温熱環境評価のための人体熱数値計算モデルCOMの開発

DEVELOPMENT OF NUMERICAL THERMOREGULATION-MODEL COM FOR EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENT

田辺新一*, 小林弘造**, 小川一晃***

Shin-ichi TANABE, Kozo KOBAYASHI and Kazuaki OGAWA

The human thermoregulation model COM (Complex Thermal Environment Comfort Model) was developed, incorporating the blood flow model for extremities and the conductive heat transfer model at contacting skin surfaces. The whole body model has 17 body segments, each consisting of 2 compartments for core and skin. Each core compartment of extremities has artery and vein blood pool in its center. The central blood compartment exchanges heat with blood pools and the tissues except extremities. The heat balance equations for each tissue are described. The current model is able to predict fairly well for the body temperature distribution under unsteady state conditions.

Keywords : *Thermal comfort, Numerical model, Blood flow of extremities, Counter-current heat exchange*
熱的快適性, 数値計算, 四肢血流, 対向流熱交換

1. はじめに

過去の温熱環境指標に関する研究の中で広く使用されてきたPMV (Predicted Mean Vote)¹⁾及びSET* (Standard New Effective Temperature)²⁾は, 均一で定常な温熱環境を評価するための指標である。しかし, 実際の温熱環境は不均一かつ非定常である場合が多く, そのような環境の評価が望まれている。

我々の研究グループは, 非定常・不均一な温熱環境の評価を目的として人体熱数値計算モデル65MN³⁾および3DM⁵⁾の開発を行ってきた。65MNは, 血管系の簡易なモデル化等により, 寒冷環境下で数値解析の結果が実際の人間の皮膚温分布から外れてしまうケースがあった。一方, 血管系および呼吸器系等を詳細に取り扱っている3DMでは, 詳細モデルの作成のために膨大なデータの取得が必要となるため, 人体熱モデルによる解析には目的に応じた使い分けが必要である。

本研究では, 実在温熱環境の評価への適用が容易で, 精度良く皮膚温分布を予測可能な人体熱数値計算モデルCOM (Complex Thermal Environment Comfort Model)を開発した。COMは, 詳細な四肢血流モデルを含み, 人体をCore層とSkin層からなる17のSegmentに分割しモデル化している。人体Segment別の温熱環境6要素を境界条件として入力することによって, 不均一かつ非定常状態にある温熱環境に曝露された人間の生理量・心理量を予測する。本論文では, COMの概要と, 被験者実験との比較によりその予測精度を示す。

2. 被制御系のモデル

2-1 人体の分割

本モデルの人体は, Stolwijkのモデルの体型を参考として設定した。この体型は, SET*で想定される体型にも近く, 65MNとの比較を容易とするため使用した。日本人の体型より大きく設定されているが, 比較を行った被験者実験の体型ともほぼ一致している。人体のモデルは, 図1に示すように全身を17のSegmentに分割するものとした。各Segmentの体表面積を表1に示す⁶⁾。従来から得られている生理量および熱物性値データを利用できるように, 各SegmentはCore層とSkin層の2層に分割するものとした。同SegmentのCore層とSkin層は熱伝導により熱交換を行い, Skin層は外部環境と, 対流, 放射, 蒸発, 熱伝導により熱交換を行う。また, 呼吸による熱損失がChestのCore層で考慮される。四肢の12のSegmentにおいては, Core層の中心にArterial FlowとVenous Flowを置き, 血流を介しての熱交換が行われる。図2に四肢のモデル概念図を示す。四肢を除くSegmentの血流輸送による熱交換は, Central Blood Flowとの熱交換として簡易にモデル化した。

2-2 血流のモデル化方法

四肢を除くSegmentでの熱交換を図3に示す。四肢Segment以外ではStolwijkのモデル⁷⁾を採用している。各SegmentのCore層およびSkin層はそれぞれCentral Blood Flowとの熱交換を行う。すなわち, 主要な生体内熱移動経路である血流循環による熱移動は, Central Blood Flowを介してのSegment間の熱交換としてモデル化される。このCentral Blood Flowとは, 心臓および四肢を除くSegmentの動静脈の血管系および血液を指すものである。

* 早稲田大学理工学部建築学科 教授・工博
** ㈱日建設設備設計部 工修
*** ㈱日本ERI ソリューション事業部 工修

Prof., Dept. of Architecture, Waseda University, Dr. Eng.
Nikken Sekkei Co., Ltd., M. Eng.
Japan ERI Co., Ltd., M. Eng.

図1 Segment 分割

図2 四肢 Segment のモデル

表1 分割 Segment 体表面積

Segment	体表面積[m ²]
Head	0.110
Neck	0.029
Chest	0.175
Back	0.161
Pelvis	0.221
L.Shoulder	0.096
L.Arm	0.063
L.Hand	0.050
R.Shoulder	0.096
R.Arm	0.063
R.Hand	0.050
L.Thigh	0.209
L.Leg	0.112
L.Foot	0.056
R.Thigh	0.209
R.Leg	0.112
R.Foot	0.056
全身	1.870

図4 四肢 Segment での熱交換

3. 各部の熱平衡式

各部の熱平衡式は(1)～(5)式のように表される^{(注3)(注4)}。熱平衡式中の記号は表2に示し、各々の項に関しては3-1以降に述べる。生体内の個々の生理量および熱物性値は、文献7)～13)を参考に分割した人体各部に与えた。

・Core 層の熱平衡式

$$C_{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = M_{cr} + \rho C V_{cr} (T_{ar} - T_{cr}) - K (T_{cr} - T_{sk}) + K_V (T_{ar} - T_{cr}) + K_V (T_{ve} - T_{cr}) - Q_{res} \dots\dots\dots(1)$$

