



Title	人体熱モデルによる皮膚温分布・顕熱授受量分布の予測に関する研究
Author(s)	佐古井, 智紀; 都築, 和代; 加藤, 信介 他
Description	第12回衛生工学シンポジウム (平成16年11月4日 (木) -5日 (金) 北海道大学クラーク会館) . 一般セッション . 6 建築 都市環境とエネルギー有効利用 . P6-10
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 12, 205-208
Issue Date	2004-10-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1266
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-10_p205-208.pdf



6-10 人体熱モデルによる皮膚温分布・顕熱授受量分布の予測に関する研究

○佐古井智紀（産業技術総合研究所）、都築和代（産業技術総合研究所）、
加藤信介（東京大学生産技術研究所）、大岡龍三（東京大学生産技術研究所）、
宋斗三（成均館大学）、朱晟偉（東京大学）

1. はじめに

これまでに得た、不均一熱環境を対象とした皮膚温と顕熱授受量の分布による快・不快感の表現式^{1),2)}を用いて不均一熱環境を設計、評価するにあたり、皮膚温と顕熱授受量の分布を把握することが必須となる。本稿は、3次元的热収支と温度分布が考慮される Smith モデル³⁾を再現し、人体の皮膚温分布を予測する。また、その結果を踏まえて現在開発中の新しい人体熱モデルの概要を記述する。

2. Smith モデルによる皮膚温分布予測に関する検討

有限要素法に基づくゆえに複雑形状への対応など熱モデルとしての将来性が有り、かつ、コードが開示された Smith モデル³⁾を、今後の拡張を見込んだ基礎人体熱モデルとして再現した。図-1 に、ほぼ中立条件（気温=放射温=28℃、RH=50%、静穏（ $h_c=3.1\text{W/m}^2\text{℃}$ 、 $h_r=4.65\text{W/m}^2\text{℃}$ ）・裸体・活動量 1met）・定常における、全身の皮膚温分布の計算値を実測値²⁾と比較して示す。実測値は、椅座、28℃均一、男性（トランクスのみ）の実験の平均値（ $n=18$ ）である。手・足の末梢部で計算値が実測値より低く、逆に頭部や胴躯幹部で高くなった傾向が見て取れる。計算では、対流熱伝達率を全身に一律で設定したが、末梢と躯幹の代表径の違いを考慮すると、この設定は分布のある実際の対流熱伝達率分布を使用した場合と比べて末梢で保温側に、躯幹で冷却側に作用しているため、ここで示された末梢部と躯幹部の温度予測誤差の原因になることは考え難い。竹森が、Smith モデルにおける皮膚血流調節の不十分さを指摘⁴⁾しているように、人体の温度分布を予測するにあたって末梢への血流による熱輸送に改良を要することを示唆した結果である。

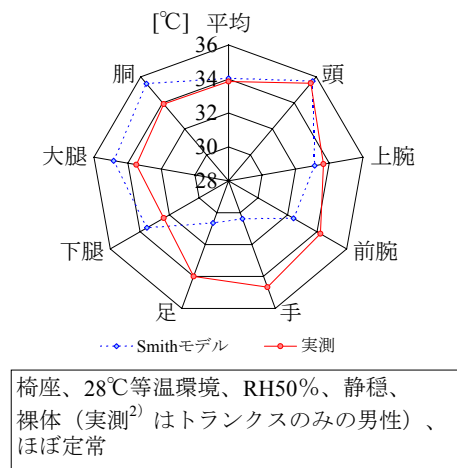


図-1 Smith モデルによる皮膚温分布
計算値と実測値の比較

3. 新しい人体熱モデルの開発

3.1. 血流量と血流の一方向流・対向流による温度伝達特性

2章の結果を踏まえ、末梢への血流による熱輸送を改良した人体熱モデルを開発する。まず、ある温度 T_0 を持った血流が均一温度空間 T_s に流れ込んだ場合に、流入点下流、距離 x における定常血液流出温 $T(x)$ と周囲温 T_s の差 $(T(x)-T_s)$ が流入温と周囲温の差 (T_0-T_s) の $1/e$ (≈ 0.368) となる距離 LC (概念として正確ではないものの、時定数を参考に以後、距離定数と記述) に着目して、血流による温度輸送が血管の種類、血流速とどのような関係にあるかを見る。検討対象とする 1 次元血管血液に着目した熱収支式とそれから導かれた流出血液温の式を式 (1)、(2) に、式 (2) より得られる血流速と距離定数の関係を血管の種類ごとに図-2 に示す。層流域 ($Nu=4.36$) を対象

