

# 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

Coupled Simulation of CFD, Radiation and Moisture Transport for Sensible and Latent Heat Loss from Human Body  
Study of Computational Thermal Manikin

曾 潔\*・加藤 信介\*・村上 周三\*\*

Jie ZENG, Shinsuke KATO and Shuzo MURAKAMI

数値サーマルマネキン開発の一環として人体皮膚表面からの全熱放熱特性に関する CFD・放射・湿気輸送の連成解析法を開発する。すなわち、室内の人体と室内壁及び空気との間の顕熱、潜熱輸送に関する対流・放射・湿気輸送連成シミュレーションに、人体熱放散に関する温熱生理モデルを組み合わせて複雑形状を有する人体表面から室内環境に対する全熱すなわち顕熱・潜熱両者の伝達特性を詳細に検討する。気流場・温度場・湿気場の解析は低 Re 数型 k-ε モデルを用いた 3 次元 CFD により行う。放射解析ではモンテカルロ法により形態係数を求め、Gebhart の吸収係数を用いて壁面間の放射熱伝達量を算出する。人体熱放散モデルに関しては、Fanger のモデル及び Gagge らの 2 Node Model を組み込んで検討を行っている。解析結果は実際の人体の熱放出特性を良く再現するものと考えられる。

## 1. 序

数値シミュレーションにより仮想的に実現される室内の温熱環境空間で、人体の温熱感覚を再現する数値サーマルマネキンを開発する。この研究の一環として人体皮膚表面からの全熱（顕熱及び潜熱）の放散性状を CFD・放射・湿気輸送連成解析により検討する。人体の温熱感覚は人体生理発熱が如何に周囲環境へ放散されるかに直接関係する。従って、人体の熱快適性状を検討するには人体の放熱性状、特に人体表面における局所の放熱性状を詳しく解明することが大切である<sup>文1)</sup>。人体内部生理発熱は人体表面及び呼吸器官を経由して対流・放射・水分の蒸発により周囲環境に放熱される。これらの各熱放散経路は人体の温熱環境に対応する体温調節反応や人体表面における熱バランスを介して強く連成している<sup>文2)</sup>。すなわち人体の全放熱特性を検討するには、人体温熱生理モデルを含んだ対流場・放射場・湿気場の連成解析が必要となる。一般に詳細な対流熱伝達解析は CFD (Computational Fluid Dynamics: 数値流体力学) による必要があり、その形状の複雑さや関連する物理現象が多いことから、現在まで人体からの放熱性状を対流熱伝達解析を含め詳細に解析した例は筆者らの知る限り殆どない。本研究では、複雑形状の人体モデルを対

象として、人体全体に対応する生理反応モデルとして簡潔で温熱環境評価分野に広く使われている Fanger のモデル<sup>文3)</sup>及び Gagge らの 2 Node Model (2 NM)<sup>文4,5)</sup>を用いて人体表面から熱移動に関する CFD・放射・湿気の輸送連成解析を行い、人体の全熱放散特性を詳細に検討する。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析対象

図 1 に示す室内空間における人体の 1 体からの熱放散を解析対象とする。室内空調は Displacement ventilation 空調方式（吹出気流 22°C, 0.12 m/s, 57.0 m<sup>3</sup>/h）になされており、比較的静穏である。室の各壁面は断熱・断湿されて

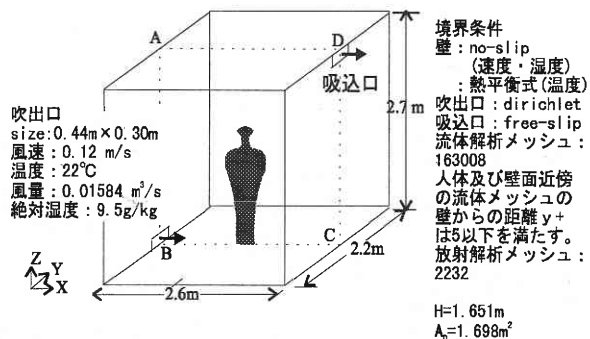


図 1 解析対象

\*東京大学生産技術研究所 第 5 部

\*\*東京大学生産技術研究所 附属計測技術開発センター

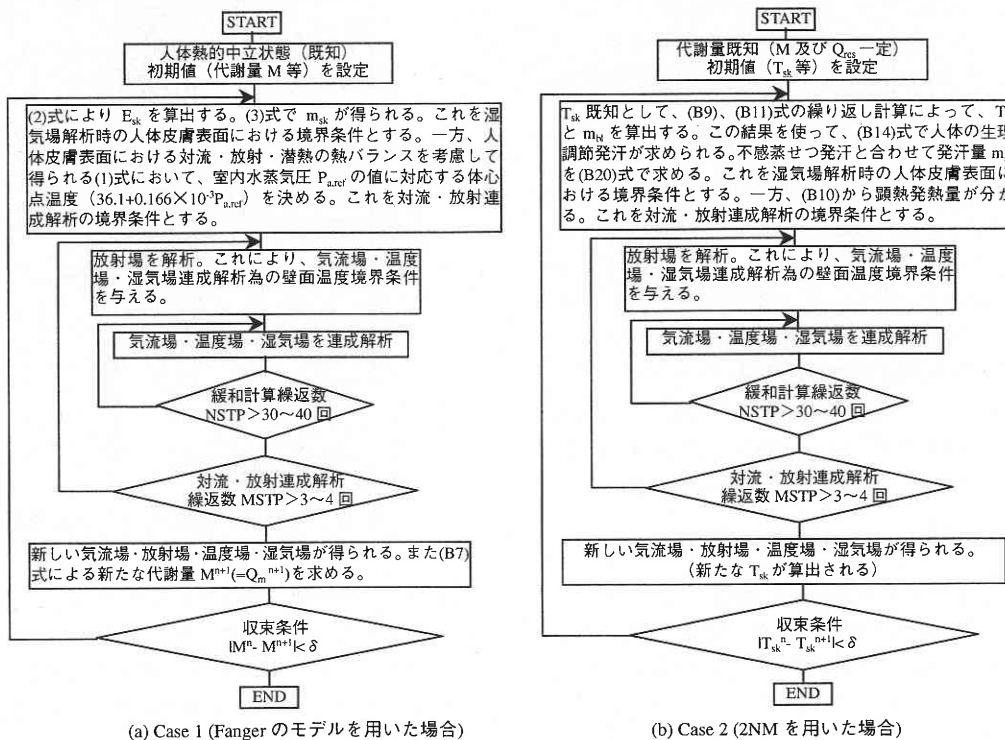


図 2 人体温熱モデルを組み込んだ対流・放射・湿気連成解析のフローチャート

いる。人体モデルは図1に示すように、実人体形状を多少簡略化している。

2.2 計算ケース

人体の温熱環境に対する生理反応条件は人体温熱生理モデルを用いて与える。本研究ではこの人体温熱生理モデルに関し、Case 0, Case 1, Case 2の三つのケースを検討する。Case 0は、Fangerのモデルを用いて人体の蒸汗を考慮せず、対流・放射連成解析により人体表面の顕熱性状に関して検討を行う。その際絶対湿度は室内一様9.5 g/kgと仮定している。なお、このケースに関する計算概要及び計算結果の考察等詳細は文献6) 参照。Case 1はFangerのモデル、Case 2はGaggeらの2NMを用いて人体内部の熱伝達及び体温調節機能を解析し、CFD・放射・湿気輸送連成解析により人体表面の蒸汗散熱を含んで全熱放散性状を検討する。

