HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	生体内熱移動解析プログラムの開発とその応用
Author(s)	角田, 直人; 横山, 真太郎; 落藤, 澄 他
Description	第4回衛生工学シンポジウム（平成8年11月7日（木）-8日（金） 北海道大学学術交流会館） . 2 評価 . P2-9
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 4, 83-86
Issue Date	1996-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7829
Type	departmental bulletin paper
File Information	4-2-9_p83-86.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

2－9

生体内熱移動解析プログラムの開発とその応用

○ 角田　直人　　横山　真太郎
落藤　澄　　濱田　靖弘
中村　真人
(北海道大学工学部衛生工学科)

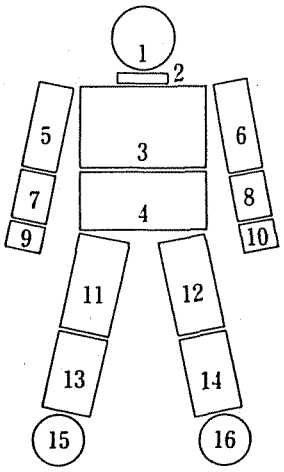
1．はじめに

北大 衛生工学科 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[1]、境界要素法のアルゴリズムについて報告してきた[2,3]。本報では、人体の各部位を円筒多層モデルとした場合の新しいアルゴリズムについて述べる。

このアルゴリズムに基づいて開発されたプログラムは、温熱環境因子のみの入力変更で、生体内温度分布、熱流束の算出が可能で、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もっている。

2．人体部位のモデル化

人体のモデルとしては、解剖学と生理学の知見から全身を16分割し、それぞれの部位を円筒層近似とした。内部構造については、内



1 頭　部
2 頸　部
3 上軀幹部
4 下軀幹部
5 上腕部(右)
6 上腕部(左)
7 前腕部(右)
8 前腕部(左)
9 手　部(右)
10 手　部(左)
11 大腿部(右)
12 大腿部(左)
13 下腿部(右)
14 下腿部(左)
15 足　部(右)
16 足　部(左)

図1　16分割モデル

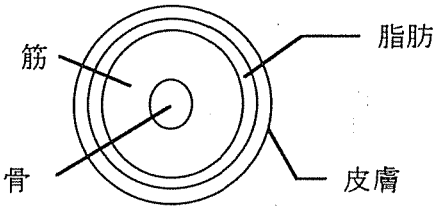


図2　多層モデル(四肢部の例)

表1　生体内熱移動方程式

・組織（tissue）

$$\rho c\frac{\partial T}{\partial t}=\lambda\nabla^2 T+\frac{vc_b}{V}(T_a-T)+H_a(T_a-T)+H_v(T_v-T)+M \qquad (1)$$

・動脈系プール（arterial pool）

$$\rho_b c_b V_a\frac{\partial T_a}{\partial t}=v_a c_b(T_{am}-T_a)+\int_V H_a(T-T_a)dV+H_{av}(T_v-T_a) \qquad (2)$$

・静脈系プール（venous pool）

$$\rho_b c_b V_v\frac{\partial T_v}{\partial t}=v_v c_b(T_{vn}-T_v)+\int_V\left(\frac{vc_b}{V}+H_v\right)(T-T_v)dV+H_{av}(T_a-T_v) \qquad (3)$$

ρ:比重量[kg/m³], c:比熱[J/kg℃], T:温度[℃], λ:熱伝導率[W/m℃], v:血流量[kg/s], V:体積[m³], M:産熱量[W/m³], H:熱伝達を表わす係数[W/m³℃]　　添字　b:血液, a:動脈系, v:静脈系, am:隣接部位の動脈系, vn:隣接部位の静脈系

蔵層、骨層、筋肉層、脂肪層、皮膚層の多層モデルとした(図1, 2)。部位のモデル寸法は、過去の資料と測定を基にした値を用いて、16部位について求めた。

3．生体内熱移動方程式の解法

プログラム開発の基本となる生体内熱移動方程式を表1に示す。式(1)の左辺は、単位体積当たりの組織の蓄熱項である。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。また動脈、静脈系についての熱収支式が式(2),(3)である。

