

令和 4 年 6 月 27 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04725

研究課題名（和文）室内気流設計のための気流感メカニズムに関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental Study on Mechanisms of Airflow Sensation for Indoor Airflow Design

研究代表者

桃井 良尚（MOMOI, YOSHIHISA）

福井大学・学術研究院工学系部門・准教授

研究者番号：40506870

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：気流は人間の温冷感に大きく影響するものの、気流感メカニズムに関する研究は少なく、未だに十分に解明されていない。本研究ではこの気流感が主に人体皮膚表面の気流、対流熱伝達、静圧によって生じると仮定し、実験及びCFD解析によって得られる「物理量」と、被験者実験によって得られる「心理量」（人体各部位別の気流感申告）との関係性を検討することで、人間の気流に対する感覚知覚メカニズムを明らかにすることを最終目標とし、定常一様気流曝露時の人体全体及び各部位周辺の気流、対流熱伝達率、静圧の分布を、測定実験とCFD解析によって詳細に把握し、これら「物理量」の関係性を求めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、サーマルマネキンによる対流熱伝達率及び静圧の把握、バーチャルマネキンを用いたCFD解析、3Dプリンタで作成した縮小模型人体での静圧測定を行い、各手法の精度検証を行いながら、被験者による気流閾値に関する主観評価を得た。本研究では気流感に関する物理量及び心理量の間関係を明らかにする上で重要となる基礎データを蓄積することができた。

研究成果の概要（英文）：Although airflow greatly affects the thermal sensation in humans, there are few studies on the mechanism of the airflow sensation, and it has not been fully clarified yet. In this study, it is assumed that this airflow sensation is mainly caused by airflow, convection heat transfer, and static pressure on the surface of a human skin. In order to clarify the convective heat transfer from each part of the human body surface when exposed to a steady air flow, experiments were conducted using a thermal manikin (TM) with heat flux sensors and radiant heat flux sensors. Also, CFD simulation was conducted for the distribution of the air velocity, the convective heat transfer coefficient (CHTC) and the static pressure on the TM shape's surface. The CFD results of the CHTC and static pressure for the whole body and each part of TM were compared with the experimental results and the previous research and examined for calculation accuracy.

研究分野：建築環境工学

キーワード：気流 気流感 温冷感 CFD 対流熱伝達率 風圧 熱流 サーマルマネキン

1. 研究開始当初の背景

室内空調において、ASHRAE STANDARD 55-2013¹⁾には、積極的な気流の利用により、温冷感を低減させる効果が得られ、室温設定の緩和が見込めることが示されている。一方で、対流型空調方式における吹出し気流や冬季のペリメータ付近では、ドラフトによる不快感が常に問題となる。このように、気流は人間の温冷感に大きく影響し、不快感の要因にもなるため非常に重要な環境要素である。しかし、気流に対する人間の感覚知覚メカニズムは、皮膚の触圧覚及び温冷覚が複合して働くと考えられ、「気流感」に関して周辺環境の物理量と心理量を結び付けて詳細に検討した研究事例は多くない。

2. 研究の目的

本研究では、「気流感」が主に皮膚表面の気流による圧力と対流熱伝達量によって生じると仮定し、これらの物理量と心理量(人体各部位別の気流感申告)の関係性について検討することで、人間の気流に対する感覚知覚メカニズムを明らかにすることを最終目標とする。本研究では、心理量評価のための、人体周辺の気流分布、表面静圧分布、対流熱伝達率(以降 CHTC と記す)分布について、詳細に把握することを研究目的とする。

3. 研究の方法

具体的な研究方法としては、①サーマルマネキンを用いた人体表面静圧及び対流熱伝達率測定、②バーチャルマネキンを用いた人体周辺気流の CFD 解析による人体表面静圧及び対流熱伝達率の予測、③3D プリントでサーマルマネキン形状を再現した縮小人体模型による風圧測定を行い、各手法による測定結果の比較を行って精度検証しながら、人体周辺の物理量データを蓄積する。また、④被験者による気流感や気流閾値に関する主観評価を行い、気流感に関する心理量の基礎データも蓄積する。

4. 研究成果

4.1 人体表面静圧及び対流熱伝達率の把握 (研究方法①, ②, ③)

