

## 対流 放射連成解析による人体表面の対流熱流束の予測

Prediction of Convective Heat Flux on Human Body by Coupled Simulation of Convection and Radiation

大森 敏明、東大生研、東京ガス、〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, Email:omori@iis.u-tokyo.ac.jp  
 梁 禎訓、東大生研、〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, Email: yangjh@iis.u-tokyo.ac.jp  
 加藤 信介、東大生研、〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1, Email: kato@iis.u-tokyo.ac.jp  
 村上 周三、慶大理工、〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1, Email:murakami@ad.keio.ac.jp  
 Toshiaki OMORI, I.I.S., University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN  
 Yang JEONGHOON, I.I.S., University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN  
 Shinsuke KATO, I.I.S., University of Tokyo, 4-6-1, Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN  
 Shuzo MURAKAMI, Keio University, 3-14-1, Hiyoshi, Kohoku-ku, Yokohama, 223-8522, JAPAN

A coupled simulation of convection and radiation is applied to predict the thermal environment around a human body situated in a calm room. A flow field is calculated using a low-Reynolds-number type  $k-\epsilon$  turbulence model with the unstructured grid system. Calculated results are compared with experimental data conducted using a thermal manikin under a similar condition to the analysis. They are in good agreement in terms of convective heat flux and skin temperature at respective parts of the human body.

### 1. はじめに

人体は、それ自身が発熱体であるため、足元で発生し頭頂部に向かって発達する上昇気流に包まれる。この上昇流は、主として人体表面からの対流熱伝達によってもたらされるものである。発熱体である人体の表面温度は、人体深部で発生する生理発熱の表面への輸送と、表面での対流熱伝達、放射熱伝達および湿気伝達がバランスするように定まると考えられる。従って、人体と環境の熱伝達を総合的に解析する場合には、これら全ての現象を連成する必要がある<sup>(1)</sup>。本研究は、この人体と周囲の環境との熱伝達を総合的に解析することを目標としているが、本報告では、研究の一段階として中立な温熱環境を対象とすることとし、相対的に寄与の小さい湿気伝達はこれを無視して解析を行う。

ところで、人体表面は極めて複雑な三次元形状であるために局所的な対流熱流束・放射熱流束を適切に予測することは容易ではない。これまでに、幾分簡略化した人体形状を対象として精密メッシュと低レイノルズ数  $k-\epsilon$  乱流モデルを採用して詳細に対流熱伝達率を解析した例<sup>(2)</sup> や生理モデルを組み込んだ総合的な解析例<sup>(3,4,5)</sup> が報告されているが、実人体形状を精密にモデル化して詳細な対流・放射連成解析を行った例はほとんどみあたらない。

本研究では、実際の人体形状をできるだけ模擬した精密人体モデルを対象として、人体表面における顕熱輸送を対流・放射連成解析によって精度よく解析することを目的とする。先に、実用計算に使用されることの多い標準  $k-\epsilon$  乱流モデルと一般化対数則に基づく方法によりこれらを解析し、定性的には妥当と思われる結果を得たが、人体表面の一部に過大な対流熱伝達率が計算されるなどの問題があった<sup>(6,7)</sup>。本研究では、対流熱流束がより正確に計算されると期待される低レイノルズ数型  $k-\epsilon$  乱流モデルを用いて対流・放射連成解析を行い、この解析条件と類似の条件で行われた実験結果と計算値を比較することにより定量的な評価を行う。

### 2. 解析対象モデル

これまでに表面の温度、熱流束等が詳細に調べられている実験用サーマルマネキン<sup>(8)</sup>の寸法にできるだけ一致するように人体モデルを作成した。身長 1.67m、表面積 1.47m<sup>2</sup>、有効放射面積率 0.872 である。図 1 に示すように、幅 3m、長さ 3.5m、高さ 2.5m の換気のない部屋の中央に立位裸体状態の人体モデルを設置するものとした。床・天井・壁の表面温度は 27.5℃ 一定とした。

