低炭素型熱環境の創出

Creation of low carbon thermal environment

奈良女子大学研究院生活環境科学系 Faculty of Human Life and Environment, Nara Women's University 吉田 伸治 Shinji Yoshida

キーワード:再帰反射 (Retro-reflection)、屋外空間 (Outdoor Space)、日射 (Solar Radiation)、 温熱環境 (Thermal Environment)、数値解析 (Numerical Analysis)

1.背景と目的

建物開口部の遮熱による冷暖房負荷の削減は、省エネ、CO₂ 排出削減による低炭素型熱環境を形成する ための最も基本的な対策である。Low-e ガラス、遮熱フィルム貼付け窓は、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る。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、屋外温熱環境を悪化させる可能性が懸念される。この対策として、

入射する近赤外線を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)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る。

本稿では、再帰反射技術の概要、並びに数 値解析技術に基づくその効果の評価手法を 紹介するとともに、上述の再帰性反射フィル ム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分析結果を報告し、低炭 素型熱環境の創出に寄与する知見を提供す ることを目的とする。



2. 再帰反射効果を組み込んだ建築材料

2.1 再帰反射とは?

一般的な建物表面の構成材料表面への光の入射時に生じる反射には、正反射(鏡面反射)と乱反射(拡 散反射)の二つの機構が存在する。このうち、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 射するものであり、鏡等の金属研磨面で生じる。一方、後者は光の入射方向の影響をあまり受けず様々な 方向に反射するものであり、紙をはじめとする多くの材料面で生ずる。これらに対し、再帰反射とは入射 した光が再び入射方向に帰る反射現象のことである。これは光学上特殊な反射機構であるが、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る。 したがって、この再帰反射に関する研究は、情報通信、照明分野を中心に進められている^{文1,2)}。熱環境制

御に関する研究については、国内、国外共 に近年いくつかの研究例がある。西岡ら^x ³⁾は建物屋根面、壁面に設置して利用する 再帰反射体の直達日射に対する反射性能 を把握するための決定原理を整理すると 共に、実用的算定方法を示している。Rossi らは、実験並びに解析により、幾つかの商 用の再帰反射材の光学特性を分析する^{x 4)} のに加え、日射入射仰角と方向別反射率の



関係を分析している^{*5}。本稿で主に取り上げる再帰性反射フィルム貼り付け窓については、藤田、井上ら ^{*6}は、実測により、このフィルムの室内の熱負荷削減効果、屋外街路空間へ入射する近赤外線の抑制効果 を分析しており、筆者ら^{*7)}も特にこの屋外街路空間への影響を検証するためのデータ取得を目的に、遮熱 化した開口部前方で3次元放射収支を実測した内容を報告している。しかしながら研究例は未だ僅かであ り、その設置効果に関する十分な知見は得られていない。

2.2 再帰反射のメカニズム

再帰反射は、図2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 現れる。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 る。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ある。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るものである。4章で取り上げる再帰性反射フィルム貼り付け窓面^{*} ⁸⁾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を有する。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る。

3. 再帰反射を考慮した温熱環境評価手法

前章に示した種々の再帰性反射材料の設置による街区全体での温熱環境緩和効果を定量的に明らかとす るためには、この設置効果のサブモデルを組み込んだ屋外温熱環境解析を行う必要がある。本章では従来 の手法の課題を示すと共に、これを改良した新たな手法を紹介する。

3.1 温熱環境評価手法の流れ

図3は、数値流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics)解析に基づく屋外温熱環境の数値解析手法 の流れを纏めたものである。図中左の入力データ(気象データ,地形データ,表面被覆状況)を境界条件 とした対流・放射連成 CFD 解析が行われ,風速,気温,放射,湿気の空間分布が算出される。これらに着 衣量,代謝量を加えたデータを入力条件とした人体体温調節モデルに基づく解析により空間の温熱快適性 を評価する。次節では、これらの解析の中で、再帰反射の効果のモデル化に直接関わる放射解析手法の改 良について詳述する。これ以外の解析手法の詳細については、文献 9,10,11 を参照されたい。



