室内各種気流場における立位人体表面の対流熱伝達特性に関する CFD 解析

数値サーマルマネキンに関する研究 (その1)

PREDICTION OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER AROUND STANDING HUMAN BODY
WITH VARIOUS ROOM AIR DISTRIBUTION

Study on computational thermal manikin (Part 1)

曾 潔*, 村上周三**, 加藤信介***

Jie ZENG, Shuzo MURAKAMI and Shinsuke KATO

This paper describes the concept and the first-stage development of a computational thermal manikin. The computational thermal manikin will be finally used to accurately predict the thermal sensation of a human in a room, by computer simulation. Human's thermal sensation directly depends on the heat transfer characteristics between the human body and his surrounding environment. The thermal environment around a modeled manikin will be examined by numerical simulation of airflow, thermal radiation, heat conduction, moisture transport, solar radiation and so on in a coupled way. In this paper, flow and temperature fields around a modeled manikin have been investigated with CFD (Computational Fluid Dynamics). The convective heat transfer characteristics of the modeled manikin are predicted, for several types of flow field, i.e., stagnant flow, horizontal uniform flow, downward uniform flow, and upward uniform flow. The CFD simulations are conducted using a low-Reynolds-number $k-\epsilon$ turbulence model. In order to model the complicated shape of the human body, a generalized curvilinear coordinate system (Boundary Fitted Coordinates) is used. The obtained results agree well with previous experimental data.

Key words: *computational thermal manikin, CFD, convective heat transfer, air flow*
サーマルマネキン、数値解析、対流熱伝達、流れ場

1. はじめに

従来、人体の生理的温熱感評価には Fanger のモデル、Gagge らの 2 ノードモデル等の熱収支モデルが用いられている^{2), 3)}。これらの人体熱収支モデルは、人体皮膚表面での放熱特性を人体の温冷感に深く関係づけている。人体と周囲環境との間の熱移動は、放射、伝導、顕熱伝達、潜熱伝達等により生じるが、対流による顕熱、潜熱伝達に関しては、一般に実験に基づいて得られた式^{2), 3)}が用いられ、人体の熱収支モデルが評価されることが多い。しかし、この実験式は様々の温熱条件（特に温度場、放射場の不均一な場合）に対して、必ずしも適切でない。また、対流による熱伝達では、人体が流れ場に存在すること及び自ら生じたサーマルブルームによっても、周囲空間の局部空気流動性状が変わり、その性状が影響を受ける。このような人体と室内流れ場の相互作用は既存の人体熱収支モデルで詳しく考慮されていないのが現状である。そのため、様々な室内温熱環境をより精度良く評価するためには、人体同様に発熱するサーマルマネキン（本研究では後述する数値サーマルマネキンと区別し、これを実験用サーマルマネキンと呼ぶ）を室内に設置して、その熱放散性状を解析する詳細実験が必要とされている⁴⁾。

本研究は、現在主に実験用サーマルマネキン等を用いて実験的に行われている人体とその周辺環境場との熱輸送解析を、対流・放射・湿気連成シミュレーションにより数値的に精度良くシミュレートして解析することを目的とする。本研究ではこの数値シミュレーションシステムを数値サーマルマネキンと称する。数値サーマルマネキンシステムは最終的には数値シミュレーション等により予測される室内等の環境場に、人体産熱並びに環境との熱授受を精度良く再現する人体モデルを組み込み、人体生理に基づく室内の温熱環境評価を行うことを目的とする。

筆者らの知る限り人体の対流、放射による顕熱放散の特性を乱流数値シミュレーション及び放射シミュレーションにより数値的に詳細に解析した例は殆どない。これは、人体形状が複雑であること、また乱流熱伝達特性を低 Re 数型乱流モデルを用いて精度良く解析するには莫大な解析メッシュを必要とし、計算が極めて莫大となるためである。これに対し、本研究では、BFC (Boundary Fitted Coordinates: 境界適合座標系⁵⁾) に基づいて、形状の複雑な人体を表現し、人体から周辺空気への対流熱伝達を 3 次元乱流数値シミュレーションにより解析する。本報は、このような数値サーマルマネキン開発研究の

* 東京大学工学部建築学科 大学院生・工修
** 東京大学生産技術研究所 教授・工博
*** 東京大学生産技術研究所 助教授・工博

Graduate Student, University of Tokyo, M. Eng.
Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.
Assoc. Prof., Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.

