

再帰性反射機構を活用した夏季街路空間の暑熱環境の改善効果の評価に関する研究



奈良女子大学研究院 生活環境科学系 准教授 吉田伸治氏

2015年9月の国連サミットで全会一致で採択されたエスディージーズ（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）は、「誰一人取り残さない」持続可能で多様性と包摂性のある社会の実現のため、2030年を年限とする17の国際目標から構成されています。

このSDGsへの対応を考えるために、奈良女子大学の様々な研究領域の教員の方々から研究内容の紹介や提言を頂く寄稿シリーズを、今回から全10回にわたり連載します。

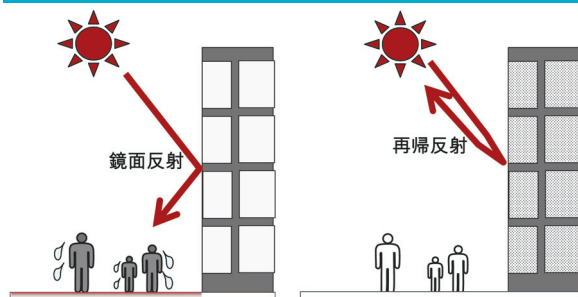
SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



1 はじめに

建物開口部の遮熱による冷暖房負荷の削減は、建物の省エネ、CO₂排出削減の最も基本的な対策です。Low-E ガラス、従来の遮熱フィルム貼付窓は、開口部の遮熱手法の一つとして主に事務所建物などに採用されています。しかし、これらの窓の設置は、図1に示す様に建物外表面における近赤外域放射の鏡面反射を増加し、屋外暑熱環境を悪化させる懸念があります。

図1：再帰性反射フィルム貼付窓の敷設による夏季屋外放射熱環境の改善効果のイメージ



例えば写真1は拙宅の東向き外表面を朝9時頃に撮影したものです。この写真で注目してほしいのは拙宅前の道路に映る怪しげな光の像です。住み始めた当時はあまり気に留めませんでした、これは拙宅2Fの東向き外表面に設けられた3層のLow-E ガラスを用いた窓からの反射光の再入

射を表すものと分かりました。この写真を見て以降、拙宅から最寄りの駅までの経路中の道路面を見ると、同様の光の像を

写真1：Low-E ガラスの鏡面反射



至る所で目にするのがわかりました。

拙宅の窓の大きさは写真の様に比較的小さなものです。それでも目視で確認できる鏡面反射光が生じる訳ですから、この様なガラスで外表面の多くを被覆する建物の立ち並ぶ都市中心部ですと、より多くの鏡面反射日射の影響が生じていると考えられます。

この対策として、入射する近赤外線鉛直上方に再帰反射するフィルム（以下、再帰性反射フィルム）を貼り付けた窓（以下、再帰反射窓）の熱負荷削減効果、屋外街路空間へ入射する近赤外線の抑制効果が注目されています。

そこで、本稿では、この再帰性反射技術の概要、

並びにその効果の評価手法を紹介するとともに、再帰反射窓の建物窓面への設置が、屋外空間の熱環境形成に与える影響の数値解析技術に基づく評価事例を紹介します。

2 再帰反射効果を組み込んだ建築材料

本章では、日射を再帰反射させる機構について簡単に説明します。本稿の読者の中には「再帰反射は本当に可能なのだろうか？」と考える方もいらっしゃると思います。

一般的な建築材料表面に光が入射する際に生じる反射には、正反射（鏡面反射）と乱反射（拡散反射）の二つの機構が存在します。前者は対象面への光の入射角と面法線に線対称な方向に反射するものであるのに対し、後者は光の入射方向にかかわらず様々な方向に反射するものです。

一方、再帰反射は入射した光が再び入射方向に戻る反射現象のことを表しており、これは光学上特殊な機構です。しかし、再帰反射は、測量、通信への利用を目的とした反射体、並びに道路標識の反射板など我々の身近な生活空間内に活用されています。

