

PIV 計測と CFD 解析による衣服内気流の 詳細把握に基づく被服時の人体温熱環境評価

豊橋技術科学大学 島 崎 康 弘
(共同研究者) 同 児 玉 壮
同 安 藤 竜之介

Investigation on Air Flow Inside Clothing Microclimate and Clothed Human Thermal Environment Through PIV Measurement and CFD Analysis

by

Yasuhiro Shimazaki, Takeru Kodama, Ryunosuke Ando
Toyohashi University of Technology

ABSTRACT

The under-garment air, namely the clothing microclimate is in general different air conditions from the ambient air conditions, and it plays an important role in human thermal environments. Extensive research has been published on clothing insulation, however, knowledge about the formation of the clothing microclimate is limited. In order to develop a methodology to understand the clothing microclimate, in the present study, the applicability of PIV (Particle Image Velocimetry) and CFD (Computational Fluid Dynamic) to clothed human thermal environment is examined. From the comparisons of different air-gap sized clothed humans, the observed distributions of air temperature and air flow are reasonably explained. The relationship between the average Nusselt number and the Rayleigh number agrees well with results of previous studies. From the subjective experiments with wearing different air-gap sized clothing, air flow in clothing microclimate can be induced for loose-fitting wearers, and thus loose-fitting wearers can feel the ventilation inside the clothing microclimate. The

different conditions in clothing microclimate can be considered using the human thermal load evaluation. The human thermal load is lowered for loose fitting because of increases in convective heat loss and evaporative heat loss. A series of studies presented here can be utilized with accuracy for future clothing designs and fabrications.

要 旨

ヒトが着衣することで、人体と衣服、また衣服と衣服との間に生じる微小な空気層に外環境とは異なる衣服内気候が形成されるが、その形成や影響に関する解明が不十分であり、人体温熱環境評価に十分に反映されていない。実験的手法であるPIVおよび数値解析的手法であるCFDを用いて衣服内気候の把握を行うとともに、それらを活用して人体温熱環境評価を行う方法を検討した。異なる空気層の厚さにおける検討例から、衣服内気温、気流また対流の度合いを示す平均ヌセルト数の変化傾向に関して妥当な結果を得ることができた。また、屋外被験者実験より、異なる空気層の厚さの着衣時における熱損失や気流形成は、人体熱負荷量で定量的に評価ができ、被験者による心理申告と同様の傾向を示した。このことより本手法による一連の評価法は、一定程度の精度にあることが確認でき、今後ウェア設計などへの応用が期待される。

緒 言

我が国で2005年に始まった夏の軽装クールビズ(COOL BIZ)の取り組みはすっかり定着し、着衣の持つ温熱環境調整作用に基づく快適性や省エネルギー対策は広く知れ渡るところとなった。気候変動や自国開催の東京オリンピックの影響もあり、夏季・屋外といった過酷環境における安全・健康・パフォーマンスを実現する機能的な作業・スポーツ用被服への関心は高まっている。

人体の温熱的快適感や暑さ寒さの感覚(温冷

感)を決めるヒトの温熱状態は、人体とその周囲環境との間の熱授受である人体熱収支に基づき説明できる。着衣量は、Fangerによって提案された快適方程式において気温などの環境要素や代謝量とともに人体温熱環境に寄与度の大きい六大要素と定義され¹⁾、温熱快適性へのさまざまな影響が検討されてきた。人体温熱環境評価や人体熱収支算出に際し、被服性能は乾式の熱伝導特性であるクロ値による評価が広く通用している。着衣を人体と外環境を隔てる抵抗体として扱い、その断熱性能としてクロ値が求められる²⁾。他方、ヒトは被服することで、「衣服内気候」と呼ばれる人体と衣服、また衣服と衣服との間に生じる微小な空気層が外環境とは異なる温度・湿度・気流を形成する。外環境の気流などがクロ値に与える影響は広範に研究されるものの、衣服内気候に関してはその形成や影響に関する解明が不十分であり、人体温熱環境評価に十分に反映されていない。

