

令和 2 年 7 月 9 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06672

研究課題名（和文）暑熱に関わる熱・光刺激が屋外歩行者の生理・心理状態・行動的適応に与える影響の分析

研究課題名（英文）Investigation of effects of thermal and optical stimulations on physiology, psychorology, and dynamic adaptation for pedestrians in outdoor space

研究代表者

吉田 伸治（Yoshida, Shinji）

奈良女子大学・生活環境科学系・准教授

研究者番号：50343190

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実験、実測、数値解析により、屋外歩行者の暑熱に適応するための行動選択の発動と環境条件の関係を分析した。この研究で行われた実験・実測の結果より、歩行者の滞在時間が約15分程度の様な比較的短時間の場合、光刺激による眩しさも歩行者の行動選択に強く作用することが明らかとなった。また、本研究では、得られた知見に配慮した評価を可能とする数値解析技術も提案した。今後は、本研究で開発された基本解析モデルの更なる改良を図ると共に、実際の歩行空間の環境設計への適用が期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

成果の学術的・社会的意義として、光・温熱の双方の快適性に配慮した屋外空間設計手法の提案、建築環境工学の知見を総合した新たな研究テーマの提案、の2点が挙げられる。については、建築空間において、光と熱環境の相互作用の存在は周知であるものの、各々の刺激に対する反応速度、過去の曝露刺激の影響は異なる点などの背景から、これら双方の考慮した評価技術は提案されていなかった。一方、については、熱・空気環境と光環境の双方の分野の知見の総合により、現時点の環境設計・計画の課題、将来性を図るための「試金石」となる知見が得られると考えられる。これらはこの分野の益々の研究発展に大きく貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, the relationships between the adaptive behavior of pedestrians to thermal environment in outdoor spaces in summer season and environmental conditions were analyzed by using experiment, field observation, and numerical analysis. By the results derived from both the experiment and the field observation, it was found that the adaptive behaviors of the pedestrians were deeply affected by the optical stimulation when the staying time of pedestrians is relatively short, such as about 15 minutes. In this study, we also proposed a computational method that enables evaluation considering the obtained knowledge from the experiment and the field observation. In the future, it is expected that the basic analysis model proposed here will be further improved and that it will be applied to the environmental design of the actual walking space.

研究分野：都市・建築環境工学

キーワード：屋外空間 暑熱環境 熱刺激 光刺激 行動的適応 被験者実験 実測 連成数値解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、室内温熱環境評価に人間の環境適応を考慮した手法(適応モデル)の導入研究が国内外を問わず行われており、これを半屋外・屋外空間の環境評価に適用することも期待されている。人間の環境への適応には生理的適応と行動的適応があるが、室内空間に比べて環境条件が遥かに劣悪な夏季屋外空間では、着衣変更、日傘の使用、歩行経路選択等の行動的適応が作用する割合が大きいと考えられる。そのため、屋外温熱環境評価のための行動的適応のモデル化が必要と考えられる。しかし、この行動的適応には、機能的快適性の確保、適度なパーソナル空間の確保、環境条件に基づく刺激に対する生理・心理的快適性の確保、等の多様な条件が関わり、これらに対する十分な知見が得られていないのが現状である。

一方、周知の通り、近年のコンピュータ性能・技術の向上は目覚ましく、学問全般にわたり、旧来定性的評価・分析に止められてきた知見の定量化が可能となりつつある。これは、前述の行動的適応に関わる多様な条件を関連付けて同時に評価・分析し、より有効な都市・建築空間の環境計画・設計案を生み出すことが実現可能になりつつあることを表している。

2. 研究の目的

本研究では、屋外歩行者の暑熱に適応するための行動選択の発動と環境条件の関係を分析することを目的とする。その目的のため、被験者を用いた人工気象室下の実験、屋外空間での実測の結果に基づき、熱環境条件と光(日射)刺激がこれを避ける行動選択の発動に及ぼす影響を関連づける。さらにその知見を研究代表者が開発してきた CFD 連成数値解析に基づく屋外温熱環境評価手法に組み込む。最後に、多くの歩行者が滞在する実際の街路空間を対象に数値解析を行い、新たな環境評価手法の有用性の検証、今後の課題を明らかとする。

