

# 数値解析用 Virtual Manikin のグリッドライブラリ作成

伊藤 一秀<sup>\*1</sup>, 堀田 太郎<sup>\*2</sup>

省エネルギー性と快適性の両者の向上を目指し、不均一環境場を積極的に利用した人体周辺微気象の制御システムに関する研究・開発が多くの機関で進められている。数値解析による予測・検証を前提とした場合、環境制御の対象が精緻化するに伴い、直接の制御対象となる人体形状に関してもより精密なモデルが要求される。このような背景のもと、本研究では、男女差・年齢等による体格の相違、ならびに姿勢等に配慮した各種の数値人体モデル (Virtual Manikin) を作成する。特に児童スケール、成人男性スケールおよび成人女性スケールの3種類の人体スケールに加え、各々のモデルで立位と座位を再現した Virtual Manikin を作成し、これらのメッシュデータをライブラリ化し、各種の汎用流体解析ソフトウェアでの使用が可能なフォーマットで整備を行った結果を報告する。更に、モデル室内を対象として対流・放射連成解析を行うことで、Virtual Manikin を用いた環境予測に関するベンチマークテストを行った結果に関しても併せて報告する。なお、本報で示す Virtual Manikin のグリッドデータは URL (<http://www.arch.t-kougei.ac.jp/ito/>) にて公開している。

**キーワード** : Virtual Manikin ・ グリッドライブラリ ・ CFD ・ 対流・放射連成解析

## 1. 序

室内環境解析が人体周辺に形成される微気象レベルまでマイクロ化している現在、環境予測に使用する人体モデルに関しても、より実現性に沿った現実的な詳細モデルが必要となる。すでに、実人体の幾何形状を詳細に再現した数値人体モデル (Computer Simulated Person、Numerical Thermal Manikin、Virtual Manikin 等と呼ばれることが多い) として、加藤・村上らのモデル<sup>1)</sup>、Sorensen<sup>2)</sup>、Topp ら<sup>3)</sup>のモデル、ならびに田辺・尾関らのモデル<sup>4)</sup>が室内環境予測に用いられており、特に CFD 解析により人体周辺に形成される流れ場、温度場ならびに汚染質拡散場等の詳細な予測が行われている。更に数値人体モデルに各種の人体生理モデル<sup>5,6)</sup>を組み込んで、人体皮膚表面温度や人体からの放熱性状に関する解析も行われている。特に白石ら<sup>7)</sup>ならびに朱・加藤ら<sup>8)</sup>は、生理モデルを組み込んだ数値人体モデルを用い、CFD との連成解析を行った事例を報告している。言い換えれば、室内環境予測において、ほぼ実人体形状を再現した数値モデルを用いた解析を行うことは、現状の計算機資源において十分に可能となっており、今後ますます汎用的に使用されることが予想される。しかしながら、詳細な人体形状を再現した数値人体モデルのメッシュ生成には膨大な時間を要することが多く、室内環境解析に数値人体モデルを適用する際の一つの障壁となっていると言える。また、上述した既存の数値人体モデルは座位もしくは立位の女性形状、もしくは女性形状を基に中性

化したモデルがターゲットであることが多く、特に実験用サーマルマネキン<sup>9)</sup>との対応を意図して作成されたものが多い。そのため、それ以外の人体形状や人体スケールを扱った事例は少ない。人体形状ならびに代謝等が異なることで、人体周辺流れ場を含む微気象も変化することが予想され、それ故、各種幾何形状の数値人体モデルを提供することには一定の有用性がある。

このような背景のもと、本研究では CFD をベースとした室内環境解析に簡易に適用可能な各種の数値人体モデル (本研究では Virtual Manikin と呼ぶ) のメッシュデータの開発を目的とする。特に、児童スケール、成人男性スケールおよび成人女性スケールの3種類の人体スケールにおいて、詳細なグリッドデザインを施した Virtual Manikin のメッシュデータ (幾何形状データ) を提供する。更にこれらのメッシュデータをライブラリ化し、各種の汎用流体解析ソフトウェアでの使用が可能なフォーマットで整備・提供することを最終目的とする<sup>注1)</sup>。