・Skin 層の熱平衡式

$$C_{sk} \frac{dT_{sk}}{dt} = M_{sk} + \rho C V_{sk} (T_{ar} - T_{sk}) + K (T_{cr} - T_{sk}) - Q_{mt} - E_{sk} - Q_t \dots\dots\dots(2)$$

・Arterial Flow の熱平衡式

$$C_{ar} \frac{dT_{ar}}{dt} = \rho C V_{ar} (T_{ar*} - T_{ar}) - K_V (T_{ar} - T_{cr}) - K_{AV} (T_{ar} - T_{ve}) \dots\dots\dots(3)$$

・Venous Flow の熱平衡式

$$C_{ve} \frac{dT_{ve}}{dt} = \rho C V_{cr} (T_{cr} - T_{ve}) + \rho C V_{sk} (T_{sk} - T_{ve}) + \rho C V_{ve} (T_{ve*} - T_{ve}) - K_V (T_{ve} - T_{cr}) + K_{AV} (T_{ar} - T_{ve}) \dots\dots\dots(4)$$

表2 記号一覧

$C[kJ/K]$	熱容量	
$E_{sk}[W]$	皮膚よりの蒸発熱損失量	
$K[W/^{\circ}C]$	Core層とSkin層の間の有効熱コンダクタンス	
$K_{AV}[W/^{\circ}C]$	Arterial FlowとVenous Flowの間の有効熱コンダクタンス	
$K_V[W/^{\circ}C]$	Arterial/Venous FlowとCore層の間の有効熱コンダクタンス	
$M[W]$	産熱量	以下添字
$Q_{res}[W]$	呼吸による熱損失量	ar Arterial Flow
$Q_t[W]$	皮膚からの対流・放射熱損失量	ar* 血流の前SegmentのArterial Flow
$t[h]$	時間	cb Central Blood Flow
$T[^{\circ}C]$	温度	cr Core層
$V[L/h]$	血流量	sk Skin層
$\rho c[kJ/LK]$	血液の体積比熱(密度と比熱の積)	ve Venous Flow
		ve* 血流の前SegmentのVenous Flow
		b 基礎

図3 四肢を除く Segment での熱交換

・ Central Blood Flow の熱平衡式

$$C_{cb} \frac{dT_{cb}}{dt} = \sum_{\text{四肢を除く各Segment}} \{ \rho c V_{cr} (T_{cr} - T_{cb}) + \rho c V_{sk} (T_{sk} - T_{cb}) \} + \sum_{\substack{\text{左右のShoulder} \\ \text{およびThigh}}} \{ \rho c V_{ve} (T_{ve} - T_{cb}) \} \quad \dots\dots\dots(5)$$

3-1 熱容量

C [Wh/℃] は各部の熱容量, T [℃] は温度を表す。表3に計算に用いた各部の熱容量を示す。この熱容量は、各組織の比熱を骨 2.088kJ/kgK, 皮下脂肪2.506kJ/kgK, その他3.758kJ/kgK, 血液の体積比熱を4.186kJ/LKとして算出した。各SegmentのArterial/Venouse Flowの熱容量はそのSegmentのCore層から、Central Blood Flowの熱容量はChestおよびBackのCore層から均等に差し引いた。

表3 各部の熱容量 [kJ/K]

Segment	Core	Skin	Arterial Flow	Venous Flow
Head	9.140	0.792	—	—
Neck	2.426	0.209		
Chest	34.246	1.588		
Back	30.837	1.462		
Pelvis	53.752	2.002		
L.Shoulder	6.028	0.544	0.067	0.256
L.Arm	3.981	0.356	0.033	0.140
L.Hand	0.514	0.356	0.016	0.075
R.Shoulder	6.028	0.544	0.067	0.256
R.Arm	3.981	0.356	0.033	0.140
R.Hand	0.514	0.356	0.016	0.075
L.Thigh	18.858	1.469	0.293	1.009
L.Leg	10.146	0.788	0.144	0.536
L.Foot	0.680	0.461	0.037	0.161
R.Thigh	18.858	1.469	0.293	1.009
R.Leg	10.146	0.788	0.144	0.536
R.Foot	0.680	0.461	0.037	0.161
Central Blood Flow				16.762

3-2 産熱量

M_{cr} [W], M_{sk} [W] はそれぞれ各SegmentのCore層, Skin層における産熱量であり、(6)式で表現される。 M_b [W], W [W], M_{shiv} [W] はそれぞれ各Segmentの基礎代謝量, 外部仕事による熱産生量, ふるえ熱産生量である^{※5)}。表4に各部の基礎代謝量を示す。外

表4 各部の基礎代謝量 [W] と Metf 値

Segment	Core	Skin	Metf
Head	16.896	0.104	0.000
Neck	0.274	0.028	0.000
Chest	24.287	0.179	0.091
Back	21.737	0.158	0.080
Pelvis	12.921	0.254	0.129
L.Shoulder	1.215	0.050	0.026
L.Arm	0.346	0.026	0.014
L.Hand	0.090	0.050	0.005
R.Shoulder	1.215	0.050	0.026
R.Arm	0.346	0.026	0.014
R.Hand	0.090	0.050	0.005
L.Thigh	1.318	0.122	0.201
L.Leg	0.357	0.023	0.099
L.Foot	0.212	0.100	0.005
R.Thigh	1.318	0.122	0.201
R.Leg	0.357	0.023	0.099
R.Foot	0.212	0.100	0.005
Total		84.656	1.000

部仕事とふるえによる熱産生はCore層でのみ発生するものとした。

$$M_{cr} = M_{b,cr} + W + M_{shiv} \quad M_{sk} = M_{b,sk} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$W = 58.2 (met - M_{b,total}) A_{Du,total} Metf \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(7)の met [met] は活動の種類により推定される全身の代謝量, $M_{b,total}$ [met] は全身の基礎代謝量, $A_{Du,total}$ [m²] は全身の体表面積である。 $M_{b,total}$ は表4に示した各部の基礎代謝量の合計から得られ本研究では0.778metとなる。 met がこれを下回ることではないとした。すなわち, W が負値となる場合は0とする。 $Metf$ [-] は仕事熱産生についての各Segment筋肉層の全身に対する相対比である。これを表4に示す。ふるえ熱産生量 M_{shiv} の算出式については後述する。