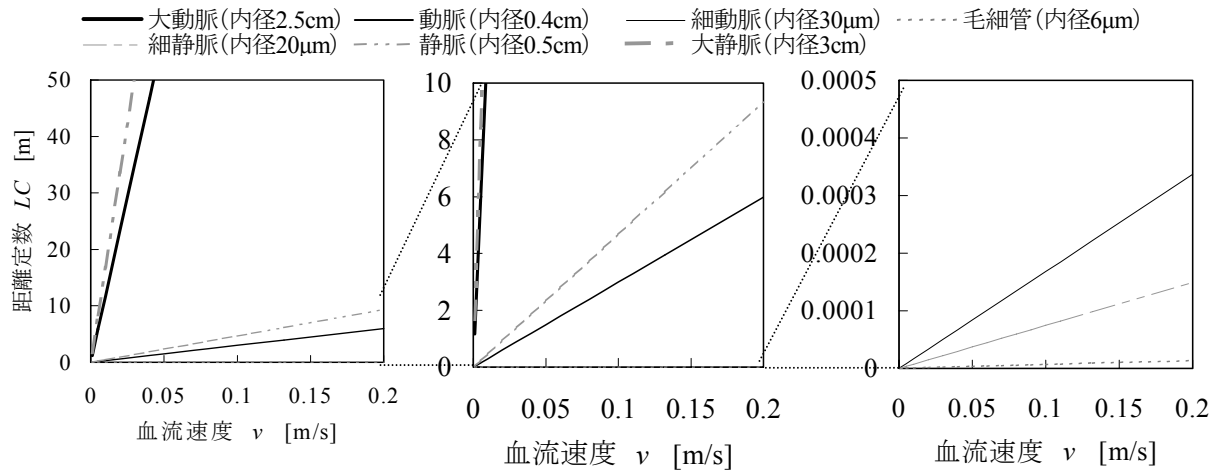


図-2 各血管⁵⁾の血流速度と距離定数(血液・組織の温度差が $1/e$ となるまで距離)の関係としており図-2は乱流域($Re \geq 2000$)を含んでいない。血管径は松田らの代表値⁵⁾を用いた。

$$0 = -\rho_B \cdot C_{pB} \cdot \pi \cdot r_o^2 \cdot v \cdot \frac{\partial T(x)}{\partial x} + 2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot h_c \cdot (T_s - T(x)) \quad (1)$$

$$T(x) = (T_o - T_s) e^{-\frac{2h_c \cdot x}{\rho_B \cdot C_{pB} \cdot r_o \cdot v}} + T_s \quad (2)$$

ここに、 ρ_B : 血液の比重[kg/m³]、 C_{pB} : 血液の比熱[J/kg°C]、 r_o : 血管半径[m]、 v : 血流速[m/s]、 h_c : 血液・血管壁管の対流熱伝達率[W/m²°C]

図-2より、大動脈、動脈、静脈、大静脈は、血流速に関わらず血液温が周囲温にほとんど同化せず、遠方まで流入温に近い温度を維持したまま輸送される様子が読み取れる。一方、細動脈、毛細管、細静脈は、血液温がすぐに周辺組織温に同化する様子が読み取れる。そこで、[1]血液温度が周囲組織温と等しくならない大動脈、動脈、静脈、大静脈空間、[2]細い血管が組織中に散在し、血液温度と周囲組織温がほぼ等しくなる細動脈、毛細管、細静脈、組織の混在空間、大きく2つに空間を分類し、両者の血流量と温度輸送の関係を考えてみる。

まず、[1]大動脈、動脈、静脈、大静脈空間における熱輸送について。前述の図-2に見られるように、血流速に応じて温度の輸送距離が増加する。

次に、[2]細い血管が組織中に散在している細動脈、毛細管、細静脈、組織空間について。この混在空間の熱収支式は式(3)となる。動脈血・組織間および静脈血・組織間の移流、対流熱交換、動静脈血間の対向流熱交換は、動脈、静脈、組織、全てを等温とした空間のため記述していない。式(3)の左辺は蓄熱項、右辺第1項は熱伝導項、第2項は移流項、第3項は産熱項である。

$$\begin{aligned} \rho_C \cdot C_{pC} \cdot \frac{\partial T_C}{\partial t} &= \lambda_C \cdot \Delta T_C + \nabla \cdot (\mathbf{v}_A T_C - \mathbf{v}_V T_C) + M \\ &= \lambda_C \cdot \Delta T_C + \nabla \cdot [(\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_V) T_C] + M \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 ρ_C : 混在組成の比重[kg/m³]、 C_{pC} : 混在組成の比熱[J/kg°C]、 λ_C : 混在組成の熱伝導率[W/m°C]、 T_C : 混在組成温度[°C]、 \mathbf{v}_A : 動脈血の正味血流速ベクトル[m/s]、 \mathbf{v}_V : 静脈血の正味血流速ベクトル[m/s]、 M : 産熱量[W/m³]

