



Title	部位別特性を考慮した人体の熱移動モデルの開発とその応用に関する研究-血流量調節域の被験者実験と数理モデルの比較-
Author(s)	横山, 真太郎; 角田, 直人; 中村, 光良 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 4 室内環境・エネルギー利用 . P4-8
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 143-148
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7281">https://hdl.handle.net/2115/7281</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-4-8_p143-148.pdf



## 4-8

### 部位別特性を考慮した人体の熱移動モデルの開発と その応用に関する研究

— 血流量調節域の被験者実験と数理モデルの比較 —

横山真太郎\* 角田直人\*\* ○中村光良\* 下川兼司\* 正木辰明\*  
濱田靖弘\* 中村真人\* 落藤 澄\* 富樫貴子\*\*\*

\* 北海道大学 大学院 工学研究科 都市環境工学専攻

\*\* 東京大学 国際・産学共同センター \*\*\* 日立ビルシステム

#### 1. はじめに

省エネルギー性を考慮した床暖房あるいはインテリジェントビルでのパーソナル空調、車室内空調など不均一な温熱環境に対する精度の高い評価法と制御法が求められている。本研究は、それらの要請に対応するため部位別特性を考慮した人体の熱移動モデルを開発し、多様な温熱環境の評価を可能とする温熱環境評価シミュレータの確立に向けてなされたものである。

本報では、部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの構成概要、体温調節系の特に血流量調節の効果、プログラムの精度向上のための基礎データ収集を目的として行った被験者実験および実測結果とシミュレーション結果との比較による有効性について述べる。

#### 2. 研究方法とその手順

##### 2.1 数理モデルの概要

人体全体の形状モデルには図1のように、全身を大きく16分割したものを採用した。各部位は円筒形で、内部構造については、内臓層、骨層、筋肉層、皮膚層の多層モデルとした。血管系は各部位に動脈、静脈血液大プールを1つずつ、各層毎に動脈、静脈血液小プールを設けている。四肢部における血管系のモデルを図2に示す。また、表1と表2に各層の物性値を示す。

生体内組織の熱伝導、産熱、血流による熱輸送、そして生体と環境との熱授受を記述した生体内熱移動方程式(表3参照)を基に、生体内温度予測プログラムを作成した。プログラムのフローチャートを図3に示す。今回の検討対象である血流量調節を含む体温調節

系の調節出力量算出ルーチンは表4の数理モデルを参考に作成した。

##### 2.2 被験者実験方法

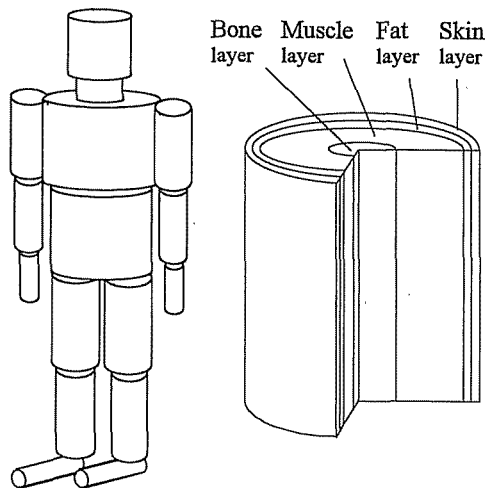
北海道大学人間環境計画学講座所有の空気環境試験室において被験者実験を行った。主要な測定項目は全身皮膚温、直腸温、鼓膜温、産熱量で、温熱環境因子と共に連続測定した(表5参照)。設定条件は22°C~32°Cの範囲で気温を6段階設定し、湿度については絶対湿度が0.012[kg/kg(DA)]となるようにした。被験者は健康青年男子3名(M, N, S)である。測定中被験者は裸体で安静椅座位を保持した。

