

# 数値サーマルマネキンに関する研究(その1) 人体表面の対流熱伝達に関する数値シミュレーション

Numerical study on Thermal Manikin (Part 1)  
Prediction of Convective Heat Transfer at Skin Surface of Thermal Manikin

村 上 周 三\*・加 藤 信 介\*・曾 潔\*  
Shuzo MURAKAMI, Shinsuke KATO and Jie ZENG

## 1. 序

本研究は、現在主にサーマルマネキン等を用いた実験<sup>1),2)</sup>に基づいて行われている人体とその周囲の環境場との熱輸送解析を、対流放射連成シミュレーション<sup>3)</sup>、さらには湿気輸送シミュレーションとの連成により、数値的に精度よくシミュレートすることを目的とする。最終的には、数値シミュレーション等により仮想的に実現化された環境場に、人体産熱ならびに環境との熱授受を精度よく再現する人体モデルを組み込み、人体温熱生理に基づいた温熱環境評価を行うことを目的としている。前報<sup>4)</sup>では、数値サーマルマネキンの概念を示した。数値サーマルマネキンによる熱輸送解析では、BFC (Boundary Fitted Coordinates:境界適合座標系)<sup>5)</sup>のメッシュ法を用い、形状の複雑なマネキンを表現している。前報ではこのマネキンを均一発熱させ、マネキンと周りの自然対流に関する3次元数値解析を試みた。本報では、引き続きマネキン周囲の自然対流に関して、前報に比べさらにメッシュを細かくすることにより、精度のよい自然対流シミュレーションを試みる。さらに前報ではマネキン表面に対して均一発熱条件を課したが、本報では均一温度を課した境界条件を検討する。

## 2. 流体数値シミュレーションの概要

### 2-1 計算対象

日本人成年男子<sup>6),7)</sup>を対象として、人体の複雑な外形をある程度保ちながら四肢と胴体を一体化して、図1に示すマネキン形状を作成。マネキンは図1に示す室内モデルに設置。

### 2-2 計算ケース

表2に示す2ケース、すなわちマネキン表面に20W/m<sup>2</sup>均一発熱させる場合(ケース1)、人体皮膚の熱快適温度33.7°Cを境界条件として設定する場合(ケース2)を対

\*東京大学生産技術研究所 第5部

表1 計算概要

計算モデル	低レイノルズk-εモデル (Laundar-Sharma型)
差分スキーム	空間スキーム: HYBRID 時間スキーム: BACKWARD
メッシュ分割	BFCを用い、メッシュ分割する。人体表面外向法線方向に、 $y_i = \Delta y_i (K^i - 1) / (K - 1)$ 関係式を用いて不等間隔とした。人体周りは、 $K = 1.042$ 、人体からより離れた区域は、 $K = 1.11$ メッシュ数: 125568 但し、Y方向の空間の対称性より半分の領域のみを計算。

表2 境界条件

	ケース1	ケース2
吹出口	$U_{in} = 0.12 \text{ m/s}$ $\epsilon_{in} = k_{in}^{0.2} / (0.3 \ell_{in})$	$\Theta_{in} = 22^\circ\text{C}$ $k_{in} = 0.002 U_{in}^2$ $\ell_{in}$ : 吹出口相当長さスケール
吸込口	$k, \epsilon, \Theta$ 等のスカラー量は free-slip、速度は質量保存則による。	
壁面	$U_i, k, \epsilon: (U_i)_w = 0, k_w = (\partial k / \partial x_i)_w = 0, (\epsilon)_w = 0$ 断熱面: $(\partial \Theta / \partial x_i)_w = 0$	
	マンネキン表面 一様発熱 $q_w = 20 \text{ W/m}^2$ (人体発熱顕熱の対流散熱分のみ)	$\Theta_w = 33.7^\circ\text{C}$