例えば、図2に示す様な夜間に高速道路などで

図2：再帰反射技術の応用事例（道路標識の場合）

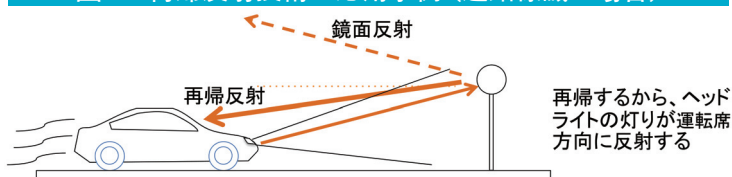
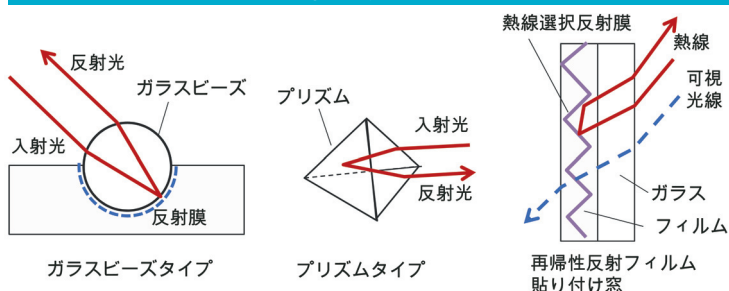


図3：再帰反射のメカニズム



車を運転する場合、安全のためにライトを点灯します。一般に標識は、見易さに配慮するため、普通車を運転するドライバーの視線よりやや上方に設置される場合が多いと予想されます。仮に標識に照射される光の全てが鏡面反射するならば、反射光が運転者側に到達しないと予想されます。したがって、道路標識等には再帰反射の技術が応用されていることが分かります。

それでは、具体的にどのような方法を講じれば再帰反射させることが可能であるかを具体的に考えてみます。再帰反射は、図3に示す様に材料内に侵入する光の屈折、材料内に設けられた金属層等での反射により実現することが可能です。

再帰性反射材は、内部構造により①ガラスビーズタイプ、②プリズムタイプの二種類に大別されます。前者は、反射膜の上に配置されたガラスビーズに入射する光がビーズ内に侵入する際の屈折、反射膜上での反射、ビーズから外部への再帰時の屈折を経て、周辺環境に光を再帰させるものです。これに対し後者は、材料内に多面体（主に三角錐の正四面体）状に挿入された反射膜上で複数回の反射を経ることにより、光を元の入射方向に再帰させます。

また、前章で紹介した再帰性反射フィルム貼り付け窓面は、フィルム内に山型に挿入された反射膜上で2度または1度反射させることにより光を上方に再帰させるものであり、プリズムタイプに近い機構に基づきます。なお、このフィルム内に挿入された反射膜は、日射に含まれる可視光線の大半を透過し、熱線だけを選択して反射させる特殊な反射膜（熱線選択反射膜）であるため、室内への採光と遮熱の両立を図る構造となっています。

3 再帰反射を考慮した屋外空間の温熱環境評価手法

前章までに示した種々の再帰性反射材料の設置は街区内の温熱環境の改善に有効であることは定性的に考えて明らかです。しかし、その効果の程度、すなわち定量的な効果を評価することは難しいと予想されます。具体的には、設置する窓の形状、方位等でその効果は大きく変わると予想されます。

私は、多様な形態の再帰反射材の設置が建物内外の温熱環境に与える総合的な効果を定量的に評価するための数値解析技術の開発に取り組んでいます。

図4は、私が取り組む屋外空間の温熱環境の評価手法全体のフローです。この手法は、数値流体力学

CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析技術に放射・熱伝導・人体体温調節に基づく温熱生理反応の分析技術を連成させたものです。この手法は、従来、空間の構成材料表面における日射の反射が一様となる完全拡散面を想定した場合の評価のために開発されてきましたが、今回の再帰反射の様な特定の方向への反射が強まる指向性反射特性をもつ放射熱交換要素の影響を考慮可能なものに改良されました。解析手法の詳細は参考文献^{*)}を参照されたく存じます。