#### 3. 研究結果と考察

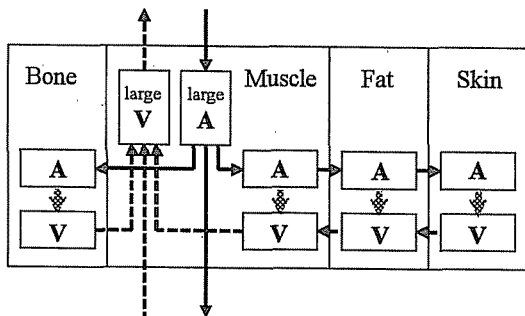
##### 3.1 被験者実験結果と考察

図4にBreath-by-breath法による代謝量の1分間平均値の経時変化の1例を示す。この例のように、同一条件では経過時間に伴う有意なトレンドの傾向は示されなかった。表7と図5に設定条件毎の代謝量の測定結果をまとめた。図5によれば、設定気温28~32°Cの範囲では被験者全員の代謝量が安定した低い値をとっていることがわかる。また、設定気温が26°Cを下回ると、代謝量が大きくなる傾向が読みとれる。

深部温として、直腸温と鼓膜温を測定した。図6は設定気温22°Cにおける深部温の連続測定例である。直腸温と鼓膜温はほぼ同様の変動を示していることがわかる。この例に示されるように、全被験者および設定条件を通じて直腸温が鼓膜温より高く、その差は0.3°C~0.8°Cの範囲であった。被験者間の変動幅を比較すると、直腸温で0.5°C以下、鼓膜温では0.3°C以下の範囲にあった。表8に各設定条件の準定常状態における直腸温と鼓膜温の測定



**Figure 1** 16 segments human body model and multi-layered concentric cylindrical model for extremities.



**Figure 2** Schematic diagram showing the geometric arrangement of the circular system. The symbols A and V stand for arterial pool and venous pool, respectively.

**Table 1** Thermal properties of each layer.

Layer	$\lambda$	$\rho$	$c$	$M$	$f$
Bone	2.208	1418	2092	545	0.32
Muscle	0.465	1239	3724	629	0.12
Fat	0.203	917	2510	449	0.45
Skin	1.580	1200	3390	493	3.50
Blood	0.518	1056	3850	-	-

$\lambda$ : thermal conductivity [W/(m·K)],  $\rho$ : density [kg/m<sup>3</sup>],  
 $c$ : specific heat [J/(kg·K)],  $M$ : heat generation rate [W/m<sup>3</sup>],  
 $f$ : blood flow rate [mL/(100mL·min)]

**Table 2** Thermal properties of internal organs layers.

Segment	$\lambda$	$\rho$	$c$	$M$	$f$
Head	0.500	1036	3724	7600	16.41
Neck	0.465	1036	3724	5667	15.20
Thorax	0.465	1065	3724	3520	16.11
Abdomen	0.465	1044	3724	1779	11.62

$\lambda$ : thermal conductivity [W/(m·K)],  $\rho$ : density [kg/m<sup>3</sup>],  
 $c$ : specific heat [J/(kg·K)],  $M$ : heat generation rate [W/m<sup>3</sup>],  
 $f$ : blood flow rate [mL/(100mL·min)]

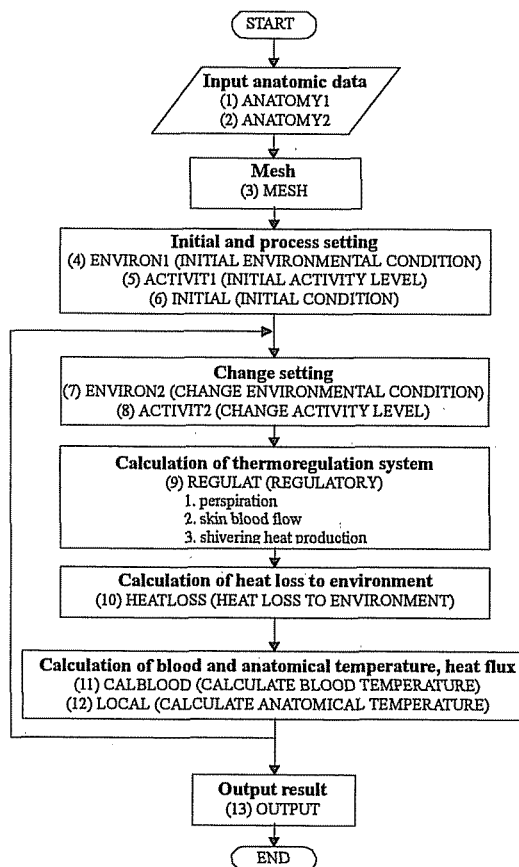
**Table 3** Heat transfer equation for the human body ( ordinary part ).

