



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの改良とその応用
Author(s)	横山, 真太郎; 田尾, 道義; 角田, 直人 他
Description	第10回衛生工学シンポジウム (平成14年10月31日 (木) -11月1日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 3 建築環境・エネルギー利用 . 3-9
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 10, 81-84
Issue Date	2002-10-31
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/7106">https://hdl.handle.net/2115/7106</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	10-3-9_p81-84.pdf



### 3-9 部位別特性を考慮した生体内温度予測プログラムの改良とその応用

横山真太郎（北海道大学） ○田尾道義（新菱冷熱工業(株)） 角田直人（電気通信大学）  
由佐卓也 濱田靖弘 中村真人 窪田英樹（北海道大学）

#### はじめに

人間の生活の場は、室内外を問わず様々である。現在の地球環境問題の一つであるエネルギー消費問題の観点から、生活の中心である室内環境に対して、省エネルギー性が求められている。また、それと同時に室内空間の本来の目的である居住者の健康増進性が求められており、その点から、人の快適さを評価する様々な指標が開発されている。

本研究室では、人間の生理反応に基づく不均一な温熱環境に対する精度の高い評価を目的とし、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を行ってきた。

また、本研究室で行われた被験者実験とそのシミュレーション結果より、予測プログラムの有効性が示された。

本研究では、生体内温度予測プログラムをさらなる発展を目指し、以下の6点について改良を加えた。

i) 全身温冷感と温熱快適感を本研究室で行った着衣時ランプ実験と裸体時ステップ実験データより、温度変化率の説明変数の導入を含めて多くの回帰式を検討した結果、鼓膜温偏差値および平均皮膚温偏差値による予測式を提示した。プログラムの出力結果より算出したそれぞれの偏差値を代入し予測を行った。

ii) 皮膚において、自由神経終末で冷感を受容されていることに着目し、皮膚温度受容器の情報源を自由神経終末に相当する真皮と表皮の境界部分に設けた。つまり、体温調節出力量算出を、温度受容器相当部位温を入力値に使用することで精度向上を図った。

iii) 人間の各種運動形式・強度に対応するように、局所筋エネルギー代謝量の推定法を用

いて、生体部位毎に代謝量を与えるルーチンを開発した。

iv) サーマルマネキンを用いた着衣量測定により、各部位にその測定値を与え、着衣変化対応を行った。

v) 個人ごとに3種類の形状データを用いることを考え個体差対応を行った。

vi) 生育環境によって能動汗腺数が異なることに注目し、水分蒸発調節量を変化させることを考え、各生育群の生理反応の対応を行った。

本報では、その中で生体内温度予測プログラムの個体差対応と運動強度変化対応を中心に述べる。その他の改良点については次報以降で述べる予定である。また、その応用例として、周知の Gagge et al. (1968)の被験者実験についてシミュレーションを行ったので報告する。

#### 1. 生体内温度予測プログラムの概要

生体内温度予測プログラムは、環境との熱授受、組織内の熱伝導、血流による熱輸送、産熱を記述した各組織および動脈系、静脈系についての熱収支式である生体内熱移動方程式の数値解法を実行するプログラムと体