## 2. Virtual Manikin メッシュデータの作成概要

本研究は、汎用の流体解析コードに対して、簡易に適用が可能で、且つ各種の環境解析に使用可能な Virtual Manikin の作成を意図し、成人男女ならびに7歳児程度の子供の人体スケールを再現した Virtual Manikin を作成する。本研究で作成する Virtual Manikin は年齢、性別に起因する人体形状の相違に加え、座位モデルと立位モデルの2種類の姿勢を対象とし、計6種類の Virtual Manikin を作成する。詳細に人体形状を再

\*1 東京工芸大学 正会員

\*2 日比谷総合設備㈱ 正会員

現するため、耳、鼻等の幾何形状もある程度再現する。

## 2.1 Virtual Manikin 作成手順

作成する Virtual Manikin は文献 10)ならびに文献 11)を参考に日本人の平均的な人体スケールの模擬を目指している。人体形状、各姿勢の基礎データは Poser 4.0J (Curious Labs)を用いて概略を作成し、データを DXF 形式にて出力後、3次元 CAD ソフト(Vector Works, A&A Co., Ltd.)にて全体形状のアウトラインのみのデータに簡略化する。特に空間メッシュ割付の際にデッドポイントと成りうる目、鼻、唇等の窪みをスムーズに修正すると共に、全体の形状を整える。その後、IGIS 形式にて出力し、汎用メッシュジェネレータである Gridgen V15 (VINAS)にて読み込み、インポートした IGIS データをテンプレートとして参考にした上で、その上からオリジナルの人体形状を作成する。その際に、脇、手足等は CFD 解析の負荷を鑑みて、大幅な簡略化を行っている。

## 2.2 Virtual Manikin メッシュデータの概要

図-1 に作成した Virtual Manikin の外観を示す。また、表-1 に本研究で開発した 7 歳児モデル(Child Model)、成人男性モデル(Male Model)、成人女性モデル(Female Model)の各 Virtual Manikin の基本情報を示す。例えば、7 歳児モデル(Child Model)の表面積は立位、座位共に約  $0.85 \text{ m}^2$  である。人体表面の最小メッシュは、両モデルともに顔に配置されており、 $0.49 \text{ mm}^2$  である。表面総メッシュは 20,000 メッシュ前後としている。Virtual Manikin は実験用のサーマルマネキンの制御に合わせて 17 部位(サーフェス)に分割しており、各部位の放熱量、表面温度等を解析することが可能である<sup>9)</sup>。

本研究で作成する Virtual Manikin は汎用的な CFD コードでの使用を目的として、①人体表面メッシュ(トリゴンメッシュ)のみを施したグリッドデータ、②人体表面法線方向に約 1mm 幅で 4 メッシュ分のテトラメッシュを配したグリッドデータ、の 2 種類を用意し、ライブラリ化している。

## 3. ベンチマークテスト概要

作成した Virtual Manikin による室内環境予測精度の確認を行う為、6 種の Virtual Manikin を対象として単純室内を対象としたベンチマークテストを行う。 $x=3.0\text{m}$ ,  $y=3.0\text{m}$ ,  $z=3.0\text{m}$  の空間スケールを有する解析対象室の中央に Virtual Manikin を配置する。床面全面吹出( $U_m=0.1 \text{ m/s}$ )、天井面全面吸込型で、モデル室内には上方に向かう一様流(静穏環境)が形成される空調方式を採用する。床面での吹出空気温度  $T_m$  は 298 K とする。7 歳児の座位モデル(Seated Child Model)を設置した場合の空間メッシュは約 102 万程度である。Virtual Manikin 周囲のグリッドデザインは図-2 に示すとおりであり、人体表面はトリゴンメッシュを配置し、人体表面から流体側への第 1~第 4 セル目までは人体表面から法線方向に約 1mm 間隔でプリズムメッシュを、第 5 セル目からモデ

