

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25630239

研究課題名(和文)換気力学を用いた着衣内空気層における熱・空気・湿気移動のモデリング

研究課題名(英文) Modeling of heat, air and moisture transfer in clothing air layer based on ventilation dynamics

研究代表者

高田 暁 (Takada, Satoru)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：20301244

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：室内での温熱快適性を予測する理論やモデルが提案されてきているが、着衣と皮膚との間に形成される空気層(着衣内空気層)での換気が十分に考慮されてこなかった。本研究では、測定の困難さを、着衣内空気層の実形状を考慮した数値流体力学(詳細モデル)による数値実験により克服し、着衣内空気層での換気性状を明らかにした。次に、これを換気力学モデル(簡易モデル)で再現する可能性を探り、それに必要な係数値を求めた。最終的に、簡易モデルにより換気を考慮した「着衣-人体熱水分収支モデル」により、室内の温湿度・風速等の条件から体温を求めるプログラムを作成し、着衣内空気層での換気が人体に及ぼす影響の量的な評価を行った。

研究成果の概要(英文)：To properly predict thermal comfort using a thermal model of the human body, heat and moisture transfer in and around clothing must be evaluated. However, the low air velocity in clothing and the complex shape of the air layer complicates the modeling of ventilation in clothing. In this study, computational fluid dynamics (CFD) analysis around the human body considering the air layer in clothing was conducted to quantitatively grasp the air distribution in and around clothing by importing real shape data obtained by a laser scanner, for an adult human wearing single-layered clothing. The influence of the ventilation of clothing air layers on the heat flux at the skin surface under the clothing was determined to be minimal in typical indoor environmental conditions. In addition, application of a simpler model using ventilation calculation to this problem was tried based on the results of CFD analysis.

研究分野：建築環境工学

キーワード：着衣 温熱快適性 数値流体力学 換気 モデル 空気層 人体形状

1. 研究開始当初の背景

室内環境の温熱快適性評価の課題として、着衣の取り扱いが挙げられるが、着衣の熱抵抗の指標である clo 値を凌駕するものは未だ無い。人体の体温調節モデルの研究には進展が見られ、相当な分解能での予測が可能となってきているにもかかわらず、着衣の取り扱いが一步遅れを取っており、温熱快適性予測の進展を妨げている。これは、主として、着衣と皮膚の間に形成される空気層(着衣内空気層)における換気の取り扱いに由来している。

これまでに、風速測定やトレーサースガス法など、着衣内空気層の換気量測定の試みがなされているが、着衣内空気層の狭さ、形状の複雑さに阻まれ、十分な精度で換気量を評価するには至っていない。これに対し、3次元レーザースキャナを用いて空気層の実形状を測定し、それを用いて数値流体解析を行うことにより、静穏気流下での人体周りの気流性状、及び着衣内空気層での換気量が把握されてきている。現状は、基礎的な重力換気の解析が出来た段階であり、空調や通風といった室内で想定される気流条件の解析には未着手である。また、このやり方は巨大な計算負荷を要し、実用的な予測モデルとしては不向きである。気流条件に応じた着衣内空気層での換気性状を明らかにした上で、それを基盤とした簡易モデルが提案できれば、温熱快適性予測の信頼性向上に繋がると考えられる。

2. 研究の目的

建築環境における温熱快適性予測の信頼性を向上させるため、着衣と皮膚との間に形成される空気層(以降、着衣内空気層と呼ぶ)における換気を十分な精度で再現するモデルを提案し、日常生活の多様な状況に対して簡易に予測できる体系を構築することを目的とする。

- (a) 数値流体力学(詳細モデル)を用い、室内で想定される典型的な気流条件(静穏気流、通風、空調)に対して、着衣内空気層での換気性状を把握する。
- (b) (a)を換気力学を用いた簡易モデルで表現する。そのために必要な係数値等を求める。

本研究では、基礎的検討として、着装形態は単純なTシャツの条件とする。

3. 研究の方法

3次元レーザースキャナで測定した着衣・人体の実形状のデータを数値流体計算のプログラムに取り込み、静穏気流時、空調・通風時を想定した流体解析を行い、人体周りでの気流・換気性状を把握する。また、着衣内空気層の熱抵抗を求め、空気層厚さでその値を説明する可能性を検討する。次に、空調・通風時に対して、風圧係数分布を数値流体解析により決定し、それを用いた換気計算モデル