式(3)より、動静脈血が完全に対向流となる $\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_V = \mathbf{0}$ の場合、移流項は相殺され、この空間における熱移動は実質的に熱伝導のみとなる。この場合、たとえ血流量の増加が生じても熱輸送は促進されない。逆に $(\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_V)$ の絶対値が大きくなるほど、移流による熱移動が大きくなる。

上記の熱輸送特性を、生理応答と照らし合わせてみる。寒冷環境では、四肢深部を還流する動

静脈血は対向流に近く、また皮膚血流量は小さい。逆に暑熱環境では、皮膚血流は増加すると同時に皮膚表層を多量の静脈血が還流する結果、深部を還流する静脈血量は動脈血流量に比べて小さくなる⁶⁾。前述のように、皮膚血流の増減が生じて、完全な対向流となる限りは、細動脈、毛細管、細静脈、組織の混在空間の熱輸送特性に変化は生じない。皮膚血流の増減に応じて、暑熱環境における熱放散の促進、寒冷環境における熱放散の抑制が生じる背景には、皮膚血流の増減と同時に血流が対向流または一方向流と変化している事象が挙げられる。なお、多量の産熱があり、かつ過度の温度上昇を好まない頭部を考えると、常に四肢部における暑熱状態の傾向、深部からの多量の動脈血が頭蓋骨直下の上矢状静脈洞に向けて一方向に還流する傾向にあり、脳組織での多量の産熱が多量の血流により有効に排出されていることも窺われる。

3.2 人体熱モデルの概要

血流量、血液密度が大きいものの、線的空間である大動脈、動脈、静脈、大静脈空間、流量、血液密度が比較的小さいものの、空間的には大きい細動脈、毛細管、細静脈、組織の混在空間、体内の熱移動をモデル化するに当たって、3.1 節に記した温度輸送に関する両者の特徴を踏まえることは必須であろう。既往の人体熱モデルの中、Smith³⁾、Fu⁷⁾、竹森⁴⁾は四肢部に深部静脈に加えて皮膚静脈も配している。しかし、血流量が部位を還流する全血流量を前提に与えられ、竹森らのAVA血流の扱いを除くと皮膚血流量を前提にしていない。従って、皮膚血流量の変化に対する、血流方向の変化すなわち深部静脈と皮膚静脈を流れる血流量比の変化の関係が明確ではない。また、除ら⁸⁾もAVA血流が皮膚静脈血管を還流するモデルを採用しているが、AVA以外に変化する皮膚血流分は深部静脈を還流するモデルとしている。筆者らは、血流の方向変化が皮膚の血流変化と同時に生じていることを踏まえ、皮膚の血流の変化を血流方向変化の直接の要因とする以下の特徴を持つ人体熱モデルの開発を進めている。

- (1) 大動脈、動脈、静脈、大静脈空間 (図-3 参照) は、1次元血管の熱収支により扱う。組織空間 (図-4 参照) には細動脈、毛細管、細静脈が混在するものとして、動脈血、静脈血、組織、全てを等温とした3次元空間の熱収支により扱う。
- (2) 血流量を Smith モデルのように圧力低下を解いて得るのではなく、横山ら⁹⁾、Stolwijk¹⁰⁾、除ら⁸⁾のように組成ごとに体積あたりの血流量を設定する。ただし、皮膚血流量は体温に応じて変動する。
- (3) 内臓、肺、脳、骨、筋、脂肪を還流する一定量の血流 (図-4a) は対向流 (深部よりの細動脈血が毛細管に流入、その後静脈血として再び深部へ流入) である。
- (4) 体温に応じて変動する皮膚血流 (図-4b) は一方向流 (深部より来る細動脈血が毛細管に流入し、その後に細静脈血として皮膚表層を四肢部または首部付け根に向かって流れ、四肢部または首部付け根において上下の大静脈に流入) である。

人体熱モデルの形状、熱物性は Smith モデル³⁾を基礎とする。血流量、血液量、産熱量は横山¹¹⁾、Smith³⁾の記述から、全身総和値⁵⁾、⁶⁾、¹²⁾と矛盾しない値を採用した。部位の発汗、皮膚血流の変動、ふるえなどの体温調節モデルは横山¹¹⁾を基礎にする。執筆現在 (2004.9.21)、プログラムの修正中であり、ここではモデル概要のみを記した。