図 3 CFD 解析に基づく屋外温熱環境評価手法の流れ

3.2 指向反射を考慮した放射伝熱解析手法の概要

3.2.1 解析領域の設定

図4に屋外空間の放射解析領域の模式図を示す。領域内は、建物並びに地表の表面温度,熱的特性値を 一様と見なせる微小要素毎に分割される。

3.2.2 微小面要素上での放射の入反射仰角・方位角の定義

図5に放射解析領域を構成する微小面要素 i 上での放射の入反射仰角・方位角を定義するための局所座



図 4 日射の指向性反射を考慮した屋外放射熱移動解析の計算領域のイメージ

標系のイメージを示す。仰角 θ は面要素 iの法線と入射・反射放射束の為す角であり、 θ =0°は iの法線方向、 θ=90°は i の接線方向に対応する。方位角φは局所座標系内の X 軸と入反射放射束の為す角であり、数学で 一般的に用いられる座標系では、反時計回りを正とする。建築環境工学分野で一般的に用いられる方位角 Azは図5に示す様に時計回りで定義されるため注意されたい。

3.2.3 従来の放射伝熱解析の基礎方程式

指向性を考えない場合、すなわち領域内の面要素を完全拡散面と仮定する場合の日射吸収量 S_i [W]は次 式により計算される。

 $\langle \mathbf{n} \rangle$

$$S_i = (\alpha_{i\theta} E_{Di} + \alpha_i E_{Si}) + \alpha_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ji} R_{Sj} \right)$$
(1)

$$R_{Si} = (\rho_{i\theta}E_{Di} + \rho_i E_{Si}) + \rho_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ji}R_{Sj}\right)$$
(2)
$$S_{Ti} = (\tau_{i\theta}E_{Di} + \tau_i E_{Ci}) + \tau_i \left(\sum_{j=1}^N F_{ij}R_{Sj}\right)$$
(3)

$$E_{Di} = A_i \gamma_i I_N \cos \theta_i \tag{4}$$

$$E_{Si} = A_i F_{iS} I_{SH}$$
(5)

ここで、 A_i は面要素 iの面積 $[m^2]$ 、 E_{Di} 、 E_{Si} は各々 iにおける直達、並びに天空日射量 [W]を表す。 F_{ii} は *i* から他の要素 *j* を臨む形態係数、 F_{iS} は *i* から天空を臨む形態係数(天空率)であり、こ れらは大森ら^{文 12)}に代表されるモンテカルロ法



東方向を表す仰角、方位角の定義

に基づく手法により計算される。 I_N は法線面直達日射量 $[W/m^2]$ 、 I_{SH} は水平面天空日射量 $[W/m^2]$ 、 R_{Si} は i における日射(短波長放射)に対する射度(相互反射の影響を含む正味の放射量)[W]、Sriはiにおける透 過日射量[W], γ は*i*に直達日射が照射される割合(受照率)、 θ_i は*i*に対する日射入射仰角である。また、 α_i 、 ρ_i、τ_iは面要素 i の日射吸収率、反射率、透過率を表し、面要素に対する窓面積の占める割合を考慮して設 定されたものである。

この手法では、解析領域内の各面要素が完全拡散面(Lambert 面)であると仮定している。従って、面要 素 i から面要素 j への単位立体角あたりの日射に対する射度 R_{Si0} [W/sr]は、次式に示す様に射出方向によ らず一様となる。

 $R_{Si(i)} = R_{Si}/\pi$

(6)

(6)式に示す様に、従来の手法の多くは、再帰性反射フィルム貼り付け窓周りの様な指向反射の影響が強い 放射場を評価することは不可能であることがわかる。

3.2.4 指向反射を考慮した放射伝熱解析の基礎方程式

本研究では、吉田ら^{文9}が提案する従来の漸進的ラジオシティ法に基づく屋外空間内の放射伝熱解析手法 を、一ノ瀬ら^{文13)}の指向反射特性を考慮した解析手法を組み込んだ新たな手法を用いて、指向反射の影響 を解析する。この手法で再定義された放射に関する諸量は次式により計算される。

$$S_i = \alpha_{i\theta} E_{Di} + \alpha_i \sum_{k=1}^{N_{sky}} \kappa_{ki} A_i F_{ik} I_{SH} + \alpha_i \sum_{k=1}^{N} F_{ki} \cdot \pi \cdot R_{Sk(i)}$$
(7)