を構築する。空気層の形状情報と数値流体解析結果を基に、流量係数を決定し、換気計算モデルによる簡易計算の可能性を検討する。最後に、換気計算モデルを「着衣・人体非定常熱水分収支モデル」に組み込み、着衣内空気層での換気が温熱快適性に及ぼす影響を量的に評価する。

4. 研究成果

(1) 数値流体解析による着衣内空気層での気流・換気性状の把握

オフィスワーカーの下着を想定し、半袖Tシャツ一枚を着用した日本人20代男性の平均的な体格をしたマネキンについて、3次元レーザースキャナにより、半袖Tシャツを着用した時と着用しない時の表面形状データを測定する。そのデータをもとに、着衣内空気層の実形状を再現し(図1)、半袖Tシャツを身につけた男性が室(3.5m×3.5m×2.5m)の中央に立っている状態を数値流体解析の対象とする(図2)。壁面温度を28℃、下半身と腕の露出部の皮膚温を28℃、それ以外の部分の皮膚温を35℃とする(表1)。布面での通気は、着衣部の運動量保存則にダルシー則による圧力損失を与え、着衣を多孔質体と模擬することで考慮する。着衣の通気抵抗として、厚手のTシャツ(厚さ1.0mm)を想定した249(Pa·s/m)、薄手のシャツ(厚さ0.4mm)を想定した95(Pa·s/m)2条件を設定する。気流条件は、吹き出しの無い場合(自然対流)、気流が後ろ上方から人体に当たる強制対流がある場合、強風と弱風の吹き出し気流が人体の前面全体から吹き出す強制対流がある場合を想定する(表2)。人体や着衣内空気層の形状を再現するため、四面体での分割を基本とし、固体表面および着衣表面の境界層については角柱を用いて、さらに細かく分割した(図3)。四面体メッシュは1~64mm四方の大きさとなっている。人体・着衣表面で約0.4mm、壁表面で約7~10mmの厚さの境界層を5層設けている。収束判定条件は流速、乱流エネルギー、乱流消失率の変動値の平均が 10^{-4} より小さくなった時とした。

室全体の気流分布の計算結果を図4に示す。また、着衣内空気層の流量収支を図5に示す。Case 1(吹き出し風無しの場合)では、裾面を通して平均流速0.02(m/s)で着衣内に空気が流入する。流入した空気は布面から流出しながら着衣内を上昇し、襟と袖から流出する。空気層全体での換気量は $0.30(\times 10^{-3} \text{kg/s})$ であり、空気層の平均温度は32.9℃であった。厚手シャツ(Case 2)では、布面での通気量が薄手シャツ(Case 1)の50%、空気層全体の換気量が87%になった。

Case 3(後方上からの吹き出し条件)では、背側の布面から流入した空気が、着衣内を下降し裾面から流出する。腹側では、自然対流により裾面を通して空気が流入し、流入した空気は着衣内を上昇し、布面と袖口から流出する。空気層全体の換気量は、1.41(\times

10^{-3}kg/s)であり、Case 1 (吹き出し風無し
の条件)の4.7倍となった。シャツを厚手
に変えた条件 (Case 4)では、布面での通気量
が、薄手の条件 (Case 3)の33%になった。
空気層の平均温度はCase 3で30.7、Case 4
で31.1であった。

Case 5 (前面全体からの強風条件)では、
腹側の布面を通して空気が流入し、流入した
空気は人体に衝突して上下に進み襟や裾から
流出する流れと、腰高さの空気層が厚い部
分を通り背側に向かう流れになる。背側に向
かうと、背側の布面や裾面、袖口から流出す
る。また、吹出気流が大腿部に衝突すると皮
膚に沿って上昇し、裾面の大腿部前側から空
気が流入する。裾面から流入した空気は、布
面から流入し着衣内を裾面に向かって下降
する流れによって押し出されターンし、再
び裾面から流出する。空気層全体の換気量は
 $3.08 (\times 10^{-3}\text{kg/s})$ であり、Case 1 (吹き出
し無しの条件)の約10倍となった。着衣を
厚手の条件に変えると (Case 6)、布面での
通気量が薄手の場合 (Case 5)の50%にな
った。空気層内の平均温度は、いずれの場合も
29.7であった。Case 7 (前面全体からの弱
風条件)では、布面での流入量が、強風条件
の (Case 5)の14%になった。空気層全体の
換気量が $1.76 (\times 10^{-3}\text{kg/s})$ となり、シャツ
を厚手に変えると (Case 8)、空気層全体の
換気量がCase 7の94%になった。空気層内
の平均温度は、いずれも30.4であった。