3. 研究の方法

本研究の遂行に当たり5つの取り組みを行った。まず、人工気象室を用いた被験者実験による暑熱環境下の光(日射)刺激と選択される適応行動の関係を分析した(取組)。次に、取組で着目する関係を、屋外環境実測で観察された実際の歩行者の行動履歴から詳しく分析した(取組)。これらの取組を通じて得られた知見を基に、熱・空気(気流)・光環境に配慮した屋外歩行空間の環境評価の考え方を整理し、これを筆者らが長年開発してきた数値解析技術に組み込んだ(取組)。取組で改良した解析技術を用いて、実街路空間内の暑熱・グレアの影響の強い歩行空間の環境評価を行った(取組)。最後に今までの取り組み内容を総括し今後の課題を検討した(取組)。

4. 研究成果

(1) 人工気象室を用いた被験者実験による暑熱環境下の光(日射)刺激と選択される適応行動の関係分析

熱・空気・光環境条件を制御可能な人工気象室内で設定された環境条件下における被験者を用いた温熱生理・心理反応、並びに同条件下で希望する適応行動のアンケート調査により、空間滞在者の熱・空気環境と光環境、適応行動の関係を分析した。実験は、奈良女子大学生活環境学部E棟内の生活環境シミュレータ(温熱実験室)において行われた。実験期間は、2017年10月中の7日間(10/5, 6, 12, 13, 19, 20, 26)である。図1に実験のイメージを示す。被験者は、人工太陽照明灯(SOLAX XC500)の照射を胸部付近に受ける中で30分間立位静止し、生理・心理反応を計測された。表1に実験ケースを、また図2に実験スケジュールを示す。被験者(20代の男性1名、女性3名の計4名)は気温28°C、相対湿度50%に制御された室内で照明灯の照射を受ける中、サングラス装着(-G) 無し(-NG)の2ケースの実験を1セットとして行い、日射強度を3段階に渡り変更した合計3セット(6ケース)の実験を体験した。

結果を代表して、図3に日射照射無し(Case0)と照射有(Case1)における温冷感、快適感、眩しさ感、許容感の被験者からの回答の中央値の計測中の推移を示す。図中の縦軸の値と各々の心理反応の関係を表2に纏める。温冷感については、照射無しのCase0でやや暖かいと感じる約0.5~1程度の値を、照射有りのCase1で約1.5~2程度の値を示し、サングラスの装着の有無による差の小さい結果となった。一方、快適感、許容感については、照射有りのCase1において、暴

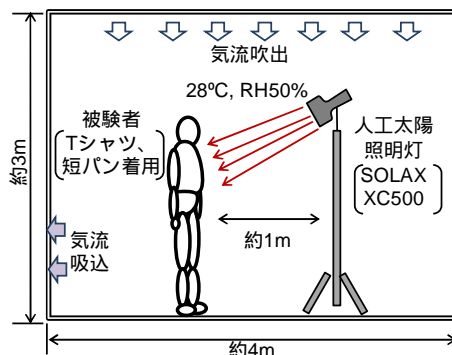


図1 被験者実験の対象  
(奈良女子大学生活環境学部 生活環境シミュレータ 温熱実験室 断面図)

表1 実験ケース

Case	日射強度(胸部付近)	サングラス
0-G	0	装着
0-NG		無し
1-G	125 W/m <sup>2</sup>	装着
1-NG		無し
2-G	250 W/m <sup>2</sup>	装着
2-NG		無し

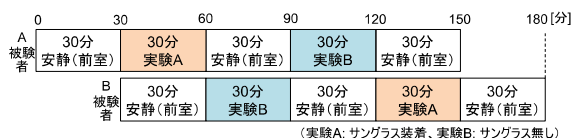


図2 実験スケジュール(1セット当たり)