2.3 人体表面における境界条件の設定

Fangerのモデル及びGaggeらの2NMによる人体表面におけるCFD・放射・湿気輸送連成解析の境界条件導出の詳細はAppendixに示す。以下簡略に両者のモデルを用いた場合の連成解析方法を示す。なお、これらの生理モデルは本来体全体の放熱特性に関してモデル化されているので、体の各部位(例えば手足など)にこの条件を適用できる保証はない。しかし本研究では連成解析の最初の試みとして体の各部位に関し、この条件を一律に課して計算を行っている。

(1) Case 1: Fangerのモデルを用いた場合

Fangerのモデルでは人体が熱的に中立(暑くも寒くもない状態)の場合、人体皮膚表面温度 $T_{sk}$ と表面顕熱放熱量 $Q_t$ に関し(1)式が導出される。これを対流・放射連成解析時の人体表面の境界条件とする。また、人体表面における潜熱放熱量 $E_{sk}$ は人体全熱放散量 $Q_m$ に関し(2)式、水蒸気の発生量 $m_{sk}$ は(3)式で表される。 $P_{a,ref}$ は人体境界層外側空気の水蒸気圧である。(3)式は湿気輸送方程式を解く際の人体表面の境界条件となる。

$$T_{sk} = (36.1 + 0.166 \times 10^{-3} P_{a,ref}) - 0.054 Q_t \dots\dots\dots (1)$$

$$E_{sk} = -(6.94 + 3.05 \times 10^{-3} P_{a,ref}) + 0.399 Q_m \dots\dots\dots (2)$$

$$m_{sk} = E_{sk} / h_{fg} \dots\dots\dots (3)$$

(1) ~ (3) 式は人体が熱的中立な感覚を持つ条件により導かれている。逆に言えば人体がある環境において、熱的に中立の感覚を持つための代謝量( $M = Q_m$ )が(1) ~ (3) 式の条件を課した人体皮膚表面の全熱放散性状の解析から求められる。

(2) Case 2: Gaggeの2NMを用いた場合

2NMを用いた場合には人体の代謝量( $M = Q_m$ )が既知条件となる。人体の皮膚表面温度 $T_{sk}$ は与えられた体の代謝量 $M$ と環境によって定まり、人体が熱的に中立な感覚を持つ温度となる保証はない。解析結果で得られる人体

皮膚表面温度  $T_{sk}$  及びぬれ率  $w$  などから人体の環境に対する温熱感覚が解析される。ここでは Case 1 と対応させるように、Case 1 で求められた人体の平均代謝発熱量 ( $100.4 \text{ W/m}^2$ ) を本ケースの計算条件とした。2NM では人体の発汗量  $m_{sk}$  及び潜熱放散量が陽的に求められる。算出された発汗量  $m_{sk}$  が湿気輸送方程式を解く際の人体表面の境界条件になる。人体の全発熱量  $Q_m$  から皮膚からの潜熱放散量  $E_{sk}$  及び呼吸による熱放散量  $Q_{res}$  を差し引いて皮膚からの顕熱放散量  $Q_i$  が得られる。 $Q_i$  は対流・放射連成解析時の人体表面の境界条件として使う。

## 2.4 CFD・放射・湿気輸送連成解析手法

連成解析のプロチャートを図2に示す。なお、その詳細は Appendix 参照。CFD 解析は Launder-Sharma 型低 Re 数型  $k-\epsilon$  モデルに基づく。

## 3. 解析結果

### 3.1 Case 1: Fanger のモデルを用いた場合

本ケースの顕熱放散性状の結果は湿度が室内一様、また人体皮膚からの湿気放散も一様と仮定して湿気輸送を考慮しない場合 (Case 0)<sup>5,6)</sup> とほぼ同様になる (図 17 参照)。即ち、顕熱放散特性に関し Fanger のモデルは湿気輸送性状を特に考慮しない場合とほぼ同様の結果を与える。そのため、Case 0 との比較は特に考察しない。

#### (1) 風速分布 (図 3)

室内全体にはほぼ静穏であるが、人体モデル表面の発熱により上昇流が生じている。特に頭上でこれが明確に観察される。この上昇流の最大風速は  $0.23 \text{ m/s}$  である。既往の実験結果<sup>7,8)</sup> や筆者らの実験と良く対応する。

#### (2) 空間温度分布 (図 4)

Displacement ventilation 空調方式のため、室内には温度成層が形成される。各壁面近傍では温度が多少上昇する。

#### (3) 空間絶対湿度及び相対湿度分布 (図 5, 6)

室内には上下絶対湿度分布が形成される (図 5)。一方、相対湿度分布に関しては、吹出口近傍を含んだ室内下部空間には温度が低いため、相対湿度が高い。室内全体的に  $45\% \sim 50\%$  分布する (図 6)。

#### (4) 壁面温度分布 (図 7)

壁面は人体の熱放射により加熱され、全体的に空気温より  $0.3^\circ\text{C}$  程度高い。壁面間に温度差が生じるため、壁面間で放射熱伝達による熱の再分配が行われる。この為、放射計算しない場合<sup>9)</sup> と比べ、壁面温度は均一化になる。

#### (5) 各壁面での熱収支 (図 8)

人体皮膚表面から放射で室内全壁面に  $61.1 \text{ W}$ 、対流で直接室内空気に  $46.2 \text{ W}$  それぞれ放熱される。また、蒸汗で  $48.4 \text{ W}$  潜熱放散される。床面は他の壁面に比べ約  $1.0^\circ\text{C}$  低く  $25.8^\circ\text{C}$  となっている。その為、人体及び他の壁面から  $31.7 \text{ W}$  と大きな放射熱を受ける。一方、天井は、床面

