

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：14602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04808

研究課題名（和文）屋外歩行者の日傘使用による夏季暑熱環境への適応効果の評価に関する研究

研究課題名（英文）Study of evaluation on effects of utilizing a parasol on adaptation to thermal comfort for pedestrians in summer season

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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では屋外歩行者の日傘使用時の微気候形成機構を分析した。当該研究期間において、実測による日傘用生地の日射、長波長放射環境への影響評価と温熱環境に与える影響評価、CFD解析による日傘使用時の歩行者の対流熱伝達率分布の評価、（CFD解析による日傘使用時の歩行者の対流熱伝達率分布の評価に取り組んだ。実測、CFD解析の更なる実施による微気候形成機構の評価モデル提案の基礎データを収集すると同時に、日傘以外の歩行者の暑熱適応手法の効果の評価を行うことが今後の課題である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的・社会的意義は、日傘の暑熱適応効果の評価における配慮すべき点を実測、数値解析の双方において明らかとしたこと、日傘使用の暑熱適応効果をCFDの可視化技術により明確に示したこと、が挙げられる。については、例えば、日傘自体の日射の遮蔽性能を分析する場合、日傘下の歩行者の温熱快適性に与える影響を評価する場合、などに応じて適切な高さに日射計を配置する必要があることが明らかとなった。またについては、夏季暑熱環境への適応技術として最も手軽で実効的な技術である日傘の効果を実測結果と通じて視覚的に示すことで、男女を問わず日傘を普及させる契機となる成果が得られたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we examined mechanisms of microclimate around a pedestrian using a parasol in the summer season. During the study period, we performed the following three investigations: (1) evaluations of effects of different textiles for a parasol on both the solar and the longwave radiant environment and the thermal environment in the summer season, (2) evaluations of distributions of the convective heat transfer coefficients on the human body using a parasol, (3) examinations of microclimate around the human body using a parasol in the summer seasons. Future directions of this study are to collect basal data for making the microclimate in the summer seasons, and to evaluate effects of installing the other adaptive behavior on thermal environment in a pedestrian in the summer seasons.

研究分野：都市・建築環境工学

キーワード：日傘 夏季暑熱環境 歩行者 行動的適応 CFD解析 実測

1. 研究開始当初の背景

近年、空間の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。

日傘は場所を問わず歩行者への日射を遮蔽可能なため、最も有用な夏季暑熱適応策と考えられる。しかし、歩行者の日傘使用時に形成される温熱環境は極めて複雑である。中でも、①日傘使用時の日射遮蔽効果、②日傘周辺に生じる複雑流れ場が日傘並びに人体周辺の熱・物質伝達に与える影響、の2点は特に複雑であると同時に日傘を使用する歩行者の人体熱収支、温熱快適性に対する影響も大きい。しかし、これらに関する検討は、不十分な現状にある。人体の温熱快適性には、気温、湿気、放射、気流、着衣、代謝などが関わるため、日傘使用時の温熱快適性には、与える影響を総合評価するためには、この複雑な気流形成、熱交換メカニズムの解明が必要である。加えて、この熱交換メカニズムには、当然ながら、この気流に基づく対流熱伝達率分布、並びに放射環境の不均一化に基づく複雑な表面温度分布の双方が作用する。この解明には放射環境と気流に基づく対流熱伝達の相互影響を分析可能な手法に基づく総合的な分析が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、日傘使用時の人体周辺に形成される複雑な放射、対流、熱・湿気輸送メカニズムを定量的に評価するための技術を開発すると同時に、この開発を通じて行われる実験・実測、数値解析の結果の分析を通じて、日傘使用時の屋外歩行者の夏季暑熱環境への適応策の効果を評価することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究の遂行に当たり4つの取り組みを行った。まず、実測による日傘用生地の日射、長波長放射環境への影響評価と温熱環境に与える影響を分析した（取組①）。次に、取組①の実測で得られた日傘の伝熱特性（熱伝導率、日射反射率、放射率）を入力条件に課した放射・CFD連成数値解析技術を用いて、日傘を持つ歩行者人体の周辺環境との熱交換に強く作用する人体皮膚表面の対流熱伝達率分布を分析した（取組②）。さらに、取組②で用いた放射・CFD連成解析を用いて、陽射しを受ける歩行者の日傘利用が周辺微気候に与える影響を詳しく分析した（取組③）。