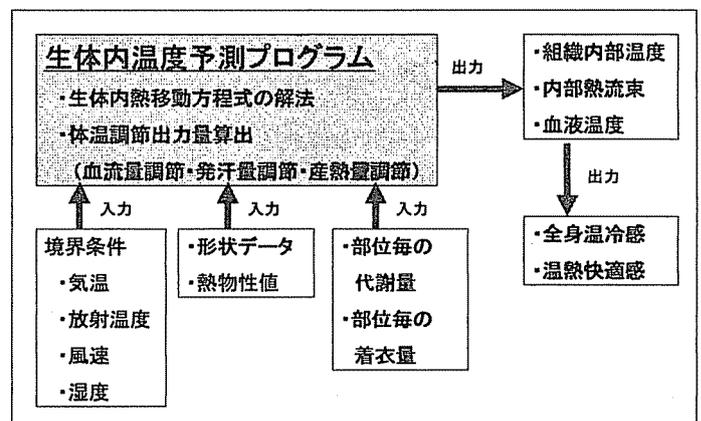


図-1 生体内温度予測プログラム概要

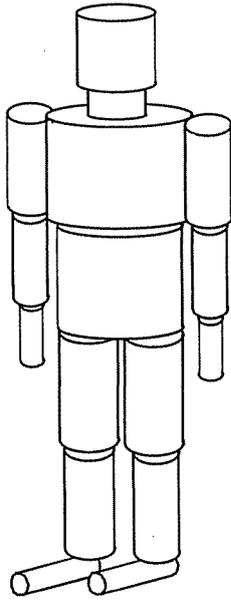


図-2 人体モデル

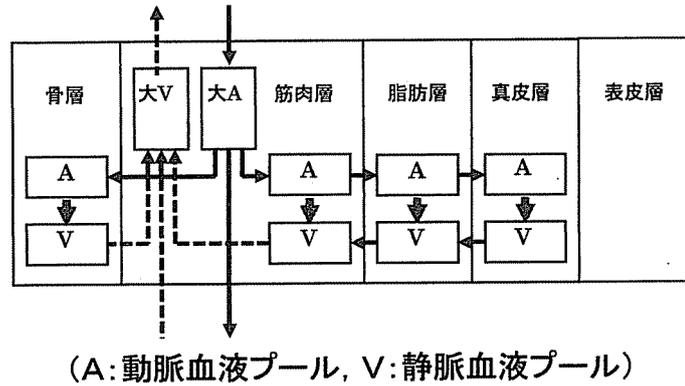


図-3 血液系モデル(四肢部)

表-1 熱物性モデル値

	熱伝導率 $\lambda$ [W/(m·K)]	密度 $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	比熱 $c$ [J/(kg·K)]	産熱量 $M$ [W/m <sup>2</sup> ]	血流量 $f$ [ml/(100ml·min)]
骨	2.208	1418	2092	545	1.00
筋肉	0.465	1239	3724	629	3.43
脂肪	0.126	917	2510	449	1.10
真皮	0.209	1200	3390	493	4.08
表皮	0.163	1000	4198	0	-
血液	0.518	1056	3850	-	-

温調節系の調節出力量算出のルーチンからなる。予測プログラムは人体の形状と各組織の熱物性値を入力、部位毎に温熱環境因子(気温、放射温度、風速、湿度)を入力することにより、生体内の温度分布、熱流束、血液温度が算出される。図-1に生体内温度予測プログラムの概要を示す。

人体モデルは16部位分割モデル(図-2)、円筒多層モデルであり、各部位の内部構造は内臓層、骨層、筋肉層、脂肪層、真皮層、表皮層からなる。ただし、四肢部には内臓層は存在しない。血管系モデルについては、表皮層を除く各組織に動脈系、静脈系の血液小プール、各部位に血管大プールを設けている(図-3)。また、各組織の熱物性は過去の資料より値を与えた(表-1)。

## 2. 予測プログラムの個体差対応

人間の外部形状および内部組成には個人差がみられ、そのため同一温熱環境であっても生体内外の熱移動量が異なる場合がある。そこで、個人ごとの各部位の詳細なサイズデータを入力することにより、個体差に対応し、高精度なシミュレーションを行うことを検討した。

本研究では、i) 生体画像計測データ、ii) 3次元形状計測データ、iii) 生体計測データを適宜活用することによって、予測プログラムの個体差対応を行うことを考えた。

### 2.1 生体画像計測データ

予測プログラムの個体差対応を行うために最も推奨するのは、詳細な生体内部組織の形状情報を得ることが可能なX線CT(コンピュータ断層撮影)やMRI(磁気共鳴画像)などの医用画像検査装置による計測データである。このデータより生体内外の伝熱現象についての極めて精密なシミュレーションを行うことができると考えられる。

### 2.2 3次元形状データ

生体画像計測データは入手困難な場合は、少なくとも環境との熱授受量算出を精度良く行うように3次元形状計測装置による人体外表面の3次元形状の同定を行うことを考えた。3次元形状計測装置は、非接触で、人体に無害な赤外光を光源とした光学的三角計測方式を用いており、10数秒で測定が可能である。3次元形状計測装置については別報にて詳しく述べる。

### 2.3 生体計測データ

文献記載の実験報告では、被験者の生体計

表-2 代謝量・温熱環境条件

条件	代謝量 [W]	気温 [°C]	平均放射温度 [°C]	風速 [m/s]	相対湿度 [%]
case1-1	360	10.5	10.5	0.225	35
case1-2	581	10.0	10.0	0.225	35
case1-3	897	11.1	11.1	0.225	35
case2-1	369	20.3	20.3	0.225	35
case2-2	594	20.1	20.1	0.225	35
case2-3	896	20.1	20.1	0.225	35
case3-1	349	30.1	30.1	0.225	35
case3-2	582	30.7	30.7	0.225	35
case3-3	900	30.2	30.2	0.225	35