 $R_{Si(j)} = \rho_{(\theta_S, \varphi_S; i, j)} E_{Di} + \sum_{k=1}^{N_{Sky}} \kappa_{ki} \rho_{Si(j)} A_i F_{ik} I_{SH} + \sum_{k=1}^{N} \kappa_{ki} F_{ki} \cdot \rho_{ki(j)} \cdot \pi \cdot R_{Sk(i)}$ (8)

κ_{ki}	$= \rho_{hemi(k)}$	$\sum_{i=1}^{N}$	F_{ii}	$\cdot \pi \cdot$	$\rho_{ki(i)}$
πι	i $iic iii (\Lambda)$	<i>'' = I</i> - 1	<i>u</i>		· ~ ~ / / /

 $S_{Ti} = \tau_{i\theta} E_{Di} + \tau_i \sum_{k=1}^{N_{sky}} \kappa_{ki} A_i F_{ik} I_{SH} + \tau_i \sum_{k=1}^{N} F_{ki} \cdot \pi \cdot R_{Sk(i)}$

ここで、 N_{sky} は解析領域内の天空面に該当する面要素数、 θ_s 、 φ_s は 各々面要素に対する日射入射仰角、方 位角を表す。 $\rho_{ki(j)}$ は面要素 k を発し i に到達する放射エネルギーのうち、面要素 j の方向に反射する割合(単 位立体角あたりの反射率) [1/sr]、 κ_{ki} は k から i へ反射する放射エネルギーの分布関数の修正係数、 $\rho_{hemi(k, i)}$ は面要素 k を発し面要素 i に到達する放射エネルギーがさらに解析領域全体(反射点を中心とする半球全 体) へ反射する割合の計測値である。また、(8)式の右辺第一項、同第二項は、各々i からj への直達、並び に天空日射の一次反射成分を表す。

3.2.5 指向反射率の設定

前項に示す手法を用いる場合、指向反射は $\rho_{i,j(k)}$ により決定づけられる。一ノ瀬ら^{×13}は、牧野ら^{×14}が提 案する AND (Anisotropic body of rotation of Normal Distribution function) モデルに基づく解析値により $\rho_{i,j(k)}$ を設定しており、本研究ではこの手法を再帰性反射フィルムの反射特性のモデル化にも適用する。AND モ デルは、反射エネルギーを指向反射成分と均等拡散反射成分に分離し、このうち、指向反射成分の反射方 向(反射方位角、仰角)に対する分布が、その値が最大となる方向成分を中心に正規分布関数を回転させ ることにより得られる非等法的な曲面分布を有すると仮定した指向反射率の計算モデルであり、次式によ り定義される。

 $\rho_{(\theta_i;\theta_o;\varphi_o)} = \rho_{Df_{(\theta_i)}} + \rho_{Sp(\theta_i;\theta_o;\varphi_o)}$

(11)

ここで、 $\rho_{Df}(\theta_i)$ は入射仰角 θ_i における単位立体角反射率の拡散反射成分[1/sr]を表す。また、 $\rho_{Sp}(\theta_i; \theta_o; \varphi_o)$ は、入射仰角 θ_i 、反射仰角 θ_o 、反射方位角 φ_o における単位立体角反射率の指向反射成分[1/sr]を表し、(12)式~(17)式を用いて計算される。

$\rho_{Sp(\theta_i;\theta_o;\varphi_o)}\cos\theta_o = A \cdot exp(-f^2/2\sigma^2)\cos\left\{(\pi/2)(f/g)^2\right\}$	(12)
$f = \sqrt{(p^2 + q^2)}$	(13)
$g = (kp + \sqrt{f^2 - k^2 q^2})/f$	(14)
$p = \sin \theta_o \cos(\varphi_o - \varphi_{o(max)}) - k$	(15)
$q = \sin \theta_o \sin (\varphi_o - \varphi_{o(max)})$	(16)
$k = \sin \theta_{o(\max)}$	(17)

