

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

大崎智寛¹⁾, 高田暁¹⁾
¹⁾神戸大学大学院工学研究科

Transient Analysis of Heat and Moisture Transfer around Human Body Considering Ventilation in Air Layer in Clothing

Tomohiro OSAKI¹⁾, Satoru TAKADA¹⁾,
¹⁾ Graduate School of Engineering, Kobe University

Abstract: In this paper, the human thermal model considering heat and moisture transfer in clothing is modified by taking into account the ventilation in the air layer in clothing, based on a ventilation calculation due to the temperature difference between the air layer in clothing and the ambient air, and wind pressure from the assumed air flow. By using this model, temperature and humidity of clothing along with the body temperatures and ventilation rate in clothing air layer were calculated for a step change of the temperature and humidity of the room air, for no wind condition and conditions of forced convection with a wind velocity of 0.5m/s from the front of the human body. As the result of calculation, it was shown that the influence of the ventilation in the clothing air layer on the skin temperature and temperature and humidity of the clothing is not significant, and that the difference in the convective heat transfer coefficient at the outer surface of the clothing brought the difference between the two air flow cases. In addition, the influence of change in ventilation rate due to the temperature difference was shown to be insignificant.

Key words: Air Layer, Clothing, Calculation of Ventilation, Heat and Moisture Transfer, Human thermal model

要旨: 本研究では、着衣での熱水分移動を考慮した人体熱モデルに、着衣内空気層での換気計算（重力換気と風力換気）を取り入れたモデルを作成した。この解析モデルを用いて、室空気の温湿度がステップ変化する場合の人体周りの熱水分場を、時々刻々の換気量を考慮して計算し、換気量の影響を静穏気流場と強制対流場それぞれについて検討した。計算の結果、静穏気流、人体前方からの風速 0.5m/s を想定した強制対流の場合に、着衣内空気層の換気が皮膚温や着衣の温湿度に及ぼす影響は大きくないこと、静穏気流と強制対流の両ケースの結果の差は、主として着衣外側の対流熱伝達率の差に依存することが示された。また、着衣内空気層温度の変化に伴う重力換気量の変化が結果に及ぼす影響は大きくないことが示された。

キーワード: 着衣、空気層、換気計算、熱水分移動、人体熱モデル

1. はじめに

皮膚と着衣との間に存在する空気層では、着衣布面や襟・袖・裾などの開口を通して人体周辺空気との換気が生じている。これまでに実験により着衣内空気の換気量を測定する試みもなされている（Lumley ら 1991, Ying ら 2014）が、通常の室内で生じる程度の気流条件に対して、換気の影響が明確になっているとはいえない。着衣での熱水分移動を考慮した人体熱モデルによる解析（高田ら, 2001）では、着衣内空気層での換気が考慮されていない。本研究では、着衣内空気の換気を考慮したモデルを作成し、室空気の温湿度がステップ変化する非定常過程において、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。計算は静穏気流

場と強制対流場の両方について行う。また、着衣内空気層の温度変化に伴う換気量の変動が結果に及ぼす影響についても検討する。

2. 計算方法

2.1 換気計算

20 代の平均的な体格の男性がTシャツのみを着用している場合について、着衣内空気層全体を一つの空間と捉え、裾、袖、襟を微小開口、着衣布面を多孔質体の縦長開口とした換

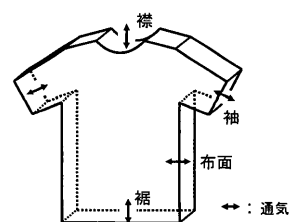


図1 着衣内空気層概念図

気計算を行う(図1)。基礎式を(1)-(3)式に示す。裾、袖、襟の開口面積、開口高さについては、3次元レーザースキャナによる着衣内空気層の実形状データ(高田, 2014)より与える。流量係数 α 、および調整係数 k は、数値流体解析により着衣内空気層と室空気との通気を考慮して得られた各開口の流量との誤差が最も小さくなるよう与えた(大崎ら, 2015)。(2)式が流量収支式を示しており、このうち、流出量の合計量を着衣内空気層全体の換気量 Q_t とする。風圧係数は、着衣内空気層と室空気との通気を考慮しない数値流体解析から求めた³⁾。人体の前後を区別して各開口を定義し(表2)、各開口に対して風圧係数 C を与える。着衣内空気層と室空気の温度から逐次その密度差を求めて、重力換気による圧力差を算出する。1室多開口の換気計算を圧力仮定法により行う。