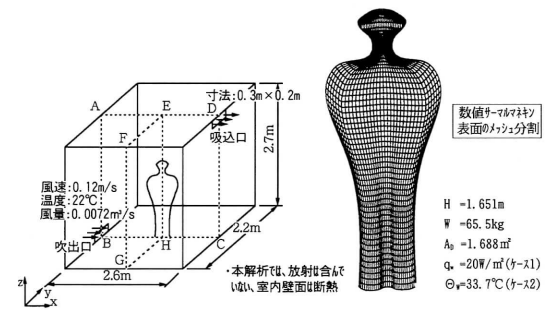


図1 解析対象

象として解析を行う。

### 2-3 計算手法

低レイノルズk-εモデル (Laundar-Sharma型)<sup>8)</sup>を用い

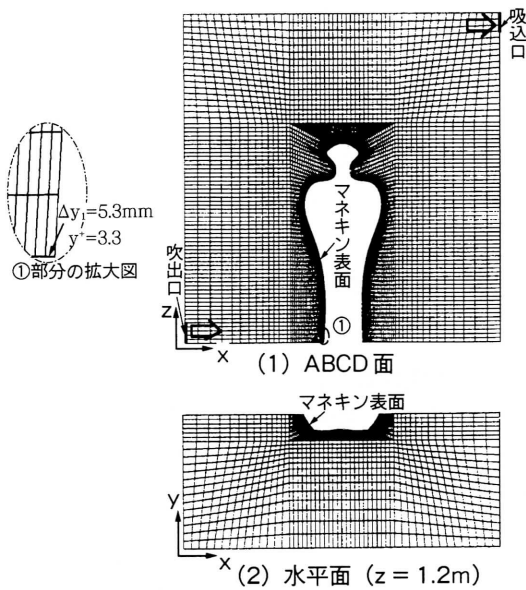


図2 メッシュの分割

て解析<sup>2)</sup>。今回の解析では、人体周り第一メッシュは、そのほとんどが粘性底層 ( $y^+ < 5$ ) にある (図2)。ただし、精度の高いシミュレーションを行うためには、さらにこの1/10程度細いメッシュが必要とされているが、この程度のメッシュでもある程度精度を確保した結果が得られることを垂直加熱平板における自然対流シミュレーションにより確認している<sup>9)</sup>。両計算ケースの詳しい計算条件、メッシュ分割、境界条件等は表1、表2参照。

3. マネキン表面を一樣発熱 ( $q_w = 20W/m^2$ ) と設定した場合の計算結果 (ケース1)

3-1 空間風速分布 (図3)

今回設定した室内の吹出風速は0.12m/sec ときわめて微小であり、室内ですぐ減衰し、マネキン周囲の流れはほぼ静穏である。マネキン表面の加熱によりマネキン周辺には上昇流が生じている (図3(1), (3))。下半身では、上昇流

に対応した下降流が上昇流の外側にわずかに見られる。(図3(3)の⑤部分)。その後、上昇流はマネキンの最も形状変化の激しい頭頸部に到達し、速度が大きくなる (最大0.36m/sec)。頭頂部には循環流が認められる (図3(4))。この周辺は乱れのエネルギーも大きい (図省略)。空間上部には人体からの上昇流が帯状に昇る様子が観察される。人体周辺以外には空気の流れはほとんど見られない。

3-2 空間温度分布 (図4)

壁面断熱条件の基礎的な検討であるので、室内一定温度とすることが望ましいが、今回の条件の吹出風量は少なく、人体の周りに上下温度分布が形成されており、いわゆる、Displacement Ventilation の状況が再現されている。空間下部にある吹出口から冷たい空気 (22°C) を吹出すことと、マネキン表面発熱の影響で、空間内にはマネキン高さまでの範囲で3°C程度の上下温度差が生じているが、人体の大部分は26°Cの熱中性環境にある。頭以上の空間では、ほぼ27°Cと均一になり、温度成層が形成している (図4(1))。マネキン表面に沿う気流による温度境界層は足元で1cmであり、頸部で厚くなり、7cm程度となる (図4(1)の⑥、(2)、(3))。

3-3 マネキン表面温度 (図5)

本ケースは放射熱伝達シミュレーションを連成させていないため、マネキン表面には20W/m<sup>2</sup>の均一発熱条件を与えた。マネキン表面には全体的に33°C~35°Cとなり、ほぼ熱中性環境にある人間の皮膚温度に近い結果となっていると考えられる。しかし、足元では27°Cの低温部と、頭頸部では39°Cの高温部等のばらつきがある。これは、放射を無視し対流熱伝達量を20W/m<sup>2</sup>で均一としたことや、人体自身の生理調整作用 (例え血液循環) を考慮していないことなどが原因である。マネキン表面面積加重平均温度は33.0°Cである。これは人間の熱快適皮膚温度 (33.7°C) よりやや低めの値となっている。

