



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	部位別特性を考慮した人体の定常熱移動モデルの開発とその応用
Author(s)	横山, 真太郎; 角田, 直人; 富樫, 貴子 他
Description	第5回衛生工学シンポジウム (平成9年11月6日 (木) -7日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 2 評価・モデル . 2-3
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 5, 68-71
Issue Date	1997-11-01
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7706">https://hdl.handle.net/2115/7706</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	5-2-3_p68-71.pdf



2-3

部位別特性を考慮した人体の定常熱移動モデルの開発とその応用

横山 真太郎\*      ○角田 直人\*      富樫 貴子\*  
濱田 靖弘\*      中村 真人\*      落藤 澄\*

\*北海道大学大学院工学研究科人間環境計画学講座

1. はじめに

北海道大学落藤研究室では、温熱環境の評価と制御のために、部位別特性を考慮した体温調節モデルの開発に取り組んできた。これまで生体内熱移動方程式の差分法によるシミュレーション<sup>1)</sup>、境界要素法のアルゴリズムについて報告してきた<sup>2)</sup>。

今回開発した人体熱移動モデルは、温熱環境因子のみの入力、定常状態における全身各部位の生体内温度分布、熱流束、血液温度の算出が可能である。生体内温度分布を変形 Bessel 関数の線形結合で表わすアルゴリズムを採用しているため、従来の数値計算法に比べ、計算ステップが大幅に低減化され、計算時間が非常に短いという利点をもっている。また、計算結果は部位別特性を反映したものとなった。

温熱環境評価のみならず、生体内の熱移動を定量的に捉える必要のある温熱生理学をはじめとする幅広い分野において、本モデルの応用が期待できる。

2. 人体のモデル化

2.1 部位分割と円筒層モデル

人体全体の形体モデルとしては、図-1 のように人体解剖学と人体生理学の知見から全身を大きく 16 分割したものを考える。各部位は円筒

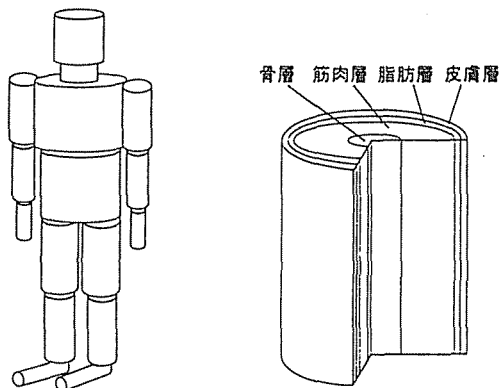


図-1 16 分割人体モデル・円筒層モデル(四肢部)

とし、内部構造については、内臓層、骨層、筋肉層、脂肪層、皮膚層の多層モデルとした。

2.2 血管系モデル

血管系は、生体において熱輸送の重要な役割を担っている。四肢部における血管系のモデル概念を図-2 に示す。各部位には動脈血液大プールと静脈血液大プールを 1 つずつ、また層毎に動脈血液小プールと静脈血液小プールを設ける。動脈血液大プールは大動脈に、静脈血液大プールは大静脈の対応を想定している。また、動脈血液小プールは小動脈-動脈系毛細血管に、静脈血液小プールは静脈系毛細血管-小静脈の対応を想定している。

3. 生体内熱移動方程式の解法

3.1 生体内熱移動方程式と一般解

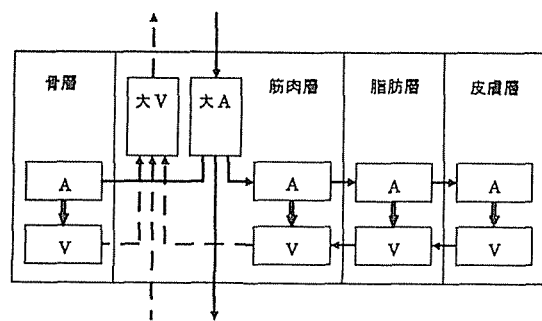
生体内熱移動方程式を以下に示す。

・組織

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

・動脈系プール

$$\rho_b c_b V_{ab} \frac{\partial T_{ab}}{\partial t} = f_{ab} c_b (T_{am} - T_{ab}) + \int_V H_{ab} (T - T_{ab}) dV + H_{av} (T_{vb} - T_{ab}) \quad (2)$$