$$\Delta p_{j,l}(z) = -p_0 - \Delta \rho g z + \frac{1}{2} C \rho_{out} V^2 \quad (1)$$

$$0 = \sum_j k \cdot \text{sign}(\Delta p_j) \cdot \alpha A_j \sqrt{\frac{2|\Delta p_j(z)|}{\rho_{ave}}} + \sum_l k \cdot \text{sign}(\Delta p_l) \cdot \int_0^{z_h} \frac{|\Delta p_l(z)|}{R} B dz \quad (2)$$

$$\text{ただし、} \text{sign}(\Delta p_{j,l}(z)) \equiv \begin{cases} +1, & \Delta p_{j,l}(z) \geq 0 \\ -1, & \Delta p_{j,l}(z) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

記号： Δp ：開口内外差圧[Pa]， p_0 ：高さ0における着衣内の静圧[Pa]， $\Delta \rho$ ：着衣内空気層と室空気の密度差[kg/m³]， g ：重力加速度[m/s²]， z ：座標(鉛直上向きを正)[m]， C ：風圧係数[-]， ρ_{ave} ：着衣内空気層と室空気の平均密度[kg/m³]， V ：自由風風速[m/s]， Q_t ：換気量[m³/s]， k ：統一の流量係数[-]， α ：流量係数[-]， A_j ：各微小開口の開口面積[m²]， z_h ：最高高さ[m]， R ：通気抵抗度[Pa·s/m]， B ：開口幅[m]， H ：開口高[m]

添え字： j ：各微小開口数， l ：布面縦長開口数， in ：着衣内， out ：着衣外

2.2 熱水分移動

Stolwijk モデル(Stolwijk, 1971)は、Head、Trunk、Arms、Hands、Legs、Feetの6部位を区別する人体熱モデルであるが、ここでは、Trunkをシャツによる被覆部、それ以外の部位を露出部として扱う。人体・及び人体周りの熱・水分移動の概念図を図2に示す。着衣内空気層における熱・水分収支式を(4)、(5)に、着衣内の熱・水分収支式、平衡含水率曲線を(6)、(7)、(8)に示す。(6)、(7)式の着衣内空気層側境界条件式を(9)、(10)に、室空気側の境界条件式を(11)、(12)に示す。人体から室空気に向かう向き(図2の上向き)を熱流・水分流の正の向きとする。

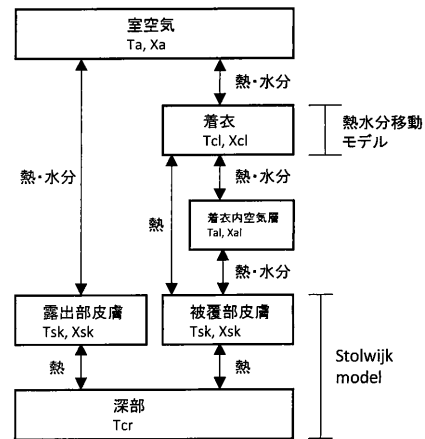


図2 人体および人体周りの熱・水分移動

$$c_a \rho_a V \frac{d\theta_{al}}{dt} = \alpha_{csk} (\theta_{sk} - \theta_{al}) S + \alpha_{ci} (\theta_{cl,i} - \theta_{al}) S + c_a \rho_a Q_t (\theta_a - \theta_{al}) \quad (4)$$

$$\rho_a V \frac{\partial X_{al}}{\partial t} = \alpha_{sk}' (X_{sk} - X_{al}) S + \alpha_{ci}' (X_{cl,i} - X_{al}) S + \rho_a Q_t (X_a - X_{al}) \quad (5)$$

$$c_{cl} \rho_{cl} \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + L \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (6)$$

$$\rho_w \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$w = f(X, \theta) \quad (8)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_s = \alpha_{ci} (\theta_{al} - \theta_{cl,i}) + \alpha_{ri} (\theta_{sk} - \theta_{cl,i}) + L \alpha_{ci}' (X_{al} - X_{cl,i}) \quad (9)$$

$$-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_s = \alpha_{ci}' (X_{al} - X_{cl,i}) \quad (10)$$

$$-\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \Big|_s = (\alpha_{co} + \alpha_{ro}) (\theta_{cl,o} - \theta_a) + L \alpha_{co}' (X_{cl,o} - X_a) \quad (11)$$

$$-\lambda' \frac{\partial X}{\partial x} \Big|_s = \alpha_{co}' (X_{cl,o} - X_a) \quad (12)$$