$$\begin{aligned} &\text{•tissue} \\ \rho c \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda \nabla^2 T + \frac{f c_b}{V} (T_{ab} - T) \\ &\quad + H_{ab} (T_{ab} - T) + H_{vb} (T_{vb} - T) + M \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\text{•arterial pool} \\ \rho_b c_b V_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} &= f_{ab} c_b (T_{am} - T_{ab}) \\ &\quad + \int_V H_{vb} (T - T_{vb}) dV + H_{av} (T_{vb} - T_{ab}) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\text{•venous pool} \\ \rho_b c_b V_{vb} \frac{\partial T_{vb}}{\partial t} &= f_{vb} c_b (T_{vn} - T_{vb}) \\ &\quad + \int_V (\frac{f c_b}{V} + H_{vb}) (T - T_{vb}) dV + H_{av} (T_{ab} - T_{vb}) \end{aligned} \quad (3)$$

$t$ : time [s],  $\rho$ : density [kg/m<sup>3</sup>],  $c$ : specific heat [J/(kg·C)],  
 $T$ : temperature [°C],  $\lambda$ : thermal conductivity [W/(m·C)],  
 $f$ : blood flow rate [kg/s],  $V$ : volume [m<sup>3</sup>],  $M$ : heat generation rate [W/m<sup>3</sup>],  $H$ : volumetric heat transfer coefficient [W/(m<sup>3</sup>·C)]. The suffixes  $b$ : blood,  $ab$ : arterial system,  $vb$ : venous system,  $am$ : adjacent arterial system,  $vn$ : adjacent venous system.



**Figure 3** Flowchart for the present computer program.

**Table 4** Mathematical modeling of thermoregulatory response.

• Local perspiration rate : $E_i$  [ $W/m^2$ ]

$$E_i = \varepsilon_i \times \{197 \times (T_{hy} - T_{hy0}) + 23 \times (T_{sm} - T_{sm0})\} \times \exp\left\{\frac{(T_{st} - T_{sm0})}{10.0}\right\} \times \exp\left\{\frac{(dT_{sm}/dt) - r_0}{10.0}\right\}$$

$$E_i = \varepsilon_i \times \{197 \times (T_{hy} - T_{hy0}) + 23 \times (T_{sm} - T_{sm0}) + \gamma \times \left\{\frac{(dT_{sm}/dt) - r_0}{10.0}\right\}\} \times \exp\left\{\frac{(T_{st} - T_{sm0})}{10.0}\right\} \times \exp\left\{\frac{(dT_{sm}/dt) - r_0}{10.0}\right\}$$

• Local skin blood flow rate : $(SBF)_i$  [ $g/cm^3 \cdot min$ ]

$$(SBF)_i = \zeta_i \times \{0.694 \times (T_{hy} - T_{hy0}) + 0.074 \times (T_{sm} - T_{sm0})\} + C_i$$

• Local shivering heat production rate : $M_i$  [ $W/m^2$ ]

$$M_i = \delta_i \times \{13 \times (T_{hy} - T_{hy0}) + 0.4 \times (T_{sm} - T_{sm0})\} \times (T_{sm} - T_{sm0})$$

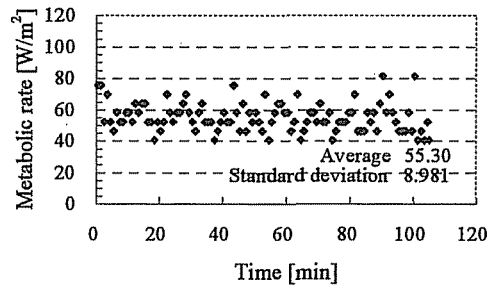
$T_{hy}$  : hypothalamic temperature [ $^{\circ}C$ ],  $T_{sm}$  : mean skin temperature [ $^{\circ}C$ ],  $T_{st}$  : local skin temperature in  $i$ -th compartment [ $^{\circ}C$ ],  $T_{hy0}$  : set point of hypothalamic temperature [ $^{\circ}C$ ],  $T_{sm0}$  : set point of mean skin temperature [ $^{\circ}C$ ],  $\varepsilon_i$  : coefficient of local perspiration rate at  $i$ -th compartment [-],  $\zeta_i$  : coefficient of local skin blood flow rate at  $i$ -th compartment [-],  $\delta_i$  : coefficient of local shivering heat production rate at  $i$ -th compartment [-],  $\gamma$  : numerical value with perspiration control effect [ $(W/m^2)/(^{\circ}C/min)$ ],  $r_0$  : numerical value with perspiration control effect [ $^{\circ}C/min$ ],  $C_i$  : local skin blood flow rate at  $i$ -th compartment in comfort [ $g/cm^3 \cdot min$ ].