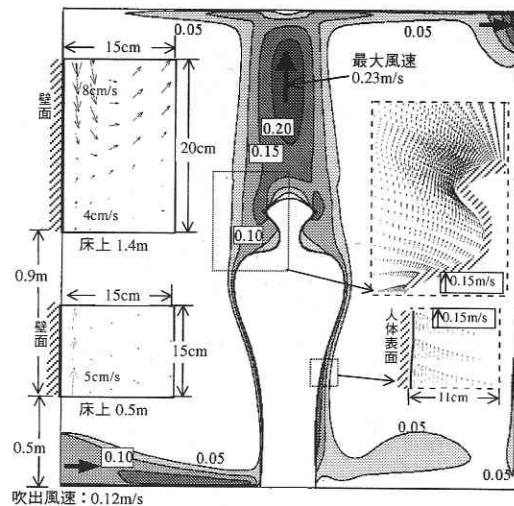


図 3 スカラー風速とベクトル風速分布 (Case 1: Fanger のモデル)

に比べ高温のため、ネットで放射放熱し、天井付近の空気から対流熱取得している。また、人体が吹出、吸込口両側の壁面と比べて、奥の壁面に対する形態係数が大きい為、奥の壁面も  $10.7 \text{ W}$  と大きな放射熱を受ける。なお、周囲壁面における平均対流熱伝達率は約  $2.6 \text{ W/m}^2\text{C}$  である。

#### (6) 人体表面温度分布 (図 9)

人体表面全体的に均一で  $33.0^\circ\text{C}$  である。足元では  $31.0^\circ\text{C} \sim 32.0^\circ\text{C}$  と低い。平均温度は  $33.0^\circ\text{C}$  である。

#### (7) 人体表面における対流熱伝達特性 (図 10, 11)

人体表面の対流熱伝達量は全体的に  $20.0 \sim 40.0 \text{ W/m}^2$  に分布する (図 10)。人体の脚部では、温度境界層が薄いために、対流熱伝達量が他の部位と比べ相対的に大きい、 $80.0 \text{ W/m}^2$  を越えている。人体表面对流熱伝達率の分布性状は対流熱伝達量と相似する。全体的に  $3.0 \sim 4.0 \text{ W/m}^2\text{C}$  に分布する (図 11)。足元では  $5.0 \sim 8.0 \text{ W/m}^2\text{C}$  と大きな値を示す。平均対流熱伝達率は  $4.2 \text{ W/m}^2\text{C}$  である。対流熱伝達率の分布性状及び平均対流熱伝達率は、いずれも既往の実験結果<sup>1,8,10-12)</sup> と良く対応する。

#### (8) 人体表面における放射熱伝達特性 (図 12, 13)

放射熱伝達量は各部位であまり変わらず  $30.0 \sim 40.0 \text{ W/m}^2$  である (図 12)。足元は胴体と比べ小さい ( $30.0 \text{ W/m}^2$  以下)。これは、足元は対流熱伝達量が大きいため、表面温度が低くなり、放射熱伝達量も小さくなるためである。平均放射熱伝達量は  $36.0 \text{ W/m}^2$  である。壁面温度に大きな差異が生じていないため、人体表面の平均放射温度 PRT に大きな分布は見られない (図 13)。全体的に  $27.0^\circ\text{C} \sim 28.0^\circ\text{C}$  と分布する。人体の平均放射温度 MRT  $27.0^\circ\text{C}$  に対し、首部と足元の内側では PRT が  $28.0^\circ\text{C}$  を越え、少々高い。体の両側は  $27.0^\circ\text{C}$  以下であり、やや低い。

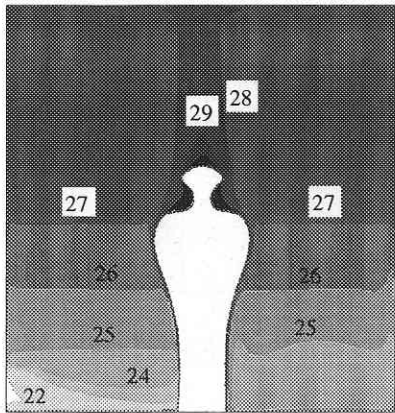


図 4 空間温度分布 (°C)

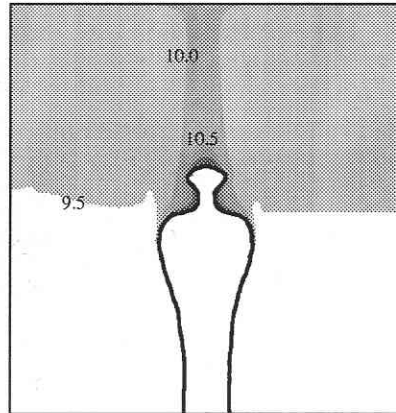


図 5 空間絶対湿度分布 (g/kg)

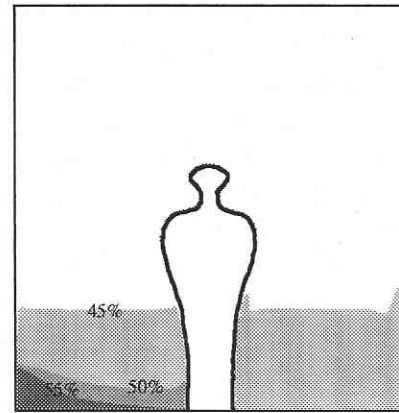


図 6 空間相対湿度分布

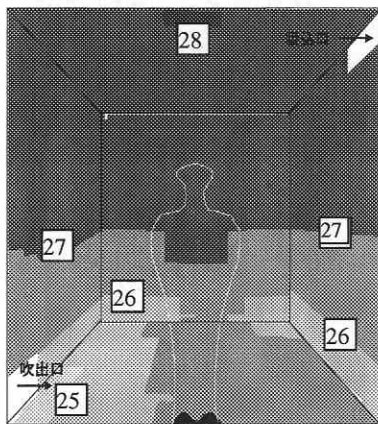


図 7 壁面温度分布 (°C)

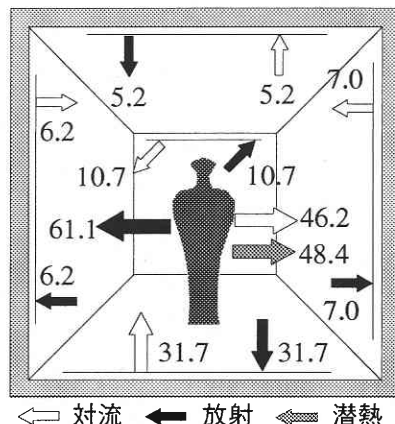


図 8 各壁面での熱収支 (W)