A: 動脈系プール V: 静脈系プール

図-2 血管系モデル概念図 (四肢部)

・静脈系プール

$$\rho_b c_b V_{vb} \frac{\partial T_{vb}}{\partial t} = f_{vb} c_b (T_{vn} - T_{vb}) \quad (3)$$

$$+ \int_V \left( \frac{f c_b}{V} + H_{vb} \right) (T - T_{vb}) dV + H_{av} (T_{ab} - T_{vb})$$

ここで、 $\rho$ : 密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $c$ : 比熱 [J/kg°C],  $T$ : 温度 [°C],  $\lambda$ : 熱伝導率 [W/m°C],  $f$ : 血流量 [kg/s],  $V$ : 体積 [m<sup>3</sup>],  $M$ : 産熱量 [W/m<sup>3</sup>],  $H$ : 熱伝達を表わす係数 [W/m<sup>3</sup>°C]. 添字は,  $b$ : 血液,  $ab$ : 動脈血管系,  $vb$ : 静脈血管系,  $am$ : 隣接する上位の動脈系プール,  $vn$ : 隣接する下位の静脈系プールを表わす.

式(1)の左辺は, 組織の蓄熱項であり, 右辺第1項は温度拡散項, 第2項は組織に流入する動脈血液の保有する熱量がもたらす移流項, 第3, 4項はそれぞれ動脈系血管, 静脈系血管と組織との熱伝達を表す項, 第5項は産熱項である.

今回の円筒層モデルにおける定常状態の式(1)は更に簡便化され, 以下の式となる.

$$\frac{d^2 T(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r)}{dr} - \omega^2 T(r) + k = 0 \quad (4)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{\lambda} \left( \frac{f c_b}{V} + H_{ab} + H_{vb} \right) \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{\lambda} \left[ \left( \frac{f c_b}{V} + H_{ab} \right) T_{ab} + H_{vb} T_{vb} + M \right] \quad (6)$$

式(4)の一般解は, 0次の第1種変形 Bessel 関数  $I_0$  と 0次の第2種の変形 Bessel 関数  $K_0$  の線形結合にポテンシャル項  $k/\omega^2$  が付加した形となり, 式(7)で示される.

$$T(r) = c_1 I_0(\omega r) + c_2 K_0(\omega r) + \frac{k}{\omega^2} \quad (7)$$

また, 式(7)を変数  $r$  で微分すると, 式(8)が得られ, 熱流束  $q$  を求めることができる.

$$\frac{dT}{dr} = c_1 \omega I_1(\omega r) - c_2 \omega K_1(\omega r) \quad (8)$$

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} \quad (9)$$

$\omega$  と  $k$  の実数値は層によって異なるため, 式(7), (9)は層ごとに記述される. 例えば, 骨層 (Born layer) における式(7)は, 添字  $B$  を用いて

以下の式のように表わす.

$$T_B(r) = c_{1B} I_0(\omega_B r) + c_{2B} K_0(\omega_B r) + \frac{k_B}{\omega_B^2} \quad (10)$$

### 3.2 領域分割法と境界条件

多層モデルのように, 複数の異質な部分領域が結合された領域に対しては, 部分領域間の適合条件(温度一致条件)と平衡条件(熱流束一致条件)により, 一つの連立方程式に帰着させることができる. 例えば, 骨層  $B$  と筋肉層  $M$  の境界 ( $r=r_1$ ) では以下の式となる.

$$\text{適合条件: } T_B(r_1) = T_M(r_1) \quad (11)$$

$$\text{平衡条件: } q_B(r_1) = q_M(r_1) \quad (12)$$

皮膚表面の熱流束は生体と環境間の熱授受量に相当する. 皮膚からの放熱については, 対流, 放射, 水分蒸発の3経路を考慮した. 対流熱伝達率は, Oosthuizen ら<sup>5)</sup>の無次元式から求めた.

また  $r \rightarrow 0$  のとき  $K_1(r) \rightarrow +\infty$  より, 最内層での  $K_1$  にかかる係数  $c_2$  は 0 となる.