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）。なお、研究申請当初は、人工気候室を活用した被験者実験に基づく日傘使用の有無が歩行者の生理反応に与える影響分析の実施も予定していたが、新型コロナウイルス COVID-19の感染拡大防止の観点から、最終的に実施を断念したことを申し添える。

4. 研究成果

(1) 実測による日傘用生地の日射、長波長放射環境への影響評価と温熱環境に与える影響評価

この取り組みでは、屋外空間での温熱環境実測により、日傘の日射・長波長放射遮蔽性能の分析、並びに日傘下の温熱環境と周囲環境との比較を行った。

表1に実測概要を、また図1に実測機器の配置図を示す。1日の計測において、日傘無し、日傘上下の熱環境の計測を行い、両者の差から日傘の影響を評価した。日傘の日射・長波長放射の遮蔽効果については、長短波収支計を日傘上、日傘下に配置することにより計測した。この計測では、日傘下の長短波収支計に入射する日射は①日傘を透過して入射する成分  $I^*$ 、②日傘に覆われない天空部分から入射する天空日射  $I_{dH}$  の二つの成分で構成されると考え、日傘自体の日射遮蔽性能を評価する場合は、②の成分を取り除いた評価手法（表2）を考え、その効果を分析した。

日傘生地の材質・色は3種類を選定し

表1 実測概要

測定日	2022年8月4日8日9日・9月26日30日
測定時間	10:55~13:55(3時間)
日傘	全天日射量・長波長放射量・日傘表面温度・地表面温度
測定項目	グローブ温度・日傘表面熱流量・風速・温度・湿度
日傘	全天日射量・長波長放射量・乾球湿球温度・地表面温度
測定項目	グローブ温度・風向風速
気象条件	全天日射量・長波長放射量・水平面天空日射量
(日棟屋上)	風向風速・法線面直達日射量・温湿度(百葉箱)
天空率	魚眼レンズカメラ撮影(日傘下・日傘上)

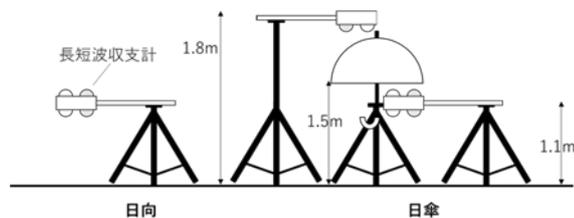


図1 実測イメージ（計測機器の配置）

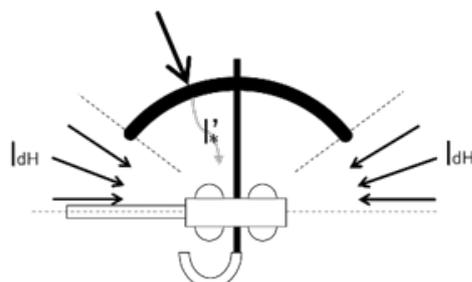


図2 精度検証のための解析対象

た。Case1 はサマーシールド（特殊三層ラミネート加工を施されたポリエステル生地）の黒、Case2 は布日傘（綿90% 麻10%）の黒、Case3 はサマーシールドのベージュである。結果の一例として、Case1、Case2の全天日射量と日射透過率の関係の比較を図3に示す。晴天時の結果に着目すると、Case1（サマーシールド）については、天空率考慮未考慮の場合の日射透過率の値は約20~30%程度、考慮時のそれは10%以下の値を示す。これより、①日傘下の日射計の配置次第では、日傘を介さず直接日射計に入射する天空日射成分の影響が日射透過率の推定に大きく作用すること、②サマーシールドは日射をほぼ完全に遮蔽する極めて高い性能を有する日傘であること、が明らかとなった。一方、Case2（布日傘）については、天空率の未考慮、考慮の日射透過率は各々約30~40%程度、約10~30%程度の値を示した。計測の結果、①Case1同様、日傘下から臨む天空率の考慮の有無による透過率の評価値に大きな差が生じること、②全天日射量に対する日射透過率の値の相関はCase1同様に見られるものの、ばらつきの大いこと、が明らかとなった。②のばらつきは、布日傘はサマーシールドとは異なり相応な量の日射を透過するため、生地に対する日射の入射角特性、入射日射の直達日射の占める割合などが透過性能に作用したことが差をもたらす要因となったと考えられる。