3-3 血液による熱輸送

(1)式右边第2項および(2)式右边第2項は、血流によって組織へ輸送される熱量を表す。 T_{ar} と表記される動脈血温度は、四肢を除くSegmentではCentral Blood Flow温度と考える。本モデルでは、移流による熱移動については、流入する動脈血液と組織の熱交換が完全に行われるという仮定をした。 V [L/h] は各部の血流量, ρC [kJ/LK] は血液の体積比熱 (密度と比熱の積) である。本モデルでは $=4.186$ kJ/LK とした。(8)式はCore層の血流量を表す。 V_b [L/h] は基礎血流量であり表5に本計算で用いた値を示す。Core層の血流量増加は産熱量増加に依存すると考えている。すなわち, 3,600kJの産熱のために, 0.860Lの血流が必要であるという仮定をした⁷⁾⁸⁾。

$$V_{cr} = V_{b,cr} + 0.860 (W + M_{shiv}) \quad \dots\dots\dots(8)$$

(3)式右边第1項および(4)式右边第3項は、血流により前Segmentから輸送される熱量を表す。 T_{ar} と表記される血流の前Segmentの動脈血温度は、躯幹部から四肢への血液流入点となるShoulderおよびThighのArterial Flowの熱平衡式においてはCentral Blood Flow温度と考える。また、ShoulderおよびThighの静脈血は、(5)式に示されるようにCentral Blood Flowに熱を輸送する。こうして、四肢血流はCentral Blood Flowを起点として往復する。

表5 各部の基礎血流量 [L/h]

Segment	Core	Skin
Head	32.228	5.725
Neck	15.240	0.325
Chest	89.214	1.967
Back	87.663	1.475
Pelvis	33.518	2.272
L.Shoulder	1.808	0.910
L.Arm	0.940	0.508
L.Hand	0.217	1.114
R.Shoulder	1.808	0.910
R.Arm	0.940	0.508
R.Hand	0.217	1.114
L.Thigh	1.406	1.456
L.Leg	0.164	0.651
L.Foot	0.080	0.934
R.Thigh	1.406	1.456
R.Leg	0.164	0.651
R.Foot	0.080	0.934
Total		290.003

3-4 組織間の伝導による熱交換

(1)式右边第3項および(2)式右边第3項は、Core層とSkin層との間の伝導による熱交換を表す。Core層とSkin層との間には、筋肉

表6 各Node間の熱コンダクタンス [W/℃]

Segment	Core—Skin	Core — Arterial/Venous Flow	Arterial Flow — Venous Flow
Head	3.422	—	—
Neck	0.909		
Chest	1.782		
Back	1.640		
Pelvis	2.247		
L.Shoulder	1.501	0.586	0.537
L.Arm	0.982	0.383	0.351
L.Hand	2.183	1.534	0.762
R.Shoulder	1.501	0.586	0.537
R.Arm	0.982	0.383	0.351
R.Hand	2.183	1.534	0.762
L.Thigh	2.468	0.810	0.826
L.Leg	1.326	0.435	0.444
L.Foot	3.370	1.816	0.992
R.Thigh	2.468	0.810	0.826
R.Leg	1.326	0.435	0.444
R.Foot	3.370	1.816	0.992

内側表面から脂肪を通り皮膚までの熱コンダクタンスが与えられた¹⁴⁾。(1)式右辺第4項および第5項はCore層とArterial/Venous Flowとの熱交換を表し、COMでは四肢Segmentのみで考慮するものとして四肢を除くSegmentでは値を持たないものとした。(3)式右辺第3項および(4)式右辺第5項は、血管系同士の対向流熱交換を表す。表6に計算に用いた各Node間の熱コンダクタンスを示す。

3-5 呼吸による熱損失

呼吸による熱損失 Q_{res} はChestのCore層のみで発生することとした¹⁶⁾。 Q_{res} は(9)式で表される。

$$Q_{res} = 58.2 \text{ met} (0.0014 (34 - t_{a, \text{head}}) + 0.0173 (5.87 - p_{a, \text{head}}) A_{Du, \text{total}}) \quad (9)$$

$t_{a, \text{head}}$ [℃], $p_{a, \text{head}}$ [kPa] はそれぞれHeadでの空気温度、水蒸気圧である。

3-6 蒸発熱損失

(2)式の E_{sk} [W]は各SegmentのSkin層における蒸発熱損失量であり、(10)式のように表現される。 E_{dif} [W]は各Segmentの不感蒸泄による熱損失量であり、(11)式で示される。また、 E_{sw} [W]は各Segmentの発汗による蒸発熱損失量である。

$$E_{sk} = E_{dif} + E_{sw} \quad (10)$$

$$E_{dif} = 0.06 (1 - E_{sw} / E_{max}) \cdot E_{max} \quad (11)$$

ここで、 E_{max} [W]は各部位の最大蒸発熱損失量であり、(12)式から求められる。Stolwijkモデル⁷⁾⁸⁾では、不感蒸泄に関しては定数を与えているが、この値は E_{max} の3～4%に相当する値となっている。本モデルでは、各部位の不感蒸泄を、発汗の無い面積率についての最大蒸発熱損失量の6%として計算を行っている¹⁵⁾。

$$E_{max} = h_e (p_{s, sk} - p_a) A_{Du} \quad (12)$$

ここで、 h_e [W/m²kPa]は各部位の皮膚表面から環境までの潜熱伝達率、 $p_{s, sk}$ [kPa]は皮膚表面での飽和水蒸気圧、 p_a [kPa]は環境の水蒸気圧、 A_{Du} [m²]は各Segment表面積である。