 $(\theta_o = \theta_{o(\max)}$ かつ $\varphi_o = \varphi_{o(\max)}$ の場合、 $f = 0; g = (実数) \neq 0)$

ここで、 $\theta_{o(\max)}, \varphi_{o(\max)}$ は $\rho_{Sp}\cos\theta_{o}$ が最大となる反射仰角、方位角を表す。また、 σ は $\rho_{Sp}\cos\theta_{o}$ のピーク幅の代表値である。変数 A、 $\rho_{Df}, \sigma, \theta_{o(\max)}, \varphi_{o(\max)}$ は試料表面の特性に応じて設定される。

3.2.6 AND モデルの再帰性反射フィルム特性の再現のための拡張

本研究で取り扱う再帰性反射フィルム貼り付け窓面の反射率には、藤田ら^{文の}が示す様に、ある入射方向か らの日射に対して、多くの場合、鏡面反射成分、再帰反射成分の各々が起因する二つのピークが生じる。鏡



(9) (10)

面成分は、①窓外表面、②フィルムの室内側表面において、また再帰成分は再帰性反射フィルム内の反射膜 内での日射の反射により生ずる。本研究では、鏡面、再帰の各々に対する AND モデル関数を定義し、これ と指向性を持たない拡散反射成分も含めた関数の重ね合わせにより再帰性反射フィルムの特性をモデル化し

た。図6は、そのモデル関数により得られた、入射方 位角60°、仰角50°の日射、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 の分布を示す。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 に投影したものである。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わかる。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°の場合に限られる。

4. 再帰性反射フィルム貼り付け窓面の設置による低炭素温熱環境空間の創出可能性の検討

4.1 はじめに

前章では、再帰反射に代表される指向反射特性を 考慮した屋外空間の放射・温熱環境評価手法の概要 を説明した。本章では、この手法の適用事例として 2次元ストリートキャニオンを構成する外表面への 再帰性反射フィルム貼り付け窓面の設置による放 射・温熱環境の緩和効果の評価例を紹介する。

4.2 解析概要

4.2.1 解析対象

図7に解析対象を示す。対象内の基本街区は南北 街路方向への奥行の長い直方体の建物群により構成 される。これは、長手方向(南北方向)における環 境要素諸量の分布が一様な結果を得るためである。 日射の指向反射特性の強い窓面は、建物東棟(East Building)の西側外表面に設置されると想定する。本 解析では、この窓面の日射の入反射特性が屋外放 射・温熱環境に与える影響を評価する。

4.2.2 解析ケース

2 つの解析ケースを設定した。Casel は従来の遮熱 フィルム貼付け窓(HSF)の設置を想定したケースで ある。これに対し Case2 は開口部に再帰性反射フィル ム貼付け窓(RRF)を採用するケースである。各ケー スで用いる窓への日射入射仰角と吸収・反射・透過率 の関係を図8に示す。Case2の反射・吸収率の値と入 射仰角の関係にややばらつきが見られるが、これは再 帰性反射フィルムの鏡面・再帰反射率が日射入射仰角、 方位角の双方に作用されるためである。



4.2.3 気象条件

本稿では、記録的猛暑となった 2010 年夏季における晴天日 (7/23)の東京の気象条件を対象に解析を行った。東京の気象庁で観測された気象データを用い、対象日前日 (7/22) 6 時〜対象日翌日 (7/24) 0 時までの計 42 時間に渡る気象条件を対象に解析が行われた。

4.2.4 解析手順

図7の領域を対象に対流・放射連成解析^{文9,10,11)}を行った。先ず非定常放射・熱伝導解析により地表面、 建物外表面温度分布を算出した。その後、図7内の破線に囲まれた領域を対象に非等温 CFD 解析を行い、 流れ場、温度場の空間分布を算出した。CFD 解析では、側方境界で周期境界条件を課す事により、南北に 細長い街路が無限に続く街区を想定した結果が得られる様に工夫した。地表面、建物外表面における速度 の境界条件には一般化対数則を、熱の境界条件には対流熱伝達率(11.6W/(m²K)一様)に基づく壁関数を用 いた。なお、本解析領域内には芝地等の湿気を発生する被覆要素が無いため、空間内の絶対湿度は一様(約 17.3g/kg')となる。その他、解析手法の詳細は文献9,10,11を参照されたい。

