確立

これまででは、温熱測定と据え置き型の大型分光光度計を組み合わせることで、高精度な再帰反射率の測定を行っていた。しかし、舗装作業は、工場生産ではなく現場で行うものであり、屋外施工時にその場で再帰反射率の測定が行えれば、施工不良などの問題を回避できる。そこで、3つ目の課題として持ち運び可能な小型の再帰反射率測定装置の開発を検討した。方法としては、測定装置の光学系を反射ミラーを使ったものから、小型化に適した光ファイバーに置き換える。ただし、光学機器は、一般的に小型であるほど測定精度が落ちることから、その妥当性を検証した。

## 4. 研究成果

### (1) 表面凹凸再帰の光学シミュレーション技術の確立

シミュレーションで得られた予測値を、舗装体模型で得た実測値と比較した結果、両者は良好に一致し、光学シミュレーション技術の妥当性を検証することができた。

### (2) 再帰反射に最適な表面凹凸形状の探索

市販の道路舗装体と舗装塗料を組み合わせた表面凹凸構造を有する試験体を試作し、その反射特性を測定した。そして、既存のプリズム反射方式や球状レンズ集光方式の再帰反射体の反射特性と比較した。その結果、再帰反射率は低いものの、構造の崩れに強く堅牢性に優れているなどの表面凹凸方式の再帰反射材の特徴が明らかとなった。これらの特徴は、通行時の視認性を阻害することのないように、過度に明度を高める必要がなく、さらに、車両等の通行により常に荷重がかかり変形しやすい環境で使われるという道路舗装体に適している。



### (3) 施工現場(屋外)での再帰反射率の測定技術の確立

施工された後の表面凹凸再帰反射体の屋外(現場)での反射特性の測定装置を開発した。照明光源をハロゲンランプからLED光源に変え、さらに、光学系を反射ミラーを使ったものから、光ファイバーを使ったものに置き換えることで小型・省電力化し、バッテリー駆動が可能で可搬性に優れたものとした。従来の測定装置と比べて、明度の高い試料については測定精度は劣るものの、舗装道路で使われる低明度の試料面であれば、遜色ない測定精度が得られることを確認した。さらに、その研究過程で、日射反射率の算出に用いる基準太陽光の数値について、工業規格間に矛盾があることを突き止め、その要因を明らかにした。

最後に、本研究が実用化した先には、その導入による直接的効果として、

- ・夏季の日中晴天時の舗装路面の表面温度低下(現行の遮熱性舗装と同等以上)
- ・道路面からの照り返し日射量の低減(新規効果)

さらに、間接的効果として、

- ・ヒートアイランド現象の緩和(日中の最高気温の抑制、熱帯夜日数の減少)
- ・道路周辺の光・熱環境の改善、歩行空間の快適性向上(新規効果)

が見込まれる(図4)。

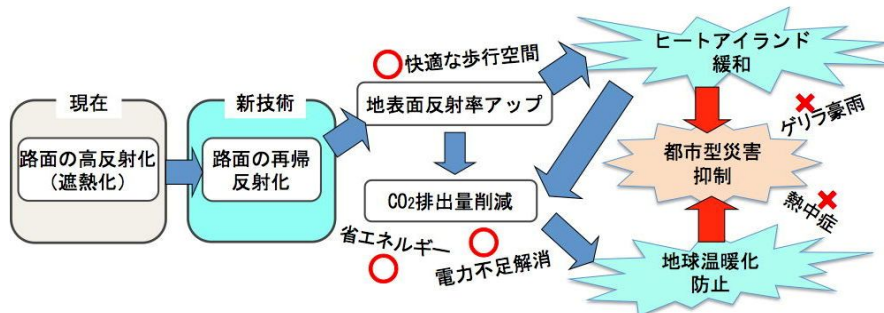


図4 新技術(表面凹凸再帰)の導入効果

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

Hideki Sakai, Hiroyuki Iyota, Development of Two New Types of Retroreflective Materials as Countermeasures to Urban Heat Islands, International Journal of Thermophysics, 査読あり, Vol.38-131, 2017, pp.1-10, DOI: 10.1007/s10765-017-2266-y.

[学会発表](計4件)

酒井英樹, 日射反射率及び透過率等の計算に用いる基準太陽光の規格間比較, 日本ヒートアイランド学会第13回全国大会, 2018.

酒井英樹, ドーム型照明を用いた非接触式測色システムによる塗膜面の屋外暴露試験資料評価, 日本色彩学会環境色彩研究会第17回発表会, 2018.

酒井英樹, 塗膜防水材料及び滑り止め材料の日射再帰反射特性の簡易評価, 日本ヒートアイランド学会第12回全国大会, 2017.

Hideki Sakai, Development of Two New-Type Retroreflective Materials as Countermeasures to Urban Heat Islands, 11th Asian Thermophysical Conference (ATPC2016), 2016.

## 6. 研究組織