#### (2) CFD 解析による日傘使用時の歩行者の対流熱伝達率分布の評価

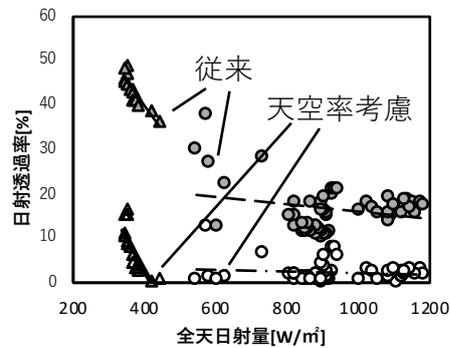
CFD 解析を用いて日傘を持つ歩行者の暑熱環境適応効果の分析の第一段階として、日傘を持つ人体の対流熱伝達率分布を評価した。図4に解析対象、解析条件をまとめる。また、図5に解析で使用する人体モデルのグリッドデザインを示す。解析対象は、周囲に障害物等の無い空間中央に人体モデル一体が主流に対向して立つ場合を想定した。この解析では、第一段階として、向かい風に相当する人体正面（Y 図3 計測方法・日傘種類が日射透過率に与える影響

軸-側境界）からの気流が流入する条件を想定した。流入風を速度を0.1、0.5、1.0、2.0、4.0m/sの5条件、乱れ強さを10、20、40%の3条件を独立変数とする計15条件の解析をケース毎に行い、対流熱伝達率分布を評価した。解析ケースは3ケース設けた。Case1は日傘を持たない立位歩行者が滞在する場合を、Case2は日傘を鉛直に保持する場合を想定した。一方、Case3は西日等を遮蔽する際を意図し、日傘を前方22.5°傾けた場合を想定した。

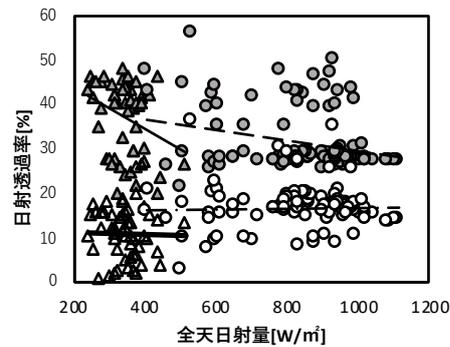
まず、既往研究の風洞実験と同じ条件を課した解析を行い、使用するツールの精度を検証した。結果の一例として、風洞実験（横軸）、数値解析（縦軸）の双方で得られた対流熱伝達率の値の関係を図6に示す。本解析（NWU）の値は、既往研究（IIS）に比べ若干値が大きいものの風洞実験、小野らの解析と概ね対応する結果が得られたことが確認された。

表2 日射透過率の推定方法

通常の日射透過率 $\tau$	$\tau = \text{ParaInSun} \downarrow / \text{SunnySun} \downarrow$
天空率を考慮した日射透過率 $\tau_*$	$\tau_* = \text{ParaInSun} \downarrow_* / \text{SunnySun} \downarrow_*$
天空率を考慮した日向上からの全天日射量 $\text{SunnySun} \downarrow_*$	$\text{SunnySun} \downarrow_* = \text{SunnySun} \downarrow - I_{dH} \varphi_{sky}$
天空率を考慮した日傘内上からの全天日射量 $\text{ParaInSun} \downarrow_*$	$\text{ParaInSun} \downarrow_* = I'_*(1 - \varphi_{sky}) + I_{dH} \varphi_{sky}$
	$I'_*(1 - \varphi_{sky}) = \text{ParaInSun} \downarrow - I_{dH} \varphi_{sky}$
よって	$\text{ParaInSun} \downarrow_* = I'_*(1 - \varphi_{sky}) = \text{ParaInSun} \downarrow - I_{dH} \varphi_{sky}$
$I_{dH}$ : 水平面天空日射量	$\varphi_{sky}$ : 日傘内の天空率
$I'_*$ : 日傘内の水平面直達日射量	
$\text{SunnySun} \downarrow$ : 日向上からの全天日射量	
$\text{ParaInSun} \downarrow$ : 日傘内上からの全天日射量	