人体モデル表面の熱流束  $q$  [W/m<sup>2</sup>] と皮膚温度  $t_s$  [℃] (対

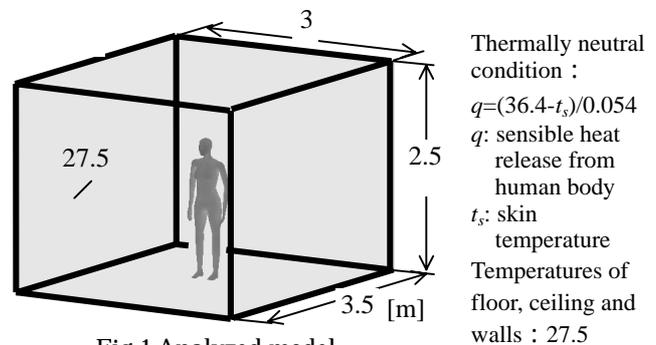


Fig.1 Analyzed model

流・放射連成解析により求まる)は、熱的に中立の場合に成り立つとされる式(1)の関係があるものとした<sup>(2,9)</sup>。

$$q = (36.4 - t_s) / 0.054 \quad (1)$$

### 3. 解析方法

#### 3.1 流体解析

流体解析は、放射計算により求められる固体面温度を用いて、固体境界面温度固定として計算を行った。乱流モデルは、2次非線形  $k-\epsilon$  モデル (Shih-Zhu-Lumley<sup>(10)</sup>) に低 Re 数型  $k-\epsilon$  モデル<sup>(11)</sup> を組み合わせさせたモデル<sup>(12)</sup> を用いた。温度による密度変化の影響は圧力を一定と仮定した理想気体の式を用いて評価した。計算アルゴリズムは SIMPLE 法、差分スキームは風上法を用いた。

人体モデル、室内壁等の固体表面は三角メッシュで分割した。耳はメッシュ作成が過度に煩雑になるため省略した。固体面のメッシュ総数は 8,942 個、うち人体モデルは 6,080 個を占めている。人体モデルのメッシュ分割状況を図 2 に示す。図 3 に示すように、人体モデル表面から流体側への第一セルおよび第二セルは、セル高さをコントロールできるようにプリズム型のセルを採用した。第二セル上端から部屋の内壁までは、テトラ型セルを用いた (図 4 参照)。プリズム型セルの最小高さは 2mm としたが、腋下部、股間部における人体部位が鋭角的に交わる箇所、および手先のように先端が鋭角的な部位では、メッシュ作成にかなりの困難が伴った。セル分割数は 128,064 個である。第一セル中心点の固体壁からの無次元法線方向距離  $y^+ = y u^* / \nu$  ( $y$ : 距離 [m]、 $u^*$ : 摩擦速度 [m/s]、 $\nu$ : 動粘性係数 [m<sup>2</sup>/s]) を図 5 に示す。 $y^+$  は、腋下部、胸部、股間部の一部で 4~5 の値であるが、その他の大部分で 1.5 以下である。

### 3.2 対流 放射連成解析<sup>(注1)</sup>

固体表面における熱収支は式(2)を満たさなければならぬ。

$$q_R + q_C + q_{CD} = 0 \quad (2)$$

ここで、 $q_R$ [W/m<sup>2</sup>]は放射熱流束、 $q_C$ [W/m<sup>2</sup>]は対流熱流束、 $q_{CD}$ [W/m<sup>2</sup>]は熱伝導による熱流束である。対流熱流束は流体解析より、貫流熱流束は固体表面温度、熱抵抗および室外温度(人体モデルでは体心温度)から求まる。一方、固体面要素*i*における放射エネルギー収支は式(3)を満足しなければならない。

$$A_i q_{Ri} = \sum_{j=1}^n C_{ji} \sigma T_j^4 - A_i \varepsilon_i \sigma T_i^4 \quad (3)$$

ここで、 $C_{ji}$ [m<sup>2</sup>]は灰色閉空間内の固体面要素*j*から射出された単位黒体放射能が固体面要素*i*にて吸収される量を表しており、全交換面積と呼ばれる<sup>(6,7,13)</sup>。[W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>]はステファン・ボルツマン定数、 $T$ [K]は絶対温度、 $A$ [m<sup>2</sup>]は面積、[-]は放射率である。人体モデルを含む固体面の放射率は0.9とした。

固体面要素*i*に式(2)を適用して求まる $q_{Ri}$ を式(3)に代入して温度 $T_i$ を計算する。このようにして求まる固体面要素の温度分布を流体解析ルーチンに転送して固体境界面温度固定として計算を行う。これらを収束するまで繰返す。