記号： c ：比熱[J/kg/K]， ρ ：密度[kg/m³]， V ：着衣内空気層の体積， θ ：温度[°C]， t ：時間[s]， S ：表面積， Q_t ：換気量[m³/s]， X ：絶対湿度[kg/kg]， α_c ：対流熱伝達率[W/m²/K]， α_r ：放射熱伝達率[W/m²/K]， α' ：湿気伝達率[kg/(m²·s·(kg/kg))]， λ ：布の熱伝導率[W/m/K]， L ：蒸発潜熱[J/kg]， λ' ：布の湿気伝導率[kg/m/s/(kg/kg)]， w ：体積含水率[m³/m³]

添え字： a ：空気， al ：着衣内空気層， sk ：皮膚， cl ：着衣， i ：着衣内側， o ：着衣外側， w ：水分， cl,i ：着衣内側表面， cl,o ：着衣外側表面

2.3 計算条件

室空気の温湿度条件として、夏季の冷房室を想定した低温低湿の条件(25°C, 40%)と、それに比して高温高

湿な条件（35℃,80%）が連続するステップ変化を想定する（図3）。計算に用いる諸数値を表1～6に示す。表1に示すように、静穏気流と強制対流それぞれの気流条件で、換気を考慮する・しないの条件を設け、計4条件について計算を行う。通気抵抗度については、厚手のシャツの値（井上ら,2004）を用いる。布面の幅Bは一定値とし、 $Z_h \times B$ が実際の布面積（3次元レーザースキャナによる測定値）と同じになるように決めた。着衣外側と露出部皮膚の対流熱伝達率は、Mitchell の式（Mitchell ら, 1969）から求め、静穏気流条件と強制対流条件とで値を変える（表5）。着衣と被覆部皮膚の間の熱伝達率は高田ら（2001）が用いた値を用い、気流条件によらず一定値とする。湿気伝達率は、ルイスの関係を用い、対流熱伝達率と連動させて求める。人体の温度の初期条件はセットポイント（Stolwijk, 1971）を与える。着衣の空間差分刻みは $2.5 \times 10^{-4} \text{m}$ とし、全体の時間刻みを 0.1 秒とした前進差分法を用いて解を求める。

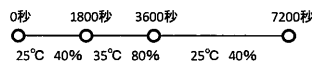


図3 室空気条件

表1 計算条件による風速と調整係数

	風速	調整係数	換気の考慮
case 1 (換気有、静穏気流)	0	0.08	あり
case 2 (換気無、静穏気流)	0		なし
case 3 (換気有、強制対流)	0.5	0.28	あり
case 4 (換気無、強制対流)	0.5		なし

表2 着衣の各開口の諸数値

	裾開口 前部	裾開口 後部	袖開口 前部	袖開口 後部	襟開口 前部	襟開口 後部	布面 前部	布面 後部
流量係数	0.6							
通気抵抗度 (Pa · s/m)							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^{-4}	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

表3 空気に関する諸数値

空気の比熱(J/kg/K)	1.0×10^3
水の比熱(J/kg/K)	4.18×10^3
水の密度(kg/m ³)	1.0×10^3
潜熱(J/kg)	2.50×10^6
着衣内空気層の体積(m ³)	8.0×10^{-3}

表4 着衣に関する諸数値

熱伝導率(W/m/K)	5.56×10^{-2}
湿気伝達率(kg/m ² /s/(kg/kg))	6.48×10^{-7}
比熱(J/kg/K)	1.38×10^3
密度(kg/m ³)	3.50×10^2
厚さ(m)	5.0×10^{-4}
表面積(m ²)	7.0×10^{-1}
実質密度(kg/m ³)	1.54×10^3
空隙率(-)	7.73×10^{-1}