第1段階として、人体の曝露される周囲気流場（気流の平均風速、気流の乱れの強さ及び気流の方向等）が人体表面の対流熱伝達特性に与える影響に着目し検討を行う。なお今回の解析では対流熱伝達のみに着目して検討を行い、放射との連成解析は次報で報告する。

2. 微値サーマルマネキンの概要

2.1 人体表面における対流熱伝達

人体の皮膚表面温度は人体の温熱感覚に直接大きく関係し、温熱環境の評価の重要なパラメーターとなる^{8), 9)}。この皮膚表面温度は皮膚表面での熱収支、即ち人体内部から皮膚表面までの熱伝導及び皮膚表面から周囲環境への熱移動プロセス（対流と放射による顕熱及び発汗による潜熱の発散）により定まる。これらの各熱移動プロセスは比較的良く研究されているが、人体表面における対流熱伝達率に関しては必ずしも十分な測定検討^{2), 3), 6), 7)}がなされているわけではない。特に人体表面における対流熱伝達率の局部分布特性に関する検討^{2), 8), 9), 10)}は多くない。本報では、人体表面における局所対流熱伝達特性に着目してCFD解析により詳細な検討を行う。

2.2 人体モデル形状

日本人成年男子¹¹⁾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モデル化する（図2）。これを図1に示される室内に設置し検討を行う。今回のCFD解析では以下の点を考慮して形状の簡略化を計っている。①単純形状の人体モデルを用いた場合、CFD解析は容易となる。②人体の対流熱伝達の主要な特性がある程度再現するよう人体モデルを簡略化する。③着衣を仮定すると人体形状はある程度単純化される。この場合人体の細部形状は無視することが可能である。

2.3 対流熱伝達シミュレーション

固体表面近傍の温度境界層（層流域）を十分なメッシュ分解能で、低Re数型k-εモデルを用いて解析する。本研究では、乱流モデルとしてLaunder-Sharma-typeの低Re数型k-εモデル¹²⁾を用いている。

3. 計算ケース

本報では、静穏環境下、水平及び垂直気流場として、表1に示す5ケースを検討する。case 1は、静穏気流場に対応し、室内はdisplacement ventilation空調方式により換気・空調される（図1(1)）。本ケースは、マネキン表面に一律発熱 20W/m^2 （人体発熱の対流散熱分）として境界条件を設定する。case 2-1、2-2では、片面の壁全面（左側）を吹出しと対向壁全面（右側）を吸込とする（図1(2)）。吹出気流の平均速度は一般に室内快適基準で推奨される上限平均風速とされる 0.25m/s と設定する。吹出気流の乱れの強さを変化させて、case 2-1は6%、case 2-2は乱れの強さを29%とする。case 3-1、3-2は気流の方向が人体表面の対流熱伝達特性に与える影響を検討するために行う（図1(3)）。case 3-1は天井面全面吹出、床吸込下向気流の場合、case 3-2は逆に床全面吹出、天井全面吸込の場合である。吹出気流は、風速 0.25m/s 、乱れの強さ10%と設定する。なおcase 1を除くcases 2-1、2-2、3-1、3-2の4ケースでは、マネキンは表面温度を一様 (33.7°C) として解析を行っている。