この手法を用いることにより、図3に示した再帰反射窓の日射反射特性を再現した結果が図5です。図5は、入射方位角 60°、仰角 50°の日射、

図4：CFD 解析に基づく屋外温熱環境評価手法の流れ

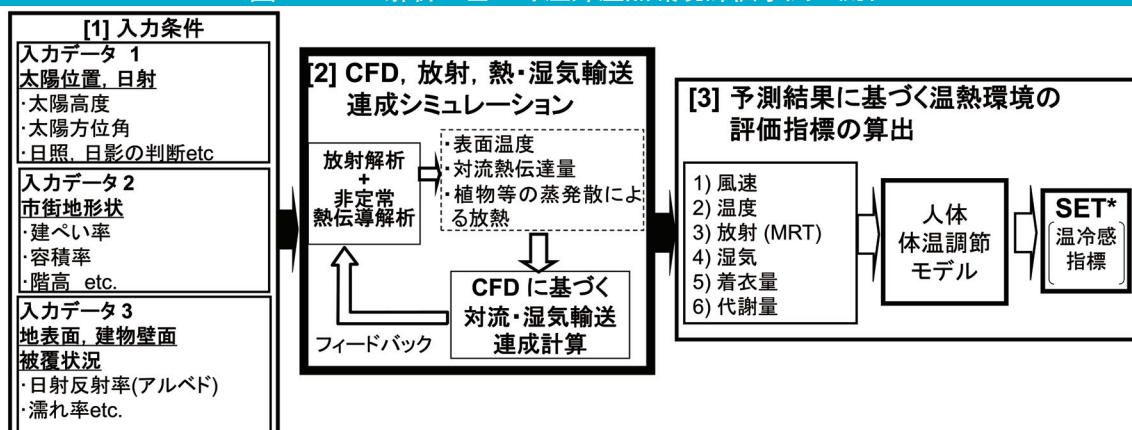
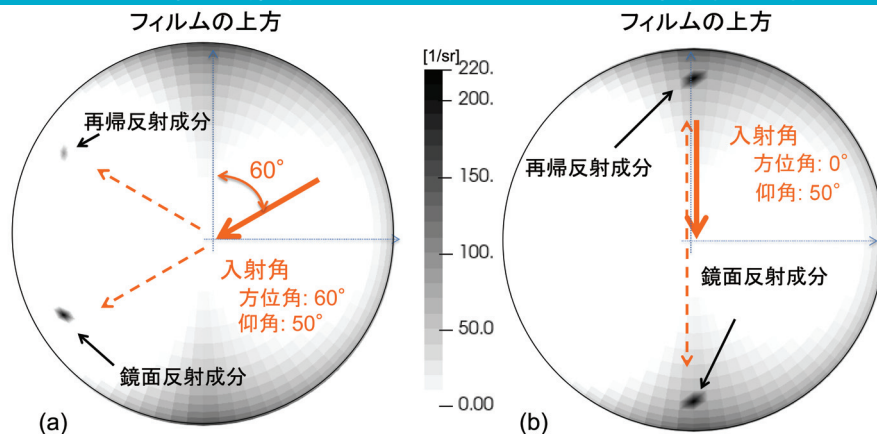


