

研究助成実施報告書

助成実施年度	2020 年度
研究課題（タイトル）	再帰反射化の建物外皮が都市域屋外熱環境に与える影響の研究
研究者名※	袁 継輝
所属組織※	豊橋技術科学大学大学院 工学研究科 建築・都市システム学系 助教
研究種別	研究助成
研究分野	都市環境工学
助成金額	150 万円
発表論文等	Building and Environment 207 (2022) 108478

※研究者名、所属組織は申請当時の名称となります。

() は、報告書提出時所属先。

大林財団 2020 年度研究助成実施報告書

所属機関名

豊橋技術科学大学

申請者氏名

袁 継輝

研究課題	再帰反射化の建物外皮が都市域屋外熱環境に与える影響の研究
<p>(概要) ※最大 10 行まで</p> <p>本研究の目的を実現するため、再帰反射型建物外皮による都市域の屋外熱環境への影響の検討に対して、特殊な反射指向特性を有する再帰反射型建物外皮素材の反射指向特性の光学測定を行う。</p> <p>また、屋外の実大実験により、異なる反射指向特性を有する建物外皮用反射素材を建物外壁面に覆った後、屋外熱環境の評価指標(屋外の新標準有効温度 (SET[*])、湿球黒球温度 (WBGT)、加熱効果量 (ΔCOT) 等)を実測と演算し比較する。</p> <p>光学測定と実大実験の以外、数値流体力学 (CFD) 解析手法を用いて、異なる反射指向特性の建物外皮素材が屋外温熱環境に与える影響も検討する。</p>	

1. 研究の目的	(注) 必要なページ数をご使用ください。
本研究の最終目的は、光学測定、屋外実測、及びシミュレーション解析を用いて、再帰反射型建物外皮素材が屋外温熱環境に与える影響を検討することである。	

2. 研究の経過	(注) 必要なページ数をご使用ください。
本研究課題を実施するため、主に三つの方法で研究を進んできた。三つの研究方法の具体的な実施時間と内容を以下のように示す。	
<ul style="list-style-type: none">• 1st 方法：再帰反射外皮素材の光学測定 (21 年 4 月～21 年 7 月)• 2nd 方法：実大壁面を用いて屋外空間温熱環境指標を評価 (21 年 8 月～22 年 3 月)• 3rd 方法：数値流体力学 (CFD) 解析手法による屋外温熱環境の予測 (21 年 12 月～22 年 3 月)	

3. 研究の成果	(注) 必要なページ数をご使用ください。
研究方法ごとに研究の成果をまとめて以下の通りに示す。	
<ul style="list-style-type: none">• 再帰反射外皮素材の光学測定 <p>再帰反射材の反射指向特性を測定するために研究室自作の発光・受光反射測定システム (図 1 参照) を用いて測定を行った。</p>	

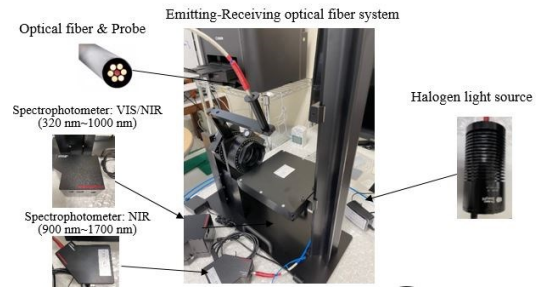
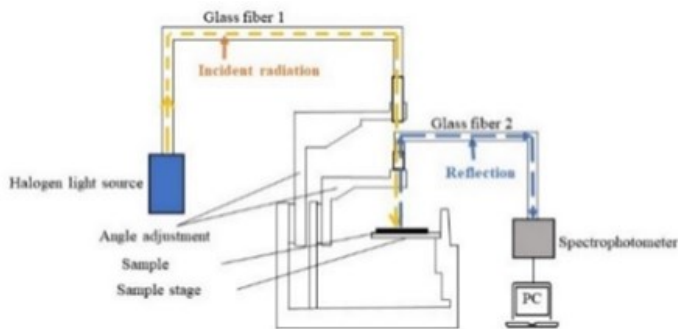


図1 発光・受光反射測定システム

自作の反射測定光学システムを用いて、プリズム (Prism) 型再帰反射材およびカプセル (Capsule) 型再帰反射材の2つのサンプルの入射角度ごと (5° - 80°) の再帰反射強度の分布を測定した結果をそれぞれ図2と図3に示す。ここで、入射角度が5°から80°まで5°のステップで変化させて、X軸は波長 (400 nm - 1700 nm) の変化で、Y軸は各波長の反射強度の生データの出力である。出力の最大値を60,000に設定した。