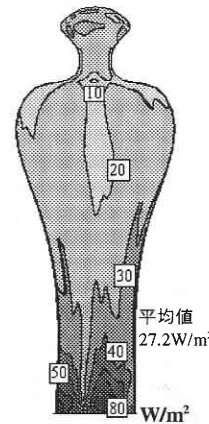


図 10 対流熱伝達量

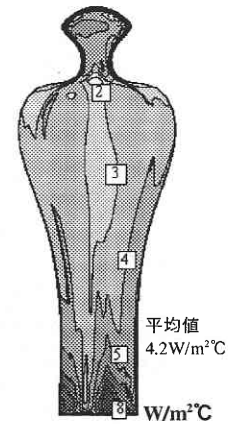


図 11 対流熱伝達率

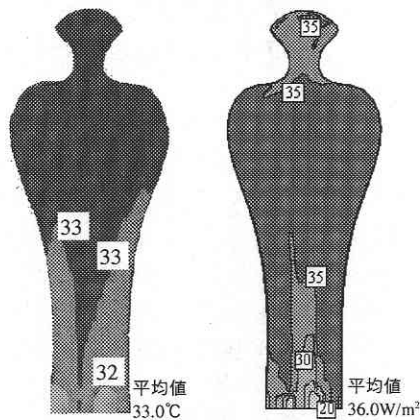


図 9 人体表面温度

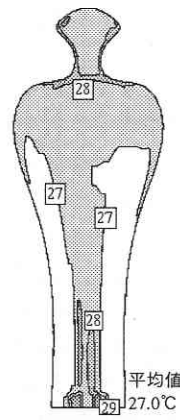


図 12 放射熱伝達量 (W/m²)

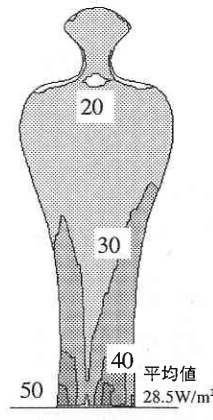


図 13 PRT (°C)

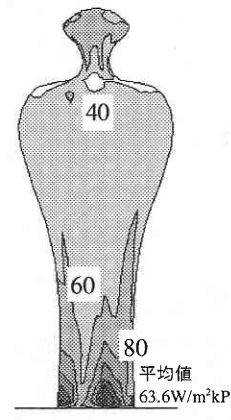


図 14 潜熱伝達量 (W/m²)

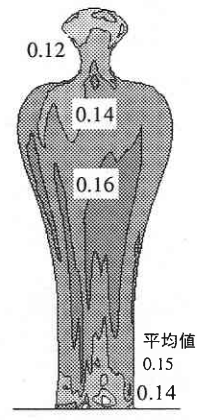


図 15 蒸発による熱伝達率 (W/m²kPa)

(9) 人体表面における潜熱伝達特性 (図 14, 15)

人体表面における蒸発による熱伝達率の分布性状は人体の対流熱伝達率と相似する (図 15)。即ちルイス関係が成立すると考えられる。蒸発による熱伝達率は全体的に 40 ~ 80 W/m²kPa と分布する。足元ではより大きめの値となる。平均蒸発による熱伝達率は 63.6 W/m²kPa となつてお

り、平均対流熱伝達率 4.2 W/m²°C と比較すると、ルイス係数は 15.1°C/kPa となる。通常室内でルイス係数は 16.5°C/kPa<sup>文1)</sup> が推薦されており、本計算結果とはほぼ一致する。

人体表面における潜熱伝達量は全体的に 20 ~ 40 W/m² と分布しており、足元では 50 W/m² を越えて大きな値を

示す (図 14). 但しこのような分布性状は必ずしも実物に対応するものとは限らない<sup>文2)</sup>. 足元では温度境界層が薄いため, 周囲環境へ対流による放熱が相対的に大きい. 今回人体の各部位に対して一律に Fanger の熱的中立条件を課している. そのため足元では熱的中立感覚を保つため, 代謝発熱量が大きくなる. また Fanger のモデルは人体の生理調節発汗は外部環境ではなく代謝量のみ関数としてモデル化されている<sup>文13~15)</sup>. そのため発熱量の大きい足元での潜熱伝達量も大きい. なお, 平均潜熱伝達量は  $28.5 \text{ W/m}^2$  と算出され, 実験値<sup>文2)</sup> と対応するものと考えられる.

#### (10) 人体表面におけるぬれ率の分布 (図 16)

胴体ではぬれ率が  $0.14 \sim 0.16$  と大きく分布するが, 頭と脚部では  $0.12$  と小さい. 潜熱伝達量の分布に影響されて, ぬれ率の分布も必ずしも現実と対応するとは限らない<sup>文2)</sup>. 平均ぬれ率は  $0.15$  である. 本ケースは人体が今回の空調条件下 (送風温  $22^\circ\text{C}$ ) において熱的中立状態に達する場合の人体の代謝量を算出するものである. 人体の平均代謝量は  $100.4 \text{ W/m}^2$  ( $1.7 \text{ Met}$ : 散歩程度軽い活動) と算出される. この平均ぬれ率は人体が  $1.7 \text{ Met}$  程度の活動する時適量な汗をかくことが熱的中立であるという常識に対応するが, やや大きめである<sup>文2)</sup>.

### 3.2 Case 2: 2NM を用いた場合

#### (1) 室内風速・温度・湿度分布

本ケースは人体の平均発熱量を Case 1 と同じするため, 図 17 に示すように人体から対流・放射・潜熱による平均熱放散量は人体温熱モデルが異なるのでそれに対応し, 異なるが大きな差はない. そのため室内風速・温度・湿度分布に関して Case 1 とほぼ同様な結果が得られるため, 結果の図は割愛.

#### (2) 各壁面での熱収支 (図 18)

各壁面での熱収支に関して, Case 1 と相似しているが, 人体からの放射熱伝達量が Case 1 より大きくなっている. これは人体表面温度が Fanger のモデルに比べ高くなっているためである.

#### (3) 人体表面温度分布 (図 19)

Case 1 の場合, Fanger のモデルは皮膚温が熱的中立となる条件であるので皮膚温は体中で比較的均一である. 本ケースこのような均一的な温度分布性状と異なる. 胴体と頭では  $33.0^\circ\text{C} \sim 34^\circ\text{C}$  と均一的であるが, 肩と首あたりでは  $34^\circ\text{C}$  を越えており, 足元では  $29.0^\circ\text{C} \sim 32.0^\circ\text{C}$  と低い. 平均温度 ( $33.3^\circ\text{C}$ ) は Case 1 ( $30.0^\circ\text{C}$ ) と比べてより高い.

#### (4) 人体表面における対流熱伝達特性 (図 20, 21, 17)

Case 1 とほぼ同様に分布しているが, 人体の平均対流熱伝達量及び平均対流熱伝達率はそれぞれ  $29.1 \text{ W/m}^2$ ,  $4.3 \text{ W/m}^2\text{C}$  と少々高めとなっている.