表5 熱伝達率と湿気伝達率

	対流熱伝達率 (W/m ² /K)	放射熱伝達率 (W/m ² /K)	湿気伝達率 (kg/m ² /s/(kg/kg))
被覆部皮膚・着衣内側	10.0	4.65	1.0×10^{-2}
着衣外側・露出部皮膚	(風速 0.0m/s の時)3.1 (風速 0.5m/s の時)5.5	4.65	(風速 0.0m/s の時) 3.1×10^{-3} (風速 0.5m/s の時) 5.5×10^{-3}

表6 初期条件

温度(℃)	着衣	30.0
	着衣内空気層	30.0
絶対湿度(kg/kg)	着衣	1.0×10^{-2}
	着衣内空気層	1.0×10^{-2}
含水率(kg/kg)	着衣	1.0×10^{-2}

3. 計算結果

3.1 計算結果

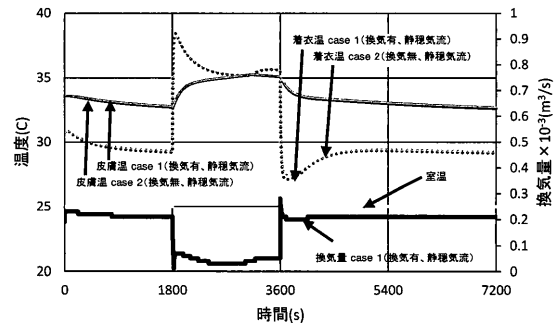


図4 皮膚・着衣温と換気量（静穏気流条件）

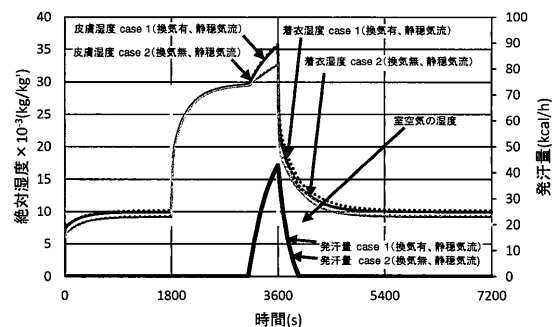


図5 皮膚・着衣の絶対湿度と発汗量（静穏気流条件）

case 1（換気有、静穏気流）と case 2（換気無、静穏気流）の皮膚・着衣の温度、換気量を図4に、皮膚・着衣の絶対湿度、発汗量を図5に示す。以下では、皮膚については被覆部皮膚（Trunk）、着衣の温湿度については、着衣の厚さ方向の中心部に絞って説明する。

1800 秒に、着衣の温度が上昇し、室温と皮膚の温度より高くなる。これは室空気の湿度上昇により、室空気から着衣への吸着熱が急激に増加することによるものである。また、約 3000 秒における皮膚・着衣の湿度上昇は、皮膚温が Stolwijk モデルにおいて設定されている閾値を超え、発汗が始まったためである。発汗に伴い、皮膚温の低下と着衣の温度の上昇が見られる。これはそれぞれ水分の蒸発熱と吸着熱によるものである。3600 秒には、室空気の温度・湿度がステップ的に下がるため、蒸発熱により着衣の温度が下がる。発汗は約 4000 秒で 0 となる。換気量は、着衣内空気と室空気の温度差により変わり、1800 秒～3600 秒の高温時には小さい。換気量は室空気の温湿度がステップ変化する際に変化するが、その変化は数秒以内に収束する。時々刻々、着衣内空気層の気温は変化しているが、その変化による換気量の変化はわずかである。case 1（換気有、静穏気流）と case 2（換気無、静穏気流）の比較を行うと、皮膚・着衣の温湿度の差は小さく、無視できる程度