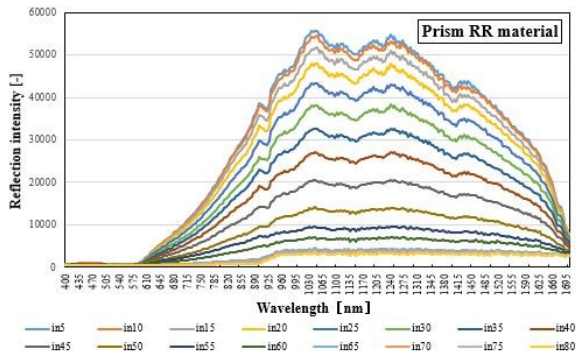


図2 入射角毎の再帰反射強度 (プリズム型)

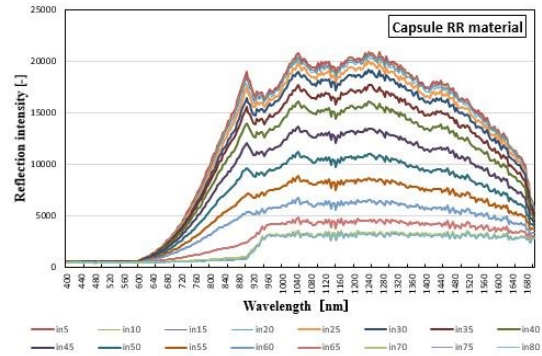


図3 入射角毎の再帰反射強度 (カプセル型)

再帰反射素材の種類に関わらず、反射強度は入射角度が低いほど反射強度が大きいことが分かった。

2種類の再帰反射材の角度ごとの再帰反射率を求めた結果を図4に示す。結果によると、入射角度が小さければ、プリズム型再帰反射材の再帰反射率はカプセル型再帰反射材の方より約2.4倍大きく、入射角度が大きくなると、プリズム型再帰反射材とカプセル型再帰反射材の再帰反射率差が小さくなることがわかった。とくに、入射角度が65°の時から大きく変化すると、プリズム型再帰反射材とカプセル型再帰反射材の再帰反射率とも非常に小さくなり、再帰反射率はわずか5%で、再帰反射特性が弱くなることがわかった。

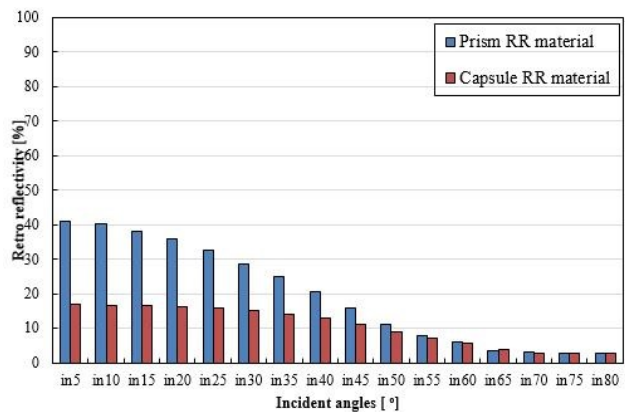


図4 入射角ごとの再帰反射率

分光実験による測定した結果から、プリズム型再帰反射材の再帰反射率は、カプセル型再帰反射材の方より高いことで、カプセル型再帰反射材と比べると、プリズム型再帰反射材を建築外皮に適用したとすれば、より都市ヒートアイランド現象を緩和する効果を得られると考えられる。

・実大壁面を用いて屋外空間温熱環境指標を評価

本研究では、図5に示すように、アイボリー系拡散型高反射 (DHR) 素材とプリズム型再帰反射 (RR) 素材を用いて、それぞれ実大壁面 (910mm×1800mm) を作成し実際の屋外環境に置いて周辺温熱環境の測定実験を行う。実験条件は、アスペクト比 0.5、1.0、1.5 の3条件を行い、その間の空気温度、相対湿度、黒球温度、日射量、表面温度、相当外気温 (SAT) を1分間隔、風速を0.1秒間隔で測定し、温熱環境指標として、①屋外平均放射温度 (MRT) を考慮した新標準有効温度 (SET*)、②湿球黒球温度 (WBGT)、③加熱効果量 (Δ COT) を算出し、2種類の壁面素材 (DHR と RR) 間で各温熱環境指標を比較した。