露開始から約15分までの時間帯のサングラス無装着時の申告が、装着時より否定的な傾向を示すものの、それ以降は双方の差が減少する結果となった。これは眩しさ感の推移に現れるサングラス装着の有無による光刺激の差異の作用と考えられる。サングラスを装着する被験者は、未装着時よりも明らかに眩しさが軽減される傾向が見られる。暴露開始から15分までは、この眩しさの緩和が快適感、許容感を和らげる結果となったと考えられる。15分以降については、環境条件への慣れ、劣悪な温熱環境条件の蓄積の影響、の双方の作用により、装着の有無にかかわらず、否定的な申告に落ち着いたものと考えられる。以上より、新たな環境への暴露後15分程度の時間帯には光刺激が歩行者の行動選択に有意に作用する可能性がある点が示唆される結果が得られた。

(2) 屋外環境実測による暑熱環境下の光(日射)刺激と選択される適応行動の関係分析

前節に示した実験で得られた知見には、実際の屋外空間に生じる環境条件の乱れの考慮が不十分であること、歩行者自身の実際の行動を確認したものではないこと、が課題である。そこで、大学キャンパス内の中庭空間を対象に屋外温熱環境と適応行動の関係を分析するための実測を行なった。計測対象を図4に示す。実測は、2018年7月24日~27日と11月13日~16日の計8日間、奈良女子大学中庭周辺にて人の通行量が多いと期待される授業間の休み時間の時間帯に行われた。中庭周辺の温熱環境は、池の東側の日照部M1、池の北側の緑陰M2の2箇所で計測した(図4)。歩行者数、並びに歩行者の適応行動は、中庭内4点(P1~P4)に設置したカメラにおける5秒毎との撮影画像から評価した。気象条件については、奈良女子大学E棟屋上での計測値、並びに奈良地方気象台での観測値を参照した。歩行者の行動的適応の評価には、表3に示す指標を用いた。具体的には、暑熱環境に対する適応行動のうち、同じ道の中での日影への避難、日傘の使用に着目した3つの指標( $R_{PS}$ 、 $R_{UP}$ 、 $R_{IC}$ )を用いて、結果を分析した。

結果の一例として、図5に日照部M1にて計測された温熱環境要素(全天日射量、 $SET^*$ )と日影通行率 $R_{PS}$ の関係を、また同様に日傘・帽子使用率 $R_{UP}$ との関係を図6に示す。温熱環境要素の種類に関わらず、夏季では環境条件の悪化に伴う日影通行( $R_{PS}$ )が増加する関係が見られるのに対し、秋季ではこのような関係は見られない、想定通りの結果となった。また、夏季における全天日射量を用いた近似式の決定係数 $R^2$ の方が $SET^*$ を用いた場合に比べ値が大きく、相関の強い傾向が見られた。これは日射しの強い酷暑環境下における比較的短時間の活動中の適応行動の選択においては、視環境情報が温熱感よりも優位に作用することを表しており、(1)と同様の傾向が得られた。 $R_{UP}$ については、夏季において環境条件の悪化に伴う値の上昇傾向がやや見られたものの相関は低い。これは、日傘を日常的に使用する人は紫外線を防ぐ意識が高いため、日射量が少ない条件下でもより暑熱環境を緩和できる日傘の使用を心掛けるためと考えられる。最後に、図7に日影通行または日傘・帽子着用の様な対策を講じた歩行者の割合を表す日除け対策率 $R_{IC}$ と全天日射量の関係を示す。全天日射量に対する本実測で得られた $R_{IC}$ 、並びに過去に研究代表者が行った実測で得られた避難率の近似式は概ね対応しており、両実測で同様の傾向が得られたことが確認された。