4. 解析手法

BFCによりメッシュ分割を行う。低レイノルズ数型k-εモデル（Launder-Sharma型）¹²⁾を用いて定常流れ場を解析する。今回の解

(1) 静穏気流場

(2) 一様水平気流場

(3) 鉛直一様気流場

図1 解析対象

析では、人体周りの第一メッシュは、そのほとんどが粘性低層（ $y^+ < 5$ ）にある（図2）¹³⁾。計算条件、メッシュ分割、境界条件等は表2、表3に示す。8GFLOPSのスーパーコンピュータを使って、1ケースにつき約100hの計算量を必要とする。

5. 解析結果

5.1 マネキンが静穏環境下に置かれる場合（case 1, 図3）

平均風速分布（図3(1)） 今回設定した室内における吹出風速は 0.12m/s と極めて微小であり、室内全体はほぼ静穏である。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。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(1)③）。その後、上昇流は頭部に到達し、速度が大きくなる。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。この上昇流の最大風速は 0.26m/s となり、これは既往の実験結果と良く対応する¹³⁾。マネキン近傍の速度境界層は表面上昇流に沿って、徐々に

発達する傾向が観察される²¹⁴⁾。

平均温度分布 (図 3 (2)) 室内はマネキン発熱の影響で、床面よりマネキン高さまでの範囲で約 3℃の上下温度差が生じている。頭部より上の空間では、ほぼ 27℃と均一となっている。マネキン表面の温度境界層厚さは足元で約 5cm であり、首、頭部で厚くなり、約 19cm 程度となっている (図 3 (2)④、⑤、⑥)。

乱流エネルギー k の分布 (図 3 (3)) 流れ場解析では境界層の乱流遷移促進のため、微小な乱れを与えた。このため、マネキン表面には境界層の乱流遷移が再現されている¹²⁾。乱流遷移後の境界層内における乱流強度は、強制的に乱れを与えていない場合の解析結果^{215), 16), 17)}に比べ 10 倍程度に達している。また、空間上部の乱流エネルギーも大きくなっており、乱れた浮力ブルームが人体上部に発達する様子が再現される。

マネキン表面温度 (図 3 (4)) 一様発熱の条件のため対流熱伝達特性の違いにより、マネキン表面には温度分布が形成される。胴体では 31℃～33℃となり、足元では 27℃と低温、頭部では 37℃と高温になる。このような温度分布性状は実験²¹⁸⁾でも検証されている。マネキン表面における平均温度は 31.0℃である。流入空気温度 22℃、対流放熱量 20W/m²の条件によるこの解析ではマネキン表面温度は人体の熱快適温度である 33.7℃以下となる。

マネキン表面における対流熱伝達率 (図 3 (5)) マネキン表面の局所対流熱伝達率は下式によって求められる。

$$\alpha_{c,x} = q_{w,x} / (\theta_{w,x} - \theta_{ref,x}) \quad (1)$$

参照温度 θ_{ref} は、マネキン表面から法線方向の温度境界層外の空気温度を用いる。マネキン表面全体的に対流熱伝達率は 2～3W/m²℃となっている。人体上半部は熱上昇流により囲まれており、対流熱伝達率は小さくなる。また、足元は温度境界層が薄いために、対流熱伝達率は 7W/m²℃と大きくなっている。このような分布性状は実験結果^{218), 9), 10)}と良く一致する。人体の平均対流熱伝達率は次式によって算出される。

図 2 メッシュ分割

表 1 計算ケース

ケース No.	case 1	case 2-1	case 2-2	case 3-1	case 3-2
流れ場性状	静穏環境 (Displacement ventilation)	一様水平流 乱れの強さ小	一様水平流 乱れの強さ大	一様下降流	一様上昇流
マネキン表面 における発熱条件	一様発熱 20W/m ²	一様表面温度 33.7℃			

表 2 計算概要

計算モデル	低レイノルズ k-ε モデル (Launder - Sharma Type)
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 を使い、メッシュ分割する。人体表面外向法線方向に、幾何級数を用いて不等間隔とする。マネキン表面近傍第 1 メッシュの y+ は 5 以下とした。メッシュ数: 125,568。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 3 境界条件