**Table 5** Measuring items and measuring instruments.

Measuring items	Measuring instruments
<b>Subject</b>	
Skin surface temperature (16 segments)	Thermography (NEC Sanei, TH3102MR) Thermistor (TAKARA, THR series) Multi channel recorder (ESD, Green Kit 88) Control computer (NEC, PC9801NS/E and EPSON, PC286LF)
Tympanic temperature	Thermistor for tympanum
Rectal temperature	Thermistor for rectum (Shibaura Electron, Type MGAIII thermometer)
Total metabolic rate	Metabolic measurement system by respiration (Sensor, Medics VMAX29c)
Sensitivity	Report for subjective sensation
<b>Thermal environmental factor</b>	
Air temperature	C-C thermocouple Multi channel recorder (ESD, Green Kit 88) Control computer (NEC, PC9801NS/E and EPSON, PC286LF)
Wall temperature	Thermography (Fujitsu, INFRA-EYE 5000) C-C thermocouple
Air velocity	Hot wire anemometer 3-D ultrasonic anemometer (KAJIO, Microsonic WA-590)
Humidity	Humidity sensor (SHINEI, RHD-SD series)

**Table 6** Physical characteristics of subjects.

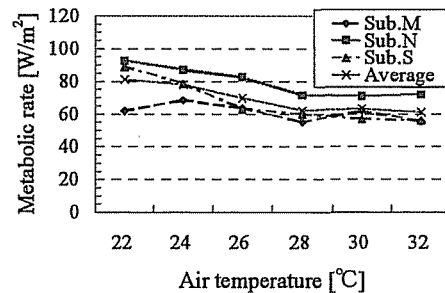
	Sub.M	Sub.N	Sub.S
Age [yr.]	22	20	20
Height [cm]	173.0	169.0	163.0
Weight [kg]	63.5	73.0	53.0
Body surface area [ $m^2$ ]	1.7	1.8	1.5
Ratio of body fat [%]	12.8	17.2	10.7



**Figure 4** Experimental results of total metabolic rate (Subject M;  $T_a=32^{\circ}C$ ).

**Table 7** Experimental results of total metabolic rate.

Air temperature [ $^{\circ}C$ ]	Sub.M [ $W/m^2$ ]	Sub.N [ $W/m^2$ ]	Sub.S [ $W/m^2$ ]	Average [ $W/m^2$ ]
22	61.73	92.54	88.96	81.08
24	68.39	87.02	78.50	77.97
26	63.59	82.47	63.14	69.73
28	54.88	71.46	59.67	62.00
30	61.65	70.71	56.92	63.09
32	55.30	71.85	56.09	61.08



**Figure 5** Relationship between total metabolic rate and air temperature.

**Table 8** Experimental results of mean skin, rectal and tympanic temperatures.

Air temperature [ $^{\circ}C$ ]	Mean skin temperature [ $^{\circ}C$ ]	Rectal temperature [ $^{\circ}C$ ]	Tympanic temperature [ $^{\circ}C$ ]
22	30.29	36.69	36.18
24	32.01	36.94	36.16
26	32.72	36.74	36.07
28	33.25	36.94	35.98
30	33.98	36.85	36.29
32	36.78	36.78	36.45

結果（3名の平均値）をまとめた。

図7に設定気温 28℃における代表的な部位の皮膚温の測定例を示す。設定気温 28℃では実験開始から、各部位の皮膚温の大きな変動は見られなかった。部位間を比較すると、額部が高く、足部が低いことがわかる。この傾向は全被験者を通じて同様であった。尚、平均皮膚温（3名の平均値）は 33.25℃であった。設定気温 30℃では各部位の温度レベルが上昇し、部位間の差が小さくなるという結果を得た。設定気温 32℃では各部位の温度レベルがさらに上昇し、部位間の差がより小さくなった。図8に設定気温が最も低い 22℃における皮膚温の経時変化を示した。図7の設定気温 28℃の場合と比較すると、どの部位においても、皮膚温は低下し、その傾向は四肢部で大きく、特に足部において顕著であった。平均皮膚温は 30.29℃となった。設定気温 24℃と 26℃の変動傾向はそれらの中間に位置し、平均皮膚温でみるとそれぞれ 32.01℃と 32.72℃であった。