(1) 実験概要

Fig.1 に示す東京工芸大学風工学研究センターのアクティブ制御マルチファン人工気候室にサーマルマネキン (Newton 20-Zone Sweating Thermal Manikin, 米国 MTNW 社製, 以降 TM と記す) を椅座位で設置し、TM を対象として Fig.2 に示す測定点において人体表面の対流熱伝達率と静圧の測定を行った。対流熱伝達率測定は、Fig.3 に示すように TM 上の測定点に 3cm 角の輻射熱センサ (CAPTEC 製, 輻射センサー RF), その隣に 1cm 角の熱流センサ (江藤電気製, S11A) を並べて設置し、部位毎に 1 秒間隔で熱流と表面温度を順次貼り替えながら、局所対流熱伝達率を測定した。また、TM から出力される人体各部位の発熱量と表面温度を 10 秒間隔で記録し、輻射熱センサにより測定された放射熱を発熱量から差し引くことで、部位平均対流熱伝達率を算出した。Table1 に示す条件で、実験を行なった。TM は表面温度一定制御とし、48 台の DC ファンをインバーター制御することで一定一様気流を発生させた。

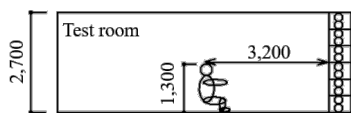
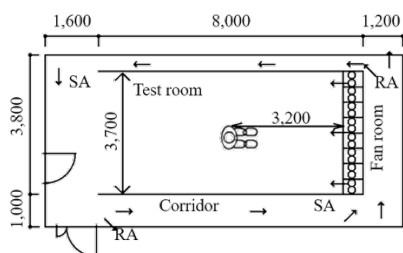


Fig.1 Test room

Table1 Experimental conditions

Air flow Direction	Forward flow
Air flow Velocity	$U=0, 1.0, 2.0$ m/s
TM surface	34.0°C
Test room	26.0°C

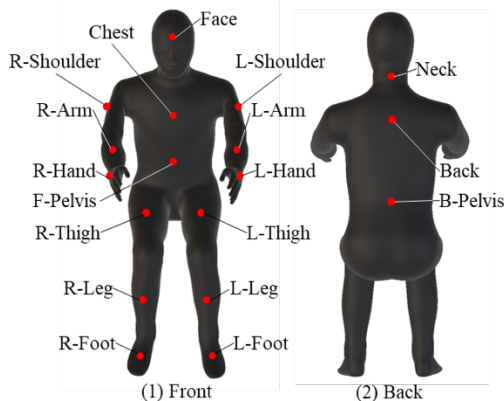


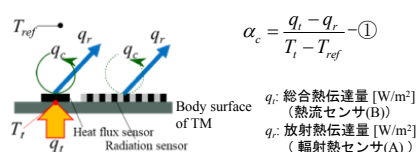
Fig.2 TM shape and measurement point

また、TMの人体表面静圧の測定実験を行った。測定には、アプローチフローの動圧については微差圧計(Validyne社製, DP45)を用い、人体表面静圧には微差圧計(Halstrup社製, P26)を用い、それぞれ1秒間隔で30秒間の測定を行った。また、熱式風速計(テスト社製, Testo 405i)を用いてアプローチフロー風速を測定した。

(2)CFD解析概要

本解析では、人体正面からの定常一様流に対して、椅座位状態の人体周辺のCFD解析を行った。人体形状モデルには、TMを3Dスキャンしたデータを修整したものをを用いた。この人体形状モデルの表面を、TMの部位面積に従って領域分割し、人体各部位での局所及び部位平均の対流熱伝達率の算出を行った。解析空間としてFig.4に示す実験室を模した空間(3.7m×8.0m×2.7m)を作成し、測定実験と同じ位置に人体形状モデルを設定した。本研究では、実験室の流れ場を再現するため、測定実験と同様に人体形状モデルの正面から気流を発生させ定常解析を行った。Table2にCFD解析条件を示す。人体形状モデル表面には既往研究を参考に表面の第1層を0.5mmとし、変化倍率1.1倍で14層(計13.99mm)挿入した。人体表面のY+の平均値は4以下であった。他の空間には、Fig.5に示す通り人体から遠ざかるにつれ格子サイズが大きくなるように、ポリヘドラルメッシュを配置した。