測項目には身長、体重、またそれらから算出された体表面積、体脂肪率のみの記述しかない場合が多い。その場合は、生体計測データより推定した体脂肪量と除体脂肪量より筋肉と脂肪を変化させ部位毎のサイズ(部位長、部位半径)を変えることにより、予測プログラムの個体差対応を行うことを考えた。

表-3 代謝量の分配例

筋群	代謝量 [W]	部位	代謝量 [W]
準基礎代謝量	248.4	準基礎代謝量	248.4
前腹筋群	19.0	下躯幹部	50.2
体幹起立筋群	16.5		
臀筋群	14.8		
前大腿筋群	147.2	大腿部	209.8
後大腿筋群	62.6		
前下腿筋群	12.3	下腿部	29.8
後下腿筋群	17.4		
合計	538.2	合計	538.2

### 3. 予測プログラムの運動強度変化対応

横山ら<sup>5)</sup>は総エネルギー代謝量と筋エネルギーの線形指標として主に双極表面誘導筋電図を同時測定し、その連立方程式から推定対象筋群の線形指標をエネルギー換算する係数と準基礎代謝量を求め、各筋群のエネルギー代謝量を推定する方法を開発した。また、これによる立位や座位などの静的筋作業、トレッドミル歩行や自転車エルゴメータ作業などの動的筋作業における局所筋エネルギー代謝量の推定を行っている。

本研究では、各種作業に対応した局所筋エネルギー代謝量の推定値を、各筋群に相当する人体モデル各部位の筋肉層に与えることにより、予測プログラムの運動強度変化対応を考えた。

## 4. シミュレーション

大幅に改良を加えた予測プログラムを用いたシミュレーションの応用例として、Gagge et al.(1968)の温熱環境変化と運動強度変化の複合影響実験を再現したので、その結果を報告する。

### 4.1 実験概要

Gagge et al.の実験は運動強度3条件(最大酸素摂取量約30%、50%、70%)の自転車エルゴメータ作業(50rpm)、環境条件3条件(気温約10°C、20°C、30°C)の組み合わせ9条件下で行った被験者実験である。被験者は健康な男性4名(平均身長184cm、平均体重87.9kg)を用いている。

### 4.2 シミュレーション入力条件

各部位の温熱環境条件は表-2に示す文献記載の値を用いた。

人体モデルは、身長184cm、体重87.9kgの被験者を既往のモデルとの比較により、各部位の長さおよび半径を変更することで再現した。

次に、自転車エルゴメータ作業時の生体内予測プログラムの運動強度変化対応について述べる。シミュレーションで用いた総代謝量は表-2に示す実測された代謝量を用いた。各組織における代謝量は、筋肉層以外の部位では、安静時と比べ代謝量の増減は起こっていないと考え、安静時の値を用いた。また、筋肉層については、自転車エルゴメータ作業時の局所筋代謝量の推定より、安静時からの代謝量の増加量分を各筋肉層に表-3に示すように分配した。他の部位の筋肉組織については、準基礎代謝量より基礎代謝量を減じた値を均等に分配した。