皮膚表面から環境までの潜熱伝達率 h_e は i_{cl} 係数を用いた表現とし(13)式で求められる。

$$h_e = LR \cdot i_{cl} / \left(0.155 I_{cl} + \frac{i_{cl}}{h_c \cdot f_{cl}} \right) \quad (13)$$

Stolwijkモデル⁷⁾⁸⁾では着衣熱抵抗が考慮されていないが、COMではサーマルマネキン測定による各Segment別の着衣熱抵抗 I_{cl}

[clo]を用いて考慮することとした。 h_c [W/m²℃]は人体の対流熱伝達率、 f_{cl} [—]は着衣面積比である。 LR [℃/kPa]はルイス係数であり、 $LR = 16.5^\circ\text{C}/\text{kPa}$ である。また、全身各Segmentについて $i_{cl} = 0.45$ とする。本モデルでは着衣は顕熱・潜熱抵抗としてのみ取り扱っており、熱容量、吸放湿に関しては考慮していない¹⁷⁾。

3-7 皮膚表面の顕熱交換

Q_t [W]は皮膚表面と環境の対流および放射熱交換であり、(14)式のように総合熱伝達率を用いた表現とした。 h_t [W/m²℃]は各Segmentの皮膚から環境までの総合熱伝達率、 T_{sk} [℃]は皮膚表面の温度、 t_o [℃]は作用温度である。

$$Q_t = h_t (T_{sk, \text{unc}} - t_o) A_{Du} \quad (14)$$

h_t はclo値を用いると(15)式のように表現される。すなわちその逆数は、着衣量 I_{cl} [clo]と着衣外表面における表面空気層の熱抵抗の和として表現できる。 h_r [W/m²℃]は線形放射熱伝達率である。

$$\frac{1}{h_t} = 0.155 I_{cl} + \frac{1}{(h_c + h_r) f_{cl}} \quad (15)$$

COMのSegment分割は皮膚温可変型サーマルマネキン¹⁶⁾にはば対応しているので、 h_c , h_r の値には、サーマルマネキンによる測定値¹⁷⁾を用いることができる¹⁸⁾。本モデルでは、Segment別測定値(対流熱伝達率については気流条件毎の測定値)に、(16)～(18)式で示される Mod_c , Mod_r 係数を乗じて熱伝達率を算出するものとした。 Mod_c は(17)式による値と(18)式による値の大きい方とした。この取り扱い方法は7項においての65MN¹⁹⁾と比較のため同様とした。 v_{ave} [m/s], $h_{c, ave}$ [W/m²℃], $h_{r, ave}$ [W/m²℃]はそれぞれ、面積重み付け平均した全身の相対気流速度、対流熱伝達率の測定値、線形放射熱伝達率の測定値である。表7に静穏気流下(0.13m/s以下)の h_c と h_r を示す²⁰⁾。なお、表7に示した熱伝達率は立位のものであるため、本モデルは立位への対応が可能である。ただし、表7の値を姿勢に従って変更すれば、他の姿勢にも対応可能である。

$$Mod_c = 8.6 v_{ave} 0.53 / h_{c, ave} \quad (16)$$

$$Mod_c = 3.0 / h_{c, ave} \quad (17)$$

$$Mod_r = 4.7 / h_{r, ave} \quad (18)$$

SET*の2node-model²⁾では、対流熱伝達率を代謝量の関数として、作業時の相対気流速度増加を考慮しているが、本モデルでは考

表7 静穏気流下(0.13m/s以下)の $h_c(i)$ と $h_r(i)$

Segment	h_c [W/m ² ℃]	h_r [W/m ² ℃]
Head	4.5	4.9
Neck	4.5	4.9
Chest	3.0	4.3
Back	2.9	4.1
Pelvis	2.9	4.3
L.Shoulder	3.6	4.5
L.Arm	3.6	4.4
L.Hand	3.7	4.2
R.Shoulder	3.6	4.5
R.Arm	3.6	4.4
R.Hand	3.7	4.2
L.Thigh	2.8	4.8
L.Leg	2.0	5.3
L.Foot	2.0	6.1
R.Thigh	2.8	4.8
R.Leg	2.0	5.3
R.Foot	2.0	6.1
Total	3.0	4.7

慮していない。動作による相対気流速度増加に関しては、対流熱伝達率そのものを変更することとした。また、サーマルマネキンの等価温度¹⁰⁾を計算に用いることも可能である。この場合は、 h_t を標準状態に固定し、作用温度の代わりに各 Segment 等価温度を代入することによって Q_t を求める。

4. 制御系

COM の体温調節の制御式は Stolwijk モデル⁷⁾⁸⁾を基本として以下のように取り扱った。

4-1 センサー信号

各部のエラーシグナル Err [°C] は、(19)式に示す通り、各部の温度 T [°C] とセットポイント温度 T_{set} [°C] との差、および受容器の非定常特性の和とした。各部の制御目標温度としての T_{set} の値は非常に重要である。本モデルで用いたセットポイント温度および計算の初期温度である、各部の設定温度を表 8 に示す¹⁰⁾。

$$Err = (T - T_{set}) + RATE \cdot F \quad (19)$$

ここで、 $RATE$ [h] は温度受容器の動的感度、 F [°C/h] は微小温度変化量である。 T_{set} と $RATE$ は制御系の特性であり、定数として与えられる¹¹⁾。

温・冷温度受容器に対応して、各部の Warm シグナル (Wrm [°C]) と Cold シグナル (Cld [°C]) を (20), (21) 式で定義する¹²⁾。

Err が正の値のとき温受容器が動作中とし、

$$Wrm = Err, \quad Cld = 0 \quad (20)$$

Err が負の値のとき冷受容器が動作中とし、

$$Cld = -Err, \quad Wrm = 0 \quad (21)$$

表 8 各部の設定温度 [°C]