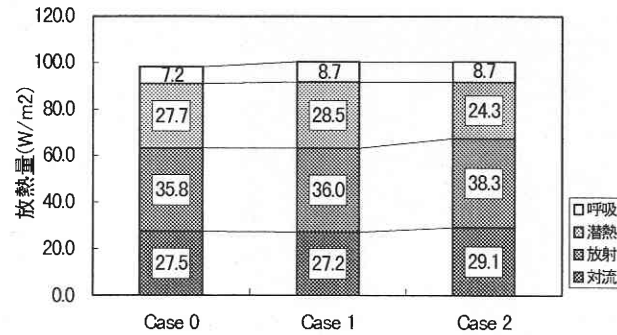


図 17 各ケースにおける人体放熱量の比較

#### (5) 人体表面における放射熱伝達特性 (図 22, 23, 17)

人体表面 PRT の分布は Case 1 とほぼ同様であるが, 放射熱伝達量の分布は Case 1 と若干異なる. PRT が人体の位置及び室内壁面温度分布のみに関係する. 一方, 放射熱伝達量はこれらのことのみではなく, 人体自身の表面温度にも関係するためである. 胴体では放射熱伝達量が  $40 \text{ W/m}^2$  を越えており, 脚部では  $20 \text{ W/m}^2$  と低くなっている. 平均放射熱伝達量は Case 1 と比べて  $38.3 \text{ W/m}^2$  と高い.

#### (6) 人体表面における潜熱伝達特性 (図 24, 25, 17)

Case 1 と違って, 本ケースでは人体全表面に対して発熱量一定 ( $100.4 \text{ W/m}^2$ ) としている. 体の足元で対流熱伝達量はかなり大きいため, 潜熱伝達量は逆に小さい (図 24). 胴体では  $20 \sim 30 \text{ W/m}^2$  と分布する. 肩と首あたりにおいて, 潜熱伝達量は  $30 \text{ W/m}^2$  を越える. このような分布性状は人体表面温度分布 (図 19) と対応し, 実験<sup>文2)</sup> と一致する. 2NM は人体の熱的中立条件の成立を仮定した Fanger のモデルと比べて, 人体の内部熱伝達及び外部への熱放散性状, 特に潜熱伝達特性に対してより実現象に対応するモデルとなる (図 17). 一方, 蒸発による熱伝達率の分布性状は Case 1 と同様で, 対流熱伝達率と相似している (図 25). いわゆる, 本ケースの計算でもルイス関係が達している. 体全体的に  $40 \sim 80 \text{ W/m}^2\text{kPa}$  と分布しており, 足元では  $160 \text{ W/m}^2\text{kPa}$  を越えている. 平均蒸発による熱伝達率は  $70.2 \text{ W/m}^2\text{kPa}$  となっており, ルイス係数は  $16.5^\circ\text{C/kPa}$  となる. これは ASHRAE の推薦値と極めて良く一致する<sup>文1)</sup>.

#### (7) 人体表面におけるぬれ率の分布 (図 26)

ぬれ率の分布性状は Case 1 と大幅に異なる. 体の足元では, 潜熱伝達量が相対的に小さいため, ぬれ率も  $0.06$  と小さい. 人体の上半身に上がるに従い, ぬれ率は徐々に大きくなる. 肩及び首あたりではぬれ率は  $0.18$  と一番大きい. ぬれ率のこのような分布性状は人体表面温度分布 (図 19) と対応し, 実験<sup>文2)</sup> と一致する. 平均ぬれ率は Case 1 と比べて  $0.11$  と低い. このような活動レベル ( $1.7 \text{ Met}$ ) において, 熱的中立状態に対応するぬれ率と考

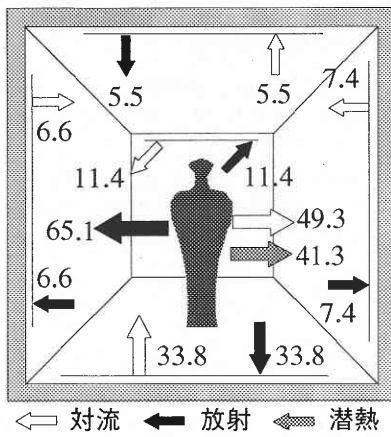


図 18 各壁面での熱収支 (W)

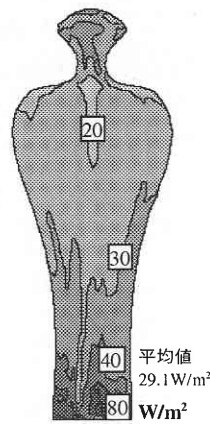


図 20 対流熱伝達量

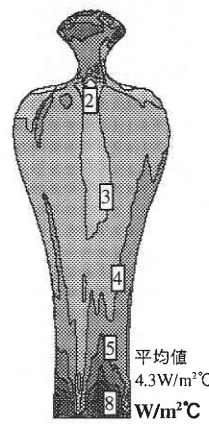


図 21 対流熱伝達率

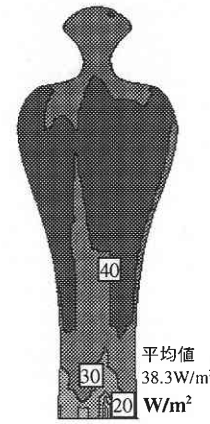


図 22 放射熱伝達量

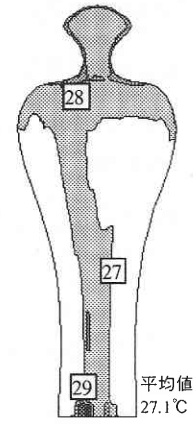


図 23 PRT (C)

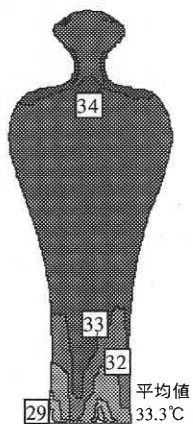


図 19 人体表面温度 (C)

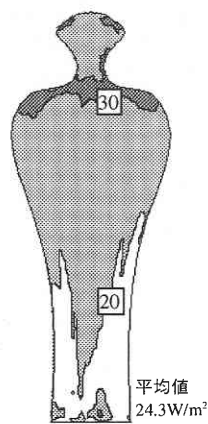


図 24 潜熱伝達量 (W/m²)

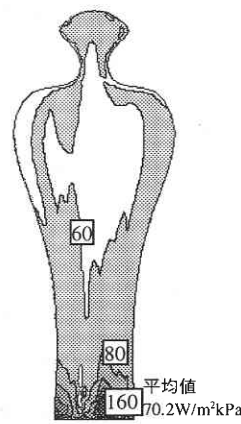


図 25 蒸発による熱伝達率 (W/m²kPa)