今回の円筒層モデルにおいて部位毎の筋産熱、血流量、また温熱環境が円周方向に均質とみなせる場合、式(1)の定常状態の式は更に簡便化され、以下の式となる。

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

$$\omega^2=\frac{1}{\lambda}\left(\frac{vc_b}{V}+H_a+H_v\right) \quad (5)$$

$$k=\frac{1}{\lambda}\left[\left(\frac{vc_b}{V}+H_a\right)T_a+H_vT_v+M\right] \quad (6)$$

また、Pennes(1948)[5]以来の詳細な皮膚温度分布報告や最近のサーモグラフィーの報告によれば、同一部位内では温度変異がほとんどみられない。従って、各部位の円筒モデルの軸方向すなわちz方向に変異がないものとして、解析を進めた。

式(4)において定数項 k を含まない方程式は、0次の変形Bessel方程式と呼ばれ、その一般解は、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 の線形結合で表される。従って、方程式(4)の一般解は、一定のポテンシャル項 k/ω^2 が付加した形となり、式(7)で示される。

$$T(r)=c_1I_0(\omega r)+c_2K_0(\omega r)+k/\omega^2 \quad (7)$$

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。

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

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

今対象としている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。

適合条件と平衡条件は、例えば骨層 B と筋肉層 M の境界($r=r_1$)においては、以下の式のようになる。

適合条件： $T_B(r_1)=T_M(r_1)$ (10)

平衡条件： $Q_B(r_1)=-Q_M(r_1)$ (11)

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、強制対流と自然対流の双方の影響を考慮し、Oosthuizenら[6]の無次元式から求めた。

また円筒モデルにおいて、中心($r=0$)の熱流束は0であるから、$r\to0$ のとき $K_1(r)\to+\infty$ より、中心の層での K_1 にかかる係数 c_2 は0という条件式が導かれる。

以上の条件式より、係数 c_1、c_2 を未知数とする連立方程式を形成する。

4．血管系モデル

血管系は、生体内熱移動現象で熱輸送の最も重要な役割を担っている。血管系のモデル概念を図3に示す。各部位には動脈血液大プ

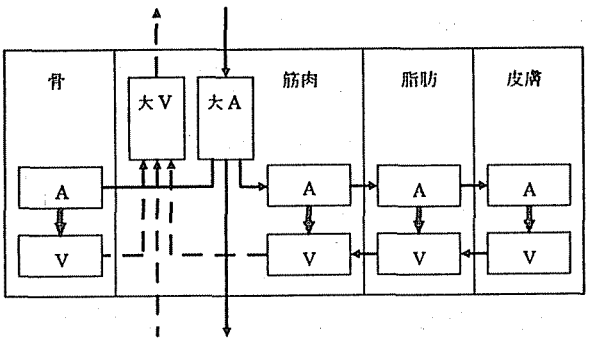


図3　血管系のモデル概念図

表２　モデルの生体物性値

	熱伝導率 [W/m℃]	比重量 [kg/m³]	比熱 [J/kg℃]	産熱量 [W/m³]	血流量 [ml/100ml/min]
骨	2.208	1418	2092	545	0.32
筋	0.465	1239	3724	629	0.12
脂肪	0.203	917	2510	449	0.45
皮膚	1.580	1200	3390	493	3.50
血液	0.518	1056	3850	-	-

ールと静脈血液大プールを一つずつ、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に相当する。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－小静脈に相当する。血流量については、過去の報告を基に慎重に検討して割り当てた。

血管系に関する熱収支式(2),(3)は、各プールにおいてそれぞれ成り立ち、式の中には組織温度、隣接するプールの血液温度が含まれており、連立して解く必要がある。さらに、大動脈血液プール・大静脈血液プールにより各部位が連結され、全身モデルとして一括して解くことにより、全身の組織温度、血液温度の算出が可能になる。