ケース	case 1	case 2-1	case 2-2	case 3-1	case 3-2
吹出口	$U_{in}=0.12\text{m/s}$, $k_{in}=0.002U_{in}^2$, $\Theta_{in}=22^\circ\text{C}$, $\epsilon_{in}=k_{in}^{3/2}/(0.3D)$, $D=0.24\text{m}$	$U_{in}=0.25\text{m/s}$ $\Theta_{in}=26^\circ\text{C}$			
		乱れの強さ: 6%	乱れの強さ: 29%	乱れの強さ: 10%	
		$k_{in}=1.5(0.06U_{in})^2=0.005U_{in}^2$	$k_{in}=1.5(0.29U_{in})^2=0.125U_{in}^2$	$k_{in}=1.5(0.10U_{in})^2=0.015U_{in}^2$	
		$\epsilon_{in}=k_{in}^{3/2}/(0.3D)$, $D=2.42\text{m}$ D : 水力直径(m)		$\epsilon_{in}=C_\mu k_{in}^{3/2}/\ell_{in}$, $\ell_{in}=0.1\text{m}$ ℓ_{in} : 乱れの長さスケール(m)	
吸込口	風速, k , ϵ , Θ : free slip				
壁 面	$U, k, \tilde{\epsilon}: (U)_w=0, \quad k_w=(\partial k/\partial x)_w=0, \quad (\tilde{\epsilon})_w=0, \quad$ 断熱面: $(\partial\Theta/\partial x)_w=0$				
	マネキン表面: 一様 発熱 $q_w=20\text{W/m}^2$ (人体対流発熱分)	マネキン表面: 温度一定 $\Theta_w=33.7^\circ\text{C}$			

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

ここで、 θ_w をマネキン表面平均温度の 31℃を用い、参照温度 θ_{ref} を室内平均温度 26℃とした場合 (図 3 (2)参照)、対流熱伝達率は 3.9W/m²℃となる¹²⁾。これは従来の実験結果^{213), 6), 7), 8)}とよく一致する (表 4)。また、人体立位の場合は座位と比べ平均対流熱伝達率が比較的に大きい、臥位と比べて比較的に小さいことが表 4 に示されている。これは人体表面における温度境界層の性状に関係する。鉛直加熱板と同様に、温度境界層は足元から始まり、徐々に厚くなるに従い、局所対流熱伝達率は小さくなる。ある限界を超えると (鉛直加熱板の場合 $Gr_x=1 \sim 2 \times 10^9$ 、立位人体肩付近 (図 3(3))、層流境界層から乱流境界層に遷

図3 解析結果 (case 1: マネキンが静穏環境下に置かれる場合)

移し、局所対流熱伝達率は大きくなる^{214, 19)}。人体臥位の場合は鉛直方向には短くて、体に沿う境界層が全体的に薄い為、対流熱伝達率は大きく分布する。一方、座位の場合は境界層が全体的に層流域にあるため、対流熱伝達率は小さく分布する。なお、座位と臥位に関して、今後CFDにより詳細に検討する必要がある。

5.2 マネキンが一樣水平流に曝露される場合 (cases 2-1, 2-2, 図4)

平均速度分布 (図4 (1)) cases 2-1, 2-2の両ケースとも流れ場は互いによく類似する (case 2-1の図省略)。片側壁面からの吹出気流はマネキンと衝突し、下降流を生じながらマネキンを迂回して流れる。人体発熱による表面の上昇流は、マネキンに吹出気流が直接当たらない側で顕著となっている。頭上の熱上昇流は水平吹出気流により、右上方向に流されている。

平均温度分布 (図4 (2)) 片側壁面からの吹出気流による強い移流により、マネキンからの発生熱は風下側に運ばれる。吹出気流の乱れが強い case 2-2 は、マネキンの発生熱はより広く拡散して伝達されている。この傾向は特に風上側昇温域の増大に明確に表われている。

乱流エネルギーkの分布 (図4 (3))