### 3.3 生体内熱移動解析プログラム

前節の条件式と血管系の熱収支式より, 全身すべての部位の各層の任意係数  $c_1, c_2$ , 動脈系, 静脈系血液温度  $T_{ab}, T_{vb}$  を未知ベクトルとする連立方程式を構成する. この連立方程式を解き, 求めた値から生体内温度, 熱流束を算出するプログラムを開発した.

このプログラムは温熱環境因子のみの入力変更で, 多様な条件下の生体内温度分布, 熱流束

表-1 生体物性値

	$\lambda$ [W/m°C]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/kg°C]	$M$ [W/m <sup>3</sup> ]	$f$ [ml/100mlmin]
骨層	2.208	1418	2092	545	0.32
筋肉層	0.465	1239	3724	629	0.12
脂肪層	0.203	917	2510	449	0.45
皮膚層	1.580	1200	3390	493	3.50
血液	0.518	1056	3850	-	-

表-2 内臓産熱量・血流量

	産熱量 [W]	血流量 [m <sup>3</sup> /s]
頭部	13.59	8.67×10 <sup>-6</sup>
頸部	0.22	4.00×10 <sup>-6</sup>
上躯幹部	36.87	23.00×10 <sup>-6</sup>
下躯幹部	21.62	15.00×10 <sup>-6</sup>

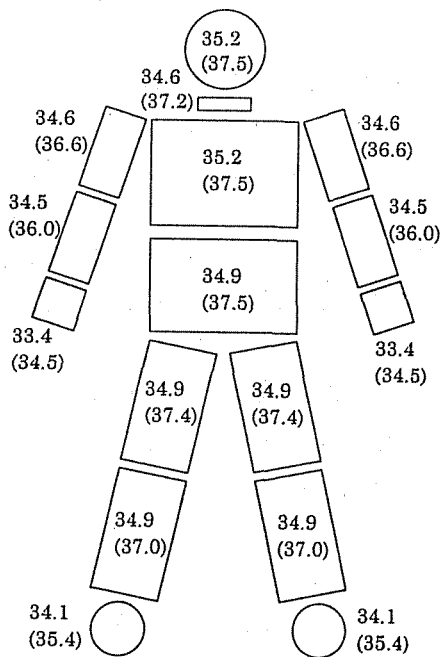


図-3 各部位の皮膚表面温度[°C]と中心温度[°C]. ( )内が中心温度.

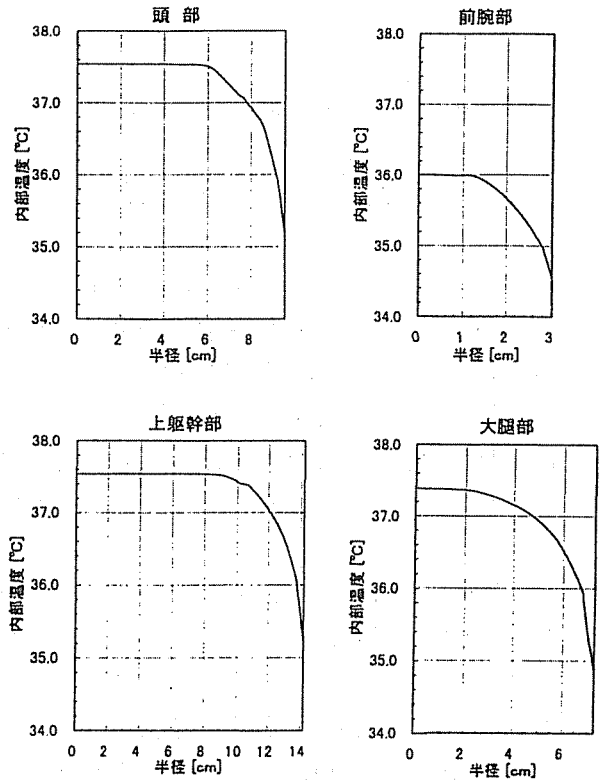


図-4 内部温度分布の例

分布, 血液温度の算定が可能である. 温熱環境因子は部位レベルでの入力となっている. さらに, 生体内温度分布を変形 Bessel 関数の線形結合で表わすアルゴリズムを採用しているため, 従来の数値計算法に比べ, 計算時間が非常に短いという特長を有している.