Method 1: 輻射熱センサを用いた局所対流熱伝達率



Method 2: 輻射熱センサを用いた部位平均対流熱伝達率

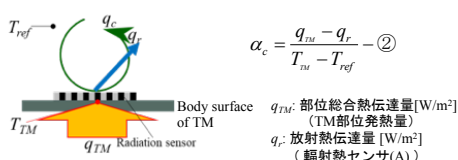


Fig.3 Calculation method of CHTC

Table2 Analytical conditions

解析ソフト	scFLOW v2021.1
計算アルゴリズム	定常解析 (SIMPLEC法)
メッシュ数	約3200万
乱流モデル	SST $k-\omega$ モデル
スキーム	移流項: QUICK
定常判定	10^{-4}
壁面境界	静止壁、断熱
人体表面境界	表面温度34°C一定 または、非発熱
流入境界	流速: 1.0m/sまたは2.0m/s 温度: 26°C
乱れ強さ	乱流統計量: $k=0.0001\text{m}^2/\text{s}^2$ $\epsilon=0.0001\text{m}^2/\text{s}^3$
流出境界	静圧規定 $P=0\text{Pa}$

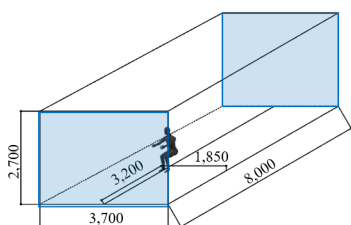


Fig.4 Analytical domain

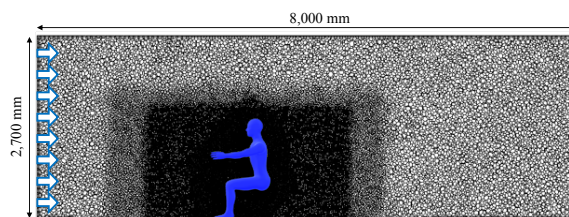


Fig.5 Mesh layout

(3)人体周辺対流熱伝達率の実験結果と解析結果

Fig.6に風圧係数の測定結果とCFD解析結果を示す。風圧係数は、TM表面静圧をアプローチフローの動圧で基準化して計算した。TM実験において、FaceやChest、F-Pelvis、Legといった部位では、各発熱条件や風速条件による差異は見られなかった。一方で、Neck、Back、B-Pelvis、Shouldersといった部位では、1.0m/s・発熱条件で大きく負圧側にシフトしている傾向が見られる。この原因として、気流可視化実験で確認された人体発熱による熱上昇流の影響が考えられる。低風速条件では、熱上昇流は、人体の背面側の後流域等の気流が直接衝突せず人体表面近傍の風速が小さくなると考えられる部位において相対的に影響が大きく、それらの部位では熱上昇流が支配的な流れとなり、非発熱時と比べて静圧を負側にシフトさせる作用があると考えられる。

Fig.7に人体形状モデル表面での対流熱伝達率の測定結果とCFD解析結果を示す。解析における対流熱伝達率は、人体形状モデル表面の熱流を表面温度と室温の差で除して算出した²⁾。両者を比較すると、部位局所において熱流計で測定した局所測定値(Method1)と部位局所の解析値、TMの発熱量を基に算出した部位平均測定値(Method2)と部位内の解析値を平均した部位平均解析値は、それぞれ部位間の大小などの傾向は概ね一致している様子が見られた。FaceやLegなど風上側で気流が直接人体に衝突する部位では、局所測定値と局所解析値との、部位平均測定値と部位平均解析値との差がそれぞれ大きくなる傾向が見られた。NeckやShouldersなど風下側の気流が直接人体に衝突しない部位では、各値の差異が小さくなった。また、Fig.8に示す通り、解析値では2.0m/s条件で各部位内の局所値のばらつきが大きくなっており、特にHandのように表面形状の複雑な部位や、Shoulders、Leg、Footのような風上側と風下側の面の両方を含む部位では、対流熱伝達率の分布が大きい結果となった。