このような背景から、本研究は、環境-被服-人体系の複合的な熱輸送現象を把握、またPIVやCFDといった手法を用いることで衣服内気候の見える化を実現し、的確に着衣時の人体熱収支を導入することで人体温熱環境評価を実施できる方法論を確立することを目的とした。本報においては、主に衣服内空気層の厚さが異なる際の人体発熱に起因する衣服内の自然対流を対象に行った検討を報告する。

1. 実験的手法

1. 1 PIV測定

PIV (Particle Image Velocimetry ; 粒子画像流速

測定法)とは、通常目で視る事ができない流体の速度を非接触で可視化・測定する手法である。流体中(今回は空気)にトレーサー粒子を流入させ、レーザーシート光により照射された複数の粒子画像から、2次元平面内の速度およびその方向を求めることができる。

1. 2 モデル実験概要

環境-被服-人体系の温熱環境形成の特徴を把握する目的から、移動現象を無次元化して考えた。そこで、熱源ヒーターを人体、また、着衣下の粒子画像を捉える必要があるため、透明塩化ビニルシートを着衣、の模擬体としてそれぞれ用いる着衣人体を再現した実験モデルを作成した。ヒーターの発熱量は代謝量に応じて設定する。高さは200mmであり、衣服内気候の複数点にて温度、熱流束の測定、またPIV測定を行った。定常とみなせる状態にて測定した。

1. 3 評価量

衣服内気候まで含めた系において、平均熱伝達率 h_m および平均ヌセルト数 Nu_m を以下で定義する。

$$q_{conv} = h_m(T_{heater} - T_{env}) \quad (1)$$

$$Nu_m = \frac{h_m L}{k} \quad (2)$$

ここで、 q_{conv} はヒーター表面から対流により移動する熱量[W/m²]、 T は空気温度[°C]、 L は代表長さ[m]、 k は空気の熱伝導率[W/(m·K)]であり、添え字heaterおよびenvは、それぞれヒーター表面および周囲環境を表す。ヒーターから発生する熱量より、伝導およびふく射による熱移動を減じて q_{conv} は算出される。また、 k は膜温度(T_{heater} と T_{env} の平均値)における値を採用した。

高速度カメラを用いて、モデルの鉛直高さ方向を3区間(H = 0, 100, 200mm)に分け粒子画像を取得し、PIVによる気流測定を行った。粒子画像

1枚毎の流速ベクトルの方向成分を一定時間における全画像で平均化し、その区間の流速として扱う。PIV計測により得られた流速は式(3)のフルード相似則を用いて人体スケールに変換できる。

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \quad (3)$$

ここで、 Fr はフルード数[N.D.]、 U は流速[m/s]、 g は重力加速度[m/s²]である。

1. 4 人体形状の反映

実験スケールの決定およびCFD解析に用いるため、衣服内空気層厚さの異なるTシャツ(ルーズフィットおよびタイトフィットと呼ぶ)を用いて着衣時および裸体時において高さ方向5mmごとに3Dスキャン計測を行った。得られた断面形状から、自作プログラムにより5mmごとの断面積のデータを積み重ね、衣服着用時の人体形状および衣服内空気層の形状を算出する。健康な男子学生9名に協力を得て測定を行った。

スキャンデータの中から代表的な例を図1に取り上げる。タイトフィットでは空気層厚さの変化は小さい一方、ルーズフィットでは衣服の下方から上方にかけて空気層が狭くなっている傾向がみられた。これを基に、衣服内空気層の一定ものと高さ方向が垂直から-9°傾斜し上部開口を小さくした形状とを図2のようにモデル化した。なお、両者の衣服内空気体積は同一である。クロ値の測定条件を参考に、気温21°C、湿度50% RHの人工気候室内で実験を行った。

2. 数値解析的手法

2. 1 CFD解析

CFD(Computational Fluid Dynamics; 数値流体力学)とは、コンピュータを用いて流体に関する支配方程式を解くことで、流れや温度などの状態を予測・可視化する手法である。複雑で様々な状況を実験することなく知ることができるため、設