4.3 解析結果

4.3.1 西向き再帰性反射フィルム貼り付け窓の日射反射性能

図 9 に、解析対象日(7/23)における再帰性反射フィルム貼り付窓が西を臨む場合の日射の再帰・鏡面 反射率の時間変化を示す。太陽が南に位置する 12 時以降から日没する 18 時頃に渡る時間帯において反射 率の値が得られる。この時間帯における太陽位置の推移に従い窓面への日射入射角は大きく減少し、これ に伴い鏡面反射率も大きく減少する。一方、再帰反射率は 14 時頃に約 0.2 程度の最高値に達する。これは 同時刻の鏡面反射率の約 2 倍に相当し、この時刻の再帰反射の効果は特に大きいと期待される。

4.3.2 解析結果の二次元性の確認

図 10 に 7 月 23 日 14 時の地表面における日射吸収量の分布を示す。建物の北端、南端(図中の上端、下端)付近を除く多くの領域で、南北方向に一様な分布を示す。従って、街路中央を東西に切断する A-A'断

面(図7)における東西-鉛直の2次元に渡る環境要素の分布が、街路全般に渡り一様に形成されるもの と考えられ、結果の代表性が高いと判断される。そ のため、次項以降ではこのA-A'断面における結果を 用いて、街路内の放射熱環境を分析する。

4.3.3 窓の設置が街区内の日射環境に与える影響(1) 窓面からの反射日射量

図 11 に 7 月 23 日 14 時、16 時における窓面を配 した建物西向外表面における反射日射量の鉛直方向 の分布を示す。これらの時刻における太陽高度、太 陽方位角、窓面への日射入射仰角は、14 時に各々 57.1°、71.1°、59.1°、16 時に各々33.3°、92.4°、36.0° であった。14 時においては、Case1、Case2 共に約 120W/m²~140W/m²の値を示し、高さ方向に相対的 に一様な分布を示す。一方、16 時では、両ケース共 に高さ 10m 以下の値が大きく減少する傾向が見られ る。これは、16 時頃の太陽高度が約 33°と低く、10m 以下の領域は対向建物の影に入るためである。10m より上方においては、Case1 で約 160 W/m²、Case2 で約 120 W/m²の値を示し、Case1 の方が約 40 W/m² 程度値が大きい。これは再帰性反射フィルム貼り付 け窓の日射吸収率が大きいためと考えられる(図 9)。



図 9 西向き再帰性フィルム付窓面における再 帰・鏡面反射率の時間変化 (2010/07/23)



(2) 地表面、対向壁面への再入射日射量

本項では、窓面からの反射日射が街路を構成する他 の外表面に再入射する成分に着目する。図 12 に地表面 への再入射量分布を、また図 13 に窓面に対向する建物 の東向外表面におけるそれを示す。ここで、図 12 の横 軸は対向建物の東向外表面からの距離に対応しており、 窓面は 30m の地点に存在する。

まず 14 時の結果に着目する。この時刻では窓面に近 い地表面(14m~30m)における値が大きく、反射日射 の大半はこの辺りに入射する事が分かる。この範囲の 長さ(約 16m)は、建物高さ 30m、同時刻における日 射入射仰角(59.1°)より推定される反射日射の窓面か らの到達距離(約 15.5m)と対応する。また、再入射 量の値については、Case1 で約 190 W/m²、Case2 で約 80 W/m²の値を示し、Case2 の値は Case1 の約 4 割程度 に減少する。

次に 16 時の結果に着目する。地表面では対向壁から 14m の範囲の、対向壁面上では高さ 10m より下方の範 囲の値が大きく、14 時とは全く異なる傾向を示す。こ れは、同時刻の太陽高度が低く入射・反射仰角も小さ いため、反射日射の大半は対向壁面、並びにその近傍 の地表面に再入射するためである。また、再入射量の 値については、Case1 では、対向壁面で最高約 165 W/m²、 地表面で最高約 63 W/m²、また Case2 では、対向壁面 で最高約 60 W/m²、地表面で最高約 35W/m²の値を示し、 Case1 の対向壁面下方の値が特に大きな結果となった。

