

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K02364

研究課題名（和文）衣服内換気の最適化に基づく快適被服デザイン

研究課題名（英文）Comfortable clothing design based on optimization of clothing ventilation

研究代表者

島崎 康弘（SHIMAZAKI, Yasuhiro）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20584270

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：衣服内換気を軸に被服により快適性を創造しようとする試みを行った。換気や衣服気候の物理的理解を進めるため、模擬人体を用いたモデルにて、粒子画像流速測定を用いて気流性状、小型温度・湿度の多点計測から伝熱則を導いた。着衣設計に人体特性を生かすため、モーションキャプチャーを用いた形態・動態計測、また被服時の人体熱収支を算出するため被服近傍モデルと人体熱収支式を結合して、統合的に快適性を測定できる手法を確立した。実生活で活用できる被服を創造するため、プロトタイプ作成などに対して着用者による検証を行うことで、被服パターンに適応可能となる快適な被服デザインの総合的評価を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

被服は着衣者の人体温熱状態や快適性に大きな影響を持ち、また着衣・着装を変化させることで即効性をもってこの微空間を着衣者好みに創り上げることができる。一方で衣服気候形成に関わる物理的メカニズムは非常に複雑現状の被服設計は経験則や被験者評価に基づくものも多く、換気の工夫が快適被服設計に生かされていない。本研究では、快適被服設計を実現するために、換気による物理的な衣服気候形成の理解にとどまらず、被服素材特性、人体の形態や動作、生理機能と被服・外環境の関係性を理解し、また同時に被服機能に関する物理を被服構成に反映する被服学の知見など横断的に整理を行い、機能的な被服を提案可能とした。

研究成果の概要（英文）：In this study, an attempt to design comfortable clothing based on the optimization of clothing ventilation was examined. First, to gain an understanding of the physical phenomena of the formation of clothing ventilation, heat transfer and flow analyses were conducted using multi-point temperature and humidity measurements and the PIV method. Because clothing is of course for humans, its usability was evaluated using a motion capture system for human dynamics, and the overall wearer's comfort evaluation method was established. As an example for practical clothing applications, a prototype was prepared, and its effect on clothing ventilation and comfort was verified using subjects. A design methodology for comfortable clothing based on the optimization of clothing ventilation was developed.

研究分野：建築環境工学，生活支援工学

キーワード：温熱快適性 換気 被服設計 素材物性 人間動態 気流解析 伝熱モデル

1. 研究開始当初の背景

被服は温熱環境六大要素の一つであり、人体温熱状態や快適性に大きな影響を持つ。例えば、温熱効果を応用したクールビズ・ウォームビズは定着し、また、昨今の猛暑に加え、オリンピック開催や働き方改革を受けて、夏季・屋外といった過酷環境における機能的なスポーツ・作業用被服への関心が高まっている。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。着衣・着装を変化させることで即効性をもってこの微空間を着衣者好みに創り上げることができ、被服設計を最適化することで健康、快適を保つことでQOL向上への貢献が期待される。

ヒトの温熱的快適感を決める人体温熱状態は、衣服内空気層などの周囲環境と人体との熱授受(人体熱収支)により決定される。被服の温熱効果に関して従来、乾式の熱伝導特性であるクロ(clo)値による評価が広く通用するが、快適域を超えて様々な状況の環境-被服-人体系の複雑かつ複合的な熱輸送現象(伝導伝熱、ふく射伝熱、対流伝熱、空気層の断熱、湿式熱移動、気流)を把握することで、衣服気候の形成を理解し、的確に人体熱収支に導入、また設計に生かすことが重要である。

気流を伴う衣服内換気は衣服気候形成を支配する重要要素として理解され、煙突効果、ふいご(ポンピング)効果、行灯効果など多様な形式が知られる。衣服気候形成に換気機構の寄与が大きいとされるが、衣服内気流の形成メカニズムや熱伝達特性、その影響因子や影響度について物理的に詳細に解明されていない。さらに快適や安全のエビデンスとなる人体熱収支との関係性が調査されていない。そのため、現状の設計は経験則や被験者評価に基づくものも多く、換気の工夫が快適被服設計に生かされていない。もとより衣服気候形成に関わる物理的メカニズムは非常に複雑である。快適被服設計を実現するために、換気による物理的な衣服気候形成の理解にとどまらず、被服素材特性、人体の形態や動作、生理機能と被服・外環境の関係性を理解し、また同時に被服機能に関する物理を被服構成に反映する被服学の知見など横断的な知識を統合的に活用した設計・評価指針が求められる。