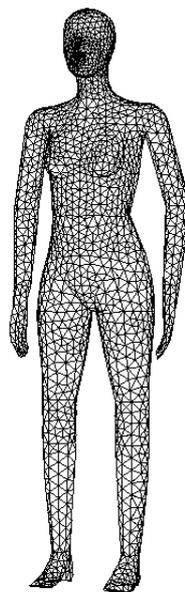


Fig.2 Human body model

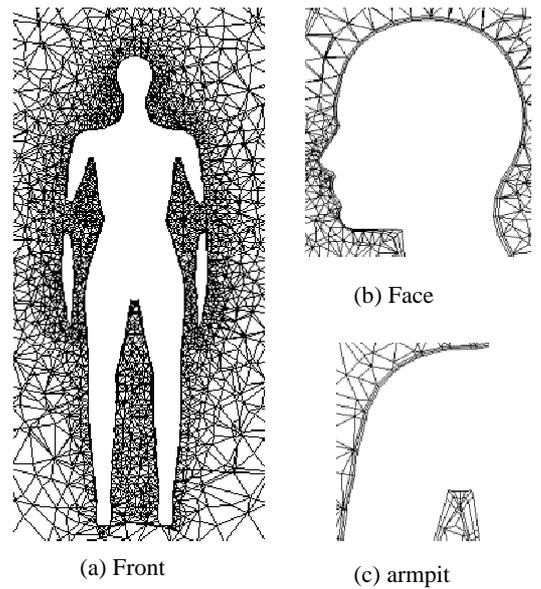


Fig.3 Grid system around human body model

### 4. 数値解析結果と比較した実験の概要

図1の解析対象室と同一寸法の床全面吹出し・天井全面吸込み換気方式の環境実験室の中央にサーマルマネキンを設置した。床からの吹出し速度は0.05m/sであり、換気無しとした解析モデルの条件とは異なる。この条件の相異は、人体周囲の空気が上昇を開始する足部では無視できないが、上半身では人体近傍における速度は0.15~0.24m/sに発達するので、吹出し気流の影響は相対的に小さくなると思われる。壁面の近くにカーテンを垂らし、空気温度と壁面温度がほぼ一致するようにした。床面は、グレーチングの上に多孔性のカーペットが敷かれ、天井面はアルミニウム製パンチングメタル面としている。床面からの吹出し空気温度は、27℃である。サーマルマネキンは、図6に示すように18個の部位に分割されている。両膝を除く16部位では、部位ごとに放熱量が式(1)を満たすように制御され、部位ごとに平均温度が測定される。実験を開始してから約4時間経過して、空気温度、マネキン表面温度、放熱量に変化がなくなったことを確認後、室内壁と空気温度、およびサーマルマネキンの部位ごとの温度と全熱流束を測定した。室内壁、空気の平均温度はそれぞれ27.5℃、27.6℃であった。

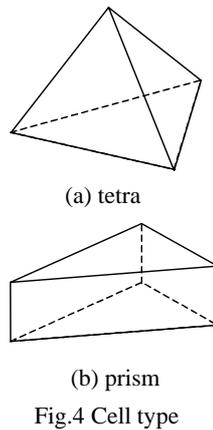


Fig.4 Cell type

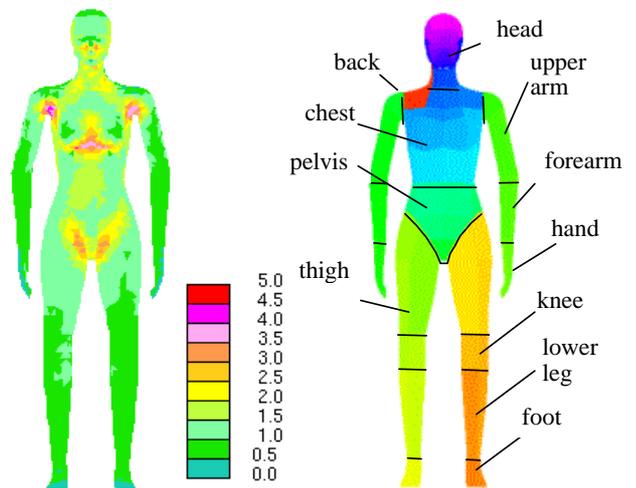


Fig.5 Distribution of  $y^+$  on human body model

Fig.6 Thermal manikin divided into 18 parts

### 5. 解析結果

#### (1) 速度分布

図7に示すように、人体モデルの発熱によりその周囲には上昇流が生ずる。上昇流は、足元から頭部に向かって次第に増速する。上昇流は、股間部、腋下部、顎でさえぎられ、それらの周囲に迂回する。背面では、滑らかに風速が増加し、頭上で最大値0.24 m/sとなる。

林らは、本研究と同一の実験用サーマルマネキンを用いて、換気を遮断した室内温度27.8℃の静穏室でサーマルマネキ

ン周囲の温度や風速の測定を行っている<sup>(8)</sup>。林らは、最大風速は頭上に現れ0.21m/sとしている。これと比べると、計算値の方がやや大きい。

#### (2) 温度分布

図8に示すように、人体モデル周囲の上昇気流の温度は足元から頭部にかけて増加する。股間部、腋下部近傍で32℃、頭上で31℃程度である。人体近傍を除く大部分の空間では、27.7℃一定とみなしうる。林らは頭頂部近傍で30℃と報告しており<sup>(8)</sup>、計算値の方が1℃ほど高い。

#### (3) 皮膚温度分布

図9に示すように、皮膚温度は32.2~34.8℃に分布し、平均値は33.7℃である。鼻の先端で32.2℃と最も低い。唇、顎は、32.8℃、その他の顔面で33.5℃と計算された。胸、手先では、33.3℃である。股間部で最も高く34.8℃、次いで、腕と胸部、および大腿部内側の互いに向き合う部位で34.2℃と高い。その他の部位では平均値にほぼ等しい。熱的中立の条件下で、皮膚温度は熱流束と式(1)で関係づけられているため、熱流束の大きいところで低くなるように計算される。