図6にアスペクト比 1.5 の条件における RR 素材と DHR 素材の1時間平均した SET*、図7に WBGT、図8に Δ COT を示す。

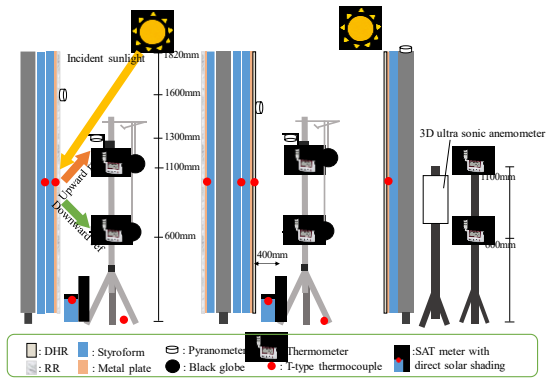


図5 実大壁面による周辺温熱環境測定

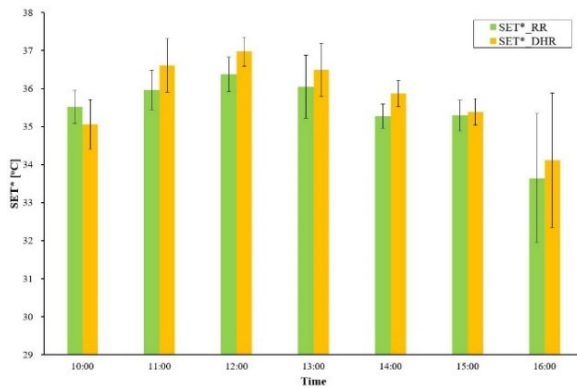


図6 異なる素材壁面間の SET* の比較

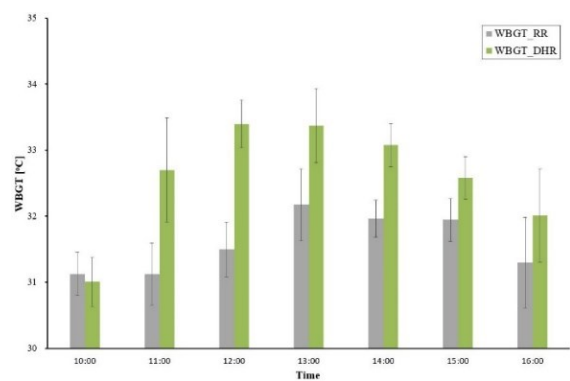


図7 異なる素材壁面間の WBGT の比較

SET*は全条件において、DHR 素材より RR 素材が低値を示し、特にアスペクト比 1.5 の条件では、全時間平均して RR 素材 (35.43 °C) が DHR 素材 (35.91 °C) よりも約 0.5 °C低い結果が確認された。WBGT は全条件において、DHR 素材より RR 素材が低値を示し、特にアスペクト比 1.5 の条件では、全時間平均して RR 素材 (31.67 °C) が DHR 素材 (32.86 °C) よりも約 1.2 °C低い結果が確認された。

また、 Δ COT のアスペクト比 1.5 の条件では、DHR 素材 (4.49 °C) より RR 素材 (4.05 °C) の方が全体として約 0.49 °C低い値を示した。

以上の結果より、RR 素材は DHR 素材に比べて、都市温熱環境 (SET*, WBGT, Δ COT) を軽減する傾向が見られ、建物の間隔が近い都市キャニオン間において、壁面の熱吸収・建物高温化の軽減に有効であることが示唆された。

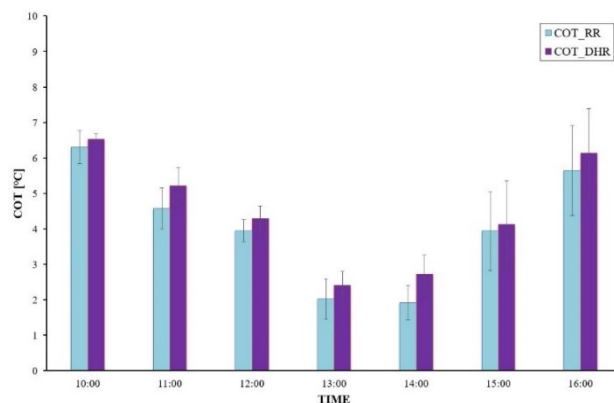


図8 異なる素材壁面間の Δ COT の比較

・CFD 解析手法による屋外温熱環境の予測

この研究方法は、数値流体力学（CFD）解析手法を用いて、建物外壁面に再帰反射素材と拡散高反射素材を適用した後、屋外の温熱環境指標（SET*、WBGT）、及び壁面の表面温度への影響を検討する。