2. 研究の目的

背景より、衣服内空気層の換気機構に着目し、衣服気候の可視化・数値シミュレーション手法(CFD:数値流体力学)により空気性状を把握することで、衣服内空気層の状態から人体熱収支・温熱状態(環境-被服-人体系)を総合的かつ定量的に評価できる手法を開発することを目的とする。これによって、衣服気候の換気機構やエネルギー輸送に関する物理的理解が進み、エビデンスをもって安全・快適な被服設計が可能となる。合わせて、衣服気候によって最適化された着衣デザインを、人間動態、生理、衣服加工等の観点から再検討し、人間工学の観点よりも真に快適な被服設計を行うための総合的な手法を確立する。これにより、温熱的観点だけでなく多角的に機能的な被服を提案可能となる。

3. 研究の方法

(1) 衣服気候の形成

換気や衣服気候の物理的理解を進めるために、自然対流を対象にして、例えば図に示すような模擬人体を用いたモデル実験にてPIV(粒子画像流速測定)を用いて換気気流性状を、また小型温度・湿度センサをトラバースすることで衣服内温・湿度を計測し、伝熱様相や気流・気候形成への影響因子とその影響度を特定する。

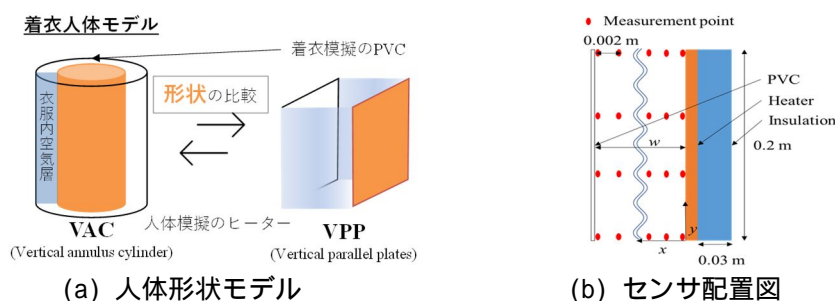


Fig. 1 モデル実験概略

(2) 被服時の人間動態や温熱状態

着衣設計に被服者の形態・動態特性を生かすため、3次元モーションキャプチャーにより形状・動作と快適性の関係を明確にすることで、被服設計に反映する。また、被服時の人体熱収支を算

出するため、上述の被服近傍モデルと人体熱収支式を結合して統合的に環境 - 被服 - 人体系の熱輸送を定式化することで、実験的また解析的に快適性まで測定できるシステムを確立する。

(3) 快適性を実現する衣服機構・形態

理論的に得た最適解を基に実生活で真に活用できる被服を創造するため、プロトタイプを作成などに対して着用者による検証を行うことで、被服パターンに適応可能となる快適な被服デザインの総合的評価を実現し、被服設計に反映する。

4. 研究成果

(1) 衣服気候の形成

衣服気候に影響を及ぼすと考えられる要素は複数あるが、被服デザインという観点から主に被服形態による影響の解明に取り組んだ。初めに被服しない暴露型のモデルにおいて既存の伝熱様相との比較を行うことで実験系の精度検証を行った。現象論を理解するため無次元数整理が有効であり、多くの場合、自然対流場においては $Nu = CRa^{0.25}$ とヌセルト数はレイリー数の0.25乗によって求められることから、本研究においてもこの方法に倣った。ここで、現象論として理解するために代表長さの捉え方が形態を示す重要な要素となり得ると考え、円筒形状では水力直径を平板形状では高さ空気層厚さの比を用いることを考案し、整理した。Fig.1に示したモデルに対して得られたヌセルト数とレイリー数の関係をFig.2に示すと、VAC(垂直二重円筒): $Nu = 0.65Ra^{0.25}$, VPP(垂直平行平板): $Nu = 0.56Ra^{0.25}$ と関係式が得られた。これは概ね既存のCの範囲と一致した。これはこの形状パラメータが自然対流の熱・気流形成にとって重要であることが示唆される。また、PIV解析により衣服気候の流れ場を解析することで、この結果の妥当性を定性的に確認することができた。