(4) 全熱流束分布

図 10 に示すように、対流熱流束と放射熱流束の和である全熱流束は、 $29 \sim 77 \text{W/m}^2$  に分布し、平均値は  $49.7 \text{W/m}^2$  である。鼻で  $77 \text{W/m}^2$  と最も大きく、次いで唇、顎で  $63 \text{W/m}^2$ 、これらを除く顔面で  $55 \sim 59 \text{W/m}^2$  と計算された。胸、手の先では  $60 \text{W/m}^2$  程度、後頭部、腕部・大腿部・下腿部の外側では  $55 \text{W/m}^2$  程度である。肩、腋下部、腕部・大腿部の内側では、 $45 \text{W/m}^2$  程度と小さい。股間部で最も小さく  $35 \text{W/m}^2$  程度で

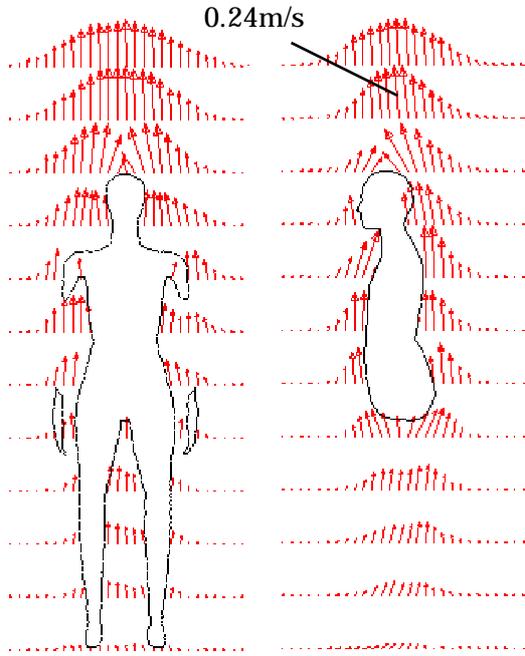


Fig.7 Velocity distribution

ある。腹部、背中、臀部は、ほぼ平均値に等しい。人体モデルからの全放熱量は  $72 \text{W}$  で、放射 65、対流 35 の割合である。

(5) 対流熱流束分布

人体正面は起伏に富んだ三次元形状のため、対流熱流束は図 11 に示すように、 $9 \sim 52 \text{W/m}^2$  に広く分布し、平均値は  $18.5 \text{W/m}^2$  である。特に顎から鼻にいたる形状が大きく変化する部分では、対流熱伝達率は図 11(c) に示すように部位ご

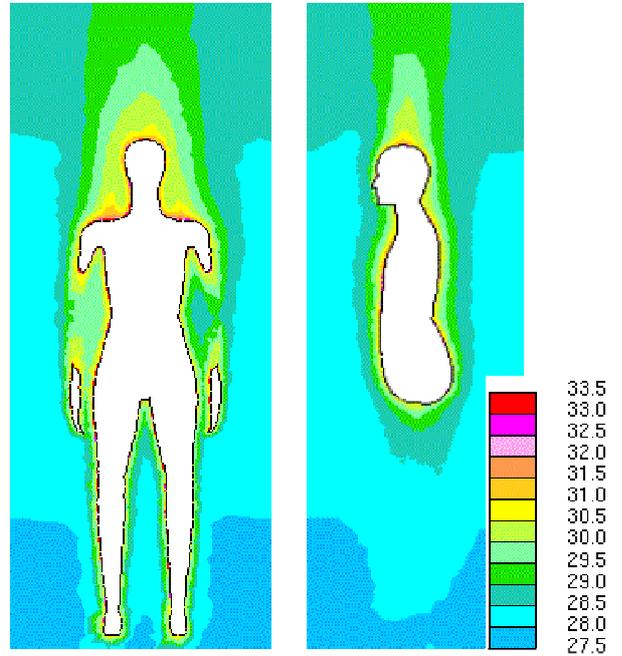


Fig.8 Temperature distribution [ ]