５．プログラムの開発と計算結果

各層の任意係数 c_1, c_2、動脈系、静脈系血液温度 T_a、T_v を未知ベクトルとする連立方程式を構成し、それらの値と式(7)から生体内温度分布、式(9)から熱流束を求めるアルゴルズムを考え、それに基づくプログラムを開発した。各部位レベルにおける計算のフローチャートを図４に示した。このプログラムによれば、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、熱流束分布の同定が可能である。さらに、既存の当研究室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くてすむという特徴を有している。

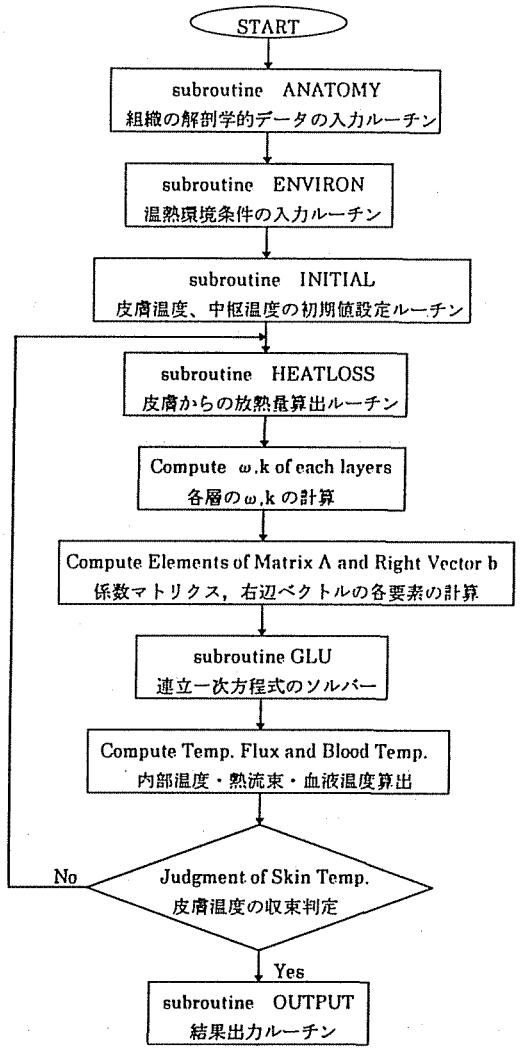


図４　計算フロー図

表２はプログラムに既設定されている各層の熱物性値、産熱量、血流量のまとめである。

このプログラムの応用例の中から、四肢部についての計算結果の例を図５に掲げた。生体側の条件としては安静裸体の定常時を想定した。温熱環境条件は、気温 30.0℃、放射温度 30.0℃、風速 0.5m/s、相対湿度 50%である。また、この条件での血液温度を大腿部と下腿部について模式的に図６に示す。