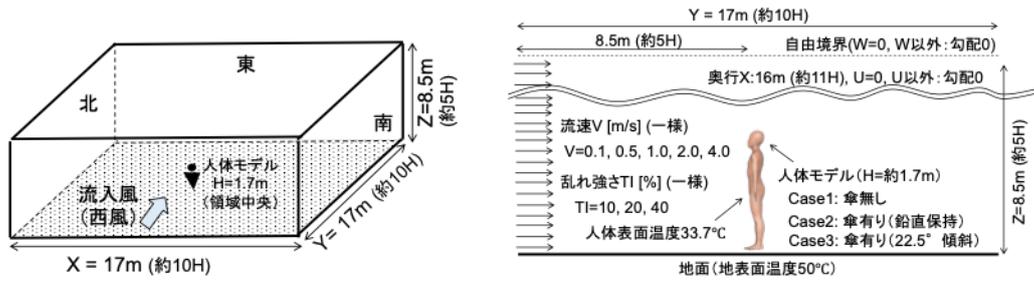


(1) Case1 (サマーシールド・黒)

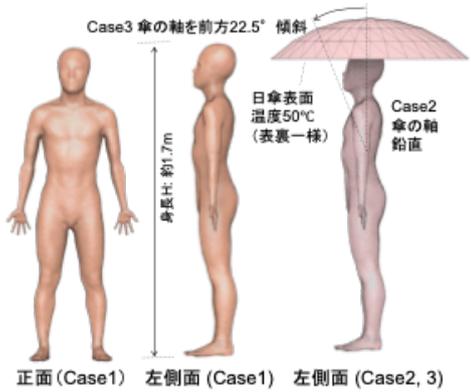


(2) Case2 (布日傘・黒)

図3 計測方法・日傘種類が日射透過率に与える影響



(1) 領域全体の鳥瞰図 (2) YZ 鉛直断面図と解析条件、解析ケース  
 図4 CFD解析の対象・解析条件・解析ケース



正面 (Case1) 左側面 (Case1) 左側面 (Case2, 3)  
 図5 数値人体モデルのグリッドデザイン

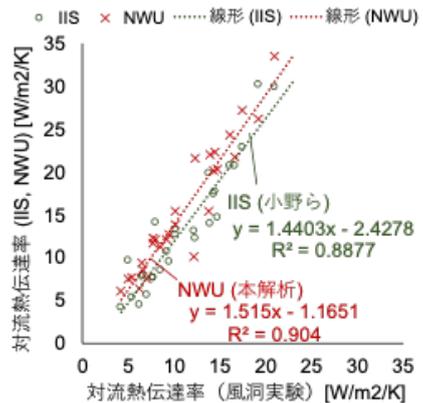
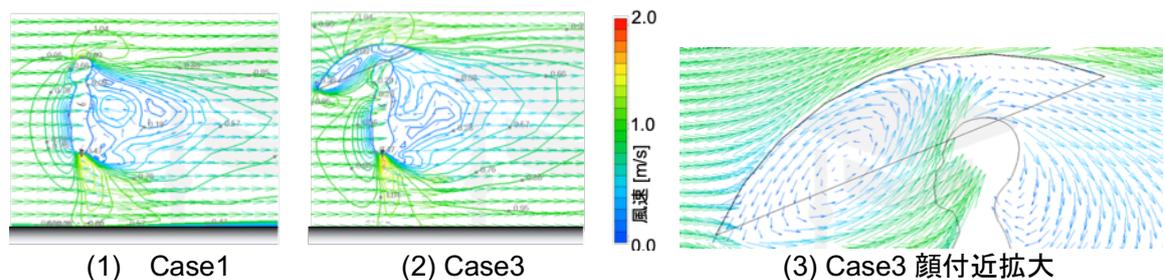


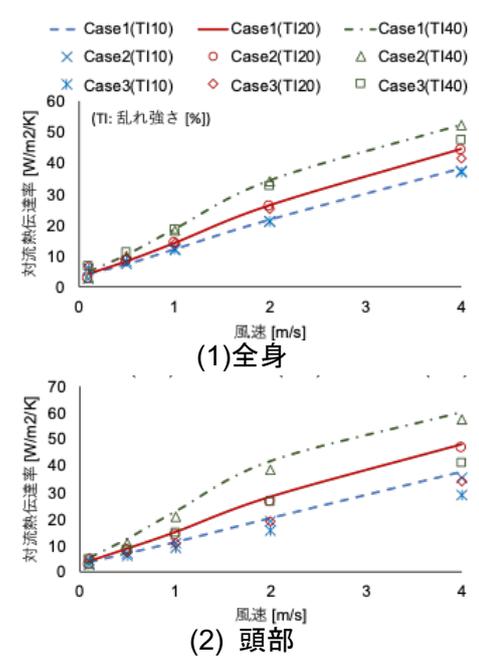
図6 風洞実験と数値解析の比較 (全身、部位毎の対流熱伝達率)