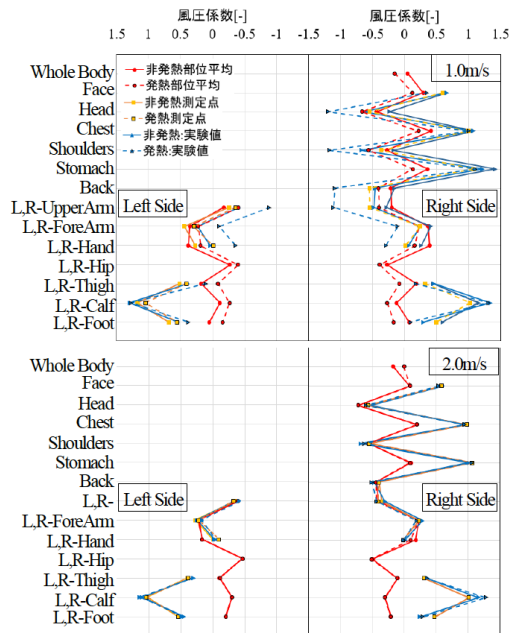


Fig.6 Measured and calculated wind pressure coefficient

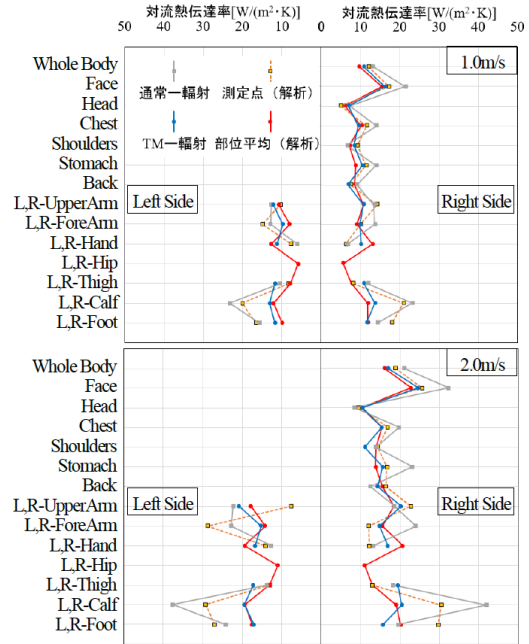


Fig.7 Measured and calculated CHTC

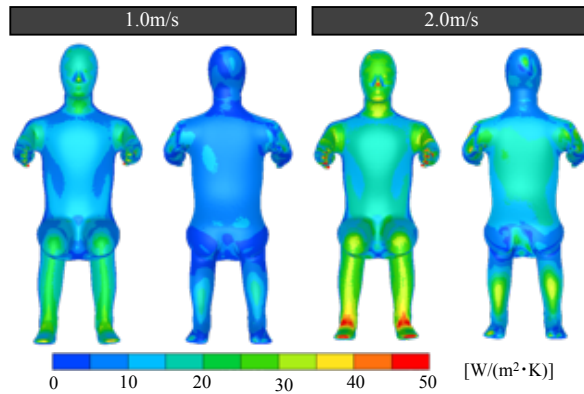


Fig.8 CHTC contour on body surface

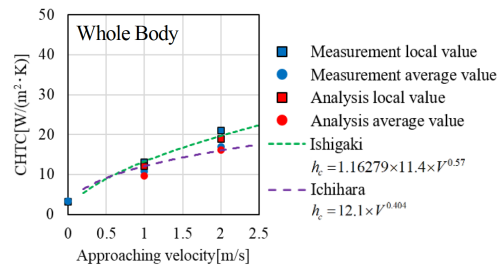


Fig.9 CHTC with approaching velocity of whole body

Fig.9に、TM全身の対流熱伝達率について、測定及び解析結果と既往研究実験式との比較を行った結果を示す。局所測定値及び局所解析値は石垣ら³⁾の実験式に近く、部位平均測定値、部位平均解析値は市原ら⁴⁾の実験式に近くなった。これは、石垣らは実人体の局所に熱流計を設置して熱流量を測定した一方で、市原らはサーマルマネキン部位別の熱損失量から熱伝達率を求めていることが要因であると考えられる。本研究と既往研究では、マネキン形状や測定点に若干の差異はあるものの、対流熱伝達率を局所で測定した値から算出するか、部位平均として算出するかという算出手法の違いが大きく影響したと考えられる。