である。

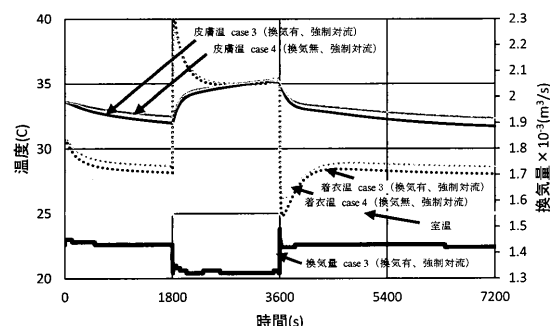


図6 皮膚・着衣温と換気量（強制対流条件）

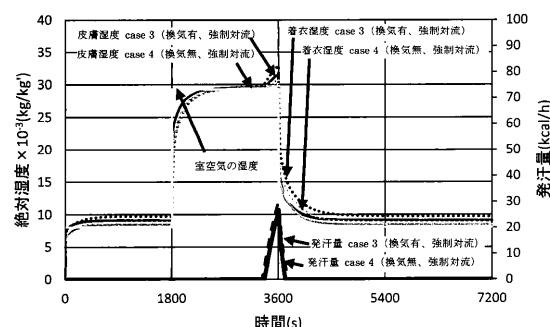


図7 皮膚・着衣の絶対湿度と発汗量（強制対流条件）

case 3（換気有、強制対流）と case 4（換気無、強制対流）の被覆部の皮膚・着衣の温度、換気量を図6に、皮膚・着衣の絶対湿度、発汗量を図7に示す。

静穏気流の場合と同様に、着衣内空気層での換気の考慮の有無が皮膚温や着衣の温湿度に与える影響は小さい。また、換気量の変動が結果に及ぼす影響も小さい。

人体の前方から 0.5m/s の風が吹くという強制対流がある場合の換気量は、静穏気流の場合の約7倍である。着衣温は静穏気流の場合より約 1℃低い。強制対流の条件の方が、発汗量が小さいのは、室温が上がる 1800 秒の時点で既に皮膚温が低く、Stolwijk モデルの調節発汗の式における皮膚温の閾値を超えるのに時間がかかるためである。この差は、換気量に加え、着衣外側の熱・湿気伝達率の値が大きいことの影響と考えられる。

4. まとめ

人体熱モデルと着衣モデルを組み合わせたモデルに換気計算を取り入れたモデルを作成した。この解析モデルを用いて室空気の温湿度のステップ変化による人体周りの熱水分場への影響を解析した。計算の結果、着衣内空気層の換気が皮膚温や着衣温湿度に及ぼす影響は大きくないことが示された。また、着衣内空気層の気温変化に応じた換気量の変化の影響は小さい。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会 科学研究費挑戦的萌芽研究（課題番号 25630239，研究代表者：高田 暁）の助成を受けた。記して謝意を表する。

5. 文献

- S. H. Lumley, D. L. Story and N. T. Thomas, clothing ventilation, update and applications, 1991. Applied Ergonomics 22, 6: 390/394
- Ying Ke, Jun Li, George Havenith, 2014. An improved experimental method for local clothing ventilation measurement, International Journal of Industrial Ergonomics, 44: 75/81,
- 高田 暁, 銚井 修一, 川上 直紀, 工藤 正則, 2001. 着衣における熱・水分の移動と蓄積を考慮した人体の非定常温熱生理応答—被験者実験と Two-node model を用いた解析—, 計画系論文集, 549: 23/30
- 高田 暁, 2014. 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, 21(1): 1/7
- 大崎 智寛, 高田 暁, 佐々木 絢葉, 2015. 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, 日本建築学会学術講演梗概集, D-2: 765/766
- Stolwijk J. A.J., 1971. A Mathematical model of physiological temperature regulation in man, NASA-Langley, CR-1855
- 井上 真理, 柳本 周治, 桑原 智子, 山田 由佳子, 近藤 徳彦, 2004. 環境の温度変化がスポーツウェア着用時における運動時の体温調節反応に及ぼす影響, デザントスポーツ科学, vol. 25: 49/61
- D. Mitchell, C. K. Wyndham, A. J. Vermulen, T. Kodgson, A. R. Atkins and H. S. Hofmeyr, 1969. Rivalent and convective heat transfer of nude men in dry air, J. Appl. Physiol. 26: 171

<連絡先>

連絡先氏名：大崎 智寛

住所：兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1

所属：神戸大学大学院工学研究科建築学専攻

E-mail アドレス：158t010t@stu.kobe-u.ac.jp