(1) Case1 (2) Case3 (3) Case3 顔付近拡大  
 図7 風速ベクトル、スカラー風速の鉛直断面内の分布 (流入風 1.0m/s, 乱れ強さ20%の場合)

流れ場の傾向の結果の一例として図7にCase1 (日傘無し)、Case3 (傾斜日傘) の風速ベクトル、スカラー風速の鉛直断面内の分布を示す。両ケース共に図左から流入する気流が人体風下に回り込み複雑な循環流を形成することが分かる。特に日傘を保持するCase3では日傘上方に沿う流れと日傘下方で剥離する流れが形成され顔付近で反時計回りの循環流が形成される (図7(3))。従って、日傘を保持する人体頭部付近の流れ場が特に複雑な分布を示す。

図8に解析全ケースの流入風、乱れ強さの差異が対流熱伝達率に与える影響の関係を纏めて示す。風速増加、乱れ強さ増加に伴い対流熱伝達率が増加する傾向が見られ、これは既往研究と同様の結果である。日傘の有無の影響に着目すると、全身の平均対流熱伝達率については、日傘を持たないCase1に対する日傘を持つCase2、Case3の差は小さい結果となった。しかし、Case3の頭部はCase1、Case2により明らかに値の小さな結果となった。これを定量的に分析するため、横軸にCase1の対流熱伝達率を縦軸にCase2、3のそれを配置して関係を纏めたものを図9に示す。日傘を傾けて保持したCase3はCase1の約7割程度まで値が減少することが分かる。日傘保持時



(1) 全身 (2) 頭部  
 図8 流入風速、乱れ強さと対流熱伝達率の関係 (TI: 乱れ強さ)

の対流熱伝達率を日傘なしの値で割ることにより比を取ったものを増加率と定義し、すべての部位でこれをまとめたものを図 10 に示す。鉛直に保持した Case2 についてはほぼ増加率 1 と差異の小さな結果となったのに対し、日傘をやや傾けた Case3 は頭部、背面で値が 7、8 割まで減少する一方、脚、足では増加が見られ、特に足は顕著な増加率を示した。これは日傘保持時の人体後方に生じる鉛直方向の循環流の変化に依るものと推察されるが、今後更に詳しい分析が必要と考えられる。

(3) CFD 解析による日傘使用時の歩行者の対流熱伝達率分布の評価

本研究の最後の取り組みとして前節の CFD 解析に日射解析を加えることにより人体周辺微気候の形成に対する日傘使用の効果を分析した。図 11 は結果の一例として、7 月下旬正午頃の東京の気候条件下における日傘使用の有無が歩行者周りの流れ場、温度場、皮膚温度分布に与える影響を比較したものである。また、図 12 は、人体部位毎の日射照射熱量、皮膚温度、発汗率の人体表面上の分布を示す。解析対象日時は太陽高度が高いため、日傘無しの場合、頭部、肩、胸の日射照射熱量が大きい傾向が見られる。これに対し、日傘有の場合において、これらの部位は日傘の影に隠れるため、その値は大きく減少する。日射照射熱量の大幅な減少に伴い、当該部位の皮膚温度も大きく低下する。発汗率については、全身の受熱量に基づき汗の分泌が制御されるため、皮膚温度の様な部位の対応はないものの、胴体を中心に発汗率が約 10%程度減少し、日傘使用による温熱環境の緩和が確認できる結果となった。

(4) 全体のまとめ

以上より、本研究では実測、数値解析により、屋外歩行者の日傘使用時の微気候形成機構を分析した。今後は、実測、CFD 解析の更なる実施による微気候形成機構の評価モデル提案の基礎データを収集すると同時、日傘以外の歩行者の暑熱適応手法の効果の評価にも取り組みたい。