吹出気流の大部分はせん断が働かず、一樣減衰乱流となる^{18, 3)}。流れ方向の乱れの減衰を図4(3)に示す。kの減衰に関し、人体の発熱の影響を受けない部分では、当然ながら、CFDと解析解の結果は良く一致する。人体より約0.5m程度手前からは人体の影響で、kの生産がはじまり、値が大きくなる。中心断面におけるkの分布から見ると、両ケースの分布性状はほぼ似た傾向を示す。即ち、吹出気流がマネキンに当たる側の領域においてkの値が一番大きい^{18, 4)}。吹出気流が直接当たっていない側の領域では、マネキンから離れるに従い、kは次第に小さくなる。

マネキン表面における対流熱伝達量と対流熱伝達率 (図4 (4), (5))

吹出気流が直接当たる面の対流熱伝達量と対流熱伝達率とも大きな値となる。対流熱伝達率は最大で $18\text{W/m}^2\text{℃}$ を越えている^{18, 4)}。特に case 2-2 ではマネキン近傍の乱れがより大きいために、全般的に両者とも case 2-1 より大きい値を示す。case 2-1 における平均対流熱伝達量、対流熱伝達率はそれぞれ 55.0W/m^2 、 $7.1\text{W/m}^2\text{℃}$ であり、case 2-2 には 98.3W/m^2 、 $12.8\text{W/m}^2\text{℃}$ と大きくなる。これらの値は既往の実験結果^{2, 8), 9), 10), 20), 21)}とある程度対応し、人体の静穏環境下における場合(case 1)

と比べて、約2～3倍の大きな値を示す。これは、外部気流が横から人体に衝突し、人体のを囲む熱上昇流を壊して、人体と周囲環境との熱授受をより活発化させるためである。

5.3 下向き一樣気流場に曝露される場合 (case 3-1, 図5)

平均風速分布 (図5 (1)) 天井面からの吹出気流は、マネキンの頭部に衝突し、剥離する。マネキンの肩でも再び衝突し剥離する。剥離流内側のマネキン表面近傍にはマネキンの発熱による上昇流が生じている。この上昇流は、マネキンの肩を境界として、頸部と下半身近傍の二つの領域に存在し、各々明確な循環が観察される。下半身に生じる循環流の外側には最大風速域 (0.35m/s の下降流)が生じる。この強い気流はマネキンの足元で収束し脚に斜めに当たっている。

空間温度分布 (図5 (2)) 天井全面からの下向き気流 (0.25m/s 、 26℃)は、静穏状態時に見られるマネキン頭部に生じる上昇流を完全に抑圧し、温度上昇域は生じない。マネキンの発熱は下部に向か

(1) 風速ベクトル (case 2-2: 乱れの強さ大)

(2) 温度分布 (中央断面、℃)
図4 解析結果 (cases 2-1, 2-2: マネキンが一樣水平流に曝露される場合)

って移流される。室の上部空間及びマネキンからより離れた下部空間は 26℃ の等温域となっている。

マネキン表面における対流熱伝達率と対流熱伝達率 (図 5 (3)、(4)) 気流が直接当たる頭頂部、肩及び足元は、対流熱伝達量と対流熱伝達率ともに大きな値を示す。頭頂部の対流熱伝達量は 550 W/m² であり、対流熱伝達率は 70 W/m²℃ にも達する。しかし、この三個所以外は、比較的均一な分布で、対流熱伝達量は 100 W/m² 以下、対流熱伝達率も 10 W/m²℃ 以下となっている。マネキン表面における平均対流熱伝達量は 109.0 W/m² である。平均対流熱伝達率は 14.2 W/m²℃ となる。これは case 1 と比べ約 3 倍大きい。本ケースの場合でも、下向き気流が人体に衝突し人体の熱上昇流が壊されている。

5.4 上向き一様気流場に曝露される場合 (case 3-2、図 6)