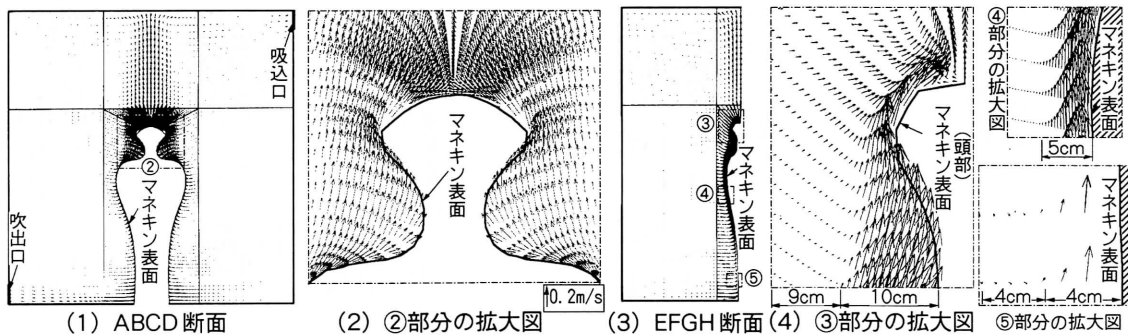


図3 風速ベクトル (ケース1)

研 究 速 報

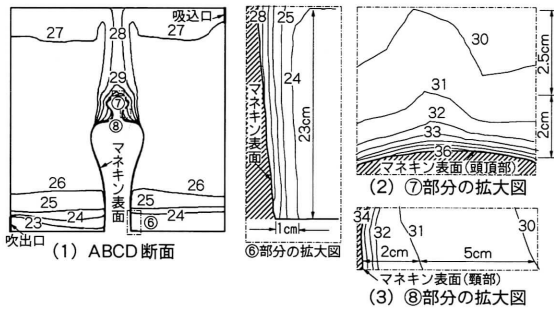


図4 空間の温度分布 (単位 °C) (ケース 1)

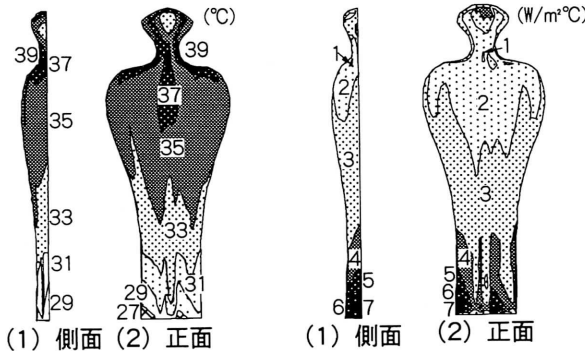


図5 マネキン表面温度分布 (ケース 1)

図6 マネキン表面における対流熱伝達率 (ケース 1)

3-4 マネキン表面における対流熱伝達率 (図 6)

マネキン表面局所対流熱伝達率は下式によって求められる。

$$\alpha_{cx} = q_w / (\theta_{wx} - \theta_{ref}) \quad (1)$$

参照温度  $\theta_{ref}$  は、マネキン表面からの熱流の影響を受けない温度境界層外の空気温度を用いた。マネキン表面全体には  $2 \sim 3 \text{ W/m}^2\text{C}$  となっているが、吹出口からの冷風の影響で、足元の凸部分には最大値の  $7 \text{ W/m}^2\text{C}$  の値を示し、一方頭頸部では  $1 \text{ W/m}^2\text{C}$  の低い値を示す。マネキン

表面平均対流熱伝達率は下式によって算出される。

$$\alpha_c = q_w / (\theta_w - \theta_{ref}) \quad (2)$$

ここで、 $\theta_w$  をマネキン表面面積加重平均温度の  $33.0^\circ\text{C}$  を用い、参照温度  $\theta_{ref}$  を  $26^\circ\text{C}$  とした場合、 $\alpha_c$  は  $2.857 \text{ W/m}^2\text{C}$  となる。従来の実験式<sup>10), 11)</sup>とある程度一致している。

4. マネキン表面を均一温度 ( $\theta_w = 33.7^\circ\text{C}$ ) と設定した場合の結果 (ケース 2)

4-1 空間風速分布 (図 7)