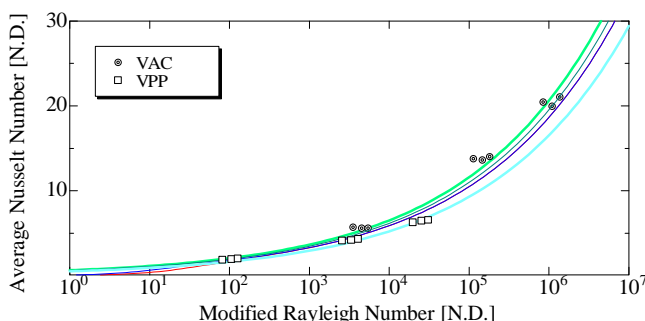
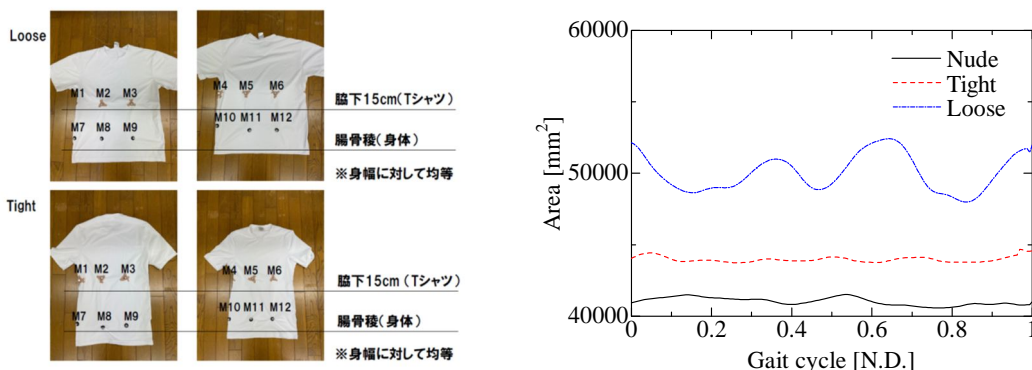


Fig. 2 ヌセルト数とレイリー数の関係

(2) 被服時の人間動態や温熱状態

上述より、空気層厚さの最適化の必要性(ほかに高さも)が示唆された、実生活時において被服の換気を有効に活用するために、異なるフィット性の着衣下・歩行動作時の体動を観察した。胸部と腰部にそれぞれ6つのマーカーを貼付して、変位を計測して、右脚と左脚の連続する一歩行周期を分析区間として、各部の面積(水平面)の推移を計ったものがFig.3である。これにより換気と人間動態との関連把握の試みを実施でき喚起効果の差異を観察できたとともに、動的な応用へのつながる方法論を提案できた。

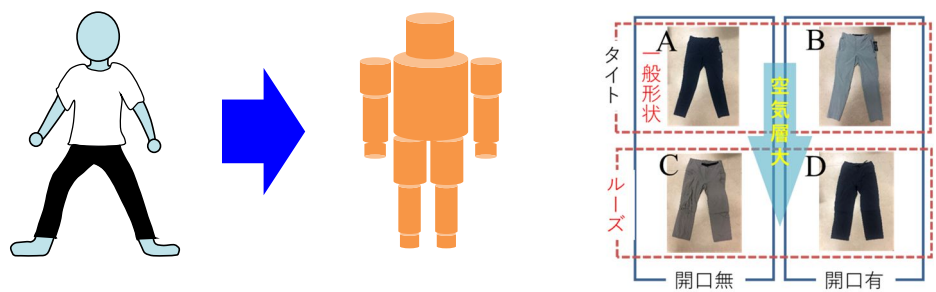


(a) 測定マーカー配置

(b) ある被験者の例

Fig.3 異なるフィット性着衣の換気評価実験

研究代表者らは人体熱収支把握に基づく「人体熱負荷量」を定義し、様々な条件下の実測や数値解析に適用できるように、センシング技術や人体熱収支計算に基づく人体温熱状態や快適感の評価を確立させてきた。上述の知見を基にして、人体熱収支モデルにおいて部位ごとに着衣時・非着衣時に分けて対流熱伝達率に反映させることとした。Fig.4のように人体形状を円筒の集合体として全身の温熱状態を把握する。各部位の代表長さの算出にあたり、周囲長から断面形状を円と近似することで部位径を求めた。Fig.4に示す換気を考慮したプロトタイプ着衣を用いて被験者実験を行うことで、気流感や温冷感と一定の関係を示すことが確認できた。



(a) 形状の簡略化手法 (b) 検証に用いたプロトタイプ着衣

Fig.4 伝熱モデルの人体温熱環境評価への適用

(3) 快適性を実現する衣服機構・形態

実着衣のひとつの例として、換気を活用したファン付き作業服の暑熱環境対策効果について検討を行った。とりわけ、作業服の内側にインナーメッシュパッド(メッシュ)を挿入して空間を作ることで流路を確保することができないか評価した。メッシュの厚さを部位別に調整することで、熱抵抗を抑えつつ、開口部から排出される気流速度を確保できることが示唆され、被服設計の観点から最適化できる可能性がある。