図9にサーモグラフィによる皮膚温の測定例を示す。前述のサーミスタによる測定結果と同様に、設定温度が低いと部位間の温度差が大きいことが確認できる。末梢部である足部全体、下腿部全体の温度が低下しており、足部ではほぼ設定温度レベルまで低下していることがわかる。この足部の皮膚温低下は、試験室下方からの吹出し気流による対流冷却および床面への熱伝導が考えられる。

### 3.2 シミュレーション結果と考察

生体内温度予測プログラムによる非定常シミュレーションの結果を示す。温熱環境条件は、周囲空気温度・平均放射温度を 10 分後に 30℃から 26℃にステップ変化させ、風速は 0.1m/s、相対湿度は 50%で一定とした。また、生体側の条件としては安静裸体時を想定した。

図10は視床下部温と平均皮膚温の時間変化を血流量調節の有無で比較した結果である。グラフ中の R-OFF とは皮膚血流量を安静時の値で一定に保った場合、R-BLD は皮膚血流量算出ルーチンを有効にした場合を指す。平均皮膚温は、R-BLD では、R-OFF に比べ低くなり、その差は 60 分経過時点で約 0.3℃となった。

これは、皮膚温低下に伴い、血流量調節によって皮膚血流量が小さくなり、そのため体深部からの熱の流入が減少するためである。視床下部温は、R-OFF において 60 分経過時点で約 0.4℃低下した。一方、R-BLD では 0.1℃程度の低下であり、さらに、環境条件変化後わずかな上昇がみられる。これは前腕部に代表される四肢部の血流量の減少に伴い深部温が初発上昇するという報告に対応するものと考えられる。

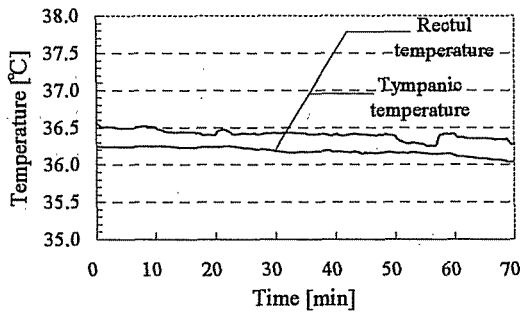
血流量調節を考慮した生体内温度予測プログラムにより計算された各部位の内部温度分布の一例として、上躯幹部、前腕部について図11に示す。20 分経過時点、すなわち環境条件を変化させてから 10 分後では両部位とも皮膚表面付近での温度低下が大きく、時間経過に伴い中心部分でも温度の低下がみられる。中心部分での温度低下は上躯幹部よりも前腕部の方が大きい。これは上躯幹部が産熱量の大きい内臓層を有し、さらに代表径が大きいためである。

### 3.3 実験結果とシミュレーション結果の比較検討

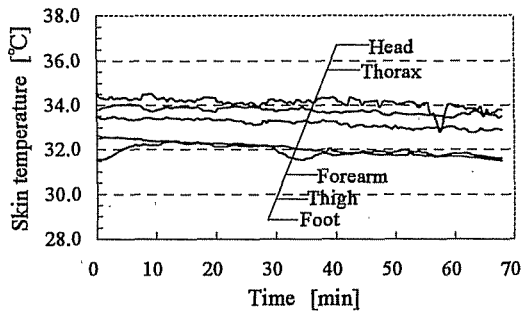
被験者実験の温熱環境条件を入力値として生体内温度予測プログラムによるシミュレーションを行い、実測値と計算値とを比較検討した。ここで計算条件のうち風速については実験での測定値を反映させ部位毎に設定した。生体側の温度初期値は至適域における安静状態を想定した定常計算により与えた。