皮膚表面からの放熱量は、大腿部において 48.7[W/m²]、上腕部では 44.9[W/m²]、足部では 46.9[W/m²]であった。

大腿部については、安静立位条件下での極

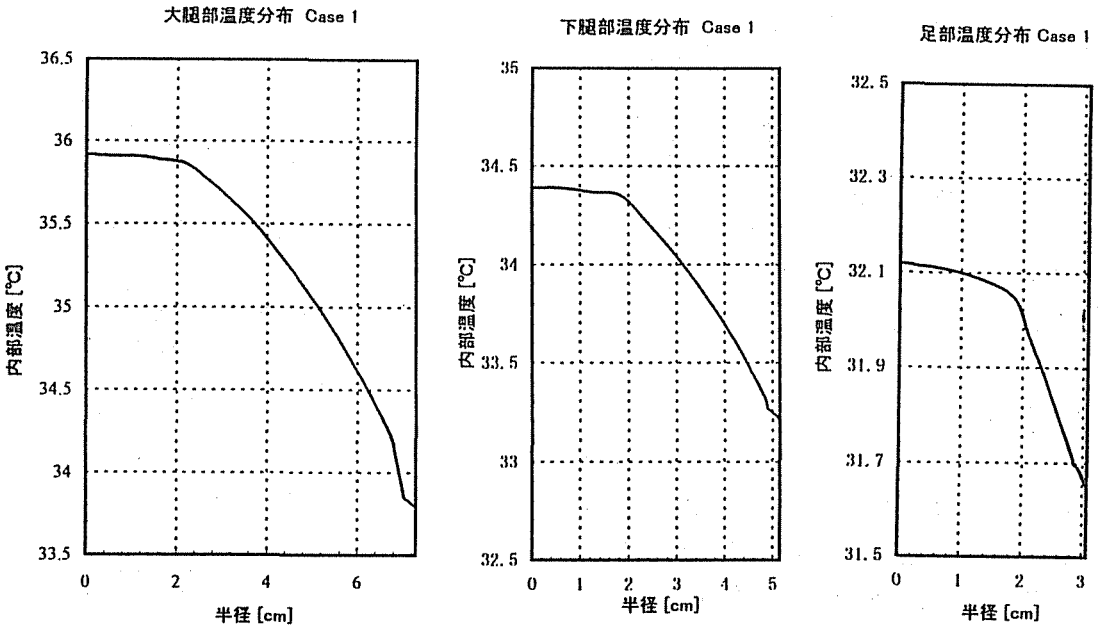


図5　生体内部温度計算結果

(気温 30℃, 平均放射温度 30℃, 風速 0.5m/s, 相対湿度 50%)

細針型熱電対による生体内部温度実測結果があり、気温、放射温度の設定条件が若干異なるが、実測結果と比較すると類似の温度分布となっている。

6．おわりに

今回開発したプログラムは、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、熱流束分布の同定が可能で、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して計算された組織温度、熱流束、血液温度は、部位別特性を十分に反映したものとなった。特に、熱物性値、発熱量、血流量の既知量の予測精度が高いと考えられる四肢部では、高い再現性を示した。

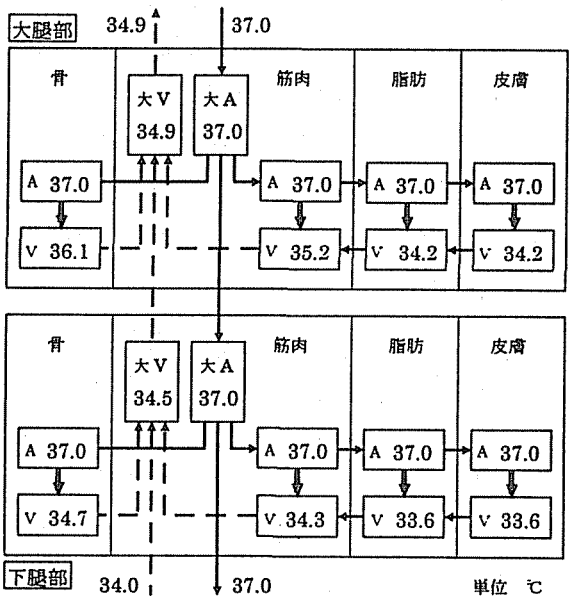


図6　血液温度計算結果

参考文献

1) Yokoyama and Ogino: Developing Computer Model for Analysis of Human Cold Tolerance. Annals Physiol. Anthrop., vol.4,pp183-187(1985)　2) 横山・坂本：部位別特性を考慮した体温調節モデルのプログラミングに関する検討. 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp549-552(1992)　3) 横山・角田・山本：生体内熱移動方程式のアルゴリズムの改良とその応用. 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp661-668(1995)　4) 横山：生体内熱移動現象. 北海道大学図書刊行会(1993)　5) Pennes: Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm. J. of Applied Physiology, pp93-123(1948)　6) Oosthuizen: Combined Convective Heat Transfer From Horizontal Cylinders in Air. Transaction of the ASME,pp194(1970)