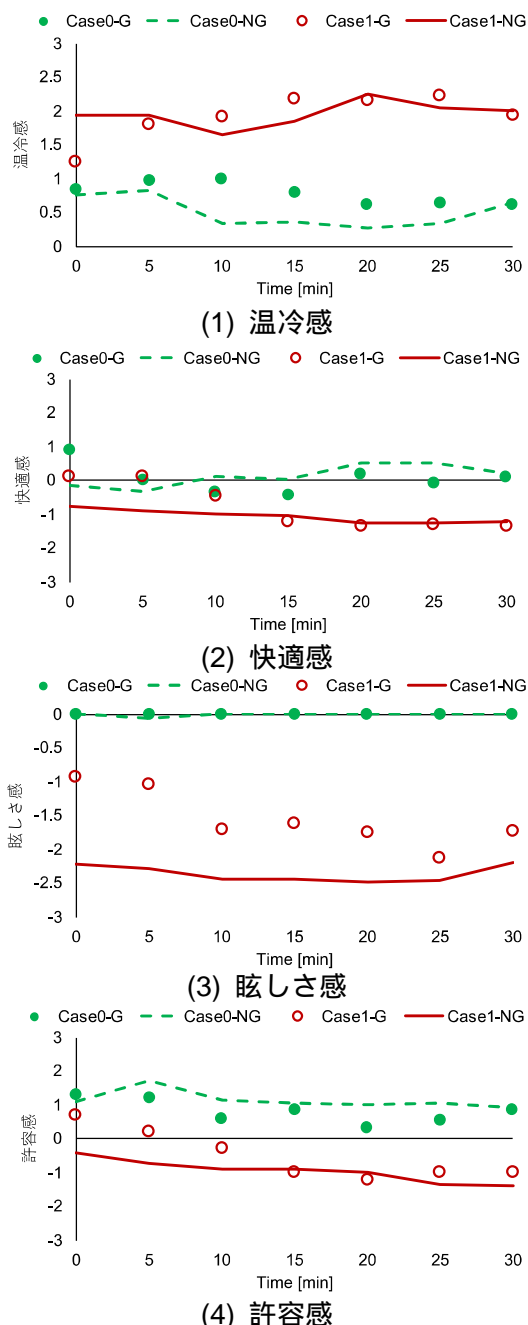


図3 光刺激の強度が温冷感に与える影響

表2 心理反応のスケール

	温冷感	快適感	眩しさ感	許容感
3	暑い	非常に快適	/	絶対許容できる
2	暖かい	快適		許容できる
1	やや暖かい	やや快適		僅かに許容できる
0	暑くも寒くもない	どちらでもない	眩しくない	どちらとも言えない
-1	やや涼しい	やや不快	やや眩しい	やや許容できない
-2	涼しい	不快	眩しい	許容できない
-3	寒い	非常に不快	非常に眩しい	絶対許容できない



(3) 熱・空気(気流)・光環境の連成数値解析技術に基づく屋外複合環境評価技術の開発

(1)、(2)の取組みにより、歩行者の滞在時間が比較的短い場合、光刺激による眩しさも歩行者の行動選択に作用することが明らかとなった。(1)に示した結果において、許容感に対する光刺激の作用が熱刺激を上回る約15分という時間は、電車通勤等で駅から目標となる地点(会社、住まい等)まで徒歩で向かう場合の所要時間として十分現実的な時間と考えられる。従って、これらの取組みにより、屋外を移動する歩行者に対する環境評価を行う場合における温熱・空気環境に加えて光環境も評価する必要が明らかとなった。そこで、本研究では、研究代表者らが長年開発に取り組んできた数値解析技術に基づく屋外空間の温熱・気流・物質環境の評価技術を改良することにより光環境の評価を可能とすることにした。ここでの大きな修正点としては、日射の指向性反射の考慮が挙げられる。従来の温熱環境評価における日射(短波長)・長波長放射解析手法では、解析領域を構成する面要素を反射の指向性を考慮しない完全拡散面と仮定した相互反射の分析が行われてきた。これは計算負荷の軽減を意図した現実的な手法であるが、光環境を評価する場合、ガラスで作られた窓面、金属面などの光の鏡面反射の特性の強い面からの反射の影響を適切に考慮できない。そこで、本研究では日射の指向性反射を考慮した解析技術を用いて得られた日射解析の結果を光環境の評価指標(照度等)に読み替えることにより、温熱・空気・光の各々環境の関係を評価することを可能とした。