図5：単位立体角当たりの反射率の反射方位・仰角毎の分布



(注) (a) が入射方位角 60°・仰角 50° の場合を、(b) が入射方位角 0°・仰角 50° の場合を表す。

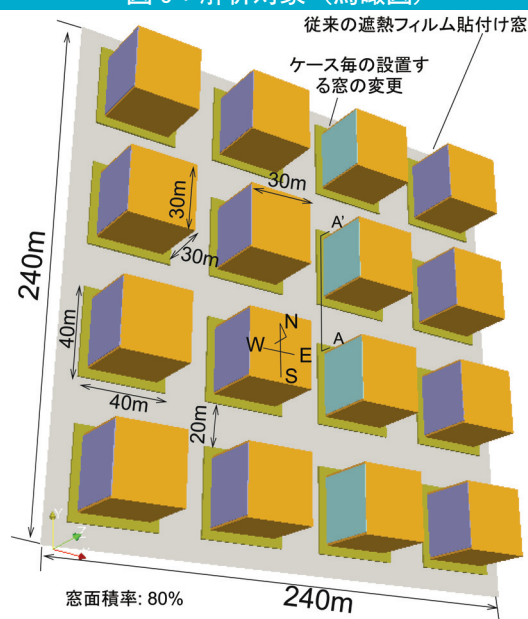
並びに入射方位角 0° 、仰角 50° の日射に対する単位立体角あたりの指向反射率の分布を表しています。図中の矢印は、日射が図の中心へ矢印方向に沿って入射することを表しており、値の分布は、反射点（図中心）からの単位立体角あたりの指向反射率の方向と強度をこの点を中心とする半球の底面上に投影したものです。鏡面反射と再帰反射の二つの反射によるピークが生じる事が分かります。

なお、このフィルムの内部構造上、再帰反射成分はフィルム鉛直軸に対称な方向へと反射する成分を指すため、入射方向と再帰反射方向が完全に重なる場合は入射方位角が 0° の場合に限られます。

4 再帰性反射フィルム貼付け窓の設置効果の評価

3章に示した評価技術を用いて再帰反射窓の設置効果を分析した事例を紹介します^{文2)}。図6に示す1辺30mの立方体の形状を有する建物モデルが東西(x)、南北(y)方向共に4棟均等に配置された街区モデルを対象に行いました。各建物の西向き外表面のみに窓（面積率80%）が設け

図6：解析対象（鳥瞰図）



られており、解析領域中央の南北街路東側の窓面の種類を変更した解析ケースを設定し、ケース毎の解析結果を比較しました。

解析ケースとしては以下の4ケースを設定しました。Case1は、厚さ3mmのフロートガラス（普通ガラス）を設置した場合、Case2は反射日射の大半を鏡面反射する従来の遮熱フィルム（Heat Shading Film (HSF)）貼付窓の設置を想定したケースです。加えて、Case3は、Low-E複層ガラス（ペアマルチEA）を想定したケース、最後にCase4は開口部に再帰性反射フィルム（Retro Reflective Film (RRF)）貼付窓を設置し、反射日射の一部を天空に再帰することを期待したケースです。

結果の一例として、まず図7に各ケースにおける窓面に入射する日射の収支をまとめたものを紹介します。この結果は2011年8月8日14時の東京における気象条件を想定した解析結果であり、平均的な晴天日の条件を想定しています。図内に示す表に各ケースの結果を、加えて結果を代表してLow-Eガラスを用いたCase3と再帰反射窓を用いたCase4については、日射収支のイメージを図化したものを併せて示します。

普通ガラスを用いたCase1では、入射日射（403kW）の約8割が室内へ透過、並びに窓で吸収され、残りの2割が屋外空間に反射され、その全てが地表に再入射します。一方、普通窓以外のケースにおける窓から室内に透過・吸収される成分の値は、窓面入射日射の約7割となり、普通ガラスよりも建物内の日射熱負荷が少なくなります。普通ガラスより約1割増加する窓面での反射日射については、遮熱フィルム貼付窓を用いるCase2、Low-Eガラス窓のCase3ではその全てが地表に再入射するのに対し、再帰性反射フィルム貼付窓