空間風速分布 (図 6 (1)) 床全面からの気流は、マネキン周囲で剥離せず、スムーズに上方に流れる。肩から上部では、マネキンの形状変化が大きいので、気流はマネキン表面から剥離する。この流れはマネキンの頭頂部で合流して、空間上部にまっすぐに上昇する。この上向き流れの最大の風速は 0.45 m/s と下向き吹出の場合に比べ速い。

空間温度分布 (図 6 (2)) 人体より離れた区域は 26℃ の等温域となっている。27℃ 以上の高温域は、人体の上部のごく狭い範囲に限られる。

マネキン表面における対流熱伝達率と対流熱伝達率 (図 6 (3)、(4)) 床面からの吹出気流がマネキンの足元に衝突すること、及び境界層が未発達のため、この部分で対流熱伝達量、対流熱伝達率ともに大きい。case 3-1 に比べ小さい。また対流熱伝達量、対流熱伝達率は共に静穏環境下における人体の自然対流の場合 (case 1) とほぼ同様の傾向を示している。本ケースでは、マネキン表面における平均対流熱伝達量は 28.9 W/m²、平均対流熱伝達率は 3.7 W/m²℃ であり、鉛直下向吹出の場合に比べ 1/3 以下となっている。これは case 1 の場合 (3.9 W/m²℃) とほぼ同じである。この原因は以下の二つが考えられる。

- ① 人体周辺乱流エネルギーの分布 (図省略) は case 1 と良く類似する。
- ② 本ケースの場合、人体周辺生じた熱上昇流は case 1 と同様に、周辺の

気流による大きな影響を受けていない。即ち人体はこの熱上昇流に覆われ熱の放散量が減少している。

6. まとめ

数値サーマルマネキンの概念を示すとともに、BFC に基づく流体解析システムにより、形状の複雑な人体を 3 次元的に表現し、その対流熱伝達特性を低 Re 数型 $k-\epsilon$ モデルに基づいて解析した。① 静穏環境下における場合、人体表面の平均対流熱伝達率は 3.9 W/m²℃ となる。人体表面における対流熱伝達率の平均値及び局部分布性状は既往の

(3) 乱流エネルギー k の分布 (m²/s²)

(4) マネキン表面における対流熱伝達率 (W/m²) (5) マネキン表面における対流熱伝達率 (W/m²℃)

図 4 (続き) 解析結果 (case 2-1 と case 2-2: マネキンが一様水平流に曝露される場合)

実験結果と良く一致している。

②0.25m/s の水平一様気流及び下向き気流に曝露される人体の対流熱伝達率は静穏環境下における場合の2～3倍となっている。③一方、0.25m/sの上向き気流に曝露される場合は、人体の対流熱伝達率は下向き気流の場合に比べかなり低くなっており、静穏環境下の場合とほぼ等しい。④人体周辺気流平均速度、気流の乱れの強さ及び気流方向が人体表面の対流熱伝達特性に大きな影響を与える。⑤人体の熱上昇流が環境気流場により破られるかどうかによって、人体の対流熱伝達性状が変わる。即ち、熱上昇流の保護があれば人体からの熱損失が少なく、対流熱伝達率も小さい。一方、外部気流からの衝突等によってこの熱上昇流が壊されたら、対流熱伝達率は大きくなる。

注1：第1メッシュが $y^+ < 1$ にあることが精度の高い計算の条件となるが、それを満足するには、メッシュ数が莫大となり、計算実行がほぼ不可能となる。ここでは第1メッシュが粘性底層、 $y^+ < 5$ にあれば、ある程度の精度が得られると

考えている。
注2：物体周辺境界層の乱流シミュレーションにおいて、周辺流の乱れが小さい場合、物体近傍境界層の層流域から乱流域への遷移は必ずしも正しく予測されない¹⁴⁾。ここでは乱流遷移を促進させるために、流れ場全域で $k = 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}^2$ 、 $\epsilon = 10^{-9} \text{m}^2/\text{s}^3$ の値を最小値として強制し、境界層の乱流遷移を促進している。なお、この乱流遷移が再現されない場合¹⁵⁾、人体の対流熱伝達特性($2.9 \text{W/m}^2\text{℃}$)は著しく過小に評価される。