(4) 実街路空間内の暑熱・グレア環境下の歩行者の適応行動の評価

夏季の人の往来・滞在の多い実存する屋外空間を対象に、(3)で提案する手法を用いて、光・温熱環境の評価を行った。

解析対象は大阪市中央区の御堂筋を中心とするモデル街区とした。図8に解析対象モデルのイメージ(鳥瞰図)を示す。幅45mを有する御堂筋を解析領域の中心に配し、その両脇を60mまたは45mの高さの建物モデルが挟む様に配置された。これらの建物モデルの東西方向には、高さ30mの中規模建物群が狭小な街路を挟んで配置される場合を想定した。解析対象時刻である夏季日中の大阪の風向は大阪湾からの海風(風向西)が卓越すると想定し、解析領域西側側面を流入側、東側側方境界を流出側と想定した境界条件を設定した。南北方向については、周期境界条件を課すことにより、街路としての連続性を考慮した。解析ケースを表4に示す。本解析では、御堂筋の東側に配置された建物の西向き外表面を構成する窓面の種類、並びに御堂筋両脇に列植された街路樹の有無、の2点に着目したケース設定を行った。Case1が御堂筋両脇の建物高さを60mとする街区を想定しており、Case1-1では西向き外表面を構成する窓面に、鏡面反射の強い従来の遮熱フィルム貼付け窓を設置した場合を、Case1-2では鏡面反射日射の多くを上方へと反射させる再帰性反射フィルム貼付け窓を設置

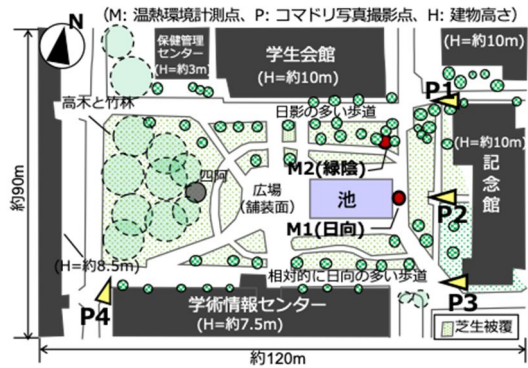


図4 実測対象(図中の円は街路樹の配置を表す)

表3 本稿における行動的適応の評価尺度

日影通行率 ( $R_{PS}$ )	$R_{PS} = (N_E / N) \cdot 100$	(1)
	$N_E = N_{EP} + N_{EN}$	(2)
日傘・帽子使用率 ( $R_{UP}$ )	$R_{UP} = ((N_{EP} + N_{SP}) / N) \cdot 100$	(3)
日除け対策率 ( $R_{IC}$ )	$R_{IC} = ((N_E + N_{SP}) / N) \cdot 100$	(4)

N: 歩行者数 [人/min],  $N_E$ : 日影通行者数 [人/min],  
 $N_{EP}$ : 日傘・帽子を使用して日影を通行した歩行者数[人/min],  
 $N_{EN}$ : 日傘・帽子を使用せずに日影を通行した歩行者数[人/min],  
 $N_{SP}$ : 日傘・帽子を使用して日向を通行した歩行者数[人/min]