愛知県名古屋市中区栄周辺（図 9）を対象とし、実際の建物の高さ、横幅を参考にして、モデル（平面図を図 10、立面図を図 11）を作成した。解析領域を図 12 に示す。気象条件として 7 月 31 日の名古屋市の晴天日を想定し、標準 $k-\epsilon$ 乱流モデルを用いた。建物壁面は全反射率 0.8 の拡散型高反射材（DHR）と、入射角度によって鏡面反射・再帰反射率が変化する全反射率が 0.7 の再帰反射材（RR）の 2 条件とした。

Z=1.7m の断面で、10 時、12 時、14 時における DHR 素材と RR 素材の WBGT、SET*、及び壁面表面温度の解析範囲内の平均値の結果をそれぞれ図 13-図 15 に示す。

図 13 に示すように、WBGT の平均値及び時間ごとの解析結果より、10 時は RR 素材（31.14 °C）と DHR 素材（31.20 °C）の差は 0.06 °C、12 時は RR 素材（31.50 °C）と DHR 素材（31.54 °C）の差は 0.04 °C、14 時は RR 素材（31.12 °C）と DHR 素材（31.19 °C）の差は 0.07 °C となり、DHR 素材と比べると、RR 素材の条件で WBGT は約 0.06 °C 低いことがわかった。

図 14 に示すように、SET* の平均値及び時間ごとの解析結果より、10 時は RR 素材（27.72 °C）と DHR 素材（27.92 °C）の差は 0.2 °C、12 時は RR 素材（28.34 °C）と DHR 素材（28.95 °C）の差は 0.6 °C、14 時は RR 素材（27.73 °C）と DHR 素材（27.84 °C）の差は 0.1 °C となり、DHR 素材と比べると、RR 素材の条件で SET* は時間平均で約 0.3 °C 低いことがわかった。

図 15 に示すように、表面温度の平均値及び時間ごとの解析結果より、10 時は RR 素材（58.10 °C）と DHR 素材（63.29 °C）の差は 5.2 °C、12 時は RR 素材（60.28 °C）と DHR 素材（64.68 °C）の差は 4.4 °C、14 時は RR 素材（58.15 °C）と DHR 素材（63.51 °C）の差は 5.4 °C となり、DHR 素材と比べると、RR 素材の条件で壁面表面温度は時間平均で約 5.0 °C 低いことがわかった



図 9 解析対象

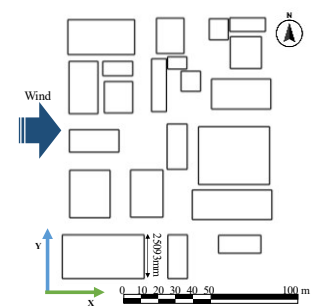


図 10 解析対象の平面

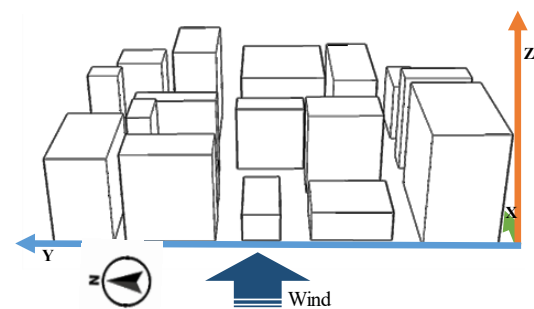


図 11 解析対象の立面図

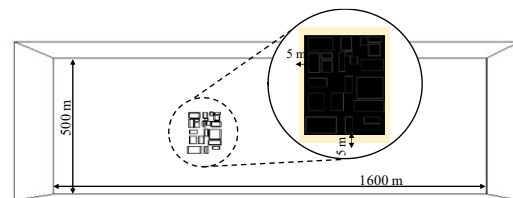


図 12 解析領域

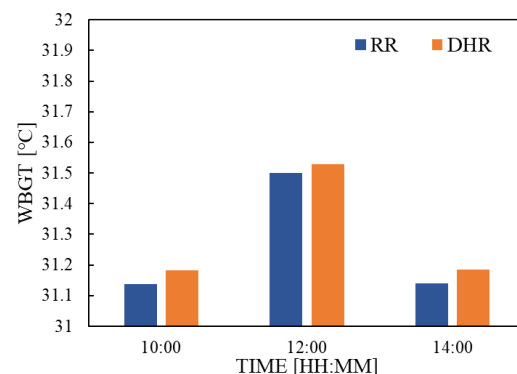


図 13 時刻ごとの WBGT 比較 (DHR と RR)