注3：マネキンが設置されない単純な等温一様水平流では、 k 、 ϵ の輸送方程式は(B1)式、(B2)式となる。

$$U \frac{dk}{dx} = -\epsilon \quad (\text{B1})$$
$$U \frac{d\epsilon}{dx} = c_2 f_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (\text{B2})$$
$$\frac{d\epsilon}{dx} = \frac{d\epsilon}{dk} \cdot \frac{dk}{dx} \quad (\text{B3})$$

(B3)を加え上記の三つの方程式を

図5 解析結果 (case 3-1: マネキンが一様下降流に曝露される場合)

表4 低風速環境下における座位、臥位及び立位人体(裸体)の平均対流熱伝達率の比較

項目	研究者 (Subject posture)		環境条件			平均対流熱伝達率 a_c (W/m ² ℃)
			流れ性状	風速 (m/s)	人体表面と空気の 温度差 (℃)	
1	Gagge et al. (sitting in chair)		静穏気流	<0.07	12±7	2.1
2	Nishi & Gagge (sitting on stool)		同上	0.18	2	3.1
3	Winslow & Gagge (sitting on bicycle)		同上	0.2	9	4.0
4	Mitchell et al. (sitting on bicycle)		同上	0.2	5	3.4
平均値 (座位)						3.2±0.8
5	Colin & Houdas (reclining)		静穏気流	0.2	3.7	5.3
6	Colin & Houdas (reclining)		同上	0.2	12	5.6
7	Winslow et al. (reclining)		同上	0.07	11±3	3.3
8	Winslow et al. (semi-reclining)		同上	0.09	20±3	4.7
平均値 (臥位)						4.7±1.0
9	Nelson et al. (standing)		静穏気流	0.2	14	4.0
10	Woodcock & Breackenridge (standing)		同上	0.15	4	4.3
11	Tamari (standing scale model)		同上	0.15	5	2.8
平均値 (立位)						3.7±0.8
12	本研究	case 1	静穏気流	<0.12	5	3.9
13		case 2-1	一様水平気流 乱れの強さ: 6%	0.25	7.7	7.1
14		case 2-2	一様水平気流 乱れの強さ: 29%	0.25	7.7	13
15		case 3-1	一様下降流 乱れの強さ: 10%	0.25	7.7	14
16		case 3-2	一様上昇流 乱れの強さ: 10%	0.25	7.7	3.7

解いて、 k 、 ϵ の減衰特性に関する解析解が得られる(式(B4)、(B5))。

$$k\left(\frac{k_m}{k}\right)^{c_2} - k_{in} = \frac{\epsilon_{in}(c_2 - 1)x}{U} \quad (B4)$$

$$\epsilon = \epsilon_{in}(k/k_m)^{c_2} \quad (B5)$$

注4: k - ϵ モデルでは、レイノルズストレスを渦粘性近似しているため、衝突域などでは、乱れの生産項を過大評価し、 k 、 ϵ の値が実際より大きくなる現象が生じる。今回の解析でも、 k の値は衝突域でかなり大きくなっている。その意味で、衝突域の対流熱伝達量、対流熱伝達率は実際より多少大きく予測されている可能性がある。

(1) 風速ベクトル

【記号】 A_0 : 皮膚表面面積 ($W^{0.33} \times H^{0.73} \times 88.83$; m^2) C_μ , c_μ , f_μ 乱流モデル定数 D : 水力直径(m) H : 身長(m) k : 乱流エネルギー(m^2/s^2) q : 対流熱伝達量(W/m^2) U : 平均風速(m/s) W : 体重(kg) αc : 対流熱伝達率($W/m^2 \cdot ^\circ C$) Θ : 温度($^\circ C$) ϵ : k の散逸率(m^2/s^3) $\xi = \epsilon - \nu(\partial k^{1/2}/\partial x)^2$ 添字 in は吹出口での値 ref は参照値 w は壁面上での値 x は局部値