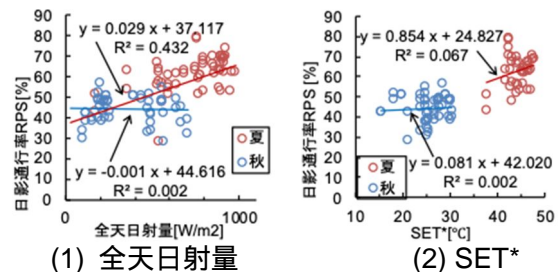


図5 温熱環境要素と日影通行率  $R_{PS}$  の関係

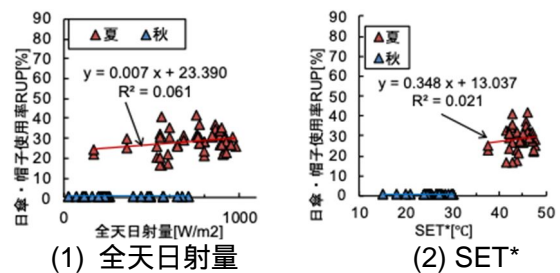


図6 温熱環境要素と日傘・帽子使用率  $R_{UP}$  の関係

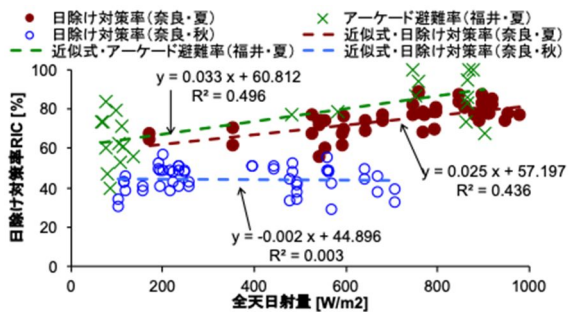


図7 全天日射量と日除け対策率  $R_{IC}$  の関係

した場合を想定した解析を行った。Case2 では、御堂筋の両脇の建物高さを 45m とした場合であり、Case1 同様に西向き窓面の仕様を変更した Case2-1、Case2-2 の 2 ケースの解析を行った。さらに Case3-1 では Case2-1 の街路に街路樹（樹種イチョウ）を列植した解析を行った。

気象条件としては、平均的な 8 月上旬の大阪の晴天日を想定しており、大阪管区気象台の観測データを参考に 2012 年 8 月 9 日を評価対象日に定め、空間の評価対象時刻としては、14 時、16 時を対象とした。

結果の一例として、図 9 に窓面からの反射日射が地表面に再入射する日射量の分布を示す。ここでは、御堂筋を挟む建物高さを 45m とした Case2、Case3 の結果を示す。図の横軸は御堂筋西側建物の東向き外表面からの距離である。同表面は本解析で窓面の種類を変更した御堂筋東側建物の西向き外表面に対向する面に相当するため、以下では対向壁面と称する。従って図横軸の 0m が対向壁面、45m が窓面に当たる。14 時の場合（図 9(1)）、Case2 では窓近傍から約 24m（図の横軸では約 20～45m）の範囲に西向き窓面からの反射日射の大半が再入射する分布を示す。これは、14 時の太陽高度（57.8°）より推定される反射日射の到達距離に対応する。窓面の差異に着目すると、遮熱フィルム貼付け窓を採用した Case2-1 で約 230W/m<sup>2</sup> 程度、再帰フィルム貼付け窓を採用した Case2-2 で約 100W/m<sup>2</sup> 程度の値を示し、再帰窓の設置により、従来の遮熱窓の約 4 割程度まで反射日射を削減し、窓からの照り返しを大幅に緩和する結果となった。また、街路樹を植栽した Case3-1 では、対向壁から約 28m から 38m の範囲の値が Case2-1 に比べて大幅に小さい。これは、街路樹の樹冠が遮熱窓からの反射日射を遮蔽するためである。次に、16 時の結果に着目する。全てのケースにおいて、窓面近傍（対向壁から約 25～45m の範囲）への日射の再入射は見られない結果となった。これは、16 時の太陽高度が 34.1°であり、地表から約 15m までの窓面に日射が入射しないため、反射日射も生じないためである。窓からの反射日射はこれより上の窓面で生じており、その再入射は対向壁面から約 20m 程度の範囲に渡り生じる結果となった。街路樹を植栽した Case3-1 では、Case2-1 に比べ、対向壁近傍から約 2m まで、並びに約 15～25m の範囲の二つの再入射の減衰が見られる結果となった。このうち、前者は対向壁近傍に列植された御堂筋西側の街路樹が窓面からの反射日射を遮蔽した効果である。一方、後者については、窓面に近い街路東側の街路樹の反射日射の遮蔽効果が表れたと考えられる。従って、列植された街路樹の配置により複雑な分布となったと考えられる。以上の様に、改良された解析手法を用いることにより、街路空間内の温熱・空気・光環境の複雑な分布を評価・分析することが可能となった。

(5) 全体のまとめ

以上より、本研究では実験、実測、数値解析により、屋外歩行者の暑熱に適應するための行動選択の発動と環境条件の関係を分析した。今後は、本研究で開発された基本解析モデルの更なる改良を図ると共に、実際の歩行空間の環境設計への適用が期待される。