図6に着衣内空気層の気温・気流速度・皮
膚表面熱流と換気量の関係を示す。人体周
辺の気流条件が同じで着衣の通気抵抗の異
なるケース同士を比較すると、着衣内空気層
での気流速度は通気抵抗の低いケースで大き
いが、皮膚表面熱流に大差が無い。今回試
みの中で最も気流速度の大きい人体前方か
らの1.5m/sの気流がある場合でも、気流に伴
う着衣内空気層での換気が皮膚表面熱流に
及ぼす影響は小さいと考えられる。

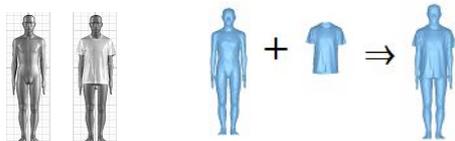


図1 着衣内空気層の形状データ (左:3Dス
キャンの結果、右:着衣内空気層形状の作成)

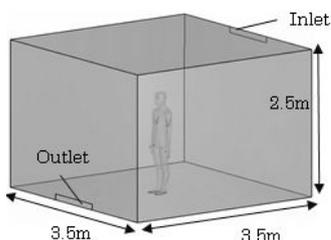


図2 数値流体解析の計算対象空間

表1 数値流体解析の解析条件

| | |
|----------|---|
| CFDコード | SCRYU/Tetra Ver.11 |
| 解析領域 | $3.5 \times 3.5 \times 2.5(\text{m}^3)$ |
| 要素数 | 約1800万メッシュ |
| 乱流モデル | 低レイノルズ数型k-モデル |
| 計算アルゴリズム | SIMPLEC法 |
| 移流項 | MUSCL法 (2次精度) |
| 境界条件 | [速度]人体・壁表面: No Slip [温度]壁面:28 固定, 下半身と腕の露出部 の皮膚:28 固定, その他の皮膚:35 固定 |
| 吹出口 | 流入速度:4(m/s), 流入温度:28 |
| 吸込口 | 表面圧力固定:0(Pa) |

表2 解析条件

| | 衣服通気抵抗 | 室への空気吹き出し条件 |
|--------|--------------------|---------------|
| Case 1 | 95 Pa·s/m (薄手シャツ) | 吹き出し無し (自然対流) |
| Case 2 | 249 Pa·s/m (厚手シャツ) | 吹き出し無し (自然対流) |
| Case 3 | 95 Pa·s/m (薄手シャツ) | 後方上から 4.0m/s |
| Case 4 | 249 Pa·s/m (厚手シャツ) | 後方上から 4.0m/s |
| Case 5 | 95 Pa·s/m (薄手シャツ) | 前面全体から 1.5m/s |
| Case 6 | 249 Pa·s/m (厚手シャツ) | 前面全体から 1.5m/s |
| Case 7 | 95 Pa·s/m (薄手シャツ) | 前面全体から 0.5m/s |
| Case 8 | 249 Pa·s/m (厚手シャツ) | 前面全体から 0.5m/s |