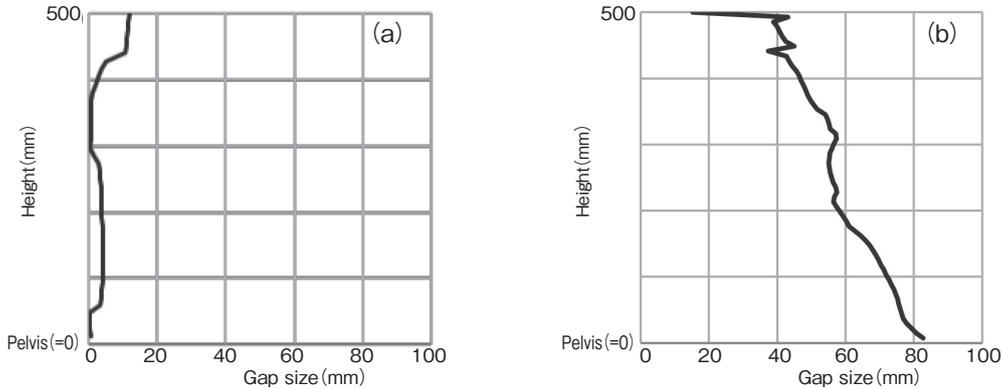


図1 異なる着衣の衣服内空気形状例 (被験者A)
(a) タイツフィット, (b) ルーズフィット

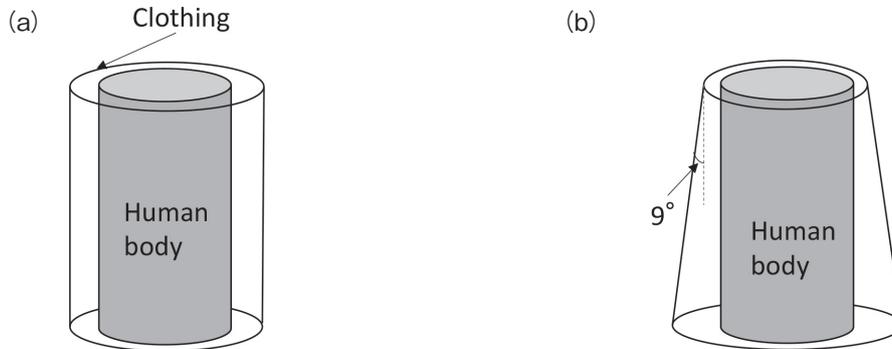


図2 スキャンデータに基づくCFDモデル形状
(a) タイツフィット, (b) ルーズフィット

計において有益なツールと考えられる。一方で、CFD解析においては、どれだけ正確にモデル構築や条件設定ができるかが重要となる。

2. 2 CFD解析概要

室温21℃、湿度50% RH、大気圧1013hPa環境において、代謝量80W/m²として、先の3Dスキャンによりモデル化した2つの形状に関して汎用ソルバーを用いて衣服内気候の定常計算を行った。

3. 着衣人体の温熱環境評価

3. 1 人体熱収支への導入

人体温熱状態を推察するために、人体熱収支を把握することは重要である。ここでは、筆者らの提案する人体熱負荷量³⁾を例に衣服内気候と人体

温熱環境の関係性について検討する。

人体熱負荷量 F_{load} は、人体熱収支による不均衡を人体への負荷と捉えた考え方で、式(4)となる。

$$F_{load} = M - W + R_{net} - C - E \quad (4)$$

ここで M は代謝量、 W は機械的仕事量、 R_{net} は正味ふく射量、 C は対流熱損失量、 E は蒸発損失量を示し、単位は全てW/m²である。このうち対流熱損失量 C は皮膚顕熱損失量 C_{sk} と呼気顕熱損失量 C_{res} の和であり、着衣は C_{sk} のみに影響し以下とかける。