(3) 鏡面・再帰反射率の比較

図 14 に図 11~図 13 の結果を面毎に積分することに より、反射と再入射の関係を整理したものを示す。図中 の放射量は、各面の幅を 1m (即ち、窓面積を 30m²) と 仮定した場合の計算値である。窓面での反射日射量は、 14 時では両ケース共に約 4kW、16 時では、Case1 で約 2.8kW、Case2 で約 2.0kW の値を示す。次に、反射後の 地表面、対向壁への再入射量は、14 時おいて、Case1 で は各々約 3.5kW、0.5kW、Case2 では各々約 1.7kW、0.8kW の値を示す。同様に 16 時おいては、Case1 では両面共 に約 1.3kW、Case2 では各々約 0.5kW、0.6kW の値を示 す。従って、本解析では、①Case1 では窓面での反射日 射の大半がストリートキャニオンを構成する表面に再 入射する、②Case2 では 14 時で約 64%、16 時で約 57% が再入射(即ち 14 時には約 36%、16 時には約 43%の入 射日射が天空に再帰) する、結果が得られた。

(4) 窓面からの反射日射がキャニオン内の日照環 境に与える影響

(2)に示した様に指向反射特性の強い窓面の設置は



対向壁面への反射日射の映り込みに代表されるような 日照環境の大きな変化をもたらす事が危惧される。図 15 に建物間の地表面上の全日射入射量(太陽、天空か ら直接入射する成分と窓面等からの照り返しにより入 射する成分の和)の分布を示す。例えば14時の結果に 着目すると、①東壁面から13m付近、②街路中央(13 ~17m 付近)、③西窓近傍(17~30m)の3つの領域で 値の段階的な変化が見られる。これらは各々①完全な 日影空間、②本来日影となる空間に窓面からの照り返 しが入射する空間(人工日向)、③本来の日向に窓面か らの照り返しが射し込んだ劣悪な日向空間(劣悪日向) に対応する。図 16 に窓面からの反射日射の再入射量 (図 12)の全日射入射量(図 15)に対する比を示す。 図 15 の「人工日向」に対応する領域の値が約 0.4~0.5 の値となる。これは、①窓面からの照り返しが、通常 の日影空間をその2倍程度の日射しが射し込む空間に 改変させること、②人工日向の全日射入射量(約 400W/m²) は夏季晴天日の朝 8 時頃の全天日射量を上 回ること、より窓面からの照り返しがキャニオン空間 の日照環境に与える影響は大きいと判断される。

4.3.4 窓の設置が街区内の温熱環境に与える影響

前項4.3.3 では、再帰性反射フィルム貼り付け窓の西 側外表面への設置が日中(14時)、夕方(16時)のキ ャニオン空間の日射環境に与える影響を評価した。本 項4.3.4 では熱環境が劣悪かつ設置効果が大きいと期 待される14時において、この窓の設置によるキャニオ ン空間の温熱環境緩和効果を評価する。

(1) 地表面温度分布

図17に建物間中央を東西に切断したA-A'断面(図7)



(1) Case 1 (HSF)



(2010/07/23)





図 18 風速ベクトル・気温の水平面内の分布(高さ 1m、2010/07/23 14 時)



図 19 風速ベクトル・気温の鉛直断面内の分布(A-A'断面、2010/07/23 14 時)

における地表面温度分布を示す。両ケース共に、日照部と日影部の間に大きな温度差が生じる。西窓近傍 において、遮熱フィルム貼り付け窓を用いた Casel の値が約 54.2℃、再帰性フィルム貼り付け窓を用いた Case2 の値が約 51.8℃を示し、Case2 の方が Case1 に比べ約 2.4℃ 温度が低い。