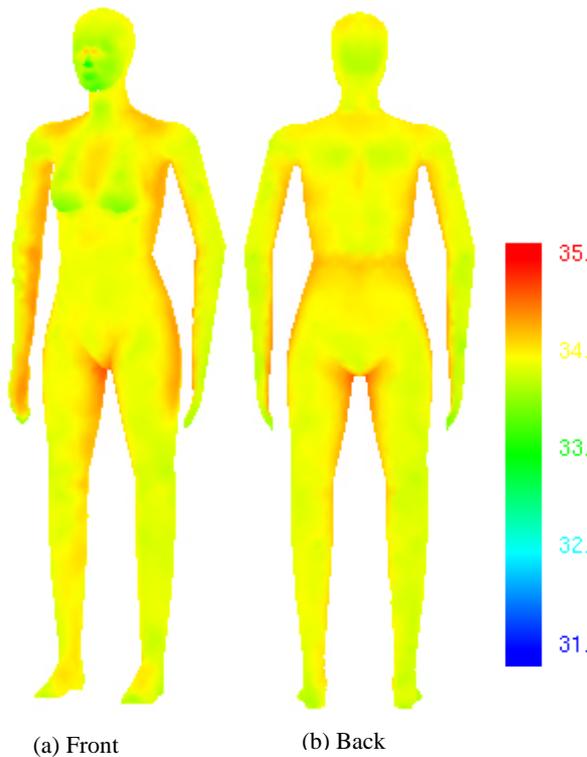


Fig. 9 Skin temperature [ ]

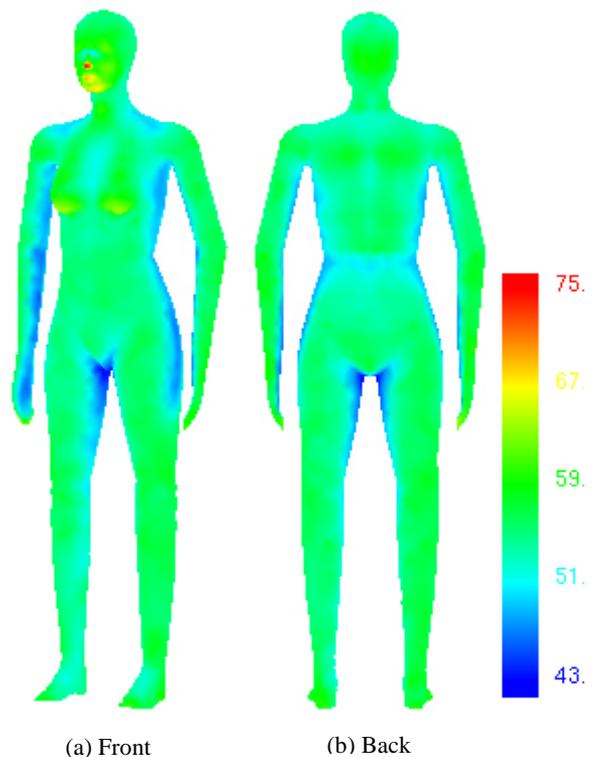


Fig.10 Total heat flux [ $\text{W/m}^2$ ]

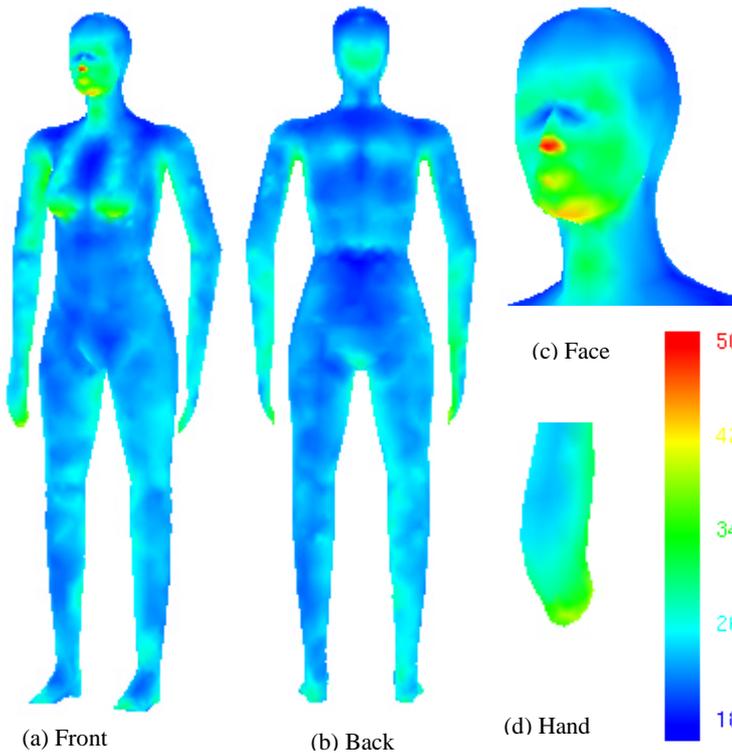


Fig.11 Convective heat flux [W/m<sup>2</sup>]

と大きく異なる値を示している。これに対して背面は、なだらかな曲面で構成されているため後頭部の 25W/m<sup>2</sup>を除き 10~15W/m<sup>2</sup> でほぼ一様である。