Segment	Core	Skin	動脈プール	静脈プール
Head	37.14	35.99		
Neck	36.72	35.06		
Chest	36.93	34.62		
Back	36.98	34.52		
Pelvis	37.04	34.62		
L.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62
L.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27
L.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94
R.Shoulder	36.25	34.30	36.68	35.62
R.Arm	35.77	33.95	36.49	35.27
R.Hand	35.01	34.43	35.62	34.94
L.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09
L.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71
L.Foot	34.73	34.26	35.34	34.75
R.Thigh	36.69	34.21	36.75	36.09
R.Leg	36.41	34.05	36.64	35.71
R.Foot	34.73	34.26	35.34	34.75
Central Blood Flow				36.79

4-2 統合信号

各 Segment の Skin からのセンサーシグナルは、中枢にて統合されると考える。皮膚温受容器からの重み付け出力 (Wrm [°C])、皮膚冷受容器からの重み付け出力 (Cld [°C]) は (22), (23) 式のように示される。 $SKINR$ は Skin からのセンサーシグナルを統合するための Segment 別重み付け係数であり、表 9 に示す。

$$Wrms = \sum_{各Segment} (SKINR \cdot Wrm_{sk}) \quad (22)$$

表 9 各部 Skin 層の全身に対する相対比 [-] と各部 $Shivf$ 値 [-]

Segment	SKINR	SKINS	SKINV	SKINC	Shivf
Head	0.0549	0.0640	0.1043	0.0500	0.0339
Neck	0.0146	0.0170	0.0277	0.0500	0.0436
Chest	0.1492	0.1460	0.0980	0.1500	0.2739
Back	0.1321	0.1290	0.0860	0.1500	0.2410
Pelvis	0.2122	0.2060	0.1380	0.1500	0.3875
L.Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0500	0.0024
L.Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0500	0.0014
L.Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.3500	0.0002
R.Shoulder	0.0227	0.0510	0.0313	0.0500	0.0024
R.Arm	0.0117	0.0260	0.0163	0.0500	0.0014
R.Hand	0.0923	0.0155	0.0605	0.3500	0.0002
L.Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0500	0.0039
L.Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0500	0.0018
L.Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.3500	0.0004
R.Thigh	0.0501	0.0730	0.0920	0.0500	0.0039
R.Leg	0.0251	0.0360	0.0230	0.0500	0.0018
R.Foot	0.0167	0.0175	0.0500	0.3500	0.0004

$$Clds = \sum_{各Segment} (SKINR \cdot Cld_{sk}) \quad (23)$$

5. 体温制御方法

制御系の式は、制御係数と Head の Core からのセンサーシグナルの結果から成る項、制御係数と Skin からの統合シグナルの結果から成る項、制御係数と Head の Core からのセンサーシグナル・Skin からの統合シグナルの結果から成る項を待つ。制御方法には、血管運動 (皮膚血管拡張・収縮)、発汗、ふるえ熱産生がある。各体温制御反応に関する全身に対する相対比は、表 9 に示す値を用いて計算を行った。また、各体温制御反応の制御係数を表 10 に示す。以下に示す各制御式から求められる DL , ST , E_{sw} , M_{shiv} は、負値になることがあるが、その時は 0 とする。

表 10 各体温制御反応の制御係数

	Core (C)	Skin (S)	Core × Skin (P)
発汗 (sw)	371.2 (W/°C)	33.6 (W/°C)	0.0 (W/°C ²)
ふるえ熱産生 ($shiv$)	0.0 (W/°C)	0.0 (W/°C)	24.4 (W/°C ²)
血管拡張 (dl)	117.0 (L/h°C)	7.5 (L/h°C)	0.0 (L/h°C ²)
血管収縮 (st)	10.8 (1/°C)	10.8 (1/°C)	0.0 (1/°C ²)

5-1 皮膚血流量

各 Segment の皮膚血流量 V_{sk} [L/h] は (24) 式で表される。 DL [L/h] は血管拡張に関するシグナル、 ST [-] は血管収縮に関するシグナルで各々 (25), (26) 式のように表現される。 $SKINV$ [-], $SKINC$ [-] は DL , ST についての各 Segment の Skin 層の全身に対する相対比である。また、 $Err_{cr,head}$, $Wrm_{cr,head}$, $Cld_{cr,head}$ はそれぞれ Head の Core におけるエラーシグナル、Warm シグナル、Cold シグナルである。

$$V_{sk} = \frac{V_{b,sk} + SKINV \cdot DL}{1 + SKINC \cdot ST} \cdot km_{bf} \quad (24)$$

$$DL = CdlErr_{cr,head} + Sdl(Wrms - Clds) + PdlWrm_{cr,head}Wrms \quad (25)$$

$$ST = -CstErr_{cr,head} - Sst(Wrms - Clds) + PstCld_{cr,head}Clds \quad (26)$$

ここで、 Cdl [L/h·°C], Sdl [L/h·°C], Pdl [L/h·°C²] はそれぞれ Head の Core から、Skin から、Head の Core と Skin からの

血管拡張制御係数, Cst [$1/^\circ\text{C}$], Sst [$1/^\circ\text{C}$], Pst [$1/^\circ\text{C}^2$] はそれぞれ Head の Core から, Skin から, Head の Core と Skin からの血管収縮制御係数である。