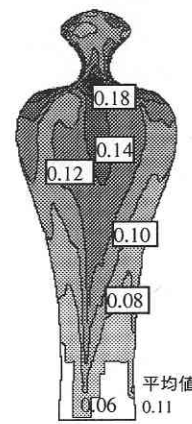


図 26 ぬれ率

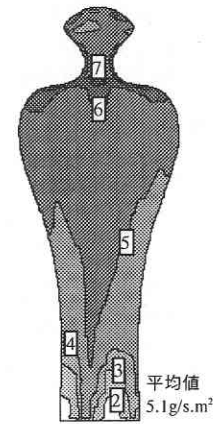


図 27 血液流量 (g/s.m²)

えられる。

(8) 人体の生理量

人体の体心部温度はほぼ均一で 36.9°C である (図省略)。人体の体心部から皮膚層までの血液流量は人体全体で 4 ~ 6 g/s.m² に分布する (図 27)。人体の足元では 2 g/s.m² と低い、肩と首あたりでは 7 g/s.m² を越える。これは人体表面温度分布 (図 19) と対応する。

4. ま と め

①人体皮膚表面の全熱放散性状を解析するため、Fanger のモデルと Gagge らによる 2NM を含んだ対流・放射・湿気輸送連成解析を行い、人体の全熱放散特性を詳細に検討した。解析は本来体全体の熱放散特性に対するモデルを各部位でもそのまま成立すると仮定した。②今回の計算条件 (軽作業に対応する熱快適状態) では、人体皮膚表面から全熱放熱の平均性状に関して、両モデルとも妥当な予測値が得られている。③人体皮膚表面から顕熱放散の局部分布性状に関しては、両モデルとも良く類似した結果が得られ、

実物と対応するものと考えられる。④人体皮膚表面から潜熱伝達量の局部分布性状に関しては、Fanger の人体の熱的中立を仮定したモデルは実物と対応がやや劣る。一方、Gagge のモデルはぬれ率の導入によって、発汗に対して人体側及び環境側両方の要素とも考慮している。今回人体各部位に対し Gagge のモデルを一律に適用し各部位で同一の発熱があると仮定しても、潜熱伝達特性に関し大略妥当な分布性状が得られている。⑤今後 Gagge の 2NM を用いた場合得られた人体表面の全熱伝達性状に基づいて、人体温熱評価指標を算出する予定である。

Appendix

本研究に用いた温熱生理モデル及び対流・放射・湿気輸送連成解析手法を以下にまとめて示す。なお参考文献が工学単位系を使っている場合、ここではすべて SI 単位系に直して示す。

1. Fanger のモデル<sup>文 3, 16)</sup>

1.1 概要 人体が定常状態で、機械的仕事をしない場合、人体における熱収支式は (B1), (B2) となる。



$$Q_m = M = Q_{sk} + Q_{res} \dots\dots\dots (B1)$$

$$Q_{sk} = Q_t + E_{sk} \dots\dots\dots (B2)$$

ここで人体皮膚表面からの潜熱放散量  $E_{sk}$  及び呼吸による熱散失量  $Q_{res}$  は Fanger によりそれぞれ (B3), (B4) 式と評価されている。

$$E_{sk} = E_{diff} + E_{rsw} \\ = 3.05 \times 10^{-3} (5.73 \times 10^{-3} - 6.99M - P_{a,ref}) + 0.42 (M - 58.2) \dots (B3)$$

$$Q_{res} = C_{res} + E_{res} \\ = 0.0014M (34.0 - T_a) + 1.73 \times 10^{-5} M (5.87 \times 10^3 - P_{a,ref}) \dots (B4)$$

ここで (B3) 式を整理すると、本文の (2) 式となる。

$$E_{sk} = - (6.94 + 3.05 \times 10^{-3} P_{a,ref}) + 0.399Q_m \dots\dots\dots (2)$$

呼吸による熱放散量  $Q_{res}$  が少ないと考えて、室内の水蒸気圧  $P_{a,ref} = 1500 \text{ Pa}$  (例えば気温  $20^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ , 相対湿度  $40\% \sim 60\%$  の場合), 気温  $T_a = 26^\circ\text{C}$  とすれば, (B4) 式から呼吸による熱放散量  $Q_{res}$  に関する (B5) 式が得られる。

$$Q_{res} = 8.63 \times 10^{-2} Q_m \dots\dots\dots (B5)$$

(B2), (2), (B5) 式を (B1) 式に代入し, (B6) 式を得る。

$$Q_m = 1.94 \left[ Q_t - (6.94 + 3.05 \times 10^{-3} P_{a,ref}) \right] \dots\dots\dots (B6)$$

一方, Fanger は人体が熱的中立状態にある場合の代謝量と皮膚温度に関する (B7) 式を提案している。

$$T_{sk} = 35.7 - 0.028Q_m \dots\dots\dots (B7)$$

(B6), (B7) 式から本文の (1) 式が導出される。

$$T_{sk} = (36.1 + 0.166 \times 10^{-3} P_{a,ref}) - 0.054Q_t \dots\dots\dots (1)$$

**1.2 潜熱伝達に関する検討** 本モデルを利用すれば人体皮膚表面における潜熱放散を考慮しない場合に, 水蒸気圧  $P_{a,ref} = 1500 \text{ Pa}$  を仮定する。これを上記の (1) 式に代入すると, 対流・放射連成解析時人体表面の境界条件は (B8) 式となる<sup>6, x16)</sup>。

$$T_{sk} = 36.4 - 0.054Q_t \dots\dots\dots (B8)$$

この式から, Fanger のモデルは人体内部の熱伝達に対して単純に体心点 (無限小熱源:  $36.4^\circ\text{C}$ ) から人体皮膚面まで熱伝導という考え方で処理すると理解される。人体の潜熱放散を考慮する場合, 更に体心点温度が調節される。即ち周囲環境に応じて熱的中立を持つため人体内部生理発熱量が変わる。この調節は (1) 式に示されるように室内の水蒸気圧を通して影響される。すなわち室内の水蒸気圧は, 人体が環境に対応する際人体の体心点温度のみに直接影響を与えることを意味する。通常室内の場合, 水蒸気圧の  $1000 \text{ Pa} \sim 2000 \text{ Pa}$  の変化に対して, 体心点温度が  $36.3 \sim 36.4^\circ\text{C}$  の微小な範囲に調節されることになる。従って室内水蒸気圧は人体の温熱調節に及ぼす影響が小さいと見られる。これは実現象とは一致しない。これは Fanger のモデルにおいて人体潜熱放散の取扱いが不十分<sup>x13-15)</sup>である点に起因するものと考えられる。