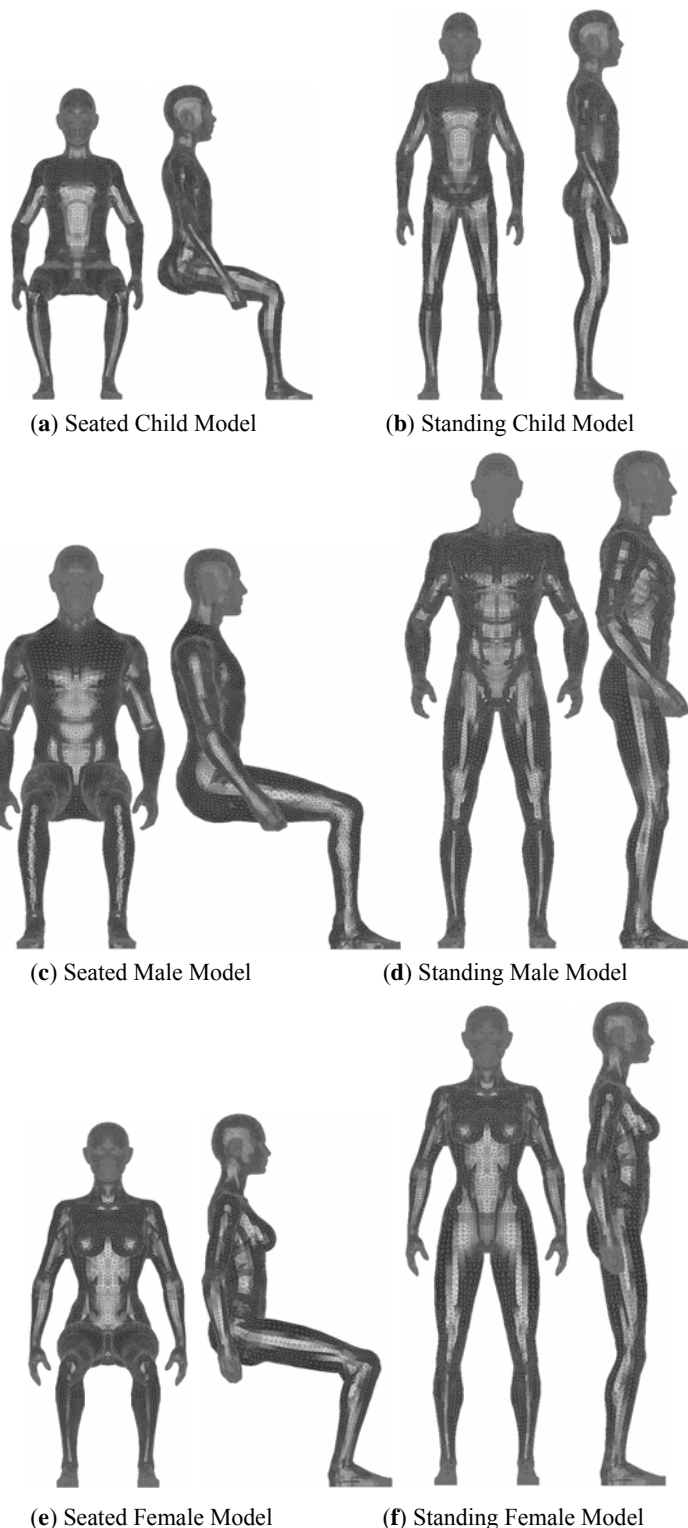


図-1 Outline of Virtual Manikin

ル室内内壁まではテトラメッシュを配置している。本ベンチマークテストでは床面位置での吹出風速を  $0.1 \text{ m/s}$  に設定しており、人体表面から第一セル中心点の無次元法線方向距離 (Wall Unit)  $y^+$  は人体表面全体において  $y^+ < 0.1$  の条件を満たしている。解析対象室の周壁は断熱条件とする。