4. おわりに

本稿では、人体内の熱移動を考える上で、細動脈、毛細管、細静脈、組織の混在空間では皮膚血流量変化に加え、血液が対向流となるか一方向流となるかを考慮する必要があることを記述し、

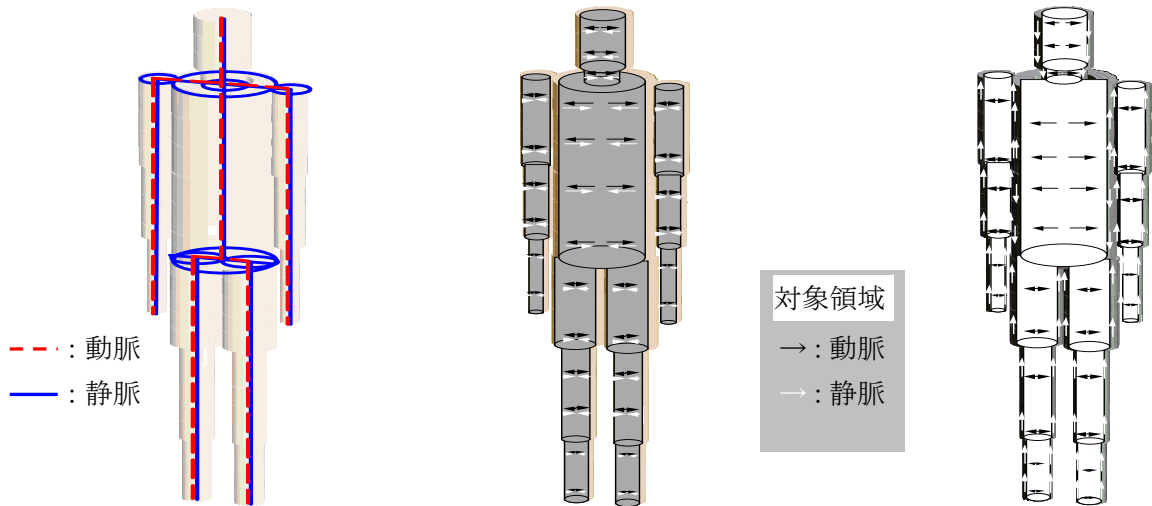


図-3 開発中のモデルが採用した1次元動脈血管・静脈血管の配置

図-4a 開発中のモデルにおいて血流が対向流となる空間（内臓、肺、脳、骨、筋、脂肪）とその血流方向設定

図-4b 開発中のモデルにおいて血流が一方向流となる空間（皮膚）とその血流方向設定

このことを踏まえて現在開発中の人体熱モデルの概要を述べた。

謝辞

本研究の一部は新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成によったことを記します。

文献

- 1) 佐古井他:不均一熱環境における快・不快感の表現法に関する研究、空気調和・衛生工学会大会梗概集, pp.641-644 (2004)
- 2) 佐古井他:皮膚温分布・顕熱授受量分布による快・不快感の表現法の提案、第12回衛生工学シンポジウム論文集 (2004)
- 3) Smith: A Transient, Three Dimensional Model of the Human Thermal System, Dissertation for Ph. D., Kansas State University (1991)
- 4) 竹森:熱環境の快適性評価のための人体モデル開発、神戸大学博士論文 (1995)
- 5) 松田他:医科生理学展望 原書6版、丸善株式会社 (1975)
- 6) 永坂:皮膚血管反応、温熱性理学 (中山昭雄編) pp.122-134、理工学舎 (1981)
- 7) Fu: A Transient, 3-D, Mathematical Thermal Model for the Clothed Human, Dissertation for Ph. D., Kansas State University (1995)
- 8) 徐ら:人間一熱環境系快適性数値シミュレータ その22 体温調節モデル JOS の開発—AVAを含む血管系の考慮、日本建築学会学術講演梗概集 D-2 (2002)
- 9) 横山ら:部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの開発 第1報—生体内熱移動方程式とその解法、空気調和・衛生工学会論文集 No.77, pp.1-12 (2000)
- 10) Stolwijk: A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA Contractor Report 1855 (1971)
- 11) 横山:生体内熱移動現象、北海道大学図書刊行会 (1993)
- 12) 講談社編:からだの地図帳 (高橋長雄監修・解説)、講談社 (1989)