$$C_{sk} = h_m(T_{sk} - T_{env}) \quad (5)$$

ここで添え字 $_{sk}$ は皮膚を表す。蒸発熱損失 E に関しても同様に対流熱伝達率を置き換えられる。算出の詳細は既報^{3,4)}を参照にされたい。

3. 2 被験者実験による検証

タイトフィットおよびルーズフィットTシャツを用いて、速度81m/sで歩行した被服着用時の人体温熱環境評価を実施した。着衣は、フィット感以外は同等の仕様となっている。実験は2020年夏季に屋外オープンスペースで30分間実施された。物理的環境を表す項目として、気温、湿度、上下方向日射量および赤外放射量を1分間隔で、気流方位・速度を0.1秒間隔でそれぞれ測定した。着衣の状態を表す項目として、着衣表面温度（4点）着衣内外近傍空気温度・湿度（8点）を1分間隔で、また着衣の重量変化を実験前後でそれぞれ測定した。ヒトの状態を表す項目として、Hardy-DuBoisに倣った皮膚表面温度7点、深部温度を1分間隔で、また体重変化を実験前後でそれぞれ測定した。被験者実験に際し、ASHRAEスケールに倣い、温冷感を7点法（-3：寒い～3：暑い）で、温熱快適感を5点法（-2：不快～2：快適）で、感じる衣服内気流感を5点法（0：感じない～4：感じる）でそれぞれ申告してもらった。被験者は3Dスキャンに協力を得た男子学生9名であり、所属機関の倫理委員会の承認を得て実験実施された。

4. 結果と考察

4. 1 モデル実験結果

本研究に先立ち、裸体（非着衣）時を模した垂直加熱平板の平均ヌセルト数 Nu_m と高さ方向が代表長さ基準のレイリー数 Ra_H の関係性を求めたところ、既報と良好に一致しており、測定系の精度は担保されることを確認した。