本解析では汎用 CFD コードとして Fluent 6.2.16 (Fluent Asia Pacific Co. Ltd.)を使用している。

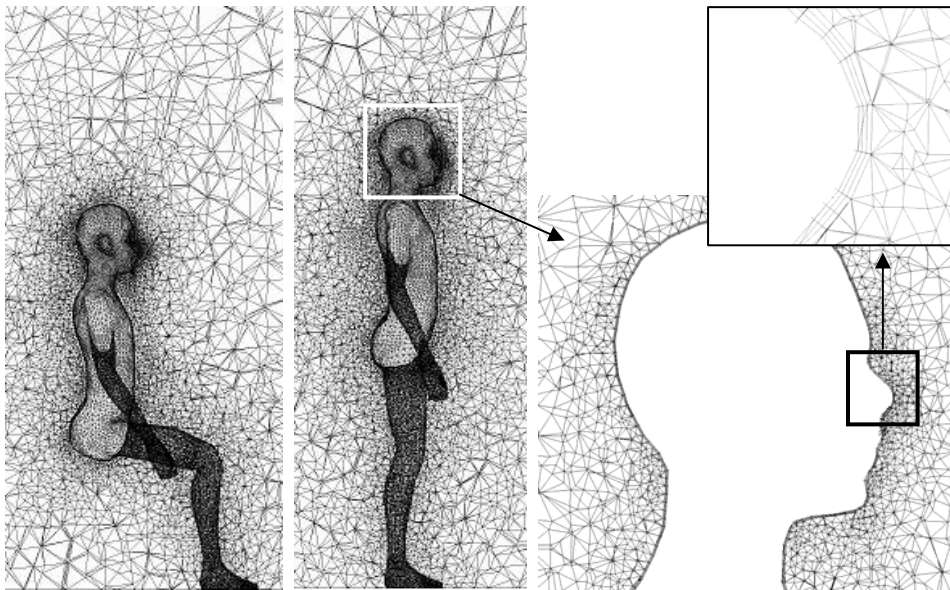


図-2 Grid Design Around Virtual Manikin

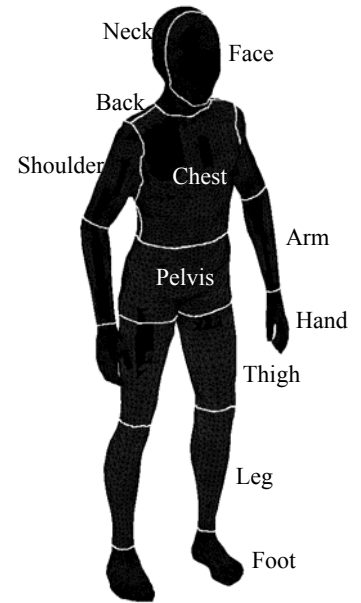


図-3 Segment of the Body

表-1 Surface Area of the Individual Segment of the Manikin

Segment	Seated Model			Standing Model		
	(a) Child	(b) Male	(c) Female	(a) Child	(b) Male	(c) Female
Area of Whole Body [m <sup>2</sup> ]	0.848	1.681	1.308	0.847	1.745	1.317
Volume of Whole Body [m <sup>3</sup> ]	0.022	0.063	0.040	0.022	0.064	0.040
Height of Body [m]	1.048	1.351	1.236	1.289	1.736	1.584
Smallest Surface Mesh Size [mm <sup>2</sup> ]	0.490	0.562	0.746	0.490	0.469	0.652
Largest Surface Mesh Size [mm <sup>2</sup> ]	154.933	468.185	380.490	151.715	425.013	372.035
The Number of Surface Mesh	20,085	44,620	36,742	18,971	44,974	35,500
Area of Left and Right Foot [m <sup>2</sup> ]	0.023	0.048	0.035	0.023	0.048	0.035
Area of Left and Right Leg [m <sup>2</sup> ]	0.063	0.112	0.091	0.060	0.111	0.088
Area of Left and Right Thigh [m <sup>2</sup> ]	0.079	0.165	0.141	0.071	0.151	0.124
Area of Left and Right Hand [m <sup>2</sup> ]	0.019	0.036	0.024	0.019	0.038	0.024
Area of Left and Right Arm [m <sup>2</sup> ]	0.030	0.061	0.040	0.030	0.071	0.040
Area of Left and Right Shoulder [m <sup>2</sup> ]	0.035	0.071	0.058	0.037	0.074	0.058
Area of Pelvis [m <sup>2</sup> ]	0.102	0.187	0.162	0.123	0.265	0.212
Area of Chest [m <sup>2</sup> ]	0.079	0.186	0.139	0.079	0.190	0.139
Area of Back [m <sup>2</sup> ]	0.073	0.155	0.084	0.068	0.127	0.084
Area of Face [m <sup>2</sup> ]	0.036	0.061	0.046	0.036	0.062	0.046
Area of Neck [m <sup>2</sup> ]	0.059	0.077	0.076	0.059	0.086	0.076