空間の流れ場は全体的にケース 1 と同じである。ただし、マネキン表面に均一温度とさせたため、計算が多少不安定となり、人体の頭部の周りに流れ場は多少非対称が生じる。頭頂における循環流はケース 1 より顕著となっている (図 7(4))。最大風速は  $0.38 \text{ m/s}$  であり、ケース 1 よりやや大きい。

4-2 空間温度分布 (図 8)

人体から離れた区域の空間の温度分布はケース 1 とほぼ一致している。人体周りには境界条件の違いによりケース 1 とは温度分布性状に差が見られる (図 8(2), (3), (4))。温度境界層の厚さ等の性状はケース 1 と類似している。

4-3 マネキン表面における対流熱伝達量と対流熱伝達率 (図 9, 図 10)

マネキン表面の中心部の対流熱伝達量は約  $20 \text{ W/m}^2$  である。これに対応して、局所対流熱伝達率は  $2 \sim 3 \text{ W/m}^2\text{C}$  となっている。対流熱伝達量の大きい足元は、対流熱伝達率も大きくなっている。一方、頸部では、対流熱伝達量が少なく、それに伴い、対流熱伝達率も小さい。対流熱伝達率の全体的な様相はケース 1 とおおむね一致している。マネキン表面総発熱量は  $37.244 \text{ W}$  であり、平均 heat flux は  $22.1 \text{ W/m}^2$  となる。これは、ケース 1 の場合にマネキン表

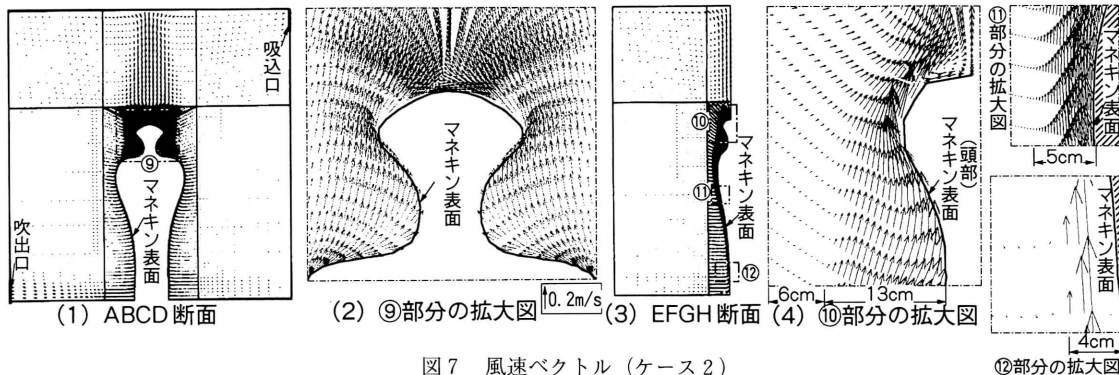


図7 風速ベクトル (ケース 2)

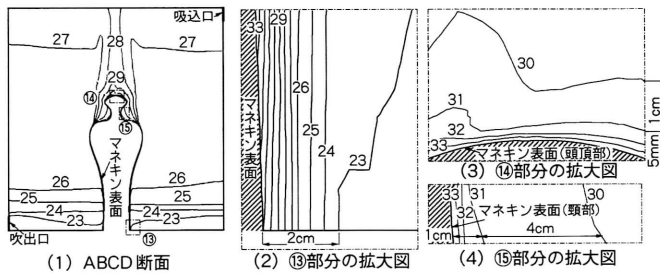


図 8 空間の温度分布 (単位: °C) (ケース 2)

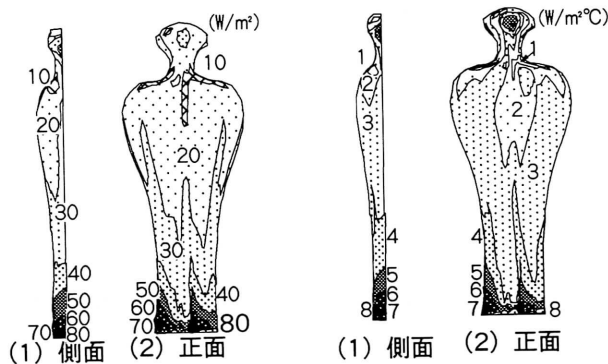


図 9 マネキン表面における 図 10 マネキン表面における対  
発熱量 (ケース 2) 流熱伝達率 (ケース 2)