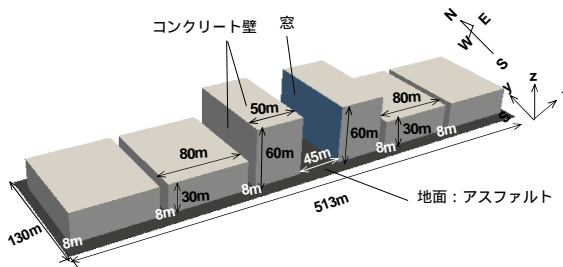
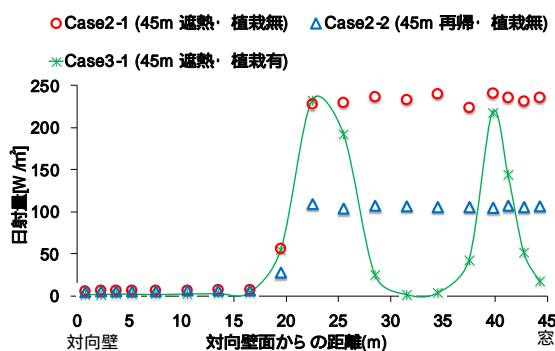


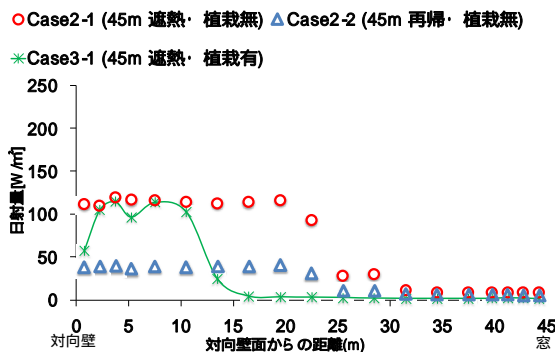
図 8 数値解析の対象

表 4 解析ケース

Case	建物高さ	窓	街路樹
1-1	60m	遮熱窓	無し
1-2		再帰窓	
2-1	45m	遮熱窓	
2-2		再帰窓	
3-1		遮熱窓	有り（イチョウ）



(1) 14 時



(2) 16 時

図 9 地表面への再入射日射量の分布（2012/8/9）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshida Shinji, Mochida Akashi	4. 巻 11
2. 論文標題 Evaluation of effects of windows installed with near-infrared rays retro-reflective film on thermal environment in outdoor spaces using CFD analysis coupled with radiant computation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Building Simulation	6. 最初と最後の頁 1053 ~ 1066
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12273-018-0462-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田 伸治
2. 発表標題 屋外歩行者の温熱生理特性と機能・空間心理特性を考慮した環境設計手法の開発(その2) 大学キャンパス内の中庭の温熱環境条件が歩行者の適応行動に与える影響の実測
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮垣 春香、吉田 伸治
2. 発表標題 指向性反射を考慮した放射伝熱解析手法による熱線再帰性反射フィルムの評価 ー大阪御堂筋のモデル街区内の日射環境の評価ー
3. 学会等名 令和元年度 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 伸治
2. 発表標題 指向性放射・CFD連成数値解析による熱線再帰性反射フィルム貼付け窓の設置が歩行者の温熱快適性の改善に有効な窓面積比の検討
3. 学会等名 第13回 日本ヒートアイランド学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田 伸治、宮垣 春香、持田 灯、石田 泰之
2. 発表標題 指向性放射・CFD連成数値解析による熱線再帰性反射フィルム貼付け窓の設置が歩行者の熱ストレス緩和に有効な窓面積比の検討
3. 学会等名 第42回人間-生活環境系シンポジウム（大阪）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮垣春香, 吉田伸治, 持田灯, 石田泰之
2. 発表標題 指向性反射を考慮した放射伝熱解析手法による屋外温熱環境評価に関する研究（その5）熱線再帰性反射フィルム貼付け窓の設置が放射熱環境改善に有効な窓面積比の検討
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉田伸治, 持田灯, 石田泰之
2. 発表標題 指向性反射を考慮した放射伝熱解析手法による屋外温熱環境評価に関する研究（その6）熱線再帰性反射フィルム貼付け窓の設置が温熱環境改善に有効な窓面積比の検討
3. 学会等名 平成30年度 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	宮垣 春香  (Miyagaki Haruka)		研究当時 奈良女子大学大学院性