(2) 風速ベクトル・気温分布

図 18 に 7 月 23 日 14 時における高さ 1m での風速ベクトル・気温の水平面内の分布を、また図 19 に建 物間中央を東西に切断した A-A'断面内における鉛直面内の分布を示す。水平・鉛直断面における風速ベク トルのスケールが異なる点に注意されたい。本解析では、上空の卓越風向がほぼ SSE であるため、南北街 路に沿った流れが形成されるものの、2 棟の建物間のストリートキャニオンを鉛直方向に循環する弱い流 れも生じることが分かる。気温については、高さ 1m における Casel の値は約 35.0°C~36.7°C、Case2 のそ れは約 35.0°C~36.1°C の範囲で分布しており、Case1

における窓近傍の値が Case2 のそれと比べて約 0.7℃ 高いことが分かる。

(3) 歩行者全身に対する日射入射量、MRT

図 20 に歩行者に対する日射入射量(*S_H*)の A-A'断 面内の高さ 1m における分布を、また同断面における MRT(*T_{mrt}*)の分布を図 21 に示す。本解析では、中村 ^{文 15)}の微小立方体型の人体形状モデルに基づく以下の 式を用いて、これらの値を算出した。

$$S_H = \sum_{l=1}^6 S_l c_l \tag{18}$$

$$\sigma T_{mrt}^4 = \sum_{l=1}^6 [\alpha_l S_l + R_l] c_l$$
(19)

ここで、 S_H は歩行者に対する皮膚表面積あたりの日射 入射量 $[W/m^2]$ 、 T_{mrt} は歩行者全身の MRT[K]、添字l は 微小立方体の構成面の方向指標、 S_l は面l への日射入 射量 $[W/m^2]$ 、 R_l は面l への長波長放射量 $[W/m^2]$ 、 c_l は微 小立方体の各面の放射に対する重み付け係数である (上下方向 0.024、側面 0.238)。また、 α_l は人体各面の 日射吸収率であり、本解析では方向に依らず 0.5 で一 様とした。

西窓を再帰性反射フィルム貼り付け窓に変更した Case2 では、窓面からの再帰反射日射の約 36%の減少 が、窓近傍に立つ歩行者への日射入射量を約 50 W/m² 減少させる結果となった。この入射日射量の減少に伴 い、Case2 の MRT は Case1 のそれと比べて約 3.6°C 低 い結果となった。

(4) WBGT、SET*

図 22 に歩行者に対する湿球黒球温度 WBGT、並び に新標準有効温度 SET*の A-A′断面内の高さ 1m におけ る分布を示す。本解析では、WBGT 算出に用いるグロ ーブ温度 *T_g*[K]を次式により算出した。

$$T_g = \{T_{mrt} + 0.247 T_a \sqrt{\nu}\} / \{1 + 0.247 \sqrt{\nu}\}$$
(20)

ここで、vは風速[m/s]、 T_a は気温[K]を表す。SET*の算 出には Gagge $6^{\pm 10}$ の Two-node model を用いており、 着衣量、代謝量には各々、0.5clo、1.2met の値を用いた。



西窓近傍において、WBGT については Case1、Case2 で各々約 33.7℃、約 32.7℃、同様に SET*について は Case1、Case2 で各々約 39.5℃、約 38.2℃、を示し、Case2 の方が Case1 に比べ、WBGT が約 1.0℃、SET* が約 1.3℃ 低い結果となった。

4. まとめ

- 指向反射の影響を考慮した非定常放射・伝導連成数値解析により再帰性反射フィルム貼り付け窓を建物外表 面に用いた場合の夏季屋外放射・温熱環境に与える影響を評価した。
- 2) 再帰性反射フィルム貼り付け窓の使用により、入射日射の約4割を天空に再帰させる事が可能であり、 街路上の日照環境改善に大きく寄与する。一方、温熱環境については、この再帰反射日射の増加により、 その近傍のMRT が約3.6°C、SET*が約1.3°C 低下し、温熱環境が緩和する結果が得られた。
- 3)本稿に示した解析により、熱線再帰性反射フィルム貼り付け窓には、夏季の冷房負荷の削減と屋外暑熱 環境の緩和を両立する低炭素型熱環境の形成に大きく貢献する可能性があることが明らかとなった。今 後は、実在街区への設置効果の評価が課題である。