着衣人体を模擬したモデルにおける、温度や速度の分布例を図3および図4に示す。また、横軸に空気層の厚さが代表長さ基準のレイリー数

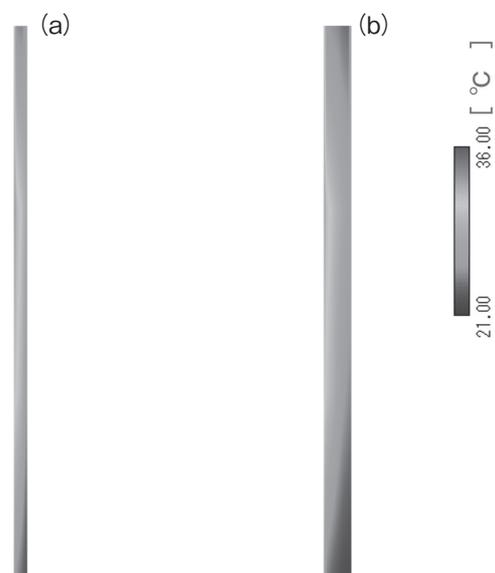


図3 実測による衣服内空気層の温度分布
(a) Gap=5 mm, (b) Gap=15 mm

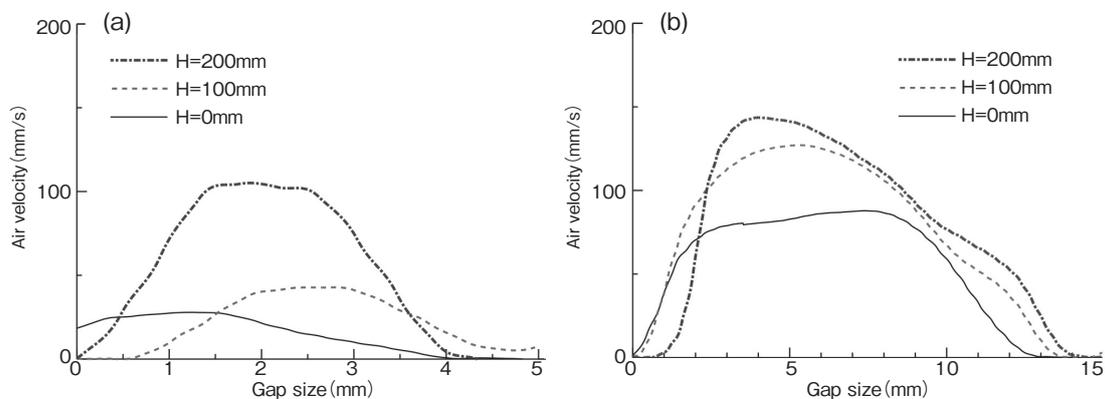


図4 異なる高さにおける流速分布
(a) Gap=5 mm, (b) Gap=15 mm

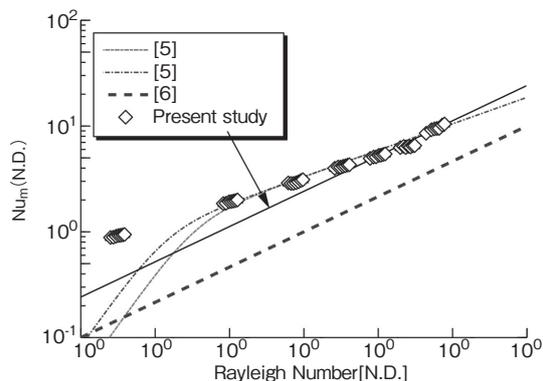


図5 平均ヌセルト数とレイリー数の関係

Ra_x をとって、平均ヌセルト数 Nu_m をプロットしたものを図5に示す。自然対流は流体の温度上昇によって誘起されるため、鉛直方向上方に高温域が形成される。また、高温範囲は上方へ行くほど空気層厚さ方向遠方へとその範囲は広がる。一方で、着衣上端では相対的に冷たい空気が空気層内に流入する。結果的に鉛直方向中央付近に空気温度の高い領域が形成される。空気層厚さに関して、それが大きくなるに従い、上端および下端から流入する相対的に冷たい空気の影響を受けやすくなる。また、熱源から遠方へは熱が伝達されにくいいため、空気層の厚さ方向遠方に向かって温度が低下している。流速は、人体、被服はそれぞれ周囲空気より高い温度となり気流を形成する。人体の方が被服より高温であり、人体近傍の流速の方が速い。鉛直方向上方ほど流速が早い傾向が確認される。最終的には、空気層両端がそれぞれ単独平板のように流体場を形成し、その重ね合わせとして気流速が計測されているようである。従って、流速のピークは空気層の厚さ方向中央よりも人体側へ寄っている。空気層厚さに関して、それが大きくなるに従い、流速は全体的に早くなる傾向が観察された。

実験結果より、最小二乗近似を用いて平均ヌセルト数は以下と整理される。

$$Nu_m = 0.242Ra^{1/3}$$

垂直二重平板についての既報^{5,6)}と比較して、

良好な一致を見たといえる。着衣人体をより正確に支配する代表長さを検討して無次元数整理することで一層の精度向上を図れる余地はある。

4.2 CFD解析結果

2つの形状による解析結果の例として、風速および分布を図6および図7にそれぞれ示す。人体生理発熱による上昇気流は鉛直上方で発達し、上方開口部から排気される。開口面積が小さいと(傾斜時)、流速は速くなるものの流量は減少し、結果的に衣服内空間に熱がこもる。このようにCFD解析により、定性的・定量的に形状の影響を観察できるようになった。また、形状スキャンデータを活用することでより現実的なモデリングや最適化が可能であり、デジタルファブリケーションへつながると考えられる。

4.3 人体温熱環境評価

実験環境は、平均気温32.6℃、平均湿度54.5%RH、平均風速1.3m/s、平均全天日射615W/m²であり、典型的な夏の気候であった。ルーズフィットとタイトフィットTシャツによる人体熱負荷量、心理申告の違いを図8および図9にそれぞれ示す。結果は、定常的に考えて時間平均値として求めた。モデル実験同様に、空気層の厚さが大きいと気流が発達しやすく、結果的に対流による熱損失(CおよびE)を増大させ、人体熱負荷は低減される。被験者の感覚としても有意に有風感は異なっている。熱損失の増大に伴い、ルーズフィットの方が温冷感で冷涼、温熱快適感で良好な傾向があるが有意差は存在しなかった。このようにモデル実験により衣服内気候を観測することを通して、着衣人体の温熱環境評価へつなげることができた。