2. Gagge らの 2 Node Model<sup>文1.4,5)</sup>

Gagge らのモデルは人体を体心部 core と皮膚層という二つの部分に分けている。代謝発熱は体心部で生じる。体心部から呼吸により直接外部環境まで, 及び皮膚層まで血流と熱伝導により放熱される。皮膚表面に達した体心部からの熱は, 対流・放射・蒸汗により外部環境へ放散される。体心部と皮膚層において熱収支式を立てると, (B9), (B10) 式となる。

$$S_{cr} = (M - Q_{res}) - K (T_{cr} - T_{sk}) - c_{p,bl} m_{bl} (T_{cr} - T_{sk}) \dots (B9)$$

$$S_{sk} = K (T_{cr} - T_{sk}) + c_{p,bl} m_{bl} (T_{cr} - T_{sk}) - E_{sk} - (Q_{cv} + Q_r) \dots (B10)$$

人体が皮膚表面温度  $T_{sk,n} = 33.7^\circ\text{C}$ , 体心部  $T_{cr,n} = 36.8^\circ\text{C}$  である場合, 人体が熱的中立状態であるとされる。そこで, 人体が相対的に暖かい環境に置かれる場合, 体心部は  $36.8^\circ\text{C}$  を越え, 皮膚層は  $33.7^\circ\text{C}$  を越えることとなる。人体の体温をある範囲に保つため, 体心部から皮膚層まで流れる血液流量や皮膚表面における発汗量が増える。これらの生理調節機能は表 B1 に示す。

表 B1 に示される生理調節機能を定量化すると, 血液流量  $m_{bl}$  に関して (B11) 式となる。

$$m_{bl} = \left[ (6.3 + 200WSIG_{cr}) / (1 + 0.1CSIG_{sk}) \right] / 3600 \dots (B11)$$

また, 皮膚表面層が人体総質量を占める比を  $\alpha$  とし, (B12) 式によって人体の平均体温  $T_b$  が算出される。熱的中立である場合には一般に  $\alpha$  は  $0.1$  とされる<sup>x5)</sup>。血液の流動によって,  $\alpha$  が (B13) 式に示されるように変わる。

$$T_b = \alpha T_{sk} + (1 - \alpha) T_{cr} \dots\dots\dots (B12)$$

$$\alpha = 0.0418 + 0.745 / (3600m_{bl} + 0.585) \dots\dots\dots (B13)$$

人体生理調節発汗は, 体心部と皮膚表面両方からの温熱信号にも影響されるが, 皮膚表面の方が直接である ((B14) 式)。生理調節発汗による潜熱発散量  $E_{rsw}$  は (B15) 式による算出される。

$$m_{rsw} = 4.72 \times 10^{-5} WSIG_b \exp (WSIG_{sk} / 10.7) \dots\dots\dots (B14)$$

$$E_{rsw} = m_{rsw} h_{fg} \dots\dots\dots (B15)$$

さらに皮膚表面の不感蒸せつ  $E_{diff}$  に関しては, (B16) 式を使う。従って皮膚表面の濡れ率  $w$  は (B17) 式となる。人体皮膚表面からの潜熱放散量  $E_{sk}$  は (B18) 式による算出される。

表 B1 人体の生理調節機能

記号	定義式	温熱感覚	生理調節
WSIG <sub>cr</sub>	$T_{cr} - T_{cr,n}$ 0	$T_{cr} > T_{cr,n}$ $T_{cr} \leq T_{cr,n}$	体心部からの 温熱信号
CSIG <sub>cr</sub>	$T_{cr,n} - T_{cr}$ 0	$T_{cr} < T_{cr,n}$ $T_{cr} \geq T_{cr,n}$	体心部からの 冷信号
WSIG <sub>sk</sub>	$T_{sk} - T_{sk,n}$ 0	$T_{sk} > T_{sk,n}$ $T_{sk} \leq T_{sk,n}$	皮膚からの 温熱信号
CSIG <sub>sk</sub>	$T_{sk,n} - T_{sk}$ 0	$T_{sk} < T_{sk,n}$ $T_{sk} \geq T_{sk,n}$	皮膚からの 冷信号
WSIG <sub>b</sub>	$T_b - T_{b,n}$ 0	$T_b > T_{b,n}$ $T_b \leq T_{b,n}$	人体からの 温熱信号
			血管拡張 血管縮小 (弱) 発汗 血管縮小 (強) 血管拡張、 発汗

$$E_{diff} = (1 - w_{rsw}) 0.06 E_{max} \dots\dots\dots (B16)$$

$$w = w_{rsw} + 0.06 (1 - w_{rsw}) = 0.06 + 0.94 E_{rsw} / E_{max} \dots (B17)$$

$$E_{sk} = w E_{max} \dots\dots\dots (B18)$$

$$E_{max} = \alpha_e (P_{sk,s} - P_{a,ref}) \dots\dots\dots (B19)$$

$$m_{sk} = E_{sk} / h_{fg} \dots\dots\dots (B20)$$

なお、呼吸の放熱分は Case 1 と同様に (B5) 式による。本来上記の生理調節プロセスは随時に生じる非定常現象である。Gagge 自身はこれらのモデルに非定常性を考慮して導いている。本研究では、人体がある環境において定常に達している場合、即ち  $S_{sk} = 0$ ,  $S_{cr} = 0$  として検討を行う。

3. 対流・放射・湿気輸送連成解析手法。

対流・放射連成解析及び他の計算概要等の詳細は文献<sup>(6)</sup>参照。

3.1 湿気輸送方程式 空気の湿度を表すパラメータには、相対湿度、絶対湿度、水蒸気圧等がある。今回絶対湿度 X をパラメータとして、湿気の輸送方程式を (B21) 式のように立てる

$$\frac{\partial \rho X}{\partial t} + \nabla (\rho U X) = \nabla \left[ \left( \lambda_x + \frac{\mu_t}{\sigma_x} \right) \nabla X \right] \dots\dots\dots (B21)$$

3.2 Fanger のモデルを用いた場合の連成手法 (本文図 2 (a) 参照) 連成解析は人体の代謝量 ( $M = Q_m$ ) の修正計算となっている。まず代謝量 M に初期値を与える。湿気場を解く時、この代謝量 (既知) から潜熱発熱量  $E_{sk}$  を求めて、湿気発生量  $m_{sk}$  として人体表面の境界条件を決める。対流・放射連成解析の場合は、潜熱発熱量  $E_{sk}$  は新しい時点の放射量 (未知) を使い、参照室内水蒸気圧  $P_{a,ref}$  のみは前時点の値を用いる。即ち潜熱放散量  $E_{sk}$  に対してはある程度陰的に取扱うことになる。