### 3.1 皮膚表面温度算出ルーチン

本報でのベンチマークテストでは、Virtual Manikin に簡易な皮膚表面温度算出ルーチンを組み込んで解析を行う。本報で使用するルーチンは、Virtual Manikin の周辺環境との熱交換による収束値として皮膚温度を決定するもので、式(1)で示す熱バランス式として表現される<sup>12)</sup>。式(1)は、熱的中立

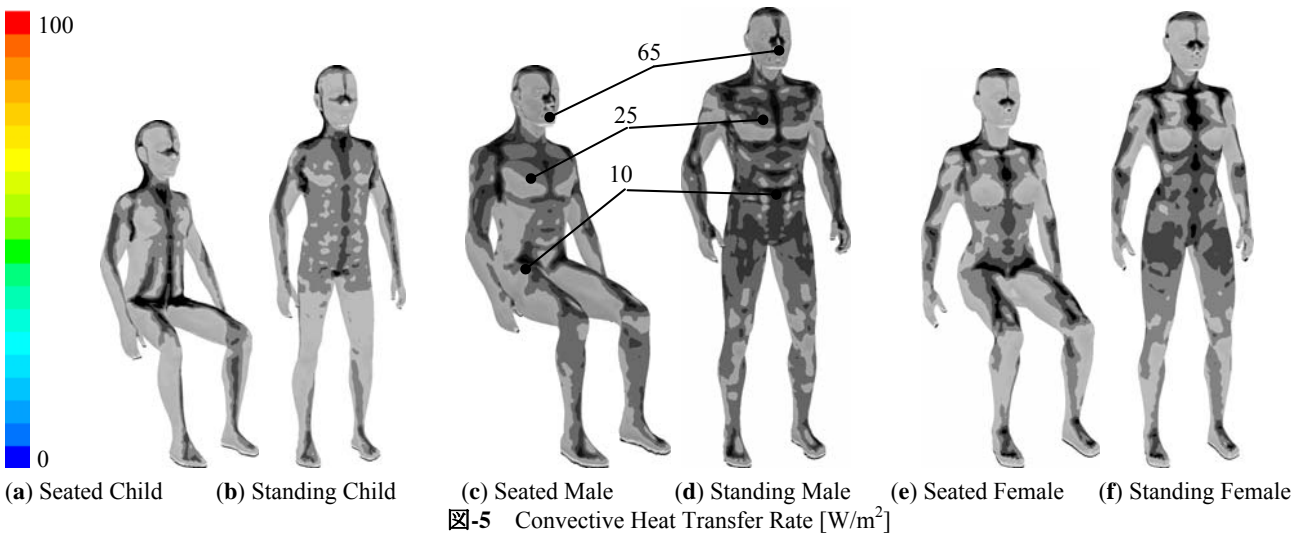
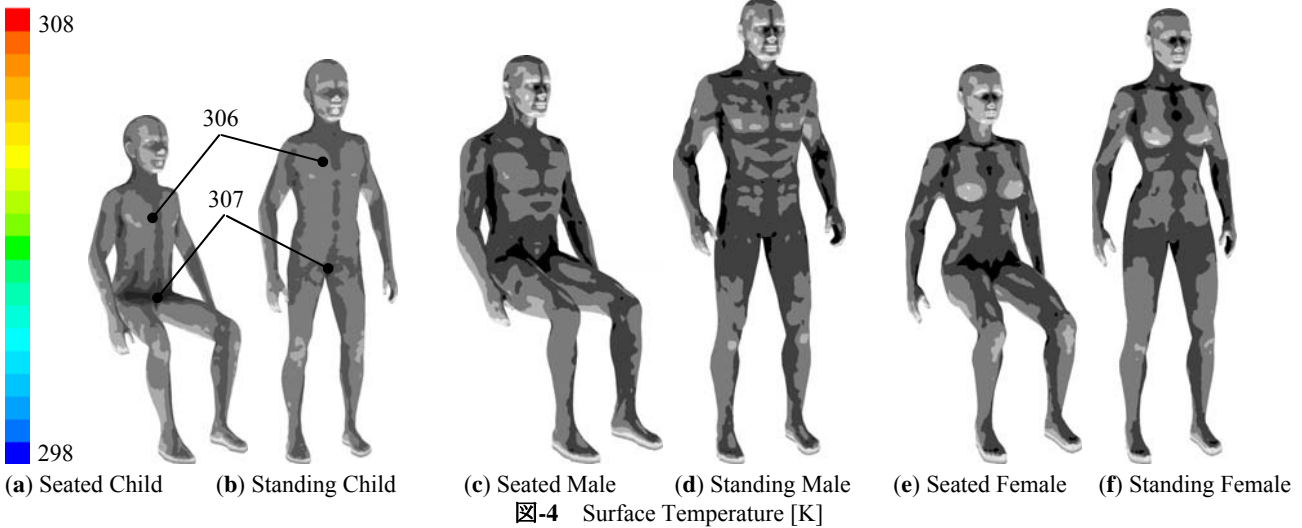
状態(定常)における熱バランス式であり、式(1)を変形すると式(2)となる。