局所対流熱流束は、鼻の先端が最も大きく 52 W/m<sup>2</sup>、次いで、顎 45 W/m<sup>2</sup>、唇 43 W/m<sup>2</sup>、胸、手の先 38 W/m<sup>2</sup> と計算された。上昇流が遮られる腋下部では 32W/m<sup>2</sup> 程度であるが、股間部では 18W/m<sup>2</sup> と低く計算された。顔面と後頭部を除く頭部、肩、上腕部・大腿部外側、腹部の中央、臀部、腰、下腿部では 10~20W/m<sup>2</sup> 程度と低く計算された。上腕部内側、前腕部、手は、20~25W/m<sup>2</sup> 程度である。

(6) 放射熱流束分布

図 12 に示すように、放射熱流束は 10~37W/m<sup>2</sup> に分布し、平均値は 31.2W/m<sup>2</sup> である。直接室内壁を見る人体部位、すなわち、頭頂部、後頭部、腹部、背中、臀部、腕部・大腿部・下腿部の外側で 30~37W/m<sup>2</sup> と高く、互いに人体自身を見合う部位、すなわち、腋下部、股間部で 15W/m<sup>2</sup> 程度、顎、腕部・大腿部の内側で 20~25W/m<sup>2</sup> 程度と低く計算された。

6. 解析結果と実験結果の比較

人体部位ごとの皮膚温度、全熱流束の計算値と測定値を比較する。計算値は各部位内のメッシュの面積重み付け平均をした値である。

(1) 皮膚温度

人体の部位別平均皮膚温度を、図 13(a) に示す。計算値は折れ線グラフ、測定値は棒グラフで表示されている。計算値は 33.6~33.8、測定値は 33.3~34.1 の範囲に分布しており、計算値は測定値に比べてかなり平均化している。図 9 で示したように、局所皮膚温度の計算値は 32.2~34.8 に分布しているが、人体部位ごとの平均値をとった結果一様化したものである。全身の平均温度は、計算値、測定値ともに 33.8 で一致している。胸部、背中、腹部は計算値 33.8、測定値 34 と高く、頭部では計算値 33.6、測定値 33.3

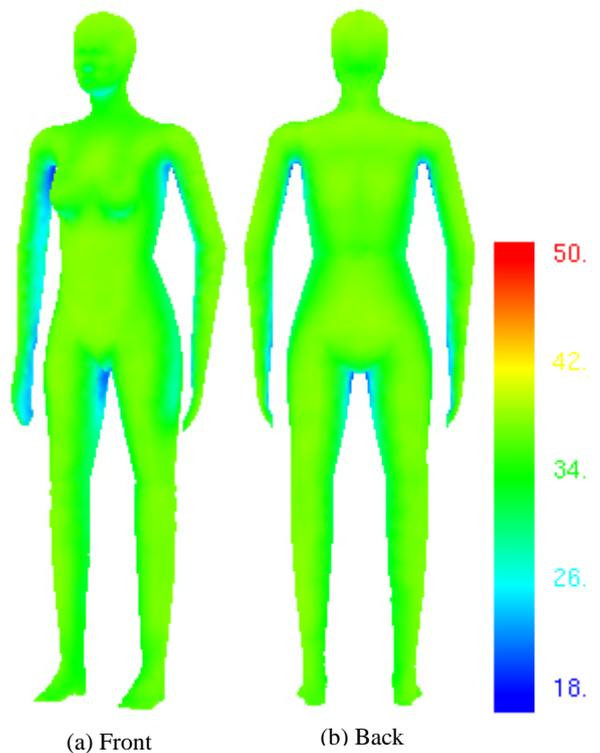


Fig.12 Radiative heat flux [W/m<sup>2</sup>]

と低い。測定値では、足部も 33.5 程度と低い。これらの部位では、計算値と測定値の差異が大きく 0.3 程度である。その他の部位では、両者はほぼ一致している。

(2) 全熱流束

全熱流束を図 13(b) に示す。計算値は 47~52W/m<sup>2</sup>、測定値は 43~57 W/m<sup>2</sup> の範囲に分布しており、計算値は測定値