を用いる Case4 ではその半分を天空に再帰するため、ストリートキャニオンを構成する外表面への再入射量は普通ガラス使用時よりもやや低減されます。

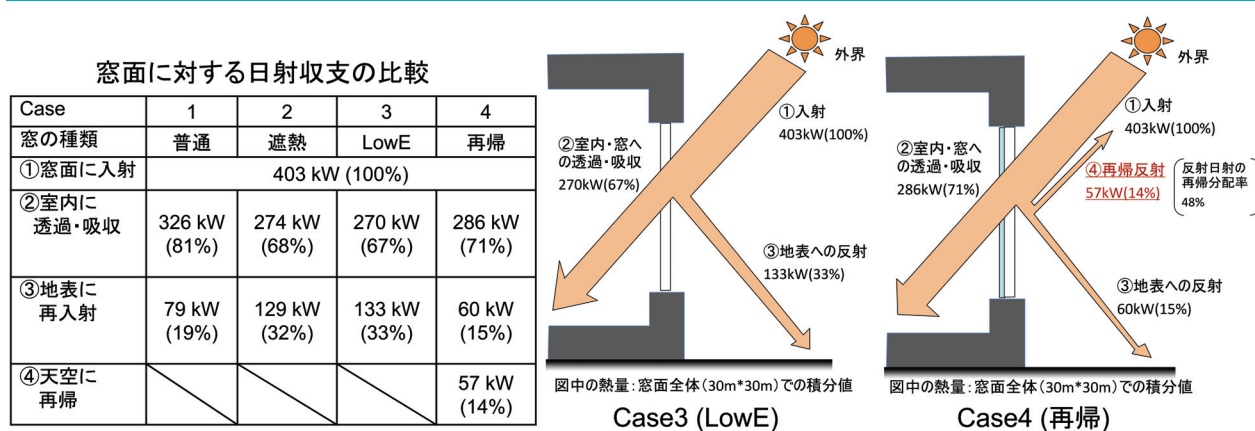
以上の様に、再帰性反射フィルム貼付け窓の設置は、室内への日射透過による貫流熱負荷の削減と地表への反射日射の削減による歩行空間への鏡面反射日射の削減の双方の効果があることが分かります。

図8は、変更を施した窓を含む建物外表面近傍(A-A'断面、図6)の平均放射温度MRT (Mean Radiant Temperature)、新標準有効温度SET* (New Standard Effective Temperature) の分

布を示します。MRTは空間の放射熱環境の、SET*は気温・放射・湿気・気流等の環境条件の影響を全て考慮した総合的な温熱快適性、すなわち体感温度に相当する評価尺度の結果です。

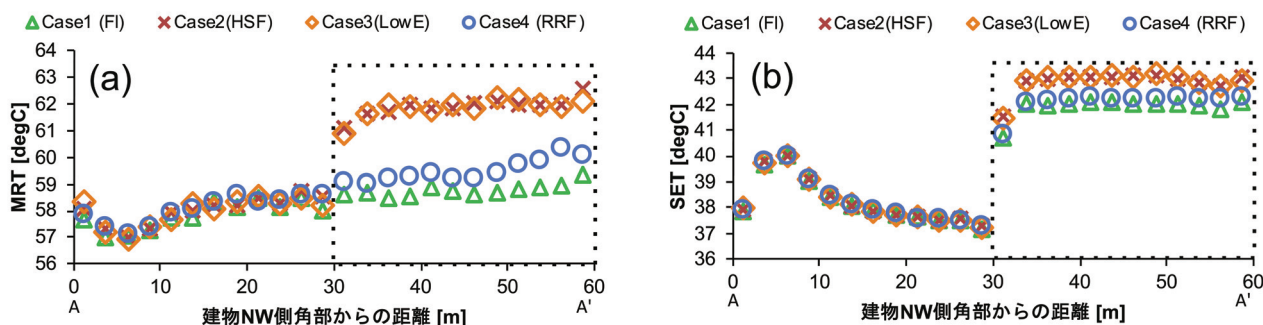
窓近傍に相当するA-A'上の30~60mの範囲の結果に着目すると、再帰反射フィルム貼付け窓を設置したCase4は、MRTの値が最高60℃程度、SET*の値が約40.8~42.2℃程度の値を示し、例えば冒頭に紹介した日射の鏡面反射の影響が懸念されるLow-Eガラスを設置したCase3に比べてMRTで約3℃程度、SET*で約0.8℃程度の温度低下が見られ、歩行空間の温熱環境の改善が期待できることが明らかとなりました。