5. まとめ

本報では、実験的手法であるPIVおよび数値解

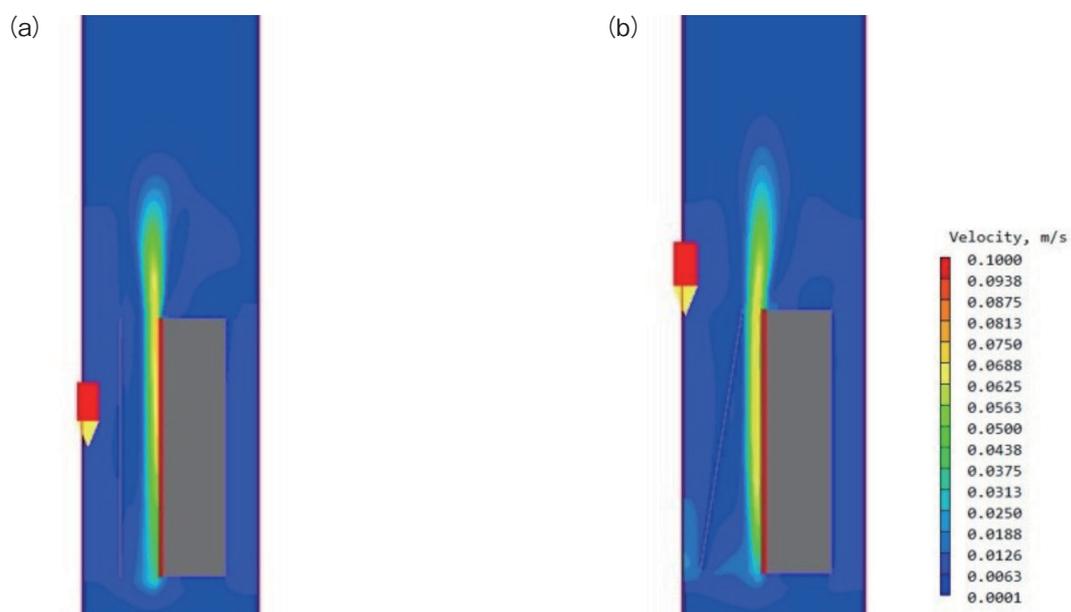


図6 CFD解析による衣服内流速分布
(a) タイツフィット, (b) ルーズフィット

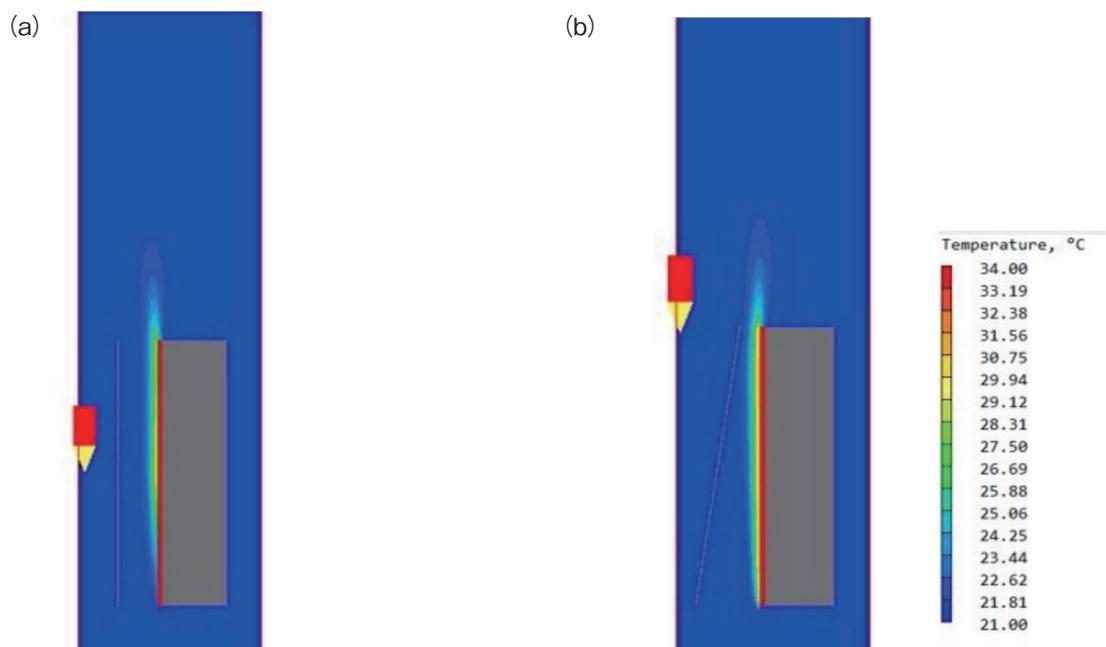


図7 CFD解析による衣服内温度分布
(a) タイツフィット, (b) ルーズフィット

析的手法であるCFDを用いて衣服内気候の把握を行うとともに、それらを活用して人体温熱環境評価を行う方法論を示した。ここでは少しの例を

示すのみだが、一定程度の精度をもって評価可能であり、今後ウェア設計などへの本手法の活用が期待される。

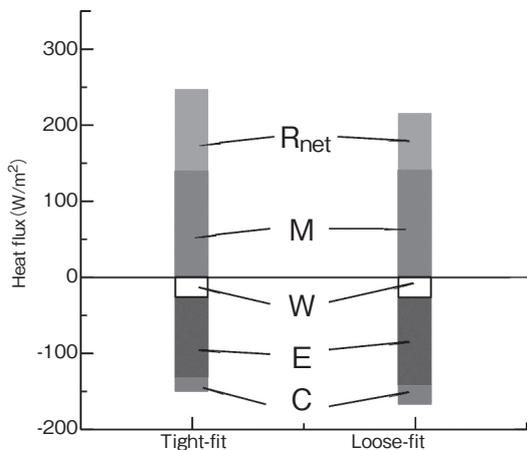


図8 人体熱負荷の内訳

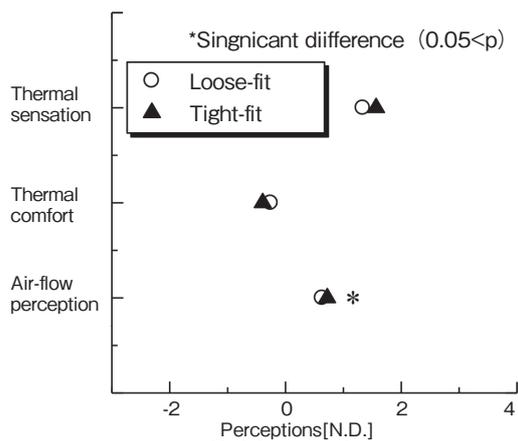


図9 被験者心理申告

謝 辞

実験実施に際し学生被験者に協力を頂いた。本研究は、公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団の助成を受けて行われた。また、本研究の一部は、デサントジャパン株式会社と共同で実施された。ここに記して謝意を表す。

文 献

- 1) P.O. Fanger, Thermal comfort, Danish Technical Press (1970)
- 2) ISO9920, Ergonomics of the thermal environment- Estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble, ISO (2007)
- 3) 島崎康弘ほか, 人体熱負荷に基づく温熱快適性指標の提案, 日本冷凍空調学会論文集, 26 (1), pp.113-120 (2009)
- 4) Y. Shimazaki et al., Experimental Determination of Pedestrian Thermal Comfort on Water-Retaining Pavement for UHI Adaptation Strategy, *Atmosphere*, 12, p.127 (2021)
- 5) A. Bar-Cohen et al., Thermally Optimum Spacing of Vertical, Natural Convection Cooled, Parallel Plates, *Journal of Heat Transfer*, 106 (1), pp.116-123 (1984)
- 6) K.M. Kim et al., Experimental study of turbulent air natural convection in open-ended vertical parallel plates under asymmetric heating conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 159, p.120135 (2020)