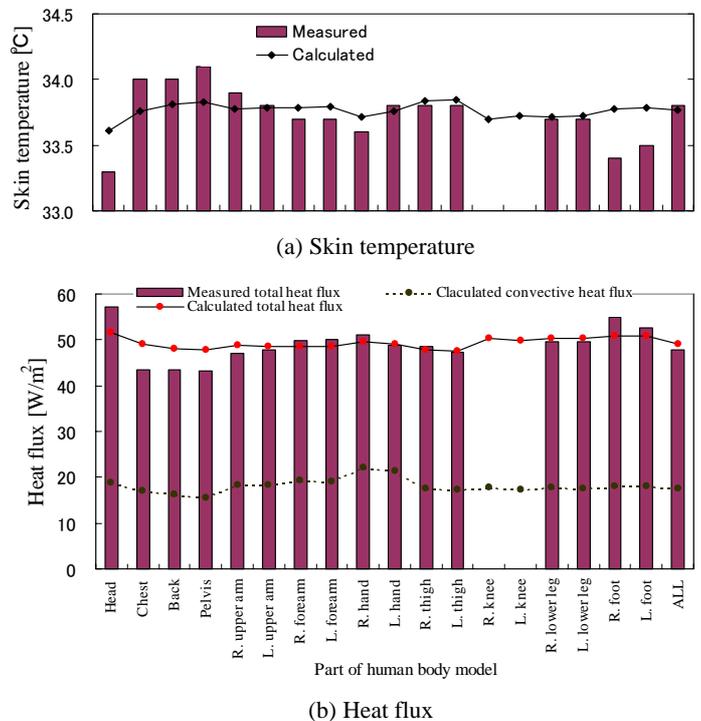


Fig.13 Comparison of calculated heat fluxes and skin temperatures with measured ones

に比べて平均化している。全熱流束は、頭部で最も大きく、計算値で  $52 \text{ W/m}^2$ 、測定値で  $57 \text{ W/m}^2$  である。頭部の全熱流束の計算値は測定値に比べて小さいが、これは解析用人体モデルで耳を省略したためと思われる。足部では、計算値が  $51 \text{ W/m}^2$  で測定値  $53 \text{ W/m}^2$  と比べて小さいが、これは床からの微弱速度の吹き出し気流の影響を無視したためと考えられる。皮膚温度が最も高い腹部、背中、胸では、計算値は約  $48 \text{ W/m}^2$  で測定値の約  $43 \text{ W/m}^2$  より大きい。この差異については、解析と実験の境界条件の相異の影響も含め今後検討を要する<sup>(注2)</sup>。全身の平均値は、計算値  $49 \text{ W/m}^2$ 、測定値  $48 \text{ W/m}^2$  でほぼ一致している。

### (3) 対流熱流束

対流熱流束の計算値を図 13(b)に折れ線(破線)グラフで示す。対流熱流束は  $17 \sim 21 \text{ W/m}^2$  の範囲に分布している。全身の平均値は、 $17.7 \text{ W/m}^2$  である。参照温度を平均空気温度  $27.7$  とした場合の対流熱伝達率の計算値を図 14 に示す。対流熱伝達率は、 $2.5 \sim 3.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  の範囲に分布している。手で約  $3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$  と最も大きく、頭部は  $3.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  程度である。腹部は、 $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  程度と低く計算された。

## 7. まとめ

(1) 実験用サーマルマネキンの形状を極力模擬した人体モデルを換気の無い静穏室の中央に置いた場合の温熱環境に関して、低レイノルズ数型  $k$ -乱流モデルを用いて対流・放射連成解析を行い、人体表面の対流・放射熱流束および皮膚温度を求めた。これらを床全面から微風速で吹出され天井全面から吸込まれる換気方式の環境実験室の中央にサーマルマネキンを設置した場合の測定値と比較し、ほぼ一致することを確認した。(実験条件は、換気無しとした解析条件と異なるが、吹き出し流が微風速のため、足部を除き大きな影響はないと思われる)

(2) 人体モデル周囲に形成される上昇気流の温度は、股間部、腋下部近傍で  $32$ 、頭上で  $31$  程度であり、最大速度は頭上で  $0.24 \text{ m/s}$  と計算された。

(3) 皮膚温度は、 $32.2 \sim 34.8$  に分布し、平均値は  $33.7$  と計算された。鼻の先端で最も低く  $32.2$ 、股間部で最も高く  $34.8$  である。

(4) 全熱流束は、 $29 \sim 77 \text{ W/m}^2$  に分布し、平均値は  $49.7 \text{ W/m}^2$  と計算された。鼻の先端で最も大きく  $77 \text{ W/m}^2$  である。

(5) 対流熱流束は  $9 \sim 52 \text{ W/m}^2$  に広く分布し、平均値は  $18.5 \text{ W/m}^2$  と計算された。局所対流熱流束は、鼻の先端が最も大きく  $52 \text{ W/m}^2$ 、次いで、顎  $45 \text{ W/m}^2$ 、唇  $43 \text{ W/m}^2$ 、胸、手の先  $38 \text{ W/m}^2$  である。顔面を除く頭部、肩、大腿部外側、腹部の中央、臀部、腰、下腿部では  $10 \sim 20 \text{ W/m}^2$  程度と低い

(6) 放射熱流束は、 $10 \sim 37 \text{ W/m}^2$  に分布し、平均値は  $31.2 \text{ W/m}^2$  と計算された。直接室内壁を見る人体部位で  $30 \sim 37 \text{ W/m}^2$  と高く、互いに人体自身を見合う部位で  $15 \text{ W/m}^2$  程度と低い。