(24)式の km_{bf} [-] は皮膚血流量に関するイフェクター動作量と呼ばれ(27)式で表される。 Err_{sk} [$^\circ\text{C}$] は各 Segment の Skin におけるエラーシグナル, RT_{bf} [$^\circ\text{C}$] は皮膚血流量に関するイフェクター動作量が2となるための必要温度幅である。本論文では, 全身各 Segment について $RT_{bf} = 6^\circ\text{C}$ とした⁷⁾⁸⁾¹³⁾。

$$km_{bf} = 2.0^{Err_{sk}/RT_{bf}} \dots\dots\dots (27)$$

5-2 発汗

各 Segment の発汗による蒸発熱損失量 E_{sw} [W] は, (28)式で示される。 $SKINS$ [-] は, 発汗についての各 Segment の Skin 層の全身に対する相対比である。

$$E_{sw} = \{CswErr_{cr,head} + Ssw(Wrms - Clds) + PswWrm_{cr,head}Wrms\} \cdot SKINS \cdot km_{sw} \dots\dots\dots (28)$$

ここで, Csw [$\text{W}/^\circ\text{C}$], Ssw [$\text{W}/^\circ\text{C}$], Psw [$\text{W}/^\circ\text{C}^2$] はそれぞれ Head の Core から, Skin から, Head の Core と Skin からの発汗制御係数である。

km_{sw} [-] は発汗に関するイフェクター動作量であり, (29)式で表される。 Err_{sk} [$^\circ\text{C}$] は各 Segment の Skin におけるエラーシグナル, RT_{sw} [$^\circ\text{C}$] は発汗に関するイフェクター動作量が2となるための必要温度幅である。本論文では, 全身各 Segment について $RT_{sw} = 10^\circ\text{C}$ とした⁷⁾⁸⁾¹³⁾。

$$km_{sw} = 2.0^{Err_{sk}/RT_{sw}} \dots\dots\dots (29)$$

5-3 ふるえ熱産生

各 Segment のふるえ熱産生量 M_{shiv} [W] は(30)式で表される。

$$M_{shiv} = \{-CshivErr_{cr,head} - Sshiv(Wrms - Clds) + PshivCld_{cr,head}Clds\} \cdot Shivf \dots\dots\dots (30)$$

ここで, $Cshiv$ [$\text{W}/^\circ\text{C}$], $Sshiv$ [$\text{W}/^\circ\text{C}$], $Pshiv$ [$\text{W}/^\circ\text{C}^2$] はそれぞれ Head の Core から, Skin から, Head の Core と Skin からのふるえ制御係数である。 $Shivf$ [-] はふるえ熱産生についての各 Segment の Core 層の全身に対する相対比であり, 表9に示す。

6. COM による SET*の算出

COM では, 各 Segment の皮膚温を面積重み付けした平均皮膚温 t_{sk} [$^\circ\text{C}$], 全身のぬれ率 w [-], 皮膚表面からの熱損失量 Q_{sk} [W/m^2] を用いて, $COMSET^*$ [$^\circ\text{C}$] を算出するものとした。その基礎式は(31)式である。 $P_{s,sk}$, $P_{s,COMSET^*}$ [kPa] は, それぞれ t_{sk} [$^\circ\text{C}$], $COMSET^*$ [$^\circ\text{C}$] における飽和水蒸気圧である。

$$Q_{sk} = h_{ts}(t_{sk} - COMSET^*) + h_{es} \cdot w(P_{s,sk} - 0.5P_{s,COMSET^*}) \dots\dots\dots (31)$$

h_{ts} [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$] は標準化した総合熱伝達率であり(32)式で示される。

$$\frac{1}{h_{ts}} = 0.155I_{cls} + \frac{1}{(h_{cs} + h_{rs})f_{cls}} \dots\dots\dots (32)$$

ここで, I_{cls} [clo], h_{cs} [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], h_{rs} [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], f_{cls} [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$] は標準化した着衣量, 対流熱伝達率, 線形放射熱伝達率, 着衣面積比である。 I_{cls} は代謝量により修正され, (33)式で示される。

$$I_{cls} = \frac{1.3264}{met + 0.7383} - 0.0953 \dots\dots\dots (33)$$

h_{cs} は代謝量増加による相対気流速の増加を考慮して(34)式で求められる。

表11 計算条件

曝露時間	60min.
作用温度	10.0~40.0 $^\circ\text{C}$ (2.0 $^\circ\text{C}$ きざみ)
相対湿度	50%
気流速度	0.10m/s
着衣量	0.00clo
代謝量	58.2W/m ²

図5 平均皮膚温・ぬれ率・SET*の比較

$$h_{cs} = 5.66(met - 0.85)0.39 \dots\dots\dots (34)$$

$met < 0.85met$ の場合と, (34)式の結果 $h_{cs} < 3.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ の場合は, $h_{cs} = 3.0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。また, $h_{rs} = 4.7\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ とした。また f_{cls} は(35)式で示される。

$$f_{cls} = 1 + 0.3I_{cls} \dots\dots\dots (35)$$

また(31)式の h_{es} [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{kPa}$] は皮膚から環境までの潜熱伝達率であり, (36)式で示される。

$$h_{es} = i_{ms} \cdot LR \cdot h_{ts} \dots\dots\dots (36)$$

ここで i_{ms} [-] は標準 i_m 係数であり, $i_{ms} = 0.45$ である¹⁴⁾。

(31)式~(36)式を用いることによって, COM で算出した結果から分割・分布を考慮した SET*値を計算することが可能となる¹⁵⁾。

7. 2node-model との比較

COM の基本特性や熱伝達率を確認するため, Gagge の2node-model²⁾及び65MN³⁾⁴⁾との比較を行った¹⁶⁾。2node-model は SET* 算出のための人体熱モデルであり, これまで多くの被験者実験との比較がなされている。表11に計算条件を示す。図5に COM, 65MN 及び2node-model によって算出された平均皮膚温, ぬれ率, SET*値の比較を示す。曝露環境は2node-model との比較のため均一な環境としているが, 血流を含めた Segment ごとの温度分布は2node-model が平均皮膚温として全身で単純化していることとは異なり詳細に予測している。結果として算出される SET*が良く一致していることから, 均一あるいはそれに近い温熱環境下では全身温冷感の予測指標ツールとして利用可能と考えられる。