$$T_{sk} = 309.4 - (0.054 + R_{cl})Q_t \quad \dots\dots (1)$$

$$Q_t = \frac{1}{(0.054 + R_{cl})} (309.4 - T_{sk}) \quad \dots\dots (2)$$

表-2 Numerical and Boundary Conditions

Turbulence Model	Low Re type $k-\varepsilon$ model (Abe-Nagano Model, 3-dimensional calc.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in} = 0.1$ m/s, Area of Supply Inlet 3,000×3,000 mm, $T_{in} = 298$ K $k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\varepsilon_{in} = C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu} = 0.09$ , $l_{in} = (\text{Slot width}) \times 1/7$
Outflow Boundary	$U_{out} = \text{Free slip}$ , $k_{out} = \text{Free slip}$ , $\varepsilon_{out} = \text{Free slip}$
Wall Treatment	Velocity: No slip, $k _{wall}$ : No slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Adiabatic condition, Emissivity: 0.9
Surface Treatment of Virtual Manikin	Velocity: No slip, $k _{wall}$ : No slip, $\varepsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Fanger's Equation, Emissivity of Radiation: 0.9



この Virtual Manikin は熱的中立を目指し、人体の熱中立温度である 309.4 K と現在の皮膚温度  $T_{sk}$  K とのずれに比例した発熱をするという方法で人体皮膚境界での熱バランスを制御するものであり、実験用のサーマルマネキンの発熱制御方式と同様である<sup>8)</sup>。ここで、 $Q_t$  は顕熱放熱量[W/m<sup>2</sup>]を、 $R_{cl}$  は衣服による熱伝達量[m<sup>2</sup>·K/W]を示す<sup>注2)</sup>。本報では簡略化した条件下でのベンチマークテストを実施するため、着衣を無視し( $R_{cl}=0$ )、裸体条件にて解析を実施する。

### 3.2 対流・放射連成解析手法

CFD による流体解析では、境界層粘性低層内の流体性状

を再現するため、低  $Re$  型  $k-\varepsilon$  モデル(Abe-Nagano model)による解析を前提とする。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する。計算アルゴリズムとして SIMPLE 法、差分スキームは移流項に QUICK、その他は 2 次精度中心差分を用い、定常解析を行う。