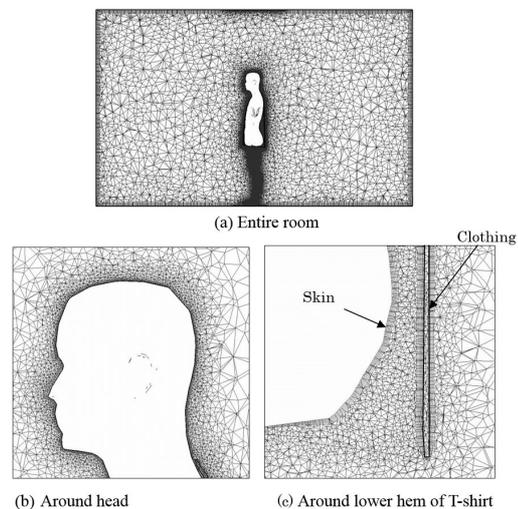


図3 数値流体解析のメッシュ分割

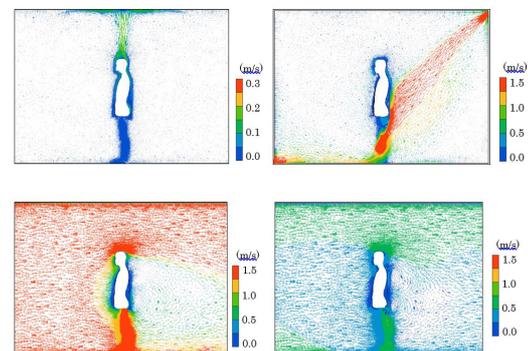


図4 室内気流分布 (計算結果、左上:Case 1、
右上:Case 3、左下:Case 5、右下:Case 7)

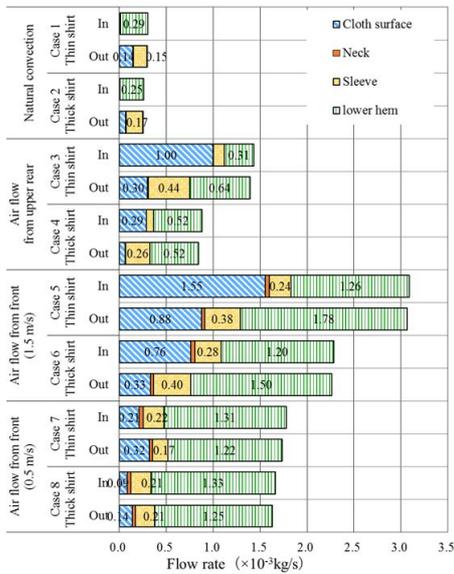


図5 着衣内空気層の流量収支（計算結果）

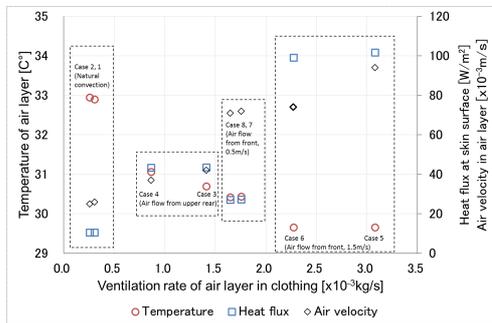


図6 着衣内空気層の気温・気流速度・皮膚表面熱流と換気量の関係（計算結果）

(2) 数値流体解析による着衣内空気層の熱抵抗分布の検討

着衣での熱水分移動を考慮した人体熱モデルを用いた解析を行う際、着衣と着衣の間、皮膚と着衣の間に存在する空気層（着衣内空気層）での熱・湿気抵抗値が必要となるが、人体各部位に適した値を決めるのは、容易ではない。また、換気が抵抗値に影響を及ぼす。ここでは、着衣内空気層厚さと熱抵抗値の関係を見出すことで、着衣条件によらず、着衣内空気層厚さの情報のみで熱抵抗値を推定することを試みる。本研究では、(1)と同様の数値流体解析（Case 1, 2, 5, 6, 7, 8）により、人体各部位（図7）の着衣内空気層の熱抵抗値の算出を行うとともに、着衣内空気層厚さとの関係を検討する。

図8に数値流体解析により求めた部位別の熱抵抗値（対流+放射成分）とその部位での空気層厚さ（実形状測定の結果に基づく算定値、その高さの平均値）の関係を示す。熱抵抗値の部位差は、主として対流成分によるものである。全体として、空気層の薄い肩前の部位から、空気層が厚い腹や背の部位になるほど熱抵抗値が大きくなる。自然対流（吹き出し無し）の条件と比べて、前方からの風が1.5m/sの条件では、熱抵抗値がどの部位でも