図7：窓面に入射する日射の熱収支の模式図



(注) 2011/8/8 14時、東京の値。

図8：変更を施した窓・建物外表面近傍の温熱快適性に関わる諸量の分布



(注) 2011/8/8 14時、高さ1m、(a) 平均放射温度MRTの分布、(b) 新標準有効温度SET*の分布。

5 まとめ

以上の様に建物外表面の建築材料として再帰性を有する材料を採用することは、建物の冷房負荷の削減、歩行空間の夏季暑熱環境の改善の双方に寄与する有用な手法と分かりました。最後に、提案する技術の活用の展望を述べたいと思います。

私は、この再帰という熱環境改善技術は、奈良の様な内陸都市の夏の歩行空間の温熱環境の改善の最も実効的な手段となると期待しています。夏の歩行空間の温熱環境を改善するため方法としては、例えば、①風通しの確保による放熱促進、②街路樹等のみどりの配置によるクールスポットの形成、③街路構成面の日射の高反射化が考えられます。

奈良市を例にこれらの方法の実装を考える場合、①の風通しは、奈良は京阪神地域のヒートアイランドの中心に当たる大阪における夏季日中の海風の風下に位置すること、海岸からの距離も長く海風の風速も相対的に弱いこと、から有効な手段とは言い難く思います。②のみどりの配置は、そもそも奈良は奈良公園、平城宮跡、寺社の境内、古墳の風景などを見ると比較的現在でも相応な規模・数の緑地がありますので、改善の余地はあるものの、大阪等の都市圏に比べてその効果は小さいと予想されます。これらに対し、③の街路を構成する建物外表面、地表面の高反射化は、奈良の様な風通しの悪い内陸都市でも熱環境の緩和に十分貢献することが期待できます。また、熱収支の観点でも、街を暑くする余分な熱を宇宙空間に跳ね返すため、系内の熱エネルギーの総量を削減する最も直接的な方法です。

従って、地域の景観に配慮した配色、設置場所（部位）に配慮しつつ日射反射を適切に制御でき

れば、奈良の夏季の暑熱環境緩和に貢献できると期待されます。現在取り組む窓面以外にも多様な外表面被覆材料・手法を考えて奈良の景観を保ちつつ、住み良さを改善したく思う次第です。

【参考文献】

- [1] Shinji YOSHIDA, Akashi MOCHIDA (2018). Evaluation of effects of windows installed with near-infrared rays retro-reflective film on thermal environment in outdoor spaces using CFD analysis is coupled with radiant computation, Building Simulation, 11 (5), 1053-1066.
- [2] 吉田伸治, 持田灯 (2017). 再帰性反射フィルム貼付窓の設置が夏季屋外暑熱環境に与える影響評価の数値解析, 第 41 回 人間—生活環境系シンポジウム報告集, 167-170.

【プロフィール】

奈良女子大学研究院

生活環境科学系

住環境学領域

准教授 ^{よしだ} 吉田 ^{しんじ} 伸治 氏



1996 年新潟大学卒業。2001 年東京大学大学院博士課程修了。博士（工学、東京大学）。福井大学工学部講師（2001 年－2004 年）、同工学研究科助教授（2005 年－2007 年）、准教授（2007 年－2016 年）を経て 2016 年より現職。

専門は都市・建築環境工学（熱・空気環境分野）。主な受賞に空気調和・衛生学会賞（2017 年）、日本建築学会奨励賞（2004 年）など。