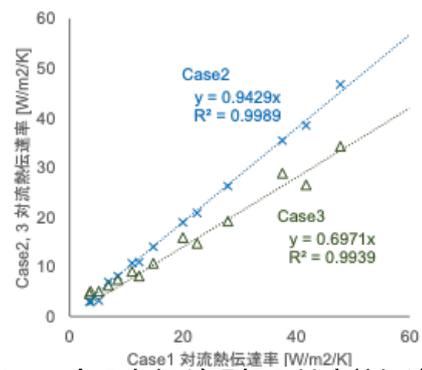


図 9 日傘の有無が頭部の対流熱伝達に与える影響

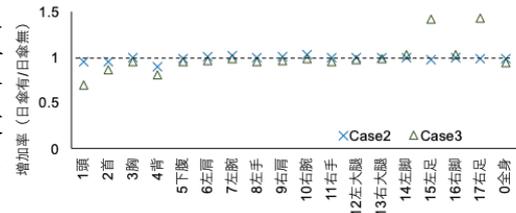


図 10 日傘保持による部位毎の対流熱伝達率増加率の分布

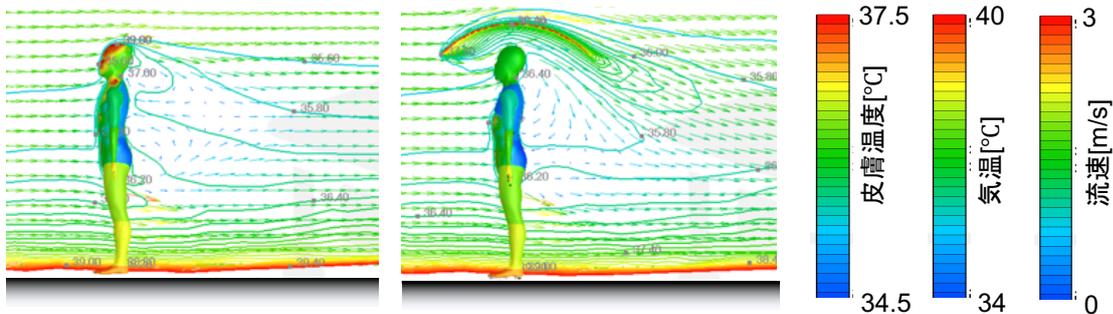


図 11 歩行者周りの流れ場・温度場の鉛直断面内の分布 (7 月下旬晴天日正午の東京を想定)

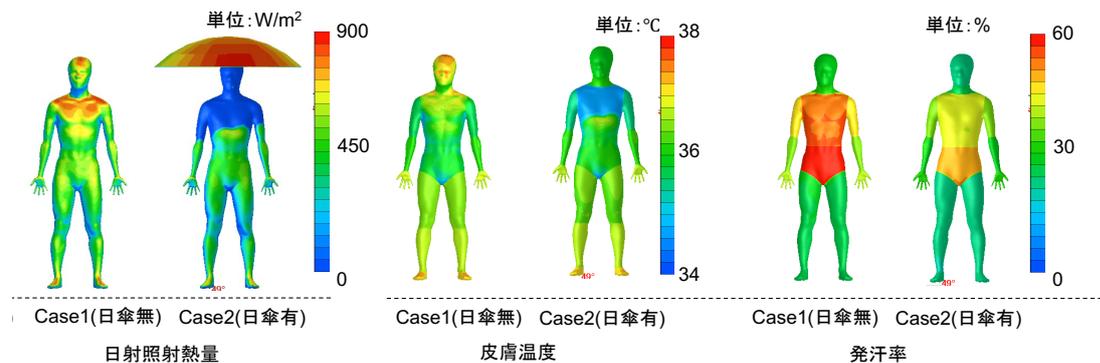


図 12 人体表面上の日射照射熱量・皮膚温度、発汗率の分布 (7 月下旬晴天日正午の東京)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4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 日傘を持つ歩行者周辺微気候のCFD解析
3. 学会等名 第46回 人間－生活環境系シンポジウム報告集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田 伸治
2. 発表標題 歩行者の日傘利用の暑熱環境緩和効果の評価に関する研究（その1）夏季暑熱環境緩和効果の分析のための実測
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 伸治
2. 発表標題 歩行者の日傘利用の暑熱環境緩和効果の評価に関する研究（その2）CFD解析による日傘使用時の歩行者の対流熱伝達率分布の評価
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2023年

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3）夏季暑熱環境条件が歩行者の交差点信号待ち場所の選択行動に与える影響分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021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
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------