表-1 は各層の熱物性値, 産熱量, 血流量である. ただし, 産熱量, 血流量は安静時の値であり, 活動状態, 姿勢により入力変更可能なプログラムとなっている. 表-2に内臓の血流量, 産熱量を示す.

#### 4. 計算結果と考察

開発したモデルの応用例の中から, 気温 29.0°C, 平均放射温度 29.0°C, 風速 0.1m/s, 相対湿度 50%の全身で均一な温熱環境条件についての計算結果を報告する. 生体側の条件としては, 安静裸体の定常時を想定した.

図-3 に全身の各部位の皮膚表面温度と中心温度を示す. 末梢部にいくほど温度が低い. 平均皮膚温度は 34.8°Cとなった. 直腸温にほぼ該当すると考えられる下躯幹部中心温度, 視床下部温にほぼ該当すると考えられる頭部中心温度

はともに 37.5°Cとなった.

図-4 に内部温度分布の例として頭部, 上躯幹部, 前腕部, 大腿部を示す. 部位の内部では, 皮膚表面に比べ, 高い温度に保持されており, 特に, 内臓層が存在する頭部, 上躯幹部は, 内臓層の領域全体で 37.5°Cに保たれている.

最近の Webb<sup>6)</sup>による皮膚表面および内部温度の実測, また限られた部位ではあるが, 著者らの研究室における極細針型熱電対による内部温度実測結果と類似の温度分布となっている.

図-5 は, 各部位の大動脈, 大静脈に相当する大プールの温度を模式的に示したものである. 小プールも併せた血液温度の例として, 大腿部, 下腿部, 足部を模式的に図-6 に示す. 内部の組織温度と同様に, 末梢部にいくほど静脈温度は低く, 更に皮膚層で最も低い. 図-7 は上躯幹部の血液温度である. 今回は, Rubensteinらの報告<sup>7)</sup>を基に, 肺での呼吸気との熱交換による肺動脈, 肺静脈の温度変化はないとしている.

計算結果では, 下躯幹部中心温度, 頭部中心温度が 37.5°Cであるのに対し, 心臓温は 37.2°C,

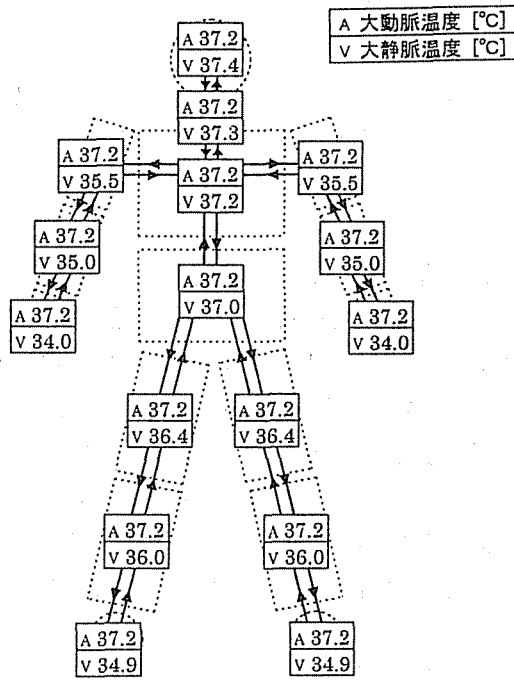


図-5 各部位の血液大プール温度

頸部から戻る静脈の温度が 37.3°C, 上軀幹部内臓層から戻る静脈の温度が 37.5°C となっている。Eichna ら<sup>8)</sup>は血液温度の詳細な実測を行い、軀幹深部の血管毎に、僅かではあるが有意な温度差があると報告している。その中で、肝静脈、頸静脈温度は心臓内血液温度より有意に高く、同様に直腸温も高いことが報告されている。