謝辞 本研究は、2013 年度科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号 26289200,代表:持田灯)の一環として 実施したものである。デクセリアルズ株式会社には、数値解析を行うための各種材料の日射反射特性データを 提供して頂いた。ここに記して謝意を表す。

[参考文献]

- [1] 今田寛典、門田博知、児島武男、区画線に添加するガラスビーズの再帰反射特性に関する 3 次元解析、土 木学会論文集, 413, pp. 39-47, 1990. 1.
- [2] JIS Z 8714 再帰性反射体-光学特性-測定方法, 日本規格協会, 1995.
- [3] 西岡真稔,井上智,酒井憲司,再帰反射を用いた日射反射体の性能評価 幾何光学的分析に基づく再帰反 射性能算定法,日本建築学会環境系論文集,633, pp. 1249-1254, 2008.11.
- [4] Rossi, F., Pisello, A. L., Nicolini A., Filipponi M., and Palombo M., Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat island mitigation: A new analytical model, *Applied Energy*, 114, 621-631, 2014.
- [5] Rossi, F., Castellani, B., Presciutti A., Morini E., Filipponi M., Nicolini A., and Santamouris M., Retro-reflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations, *Applied Energy*, 145, 8-20, 2015.
- [6] 藤田渉,井上隆,一ノ瀬雅之,長浜勉,高草智:建物周辺放射環境を考慮した開口部の遮熱対策に関する研究 近赤外域における再帰反射特性を有する遮熱フィルムの提案と効果検討,日本建築学会環境系論文集, 79,696, pp. 167-172, 2014.2.
- [7] 弓野沙織, 持田灯, 大風翼, 吉田伸治: 指向性反射を考慮した放射伝熱シミュレーションによる熱線再帰性 反射フィルムの評価 (その1)3次元放射収支測定による熱線再帰性反射フィルムの効果と人体への影響の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D1, pp. 909-910, 2013.8.
- [8] 「涼しいまちをデザインしよう」ホームページ:<u>http://www.ceis.or.jp/suzumachi/about_member.html</u>
- [9] 吉田伸治, 佐藤大樹, 大黒雅之, 多分割人体体温調節モデルと連成した CFD 解析に基づく不均一屋外温熱 環境評価に関する研究(その1)人体を覆う仮想球を覆う屋外空間の不均一放射環境の分析, 日本建築学 会環境系論文集, 79, 705, pp. 967-977, 2014. 11.
- [10] 吉田伸治,村上周三,持田灯,大岡龍三,富永禎秀,金相璡,対流・放射・湿気輸送を連成した屋外環境解析 に基づく緑化の効果の分析,日本建築学会計画系論文集,529号, (PP. 77-84), 2000.
- [11] 原山和也,吉田伸治,大岡龍三,持田灯,村上周三,非定常な対流・放射・伝導を考慮した3次元の屋外温 熱環境予測手法の開発 第1報 非定常放射・伝導解析による数値解析と精度検証,日本建築学会計画系 論文集,556号,(PP.99-106),2002.
- [12] 大森 敏明, 梁 禎訓, 加藤 信介, 村上 周三: 大規模・複雑形状に対応する対流・放射連成 シミュレーション用放射伝熱解析法の開発 第1報-モンテカルロ法をベースとした高精度放射伝熱解析法, 空気調和・衛 生工学会論文集, 88, pp. 103-113, 2003. 1.
- [13] 一ノ瀬雅之, 石野久彌: アトリウム空間におけるガラス面の指向反射が放射温度に与える影響の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, D2, pp. 25-26, 2000.9.
- [14] 牧野俊郎, 中村彰成, 若林英信: 金属のあらいふく射反射の角度特性とその伝熱パラメータ表現, 日本機械 学会論文集, B, 65, 639, 734-740, 1999.2.
- [15] 中村泰人: 建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について, 日本建築学会計画系論文報告集, 376 号, pp. 29-35, 1987.6.
- [16] Gagge, A.P., Stolwijk, J.A.J., and Nishi, Y.: A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHARE Transactions, Vol.92, part 1, pp. 709-731, 1986.