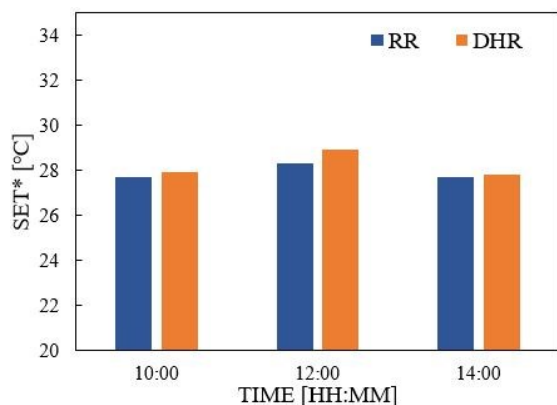


図 14 時刻ごとの SET*の比較 (DHR と RR)

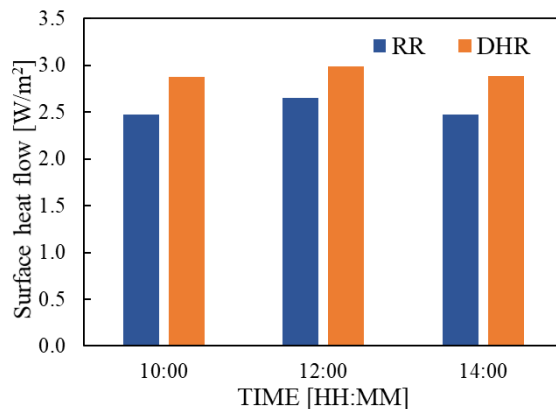


図 15 時刻ごと表面温度の比較 (DHR と RR)

CFD 解析手法による解析の結果より、実大壁面を用いて実測の結果とほぼ同じ傾向となり、RR 素材は DHR 素材に比べて、都市温熱環境指標 (SET*、WBGT) の改善、及び建物表面温度の軽減の傾向が見られ、酷暑な都市温熱環境への改善及び建築省エネに有効であると考えられる。

以上の3つの研究成果より、RR 素材のほうが都市温熱環境を改善していく上で、建築省エネルギー (熱負荷を削減) に繋がる建物外皮の表面温度を低減できることで、拡散型高反射 (DHR) 素材の代わり、将来に新しい建物外皮素材として応用できると期待する。

4. 今後の課題

(注) 必要なページ数をご使用ください。

本研究課題では、光学測定、実際の屋外実測、及び CFD 解析手法を用いて、RR 素材・DHR 素材の異なる反射指向特性を有する建物壁面が都市域屋外温熱環境に与える影響を検討した。全体の結果として、RR 素材は DHR 素材に比べて、表面温度・作用温度の上昇を抑えることが出来、省エネルギー・ヒートアイランド現象に有効であることが確認され、温熱環境を軽減する傾向が見られた。

屋外の測定においてアスペクト比の低い建物では、RR 素材の影響が少なかったことから、RR 素材は、都市で活用が最も効果的であることが分かった。また、日影では効果が大幅に少なく、日影で RR 特性の効果を受けない壁面において、向かいの壁面が RR 素材の場合、DHR 素材と比べて表面温度を抑制していたことから、すべての建物外皮に用いるのではなく、日影ができにくく、日射が多く当たるところに設置することが重要であり、最も効率的であることが考えられる。また、RR 素材はコストも高く、経年劣化を防ぐため、数年一回の頻度でメンテナンスが必要である。よって、今後の研究課題として、太陽高度・方位角と合わせて、RR 壁面をどの高さ・面積に設置すればより効果的なのか調査する必要があると考えられる。面積を小さく、設置する場所も簡易にできれば、素材コスト・メンテナンスコストが減り、より一般的に使用されるようになると思われる。