3.3 2NM を用いた場合の連成手法 (本文図 2 (b) 参照) 連成解析は人体皮膚表面温度の修正計算となっている。まず皮膚表面温度  $T_{sk}$  に初期値を与えて、体心部の熱バランス式である (B9) 式及び血液流量  $m_{bl}$  を表す (B11) 式の繰返し計算によって、皮膚温度  $T_{sk}$  に対応する体心部温度  $T_{cr}$  と血液流量  $m_{bl}$  を算出する。次に (B14) 式により生理調節に必要な発汗量  $m_{rsw}$  が決められる。不感蒸せつ発汗量  $m_{diff}$  と合わせて、水蒸気輸送解析の境界条件が得られる ((B20) 式)。更に皮膚面における熱バランス式 ((B10) 式) によって、皮膚表面からの顕熱放散量  $Q_i$  が算出される。これを対流・放射連成解析の境界条件とする。

(1997 年 10 月 27 日受理)

参 考 文 献

- 1) ASHRAE Fundamentals Handbook, Chapter 8, 1993.
- 2) 中山：温熱生理学，理工学社，1981.
- 3) P. O. Fanger: Thermal comfort, Danish Technical Press, 1970.
- 4) A. P. Gagge et al: ASHARE transactions, Vol. 77, Part 1, pp. 247-262, 1970.
- 5) A. P. Gagge et al: ASHARE transactions, Vol. 92, Part 1, pp. 709-731, 1986.
- 6) 曾，村上，加藤，林：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.101-104, 1997.
- 7) 本間，焼山：日本建築学会計画系論文報告集，第 375 号，pp.39～48, 昭和 62 年 5 月.

- 8) 李，澤地，本間：日本建築学会計画系論文報告集，第 416 号，pp.25～34, 1990.10.
- 9) S. Murakami, S. Kato, J. Zeng: ASHRAE Transactions, Vol. 103, Part 1, 1997.
- 10) 森，久保田，本間：日本建築学会大会講演梗概集，pp.369～370, 1994.9.
- 11) Rapp, G. M: ASHRAE Transactions. No 2264, pp. 75-87, 1973.
- 12) 市原，斉藤，田辺，西村：日本建築学会大会講演梗概集，pp.79～371, 1995.8.
- 13) 堀越：空気調和・衛生工学，第 60 巻，第 10 号，pp. 13-19, 1986.
- 14) 堀越：空気調和・衛生工学，第 70 巻，第 1 号，pp. 65-71, 1995.
- 15) 持田，他 4 名：PMV の修正，空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集，pp.137-140, 1997.
- 16) S. Tanabe et al: ASHRAE Transactions, Vol. 100, Part 1, pp. 39-48, 1994.

記 号

$A_D$ ：人体皮膚表面面積 ( $m^2$ )  $c_{p,bl}$ ：血液の比熱 (4.187 kJ/kg°C)  
 $C_{res}$ ：呼吸による顕熱放散量 ( $W/m^2$ )  $D$ ：水蒸気の空気への拡散係数 ( $2.61 \times 10^{-5} m^2/s$ )<sup>(2)</sup>  $E_{diff}$ ：皮膚表面からの水分拡散 (不感蒸せつ) による熱放散量 ( $W/m^2$ )  $E_{max}$ ：皮膚表面からの最大潜熱放散量 ( $W/m^2$ )  $E_{res}$ ：呼吸による潜熱放散量 ( $W/m^2$ )  
 $E_{rsw}$ ：体温調節に必要な発汗蒸発熱放散量 ( $W/m^2$ )  $E_{sk}$ ：皮膚表面からの潜熱放散量 ( $W/m^2$ )  $H$ ：人体身長 (m)  $h_{fg}$ ：水分の蒸発潜熱 (2430 kJ/kg)  $K$ ：体心部と皮膚層の有効熱伝導率 ( $5.28 W/m^2°C$ )  $M$ ：人体の代謝量 ( $W/m^2$ )  $m_{bl}$ ：血液流量 ( $kg/m^2s$ )  $m_{rsw}$ ：体温調節に必要な発汗量 ( $kg/m^2s$ )  
 $m_{diff}$ ：皮膚表面の不感蒸せつによる水分蒸発量 ( $kg/m^2s$ )  $m_{sk}$ ：皮膚表面からの水分蒸発量 ( $kg/m^2s$ )  $P_a$ ：室内水蒸気圧 (Pa)  $P_{a,ref}$ ：人体境界層外側空気の水蒸気圧 (Pa)  $P_{sk}$ ：人体皮膚表面における水蒸気圧 (Pa)  $P_{sk,s}$ ：人体皮膚表面における飽和水蒸気圧 (Pa)  $Q_{cd}$ ：貫流熱量 ( $W/m^2$ )  $Q_{cv}$ ：人体皮膚表面からの対流熱伝達量 ( $W/m^2$ )  $Q_m$ ：人体からの全熱放散量 ( $W/m^2$ )  $Q_r$ ：人体皮膚表面からの放射熱伝達量 ( $W/m^2$ )  
 $Q_{res}$ ：呼吸による全熱放散量 ( $W/m^2$ )  $Q_{sk}$ ：皮膚表面からの全熱放散量 ( $W/m^2$ )  $Q_i$ ：皮膚表面からの顕熱放散量 ( $W/m^2$ )  
 $S_{cr}$ ：人体体心部の蓄熱率 ( $W/m^2$ )  $S_{sk}$ ：人体皮膚層の蓄熱率 ( $W/m^2$ )  $T_a$ ：室内空気温度 ( $°C$ )  $T_b$ ：人体の平均体温 ( $°C$ )  
 $T_{cr}$ ：体心部の温度 ( $°C$ )  $T_{cr,n}$ ：体心部の熱的中立時温度 ( $36.8°C$ )  $T_{sk}$ ：皮膚層の温度 ( $°C$ )  $T_{sk,n}$ ：皮膚層の熱的中立時温度 ( $33.7°C$ )  $w$ ：ぬれ率  $w_{diff}$ ：不感蒸せつによるぬれ率  $w_{rsw}$ ：体温調節発汗によるぬれ率  $X$ ：平均絶対湿度 ( $kg/kg$ )  
 $\alpha_c$ ：対流熱伝達率 ( $W/m^2°C$ )  $\alpha_e$ ：蒸発による熱伝達率 ( $W/m^2Pa$ )  $\rho$ ：乾燥空気の密度 ( $26°C$ ,  $1.181 kg/m^3$ )  $\lambda_x$ ：水蒸気の空気中への伝導係数  $\lambda_x = \rho D = 3.082 \times 10^{-5} (kg/m.s)$   
 $\sigma_x$ ：乱流 Schmidt 数,  $\sigma_x = 1$   $\phi$ ：相対湿度  
 添字 a：空気 cr：人体体心部 ref：人体境界層以外点 (参考点) sk：人体皮膚層 s：飽和状態 n：熱的中立点