図12に設定温度 28℃における直腸温および平均皮膚温の実測値と計算値の経時変化を示す。直腸温に関しては実測値と計算値はこの場合最大でも約 0.2℃の誤差という結果が得られた。平均皮膚温は、初期条件などの与え方によりレベルに差があるものの、経過時間約 10 分以降は類似した温度低下の推移を示していることがわかる。

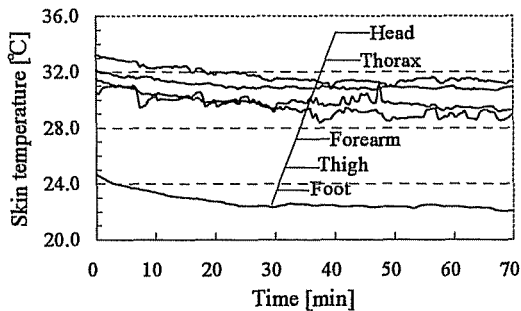
図13と図14に設定温度 24℃および 32℃、60 分経過時点での比較を示す。下腿部皮膚温を除けば、生体内温度予測プログラムによる計算値は実測結果を概ね再現しているという結果となった。下腿部は実測値よりも計算値の方が高い数値となっているが、この理由と



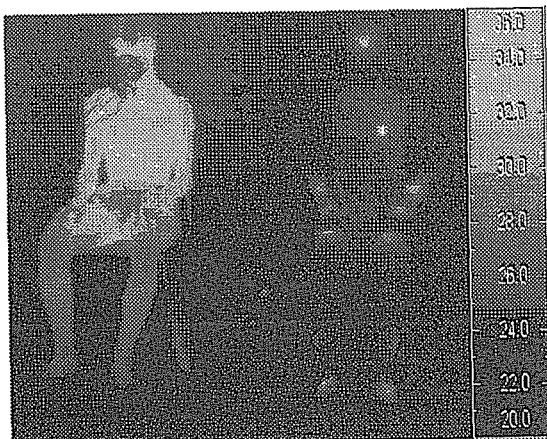
**Figure 6** Experimental results of rectal and tympanic temperatures (Subject M;  $T_a=22^\circ\text{C}$ ).



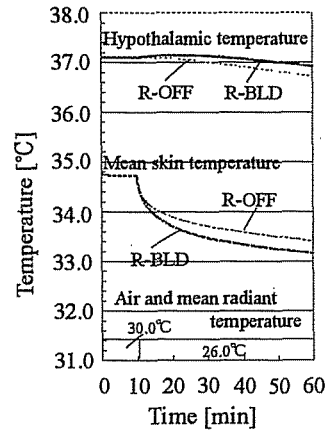
**Figure 7** Experimental results of skin temperatures (Subject M;  $T_a=28^\circ\text{C}$ ).



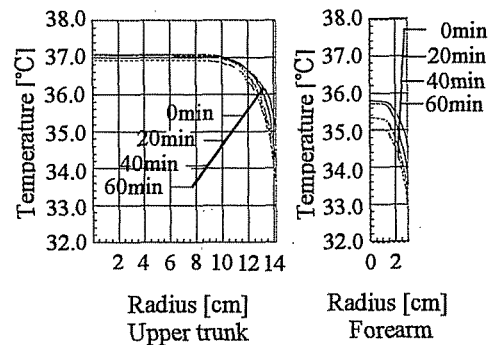
**Figure 8** Experimental results of skin temperatures (Subject M;  $T_a=22^\circ\text{C}$ ).



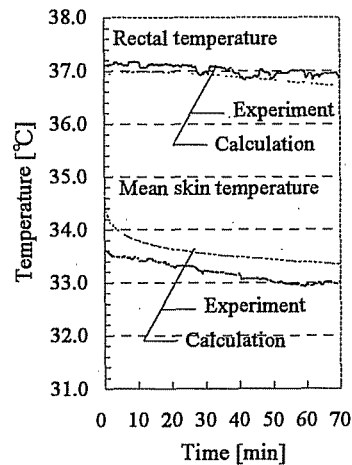
**Figure 9** Experimental results of skin surface temperatures with thermography (Subject M;  $T_a=24^\circ\text{C}$ ).



**Figure 10** Calculated results of hypothalamic and mean skin temperatures with thermoregulatory response of skin blood control (R-BLD) and with constant skin blood flow (R-OFF).