【参考文献】

- 1) Fanger, P.O.: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970
- 2) Gagge, A.P. et al.: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response, ASHRAE Transactions, Vol.77, Part 1, pp.247-262, 1970
- 3) ASHRAE Fundamentals Handbook, Chapter 8, 1993
- 4) Tanabe, S. et al.: Evaluating thermal environments by using a thermal manikin with controlled skin surface temperature, ASHRAE Transactions, Vol.100, Part 1, pp.39-48, 1994
- 5) 村上周三、加藤信介、石田義洋: 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(1989.6)、第408号(1990.2)
- 6) Nielsen, M. and Pedersen, L.: Studies on the heat loss by radiation and convection from the clothed human body, Acta. Phys. Scandinav., Vol.27, pp.272-294, 1952
- 7) Rapp, G.M.: Convective heat transfer and convective coefficients of nude man, cylinders and spheres at low air velocities. ASHRAE Transactions, Vol.79, Part 1, pp.75-87, 1973
- 8) Nishi, Y. and Gagge, A.P.: Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation, Journal of Applied Physiology Vol.29(6), pp.830-838, 1970
- 9) 李徹球、本間宏: 室内気流中の乱れの強さによるサーマルマネキン各部位の対流熱伝達率に関する研究(その2) 立位裸体のサーマルマネキンの各部位の対流熱伝達率、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.727~728, 1991.9
- 10) 植松智樹、石垣秀圭、堀越哲美、佐橋政人: 人体の対流熱伝達率に関する実験的研究(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.723~724, 1991.9
- 11) 建築設計資料集成 単位空間Ⅰ、日本建築学会編、丸善、昭和55年
- 12) Launder, B.E. and Sharma, B.I.: Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Letters in Heat and mass

(2) 温度分布 ($^\circ C$)

(3) マネキン表面における対流熱伝達量 (W/m^2)

(4) マネキン表面における対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

図6 解析結果 (case 3-2: マネキンが一樣上昇流に曝露される場合)

- Transfer, Vol.1, pp.131-138, 1974
- 13) Homma, H. and Yakiyama, M.: Examination of free convection around occupant's body caused by its metabolic heat, ASHRAE Transactions, Vol.94, Part1, pp.104-124, 1988
- 14) Kato, S., Murakami, S. and Yoshie, R.: Experimental and numerical study on natural convection with strong density variation along a heated vertical plate, Proceedings of the 9th Symposium on "Turbulent Shear Flows", Kyoto, Japan, No.12-5, 1993.
- 15) 曾潔、村上周三、加藤信介: 数値サーマルマネキンに関する研究(その2)、人体表面の対流熱伝達に関する数値シミュレーション、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.469~472, 1994.10
- 16) 曾潔、村上周三、加藤信介: 人体表面の対流熱伝達に関するCFD解析、第8回数値流体力学シンポジウム、pp.189~192, 1994.12
- 17) 村上周三、加藤信介、曾潔: 数値サーマルマネキンに関する研究(その2) 人体モデル周囲の流れ場が対流熱伝達特性与える影響、生産研究、pp.62~65, 1995.2
- 18) Torikai, K., Suzuki, K. and Tsutaki, S.: Thermal emission from human body, Proceedings of the 2nd JSME-KSME thermal engineering conference, Vol.2, pp.331-336, 1992.10
- 19) 甲斐好郎、他4名: 伝熱学特論、養賢堂、1984
- 20) 河津秀圭、堀越哲美: 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、pp.461~464, 1989.10
- 21) 森直之、久保田泰弘、本間宏: 乱れを含む気流によるサーマルマネキン周囲の気流性状及び対流熱伝達率に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.369~370, 1994.9

(1997年6月2日原稿受理、1997年11月5日採用決定)