面に設定した一様発熱量の  $20\text{W/m}^2\text{C}$  よりやや大きい。ケース 1 において皮膚表面面積加重温度が  $33.0^\circ\text{C}$  となっており、今回与えた  $33.7^\circ\text{C}$  より低いことと対応している。(2)式により求めた皮膚平均対流熱伝達率は  $2.866\text{W/m}^2\text{C}$  であり、ケース 1 で得られた結果とほぼ等しい。

### 5. まとめ

①人体モデル (マネキン) 近傍に細かいメッシュを用いて、マネキン周りの自然対流に関する 3 次元数値解析をある程度の精度を確保して実行した。②マネキン表面に一様放熱の境界条件を仮定とした場合と、均一温度の境界条件を仮定した場合の人体周りの流れ場を解析し、それぞれ発熱する人体周りの対流熱伝達率を求めた。これらは、ほぼ一致する分布性状を示す。これらの結果から人体表面における、乱流熱伝達では一定発熱または一定表面温度の熱的

境界条件の違いによる影響は対流熱伝達率の値に対しては無視しうるほど小さい。③一定放熱条件における頭頸部の高温と、足元の低温に関しては、放射放熱の影響を考慮していないことおよび、人体生理調整作用を無視していること等に原因である。今後、人体とその周りの環境との熱輸送過程に関して、各種の熱的な影響を取り込み、総合的なシミュレーションを行う予定である。

(1994年 9月29日受理)

### 参 考 文 献

- 1) Fang, P. O : Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970.
  - 2) A. P. Gagge, J. A. J. Stolwijk and Y. Nishi : An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Semiannual Meeting in Philadelphia, Jan. 24-28, 1970.
  - 3) 村上, 加藤, 近藤, 近本, 高橋 : 対流場, 放射場の連成シミュレーションによる室内温熱環境解析, 生産研究, 第43巻 1号, 1991.1.
  - 4) 曾, 村上, 加藤 : 数値サーマルマネキンに関する研究 (その1) 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海) 1994年投稿中.
  - 5) 村上, 加藤, 石田 : 一般曲線座標系による室内気流数値シミュレーション (その1, 2, 3, 4), 日本建築学会計画系論文報告集, 第386号 (昭和63年 4月), 第391号 (昭和63年 9月), 第400号 (1986.6), 第408号 (1990.2).
  - 6) 建築設計資料集成 単位空間 I, 日本建築学会編, 丸善.
  - 7) 松田, 今岡 : 衣服設計のための濃度球を用いた人体形状モデリング, 織学誌, Vol.50, No. 5 (1994), pp.221-228.
  - 8) B. E. Launder and B. I. Sharma : Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow near a Spinning Disc, Letters in Heat and Mass Transfer, Vol.1, pp.131-138, 1974.
  - 9) 義江, 村上, 加藤, 大竹, 山田 : 密度変化を伴う高温, 高浮力流れの数値シミュレーションに関する研究 (その 8, 9), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 1993.9
  - 10) Chapter 8, ASHRAE Fundamentals Handbook, 1993.
  - 11) 石垣, 堀越 : 自然対流及び低風速における人体の対流熱伝達に関する実験的研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, 1989.10.
- 注) 本解析のシミュレーションコードは英国 Harwell 研究所 FLOW3D を使用.

【記号】  $U_i$ : i 方向平均流速  $k$ : 乱流エネルギー  $\epsilon$ :  $k$  の散逸率  
 $\epsilon = \nu(\partial k^2 / \partial x)^2$   $\Theta$ : 温度の平均値  $y_i$ : メッシュ幅  $\Delta y_i$ : 第一メッシュの幅  $y^*$ : 壁座標  $\delta$ : 境界層の厚さ  $\theta_w$ : マネキン表面各点の温度  $\theta_{ref}$ : 参照温度  $\alpha_w$ : マネキン表面局所対流熱伝達率  $\theta_s$ : マネキン表面温度  $\alpha_c$ : マネキン表面平均対流熱伝達率  $H$ : 身長  $W$ : 体重  $A_b$ : 皮膚表面積 ( $W^{0.444} \times H^{0.663} \times 88.83$ )  $q_w$ : 人体一様発熱量 添字  $w$  は壁面上での値 添字  $in$  は吹出口での値