8. 定常状態シミュレーション

8-1 計算条件

定常状態での皮膚温分布予測値の精度を検証するため、Wernerの被験者実験結果¹⁹⁾との比較を行った。被験者は、21歳～27歳の男性6名、平均体重74.2kg、平均身長1.806mである。実験および計算条件を表12に示す^{※17)}。被験者は実験の前に60min.標準環境条件に曝露された。

表12 実験および計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間	60min.	120min.(10℃条件では90min.)
作用温度	30℃	10,20,30,35,40,45,50℃
相対湿度		40%
気流速度		0.10m/s
着衣量		0.00clo
代謝量		45.3W/m ²

8-2 計算結果・考察

90min.あるいは120min.の曝露実験終了時の各 Segment 温度について比較した。図6に各条件での各 Segment 温度の予測値と対応する Segment の被験者測定値を共に示す。予測値と測定値は概ね良い一致を得た。図7に10℃条件下の皮膚温分布の比較を示す^{※18)}。皮膚温分布の傾向を見るために対応する Segment と共に示した。65MNはArmの皮膚温をShoulderより高く算出し、測定値と異なる皮膚温分布傾向となった。一方、COMにより予測された皮膚温分布は測定値と似た傾向となった。四肢の末端であるHandおよびFootにおいては、極めて寒冷な環境のため皮膚血流が極めて少なくなり65MNとの皮膚温の差異は小さなものとなった。

図6 各温度条件での各 Segment 温度の比較

図7 10℃条件下の皮膚温分布の比較

9. 非定常状態シミュレーション

9-1 計算条件

非定常状態での平均皮膚温予測値の精度を検証するため、Stolwijkの被験者実験結果⁷⁾との比較を行った。被験者は、20歳代の男性数名である。実験および計算条件を表13に示す。被験者は実験の前に30min.標準環境条件に曝露された。

表13 実験および計算条件

	初期条件	実験条件
曝露時間	30min.	120min.
作用温度	30℃	48℃
相対湿度		50%
気流速度		0.10m/s
着衣量		0.00clo
代謝量		45.3W/m ²

9-2 計算結果・考察

平均皮膚温の経時変化を比較した。図8にCOMによる予測値と被験者の測定値を示す。ステップチェンジ条件下での予測値と測定値は概ね良い一致を得た。

図8 平均皮膚温の経時変化の比較

10. まとめ

- 1) 詳細な四肢の血流モデルを含めた人体モデルCOMを開発した。定数・係数を含めた計算モデル・熱平衡式などを示した。さらに、COMSET*の算出方法を示した。
- 2) Gaggeの2node-model及び65MNと計算結果の比較を行った。平均皮膚温、ぬれ率、SET*値は、2node-model及び65MNによるものと良い一致が得られ、均一あるいはそれに近い環境下ではCOMSET*により温冷感予測が可能であることを確認した。
- 3) 定常状態での皮膚温分布予測値の精度を検証するため、Wernerの被験者実験結果との比較を行った。各温度条件下で予測された各 Segment 皮膚温は概ね測定値と一致した。また、65MNと比較し予測精度の向上を確認した。
- 4) 非定常状態での平均皮膚温予測値の精度を検証するため、Stolwijkの被験者実験結果との比較を行った。ステップチェンジ条件下で予測された平均皮膚温の経時変化は概ね測定値と一致した。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費（基盤(A)(2)，課題番号12355022，代表者 田辺新一）により実施したものである。

注釈

- 注1) COMの人体のモデルはStolwijkの6円柱モデル⁷⁾⁸⁾をもととしている。StolwijkのモデルはHeadを表す1つの球とTorso, Arms, Hands, Legs, Feetの各Segmentを表す5円柱からなる。各Segmentの寸法は以下に示す通りである。Head: 半径9.88cm, Torso: 半径14.70cm, 長さ60cm, Arms: 半径5.02cm, 長さ112cm, Hands: 半径1.49cm, 長さ96cm, Legs: 半径6.42cm, 長さ160cm, Feet: 半径1.57cm, 長さ125cm
- 注2) 図4に示すように、特に四肢の末端においてはArterial FlowとVenous Flowを直接つなぐ血流経路が考えられる。しかし、血流と周囲組織との間の熱交換率および流量制御モデルがこれまでの研究で明らかとなっていないので、本モデルではこの血流経路には流量を与えないものとした。
- 注3) (1)~(5)式の常微分方程式の解法はオイラー法を用いた。(1)~(5)式で用いられた記号については記号一覧を示した。
- 注4) Segment間の温度差が小さいため、隣り合うSegment間の伝導による熱移動は血流による熱輸送に比較的小さいと考えられる。そこで、COMではSegment間の熱移動は血流によるもののみを考慮した。
- 注5) 本論文では各Segmentの仕事およびふえがない状態での生理的な発熱量を基礎的な代謝と定義した。従って、この基礎的な代謝量は生理学的な基礎代謝量とは異なる。
- 注6) 呼吸による熱損失については運動生理学の分野で議論されており、未だ明確になっていない。本研究では計算上ChestのCore層のみで呼吸による熱損失が発生するものとした。
- 注7) 着衣の熱容量については吸放湿に比較すると温冷感への影響が小さいことが知られている。着衣の吸放湿は非定常を扱う際には重要な要素であるが、本研究で計算を行っているような裸体の場合や、発汗のない環境では影響が小さいと考えられる。着衣を含む人体周辺のモデル化については別途行い、人体のモデルと連成させる予定である。
- 注8) Neckの熱伝達率はHeadと等しいものと仮定した。
- 注9) 気流速度0.15m/sの自然対流時にサーマルマネキンの皮膚温と室内温度との差が5~20℃の範囲では対流熱伝達率は大きく変化しない。
- 注10) いずれの体温調節モデルも組み込まない被制御系のモデルを用いて、作用温度28.8℃、相対湿度50%、気流速度0.10m/s、着衣量0.00clo、代謝量1.0met (PMV=±0条件)での定常計算を行い、得られた各部温度を設定温度とした。すなわち「生理的温熱中立環境=心理的温熱中立環境」を仮定した。COMでは、設定温度を解析毎に算出可能な構成とした。
- 注11) RATEはこれまでの研究では定量的に明らかになっていないので、本モデルでは0とした。これに関しては、SET*の2node-model⁹⁾でも同様の取り扱いとしている。今後、RATEが定量的に明らかになった時点で非0の数値を与える。
- 注12) 外部物体との接触がある場合には圧力の影響でセンサー信号が変化すると考えられるが、本研究では圧力の影響に関しては考慮していない。
- 注13) 切式や割式で表されるイフェクター動作量は、実験的に求めた量であるべきである。しかし、Stolwijkモデルでは一部実験結果を参考にしているが、これらの式を仮定している。今後、このイフェクター動作量は生理的な研究が進むにつれ改訂していく必要がある。
- 注14) (14)式で示される潜熱伝達率 h_e の算出では、 i_{cl} 係数を用いて定式化を行ったが、ここでは i_m 係数を用いた表現としている。 i_m 係数と i_{cl} 係数の関係は(i)式で表現される。
- $$i_m = (R_{cl} + R_{a,cl}) / [(R_{cl} / i_{cl}) + (R_{a,cl} / i_a)] \dots\dots\dots(i)$$
- ここで、 R_{cl} , $R_{a,cl}$ [m²℃/W]はそれぞれ着衣、着衣外表面の熱抵抗である。 i_a [-]は着衣外表面の空気層の透湿係数であり、対流熱伝達率 h_c [W/m²℃]と線形放射熱伝達率 h_r [W/m²℃]を用いて(ii)式で表される。
- $$i_a = h_c / (h_c + h_r) \dots\dots\dots(ii)$$
- 注15) 不均一放射環境においては、温冷感が特異な反応を示すことが渡邊らに