### 4.3 実験結果と計算結果の比較

比較した値はそれぞれ運動時の安定状態を考え、実測値は文献記載の運動開始後30~40分後の平均値を採用しており、計算値は収束計算した結果を採用した。

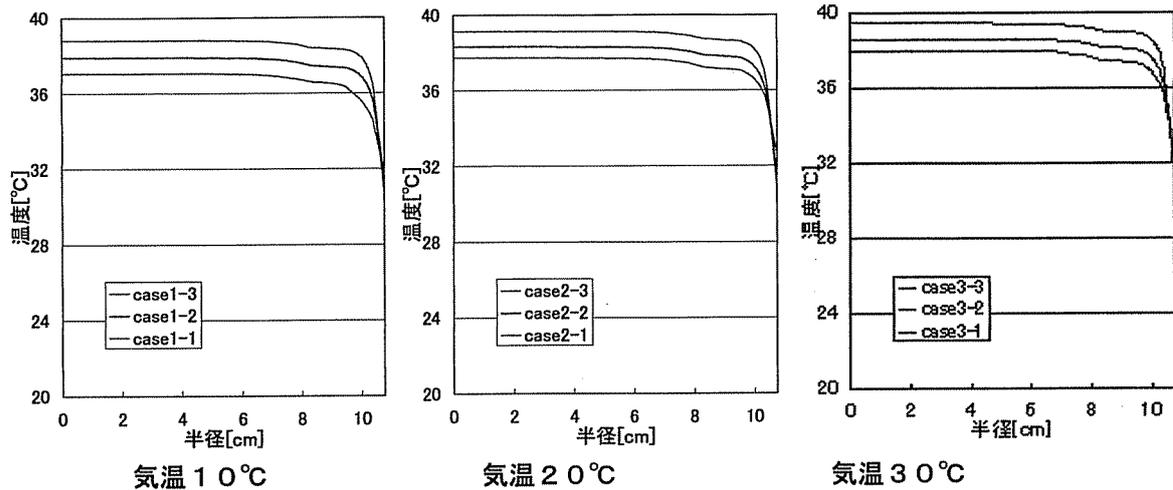


図-4 内部温度分布 (頭部)

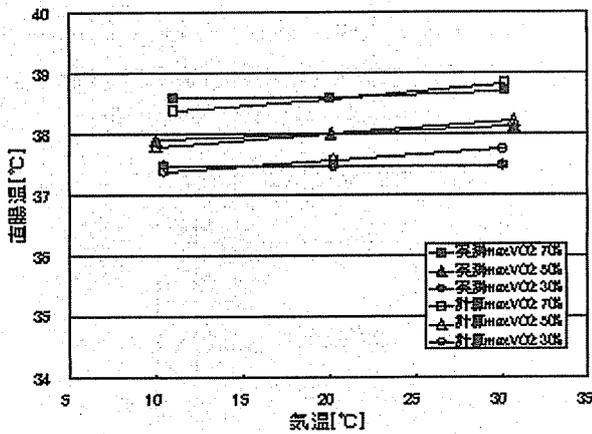


図-5 直腸温の実測値と計算値比較 (代謝量別)

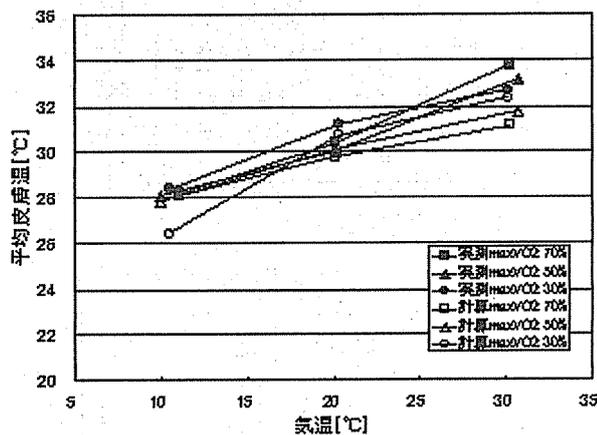


図-6 平均皮膚温の実測値と計算値比較 (代謝量別)

シミュレーション結果は各部位において生体内部温度分布は同様の結果が得られている。ここでは生体で最も重要な部位である頭部の結果を図-4に示す。部位中心温度は3段階の運動強度条件による影響が大きく、皮膚温はほぼ一定の値を示した。また、皮膚温は3段階の気温条件にともない変動した。

次に、実測値と計算値の比較にあたり、文献では直腸温および平均皮膚温が記載されているので、以下では、計算結果の直腸温相当部位温度と平均皮膚温度を比較の対象とする。図-5、6に各条件下の直腸温と平均皮膚温の実測値と計算値を示す。直腸温(下腹部中心温度)は3段階の運動強度(上より、最大酸素摂取量約70%、50%、30%)によって変化と言う実測結果の再現性を得ることができ、また、平均皮膚温は気温によって変化する再現性を得ることができた。運動強度による体温上昇を体温のセットポイントが高温側に移動するためであるとする説があるが、本プログラムではセットポイントの設定は各条件下で更しておらず、計算結果が示すように、深部体温である直腸温では実測の再現がなされている。したがって、シミュレーションでは運動時の体温のセットポイントは不変であることを支持する結果となった。

#### まとめ

本報では、生体内温度予測プログラムの改良点5項目について概説し、その中の個体差対応および運動強度変化対応について示した。また、周知の Gagge et al.(1968)の実験のシミュレーションを行い、文献に示された温熱環境3条件と運動強度3条件の複合条件下の被験者の生体内温度を再現した。