(4) まとめと展望

被服設計とりわけ衣服内換気を軸に人体快適性を創造しようとする試みを行った。換気機構として自然対流に着目し、形態に依存する温度・気流場の定式化をすることができた。また、衣服内空気層の状態から人体熱収支・温熱状態(環境-被服-人体系)を総合的かつ定量的に評価できる手法を開発した。衣服下の微空間の温度・湿度・気流など気候形成のモデリングで見える化・解明し、また人体への影響まで測る統合的な評価法を確立できたことは学術的に意義深い。本研究を通して定式化など定量的なエビデンスに基づく設計指針を提示できた。また、いくつかの限定的な条件の下で、生理や動態、機能デザインを含めて、換気や被服温熱効果を詳細に理解する試みを行い、これを通して被服時の人体温熱環境デザインの最適化の方向性を示すことができた。将来的には、数値解析手法を適用することなどを含めて、被服により労働衛生の向上、クールビズ・ウォームビズや建築空間設計の融合やなどといった省エネ効果の定量・規格化などへの発展が期待される。

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 1件）

1. 著者名 春木直人, 三宅哲也, 島崎康弘	4. 巻 36(1)
2. 論文標題 着衣模擬人体による衣服内気候の空気流動と熱移動特性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 熱物性	6. 最初と最後の頁 13-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 島崎康弘, 古高啓介, 小松陽子
2. 発表標題 衣服内空気層厚さが温度, 湿度, 気流に与える影響の実験的評価
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学会2022年年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 島崎康弘, 安藤竜之介, 児玉壮, 袁繼輝
2. 発表標題 フィット性の異なる衣服着用時の人体熱放散
3. 学会等名 第59回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井原巧暉, 島崎康弘, 袁繼輝, 田島昌樹
2. 発表標題 着衣人体モデルが形成する微気候内の対流熱伝達率の推定
3. 学会等名 令和4年度（第24回）空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福島歩実, 傳法谷郁乃, 岩本静男, 島崎康弘, 山崎慶太, 平野雄士, 染谷俊介, 藤崎幸市郎, 栗原浩平
2. 発表標題 建設作業員の熱中症対策に関する研究(その3) ファン付き作業服とフルハーネス着用時における異なる厚さのインナーメッシュの熱・気流特性評価
3. 学会等名 第46回 人間-生活環境系シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 児玉壮, 島崎康弘
2. 発表標題 垂直および水平開放端流路モデルの空気層幅が内部空気の流速と熱伝達に与える影響
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤竜之介, 島崎康弘
2. 発表標題 人体 - 衣服系モデル実験による衣服内換気の最適化
3. 学会等名 2021年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古高啓介, 小松陽子, 清水祐輔, 島崎康弘
2. 発表標題 発汗時の衣服内気流と放熱量のシミュレーション 衣服内気流の可視化検討
3. 学会等名 日本繊維製品消費科学2021年度年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤竜之介, 島崎康弘
2. 発表標題 機能性着衣による温熱環境改善効果(その1) 着衣人体温熱環境評価手法の提案
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島崎康弘, 安藤竜之介
2. 発表標題 機能性着衣による温熱環境改善効果(その2) 夏季フィールド測定結果
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 児玉壮, 島崎康弘
2. 発表標題 円筒型二重構造模型を用いた内部空気の実験的把握
3. 学会等名 2020年度日本建築学会大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryunosuke ANDO, Yasuhiro SHIMAZAKI
2. 発表標題 EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECTS OF CLOTHING VENTILATION ON THERMAL COMFORT
3. 学会等名 15th ROOMVENT Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 児玉壮, 島崎康弘
2. 発表標題 垂直および水平開放端流路モデルの空気層幅が内部空気に与える影響
3. 学会等名 令和2年度(第22回) 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安藤竜之介, 島崎康弘
2. 発表標題 サイズの異なる衣服が人体温熱環境に与える影響
3. 学会等名 令和2年度(第22回) 空気調和・衛生工学会中部支部学術研究発表会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊橋技術科学大学 教員紹介 https://www.tut.ac.jp/university/faculty/ace/post_55.html 豊橋技術科学大学 建築環境デザイン研究室ホームページ https://bed.ace.tut.ac.jp/

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	齋藤 誠二 (SAITO Seiji) (70452795)	岡山県立大学・情報工学部・教授 (25301)	

6. 研究組織（つづき）

	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	傳法谷 郁乃 (Dempoya Ayano) (00782301)	神奈川大学・建築学部・助教 (32702)	

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