Fig.10に、解析結果から得られた人体全部位の対流熱伝達率(局所解析値、部位平均解析値)と、対応する壁面摩擦速度との相関を示す。概ね部位平均解析値は正の相関を示している。風上側のLegやFootといった気流が直接衝突する部位では、壁面摩擦速度の増加に伴い局所のCHTCが他の部位に比べて大きくなる部位があることがわかる。これは表面流による熱伝達ではなく、面に直接衝突する気流による熱伝達が生じていると考えられる。また、B-PelvisやNeckといった風下側の部位は後流域であるため、対流熱伝達率と壁面摩擦速度が小さくなったと考えられる。

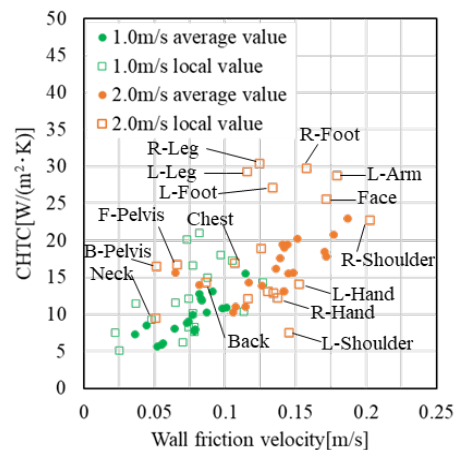


Fig.10 Correlation between wall friction velocity and CHTC

4.2 気流を知覚する風速と冷覚閾値に関する被験者実験（研究方法④）

(1) 実験概要

2021年8月26日から9月24日までに、摂南大学の恒温恒湿室（ESPEC製：TBR-3HAOPX）を25°C50%に制御して、被験者の左前腕部の冷覚閾値と気流を知覚する風速を把握する被験者実験（健康な青年男性12名と青年女性12名）を行った。冷覚閾値の測定は、温冷覚閾値計（intercross製 Intercross-210）を用いて、25mm角のプローブを接触させる部位の皮膚温に近い温度の状態に密着させて、熱流束が $\pm 30\text{W/m}^2$ 以下としてから0.3°C/秒で温度を低下させて冷刺激を与えた。冷刺激を知覚した時、被験者にスイッチを押させることにより冷覚閾値を測定した。気流を知覚する風速の測定は、40 cm角の縦風洞を木材で製作し、上部には天井埋込形換気扇（Panasonic製 FY-38BS7）を下部には給気口を設置し、電圧調整器を用いて風速を制御した。縦風洞には、腕部を挿入できる横穴を設けており、横に伸ばした左前腕部が風洞に入るようにした。電圧を0Vから徐々に上げて、気流を知覚した時の電圧を電圧計（HIOKI製：DT4256）で測定した。申告に慣れてもらうために、3回の練習後に気流を知覚する電圧を15回測定した。気流に曝露される時の前腕部の皮膚温は、0.2mmT型熱電対をデータロガ（江藤製：CADAC3）に接続して測定した。電圧と風速の関係を算出するために、左前腕部の位置に熱線式風速計（KANOMAX製：Model6531）を設置して、30Vから65Vまで5V間隔で換気扇を2分間稼働させた時の風速を1秒間隔で測定した。測定データから回帰直線を得て、電圧を風速に変換した。

(2) 実験結果

Fig.11に、冷覚閾値と気流を知覚する風速の関係を示す。冷覚閾値が高いほど、気流を知覚する風速は大きくなった。冷覚の感度が同程度であっても気流を知覚する風速が0.2m/s～0.3m/sも異なっていることから、被験者の身体特性や暑がり寒がりなどの体質で群の分類を試みたが相関係数が高くなる群を探し出すことができなかった。そのため、涼を得る手段と扇風機の使用という質問の回答を用いて分類することとした。Fig.12に、風を好む群A、室温低下を好み扇風機を使用する群B、室温低下を好み扇風機を使用しない群Cに分類して、冷覚閾値と気流を知覚する風速の関係を示す。室温低下を好む群Bと群Cの違いは見られなかったが、室温低下を好む群B・Cと比べて風を好む群Aは、気流を知覚する風速が大きく相関が高くなった。涼を得る時に風を好む群は、日常における繰り返しの体験により気流を知覚する風速の閾値が高く鈍化するが、冷覚閾値との関係が強くなったと考えられる。