**Figure 11** Changes of calculated temperature profiles in the upper trunk and the forearm.



**Figure 12** Comparison of experimental and calculated results of rectal and mean skin temperatures ( $T_a=28^\circ\text{C}$ ).

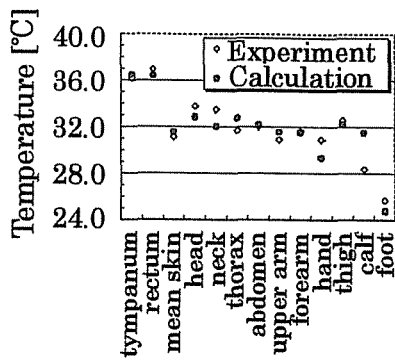


Figure 13 Comparison of experimental and calculated results of core and skin temperatures that were taken after 60 minutes the air temperature changed from 28°C to 24°C.

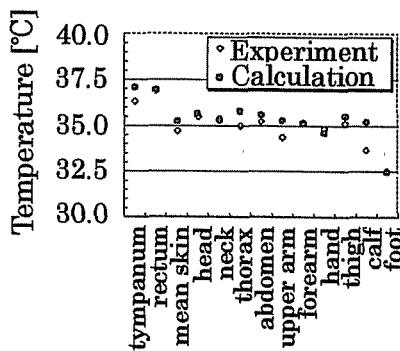


Figure 14 Comparison of experimental and calculated results of core and skin temperatures that were taken after 60 minutes the air temperature changed from 28°C to 32°C.

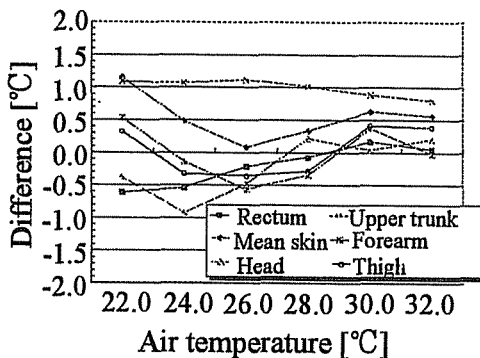


Figure 15 Differences between experimental and calculated results of core and skin temperatures.

しては乱流状態の吹き出し気流による影響が考えられる。

図 15 に直腸温と代表的な部位の皮膚温に関する 60 分経過時点での実測値と計算値との差を示す。深部温は 26~32°C でわずか 0.3°C 以内の差であり、本プログラムの組織内部温度の予測精度は良好なものであるといえる。皮膚温は、全条件を通して 1.2°C 以内の差で、特に設定温度 26~32°C では上軀幹部を除き、実測値と計算値の差は 0.5°C 以内という結果が得られた。

以上の被験者実験の実測値とシミュレーション結果との比較により、少なくとも今回の設定条件においては、生体内温度予測プログラムの有効性が確認できた。

#### 4. まとめ

- 1) 不均一温熱環境の評価と制御に対応する部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの概要を述べた。
- 2) プログラムの精度向上のために被験者実験を行った。被験者 3 名の 6 条件の代謝量、深部温、皮膚温の生理反応実験結果について報告した。
- 3) 予測プログラムによる非定常シミュレーション結果は、深部温・皮膚温ともに部位別特性を示し、血流量調節の効果を定量的に確認した。
- 4) 被験者実験の温熱環境条件を入力データとして予測プログラムによるシミュレーションを行い、得られた生体内温度の計算値と実測値との比較により本プログラムの有効性を示した。

#### <参考文献>

- 1) 横山：生体内熱移動現象。北海道大学図書刊行会，札幌(1993)。
- 2) 横山・角田・落藤：生体内熱移動方程式のアルゴリズムの改良とシミュレーション。日本生気象学会誌，34(2)，pp.73-79(1997)
- 3) Yokoyama, Kakuta and Ochifuji: Development of New Algorithm for Heat Transfer Equation in the Human Body and its Applications. Appl. Human Sci.. 16(4), pp.153-159.
- 4) Savage and Brengelmann: Control of skin blood flow in the neutral zone of human body. J. Applied Physiology, 80(4); pp. 1249-1257 (1996)
- 5) Stolwijk and Hardy: Control of body temperature. Handbook of physiology -Section 9. American Physiology Society, Baltimore (1977) pp.45-68