小さくなる。換気が着衣内空気層の熱抵抗に及ぼす影響は、前方から1.5m/sの風がある場合には無視できない。一方、ある気流条件に対して、空気層の熱抵抗が、空気層厚さが10mm程度までは単調に増加し、それ以上の厚さで一定値に近づくというほぼ一意の関係が見られ、空気層厚さから着衣内空気層の熱抵抗を推定する可能性が示された。

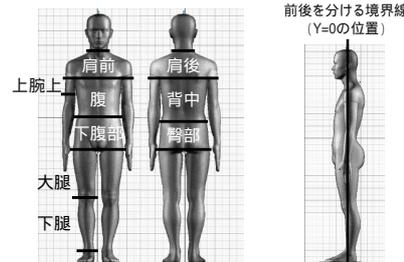


図7 人体の部位の定義

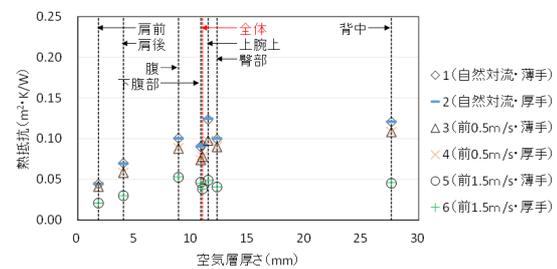


図8 人体各部位の着衣内空気層の熱抵抗値（数値流体力学による計算値）と空気層厚さの関係（半袖シャツ着用時）

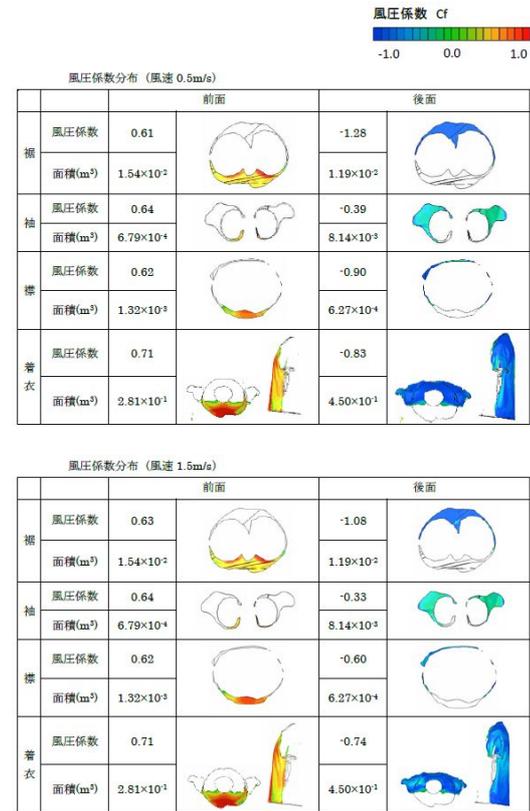


図9 風圧係数分布（人体前面の壁全体からの風速0.5m/s、1.5m/sの場合、計算値）

(3) 数値流体解析による着衣開口での風圧係数分布の把握

数値流体解析により着衣内空気層での換気性状を予測することが可能であるが、それを換気計算により簡易化する際、室内気流が着衣に及ぼす影響を風圧係数で表現する。その風圧係数を、数値流体力学により求める。(1)と同様の計算条件で、着衣の開口（裾、袖、襟、布面）が塞がった条件の解析を実行する。人体の前面全体からの強風・弱風条件（Case 5～8）に対応した条件について計算を行う。

各開口部についての結果を人体の前面と後面に分けて示す（図9）。人体前方からの気流を想定しているため、基本的に、前面は正圧、後面が負圧となっている。前面からの風速が0.5m/sの場合と1.5m/sの場合とで、風圧係数の差は小さかった。

(4) 換気計算モデルの同定

着衣内空気層全体を一つの室として捉え、裾、袖、襟を微小開口、着衣布面を多孔質体の開口とした換気計算により、着衣内空気層での換気特性を解析する（図10）。その際、着衣内空気層の実形状データを用いて、裾、袖、襟の開口面積を与え、布面には通気抵抗を与える。計算には圧力仮定法を用いる。着衣内空気層内平均気温は数値流体解析の結果を与え、風圧係数には図9の値を用いた。(1)で示した数値流体解析での解析結果を正解として、換気計算モデルによる計算結果との照合を行い、妥当性を検証する。