よって明らかにされている¹⁸⁾他が、COMSET*ではその特徴は考慮していない。

- 注16) 2node-modelの計算には、次の係数を用いた。発汗制御係数(C_{sw}) = 170 [g/m²hK], 血管拡張制御係数(C_{dil}) = 200 [L/m²hK], 血管収縮制御係数(S_{tr}) = 0.5 [-]。
- 注17) 実験では被験者はハンモック上に横たわっていた。計算ではモデルの基礎代謝量45.3W/m²を与えた。
- 注18) 被験者の皮膚温測定位置は文献19)に次のように表記されている。Head: forehead, Pelvis: abdomen, leg: calf, 等。温度測定には熱電対が用いられた。

参考・引用文献

- 1) P.O. Fanger: Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
- 2) A.P. Gagge, A.P. Fobelets and L.G. Berglund: A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol. 92, Part 2, pp.709-731, 1986
- 3) 田辺新一, 中野淳太, 小林弘造: 温熱環境評価のための65分割体温調節モデルに関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第541号 (2001年3月), pp.9-16, 2001
- 4) K. Kobayashi, J. Nakano, S. Tanabe: Development of 65-node Thermoregulation Model for Evaluation of Thermal Environment, Proceedings of Healthy Buildings, Vol. 2, pp.563-568, 2000
- 5) 小林弘造, 小川一晃, 田辺新一: 人間-快適性シミュレータ(その2~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.391-394, 2000
- 6) 山本ゆう子, 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃: 体内温度分布を考慮した数値体温調節モデル-3DM, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, pp.1221-1224, 2000
- 7) J.A.J. Stolwijk: A Mathematical Model of Physiological Temperature Regulation in Man, NASA, CR-1855, 1971
- 8) J.A.J. Stolwijk, J.D. Hardy: Control of Body Temperature, Handbook of Physiology, Section 9, Reaction to Environmental Agents (ed. Douglas), Amer., Physiol. Soc., pp.45-68, 1977
- 9) C.E. Smith: A Transient, Three-Dimensional Model of the Human Thermal System, KSU, Dissertation, 1993
- 10) 横山真太郎: 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会, 1993
- 11) 横山真太郎, 角田直人, 富樫貴子, 濱田靖弘, 中村真人, 落篠 澄: 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, 2000.4
- 12) R.G. Gordon, R.B. Roemer, S.M. Horvath: A Mathematical Model of the Human temperature Regulatory System-Transient Cold Exposure Response, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol. BME-23, No. 6, pp.434-444, 1976.11
- 13) J.W. Mitchell, G.E. Myers: An Analytical Model of the Counter-current Heat Exchange Phenomena, Biophysical Journal, Vol. 8, pp. 897-911, 1968
- 14) 片岡拓也, 房田泰治: 人体熱モデルを用いた自動車室内温熱環境評価, 日本機械学会論文集(B編), 64巻, 628号, pp.331-336, 1998.12
- 15) Chapter 8 Thermal Comfort, 2001 ASHRAE Fundamentals Handbook, pp.8.3-8.4, 2001
- 16) 田辺新一, 長谷部やエ: 皮膚温可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 第448号 (1993年6月), pp.1-8, 1993
- 17) 市原真希, 斎藤正文, 西村美加, 田辺新一: サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定, 日本建築学会計画系論文集, 第501号 (1997年11月), pp.45-51, 1997
- 18) 渡邊慎一, 堀越哲美, 三好結城, 宮本征一: 炬燵使用時における人体の熱的快適性の検討とその温熱効果の定量化, 日本建築学会計画系論文集, 第497号 (1997年7月), pp.47, 1997
- 19) J. Werner, T. Reents: A Contribution to the Topography of Temperature Regulation in Man, European Journal of Applied Physiology, 45, pp.87-94, 1980

(2005年3月10日原稿受理, 2005年9月26日採用決定)