### 5. おわりに

円筒層モデルにおける生体内熱移動方程式の一般解を導出した。その解は変形 Bessel 関数の線形結合にポテンシャル項の付加した形で表わされた。

開発したモデルは、温熱環境因子のみの入力変更で、定常状態の生体内温度分布、熱流束分布、血液温度の算定が可能で、さらに従来のものと比較すると計算ステップが大幅に低減化されているため、計算時間が非常に短いという利点を持っている。

設定された温熱環境条件に対する計算結果は、部位別特性を十分に反映したものとなった。

温熱環境評価のみならず、生体内の熱移動を定量的に捉える必要のある温熱生理学をはじめとする幅広い分野において、本モデルの応用が期待できる。

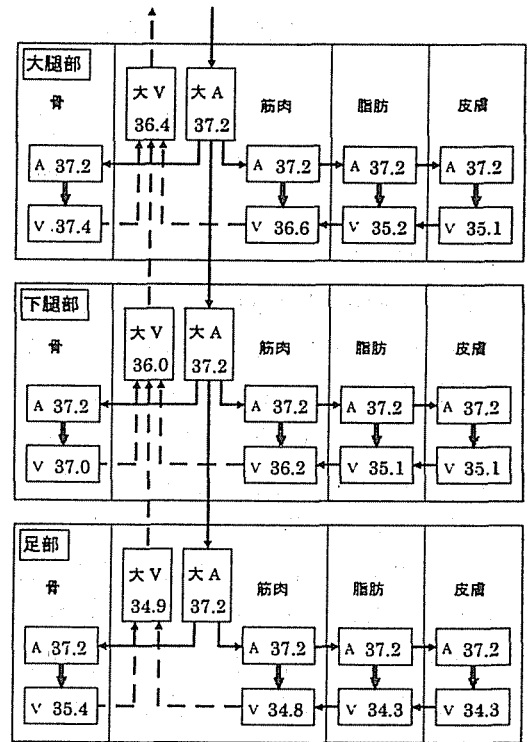


図-6 四肢部血液温度

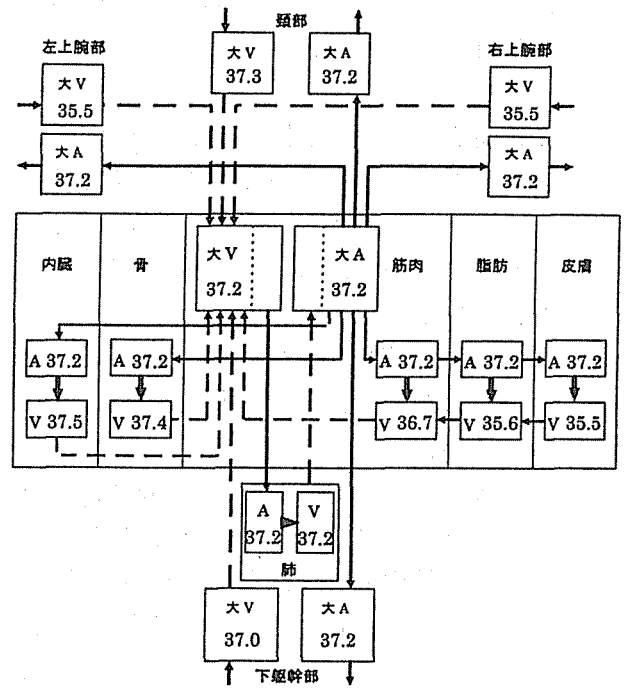


図-7 上軀幹部血液温度

### 参考文献

- 1) Yokoyama and Ogino: Annals of Physiol Anthropol, 4 (1985), 183-187.
- 2) 横山・角田・山本: 空気調和・衛生工学会講演論文集(1995), 661-668.
- 3) 横山: 生体内熱移動現象, 北海道大学図書刊行会(1993).
- 4) Pennes: J. of Appl Physiol, 1 (1948), 93-123.
- 5) Oosthuizen: Trans. ASME, (1970), 194-196.
- 6) Webb: Euro. J. Appl Physiol, 64 (1992), 471-476.
- 7) Rubenstein et al: J. Appl Physiol, 15 (1960), 10-12.
- 8) Eichna et al: J. Clin. Invest, 30 (1951), 353-359.