流量係数を0.6とした場合、各開口の流量が大きくなりすぎたため、流量の式全体に補正係数として0.195を乗じた場合、流体計算の結果に概ね一致する結果が得られた（図11）。より多様な条件に対して同様の検討を行い、換気計算モデル（簡易モデル）により着衣内換気量を予測することの可能性を見定める必要がある。

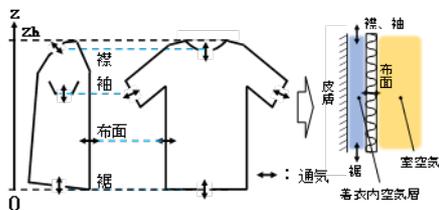


図10 着衣内空気層における換気計算モデルの概念図

表3 換気計算の計算条件

| 流量係数 | 裾開口 | | 袖開口 | | 襟開口 | | 布面 | |
|------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 前部 | 後部 | 前部 | 後部 | 前部 | 後部 | 前部 | 後部 |
| 通気抵抗度 (Pa · s/m) | 0.6 | | | | | | 249 | |
| 開口高さ (m) | 0 | | 0.4 | | 0.6 | | 0~0.6 | |
| 開口面積 (m ²) | 1.5×10 ⁻² | 1.2×10 ⁻² | 6.8×10 ⁻⁴ | 8.1×10 ⁻³ | 1.3×10 ⁻³ | 6.3×10 ⁻⁴ | 2.8×10 ⁻¹ | 4.4×10 ⁻¹ |
| 風圧係数 | 0.63 | -1.08 | 0.64 | -0.33 | 0.62 | -0.60 | 0.71 | -0.74 |

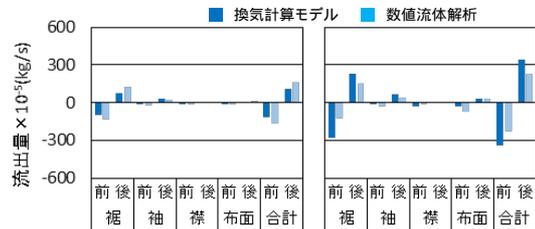


図11 着衣内空気層の流量収支（左：風速0.5m/s、右：風速1.5m/s）

(5) 換気計算モデルを取り入れた着衣 - 人体非定常熱水分収支モデルによる解析

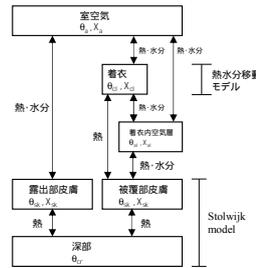


図12 解析モデルの概念図

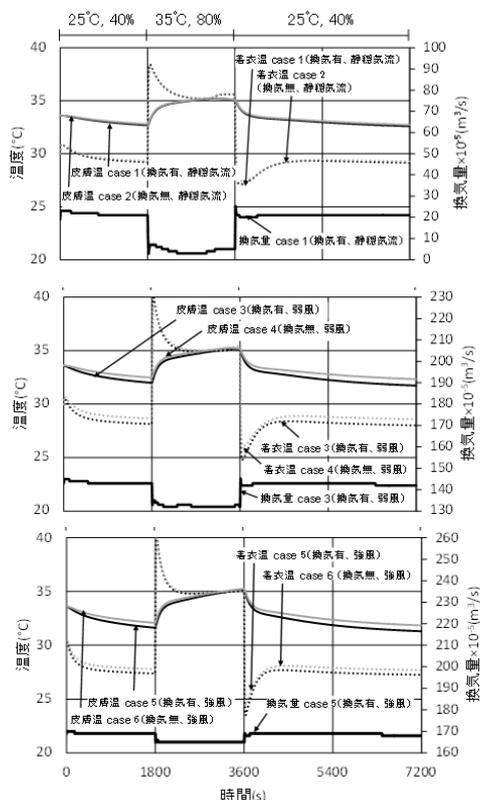


図13 皮膚・着衣温度と換気量（計算値）

換気計算法に基づき着衣内空気層での換気を、「着衣 - 人体非定常熱水分収支モデル」に組み込み（図12）これを用いて、室空気の温湿度がステップ変化する非定常過程で、換気が人体及び人体周りの熱水分場へ及ぼす影響を評価する。室空気の温湿度条件として、夏期の冷房室を想定した条件（25℃, 40%）と、高温高湿条件（35℃, 80%）が連続する状