(7) 人体モデルからの全放熱量は  $72 \text{ W}$  と計算され、放射  $65$ 、対流  $35$  の割合である。

(8) 人体モデルを 18 部位(両膝を除くと 16 部位)に分割した場合の部位別対流熱伝達率の計算値は、 $2.5 \sim 3.7 \text{ W/m}^2\text{K}$  の範囲に分布した。全身の平均値は、 $2.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  である。

(注1) 実験を行った環境実験室の床面は、多孔性のカーペット全面から  $0.05 \text{ m/s}$  で空気が吹出されるので入口境界、天井面は空気が吸込まれるので出口境界とすべきである。他方、床面と人体、および天井面と人体との間の放射熱伝達を考えると固体壁面境界とすべきである。現時点では、入口境界あるいは出口境界であって、かつ固体壁面境界でもあるような

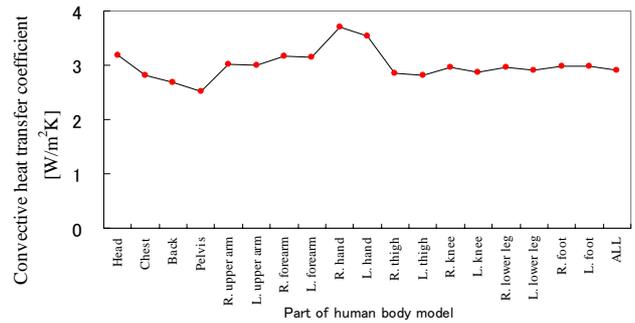


Fig.14 Calculated convective heat transfer coefficient

境界条件を設定できないので、本研究では、床面と人体の放射熱伝達を重視して固体境界面温度固定( $27.5$ )とした。今後、流体計算時は床面を入口境界、天井面を出口境界とし、放射計算時はそれらを固体面として扱うような設定法を検討し、実験条件と一致させた境界条件で計算を行う予定である。

(注2) 実験室の天井は、アルミニウム製パンチングメタル面である。本解析では、天井面を含めた壁面およびサーマルマネキンの放射率を一律に  $0.9$  とした。人体モデルの上半身で、計算値と測定値の一致度が下半身に比べて低下している事実を踏まえると、特に天井面の実効放射率に関する検討が必要である。

## 参考文献

- (1) 曾、加藤、村上：人体皮膚全熱放熱特性に関する CFD・放射・湿気輸送連成解析、数値サーマルマネキンの開発、生産研究、pp.67-74,1998.1
- (2) 村上、加藤、曾：数値サーマルマネキンに関する研究(その3)、日本建築学会計画系論文集、No.515, pp.69-74, 1999.1
- (3) 小関、小西、平松、田辺：人間-熱環境系快適性数値シミュレータ(その10)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.407-408, 2000.9
- (4) 宮永、占部、中野、梅干野：放射冷房による居住熱環境の改善に関する研究、日本建築学会計画系論文集、No.526, pp.51-58, 1999.12
- (5) 横山、中村、他：人間 温熱環境系評価プログラムのための解析モジュールとその応用、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、pp.1297-1300, 2000.
- (6) 大森、梁、林、加藤、村上：複雑形状に対応する放射伝熱解析法の開発と数値サーマルマネキンへの適用、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.19-20, 2001.9
- (7) 大森、梁、林、加藤、村上：複雑形状に対応する放射伝熱解析法と静穏室内に設置された人体モデルへの適用、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、pp.189-192,2001.9
- (8) 林、村上、加藤、高橋、曾、佐久間：数値サーマルマネキンに関する研究(14)、実人体と実験用サーマルマネキンを用いた人体周辺微気象の測定、空気調和・衛生工学会学術講演会論文集、pp.985-988,1998.8
- (9) Fanger,P.O.: Thermal Comfort, Danish Technical Press, 1970
- (10) Shih,T.H. et al.: A Realisable Reynolds Stress Algebraic Equation Model, NASA TM-105993, 1993.
- (11) Lien, F.S. et al.: Computational Modelling of A Transitional 3D Turbine-Cascade Flow Low-Re  $k$ - Model and A Multi-Block Scheme, ASME Cogen-Turbo Power Conference, pp.1-12, 1995

- (12) Lien, F.S. et al.: Low-Reynolds-Number Eddy-Viscosity Modelling Based on Non-Linear Stress-Strain/Vorticity Relations, Proc. 3rd Symposium On Engineering Turbulence Modelling and Measurements, pp.1-10, 1996.
- (13) Omori, T., Yamaguchi, S. and Taniguchi, H.: Accurate Monte Carlo Simulation of Radiative Heat Transfer with Unstructured Grid Systems, 11th International Symposium on Transport Phenomena, pp.567-573, 1998