Fig.11 Relationship between cold threshold and air velocity that perceives airflow

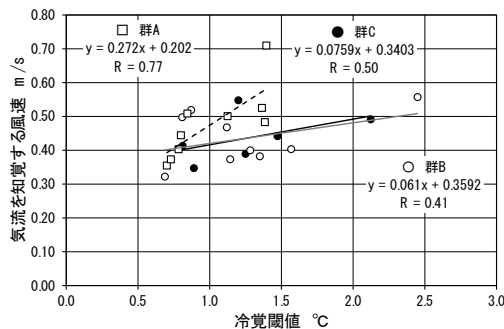


Fig.12 Effect of the means of obtaining coolness on air velocity that perceives airflow

4.3 まとめ

本研究では、定常気流曝露時の人体皮膚表面の気流分布及び対流熱伝達率、静圧について測定実験を行い、人体形状モデル周辺気流のCFD解析結果と比較して、解析の精度検証と各物理量の詳細な検討を行った。実験と解析の結果について、全体的な傾向は概ね一致しており、特に高風速条件では実験値と解析値がよく一致する傾向が見られた。一方、低風速の条件では、人体発熱による熱上昇流が各物理量に影響を及ぼすと考えられる。また、前腕部に冷刺激または気流を曝露して、気流を知覚する風速と冷覚閾値の関係について被験者実験を行い、冷覚の閾値が鈍化する被験者ほど気流を知覚する風速は大きくなることが明らかになった。日常生活下での涼を得る手段の違いによる差異も見られた。今後は、より低風速条件について、同様の測定及び被験者実験を行う予定である。

参考文献

- 1) ANSI/ASHRAE STANDARD55-2020, 2020
- 2) 向雄基, 伊藤一秀, 林徹夫: Virtual Manikinを対象とした人体表面各部位の対流熱伝達率データベース(第二報)座位形状-水平方向気流を対象とした対流熱伝達率データ, 日本建築学会九州支部研究報告47号, pp.301-304, 2008.3
- 3) 石垣秀圭, 堀越哲美, 持田徹, 土川忠浩, 磯田憲生, 久保博子: 人体の対流熱伝達と風速の生理心理反応に及ぼす影響, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.865-868, 1991.10
- 4) 市原真希, 齋藤正文, 西村美加, 田辺新一: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集第501号, pp.45-51, 1997.11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本新, 桃井良尚
2. 発表標題 気流曝露時における人体表面の熱流・圧力分布の定常CFD 解析に関する研究
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山本新, 桃井良尚
2. 発表標題 室内気流設計のための気流感メカニズムの把握に関する研究（その1）定常気流曝露時の人体表面の対流熱伝達率・圧力分布のCFD 解析
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桃井良尚, 山本新
2. 発表標題 人体表面の対流熱伝達率・圧力分布のCFD 解析手法に関する基礎的検討
3. 学会等名 空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 桃井良尚
2. 発表標題 人体の気流感メカニズムに関する研究（その1）境界層メッシュ及び乱流モデルが人体表面の対流熱伝達率・静圧に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東幸一郎, 桃井良尚
2. 発表標題 人体の気流感メカニズムに関する研究(その2)シーリングファン気流が人体表面の対流熱伝達率・静圧に及ぼす影響
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水谷虹作, 桃井良尚, 宮本征一, 義江龍一郎
2. 発表標題 定常気流曝露時における人体各部位の対流熱伝達率に関する研究
3. 学会等名 人間-生活環境系シンポジウム報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮本征一, 桃井良尚
2. 発表標題 気流を知覚する風速と冷覚閾値の関係 25・50%環境下における前腕部への曝露の場合
3. 学会等名 人間-生活環境系シンポジウム報告集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水谷虹作, 桃井良尚, 宮本征一, 義江龍一郎
2. 発表標題 CFD解析による定常気流曝露時における人体各部位の対流熱伝達率の予測
3. 学会等名 空調調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集
4. 発表年 2022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 分担 者	宮本 征一 (Seiichi Miyamoto) (80273316)	摂南大学・理工学部・教授 (34428)	

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
---------	---------