況を想定する。静穏気流と人体正面の壁全体からの一様な風が吹くという強制対流（弱風と強風の2種類）の気流条件それぞれについて、換気の有無の条件を設け、計6条件について計算を行う。

図13に計算結果を示す。今回の計算条件下では、重力換気量の変動が及ぼす影響は無視できる程度であった。また、静穏気流条件では、換気を考慮するか否かによる皮膚温の差は0.1程度と小さい。一方、人体正面の壁全体からの一様な風が吹くという強制対流条件では、気流速度が0.5m/s, 1.5m/sの両条件で、換気を考慮するか否かにより低温時の定常条件で皮膚温が約0.6, 0.5異なるという結果になった。これは、小さな差とは言えない。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計2件)

- (1) S. Takada, A. Sasaki, R. Kimura, Fundamental study of ventilation in air layer in clothing considering real shape of the human body based on CFD analysis, Building and Environment Vol. 99, pp. 210-220, 2016.4.
- (2) 高田 暁, 表面形状データに基づく着衣内空気層厚さの測定, 人間と生活環境 第21巻 第1号, pp. 1-7, 2014.5.

〔学会発表〕(計11件)

- (1) 木村理沙, 高田 暁, 数値流体解析による着衣内空気層の部位別熱抵抗の算出, 第39回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.91-94, 産業技術総合研究所・臨海副都心センター(東京都), 2015.11.20
- (2) 大崎智寛, 高田 暁, 着衣内空気層での換気を考慮した人体周りの熱水分移動の非定常解析, 第39回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.87-90, 産業技術総合研究所・臨海副都心センター(東京都), 2015.11.20
- (3) 大崎智寛, 高田 暁, 佐々木絢葉, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル(その7)強制対流時における着衣内空気層の換気性状解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.765-766, 東海大学(神奈川県), 2015.9.6
- (4) 木村理沙, 高田 暁, 着衣内空気層の部位別熱抵抗の測定および形状データに基づく推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.411-412, 東海大学(神奈川県), 2015.9.5
- (5) 木村理沙, 高田 暁, 着衣内空気層の部位別熱抵抗の測定および形状データに基づく推定, 日本建築学会近畿支部研究報

告集(環境系), 第55号, pp.369-372, 大阪工業技術専門学校(大阪府), 2015.6.27

- (6) 大崎智寛, 高田 暁, 佐々木絢葉, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル(その7)強制対流時における着衣内空気層の換気性状解析, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第55号, pp.341-344, 大阪工業技術専門学校(大阪府), 2015.6.27
- (7) 佐々木絢葉, 高田 暁, 着衣内空気層の換気性状に関する数値流体解析 着衣の通気抵抗の影響, 第38回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.119-122, 長崎県立大学(長崎県), 2014.12.6
- (8) 木村理沙, 高田 暁, 室内気流条件が着衣内空気層の部位別熱抵抗に与える影響, 第38回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.149-152, 長崎県立大学(長崎県), 2014.12.6
- (9) 佐々木絢葉, 高田 暁, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル(その6)空調機の吹出し気流が着衣内空気層の換気性状に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 D-2, pp.685-686, 神戸大学(兵庫県), 2014.9.12
- (10) 佐々木絢葉, 高田 暁, 人体熱モデルへの適用を目的とした着衣内熱水分移動モデル(その6)空調機の吹出し気流が着衣内空気層の換気性状に及ぼす影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集(環境系), 第54号, pp.137-140, 大阪工業技術専門学校(大阪府), 2014.6.22
- (11) 佐々木絢葉, 高田 暁, 着衣内空気層の換気性状に関する数値流体解析 空調機からの吹出し気流の影響, 第37回人間-生活環境系シンポジウム報告集, pp.105-108, 神戸大学(兵庫県), 2013.11.30

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.kobe-u.ac.jp/~en4/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 暁 (TAKADA SATORU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 20301244

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し