放射解析では、Discrete Transfer Method により形態係数を算出し、Radiosity Method による緩和計算により対象空間内の相互放射性状を解析する。放射解析では表面メッシュのクラスタリングを行い、人体表面、周壁面部分を流体解析セルの 10 倍程度の放射解析用メッシュを別途生成し、放射束を

表-3 Analysis Results of Micro-Climature (Virtual Manikin)

Virtual Manikin	Seated Model			Standing Model		
	(a) Child	(b) Male	(c) Female	(a) Child	(b) Male	(c) Female
平均皮膚表面温度 [K]	305.7	305.8	305.8	305.8	306.0	305.9
平均対流熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	31.2	29.7	29.1	27.4	25.7	25.3
平均対流熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> /K]	4.1	3.8	3.7	3.5	3.2	3.2

表-4 Analysis Results of Micro-Climature (Cylinder Model)

Virtual Manikin	Seated Model			Standing Model		
	(a) Child	(b) Male	(c) Female	(a) Child	(b) Male	(c) Female
平均皮膚表面温度 [K]	305.8	305.8	305.8	305.9	306.0	305.9
平均対流熱流束 [W/m <sup>2</sup> ]	25.6	24.7	25.0	21.5	21.0	21.1
平均対流熱伝達率 [W/m <sup>2</sup> /K]	3.3	3.1	3.2	2.7	2.6	2.7

割り当てる。

対流・放射連成解析は、皮膚温度  $T_{sk}$  を用いて CFD 解析より室内の空気温度分布及び皮膚表面での対流熱伝達量  $Q_{ci}$  を算出する。同時にこの時点の  $T_{sk}$  を用いて放射熱伝達解析 ( $Q_{ri}$ ) を行う。  $Q_{ci}$  と  $Q_{ri}$  の和より全熱流束  $Q_{Ti}$  が求められる。これを快適方程式ルーチン(式(2))に送る。この手順を諸量が収束するまで繰り返す。

数値解析の計算条件ならびに境界条件の一覧を表-2 にまとめて示す。

## 4. ベンチマークテスト結果

### 4.1 速度分布

誌面の都合で図は割愛するが、人体発熱により、その周囲に熱上昇流が形成された。熱上昇流は足元から頭部に向かって形成されており、座位モデルでは大腿部、臀部、脇部で、立位モデルでは股間部、脇部、顎で剥離が生じる結果となった。Virtual Manikin の頭上では、最大値約 0.25 m/s 程度の熱上昇流が形成された。人体周辺流れ場の定性的な傾向は、既往研究での報告結果と一致している<sup>1~3)</sup>。

### 4.2 皮膚表面温度

皮膚表面温度は式(2)のルーチンにより周辺環境との熱バランスを考慮して制御される。図-4 に皮膚表面温度分布の解析結果を示す。脇部、股間部、腰部においては 307 K 前後、

胸部、腹部では 306 K 前後の温度となった。

### 4.3 対流熱流束分布

図-5 に対流熱流束分布図を示す。手先、鼻先や足先等のエッジ部分において対流熱流束の値が大きくなっており、また、各モデル共に首で最も小さい値となっている。詳細に人体形状を再現することで、人体表面に特徴的な放熱分布が再現される結果となった。

### 4.4 シリンダーモデルとの比較

本研究で作成した Virtual Manikin による微気象予測精度を相対的に検証するため、各人体スケールの表面積のみを一致させた Cylinder Model を用いたベンチマークテストも実施した。平均皮膚表面温度[K]、平均対流熱流束[W/m<sup>2</sup>]ならびに平均対流熱伝達率[W/m<sup>2</sup>/K]の解析結果を表-3 ならびに表-4 に示す。Virtual Manikin ならびに Cylinder Model とともに式(1)より算出される皮膚表面温度の平均値はほぼ同一となっているが、平均対流熱流束の予測値に大きな差異が見られる。そのため、床面位置での吹出温度を参照温度として算出した対流熱伝達率の予測値も大きく異なる結果となった。人体周辺微気象の解析を行う上で、人体モデル形状の簡略化は対流熱伝達率を過小評価する可能性が示唆される。

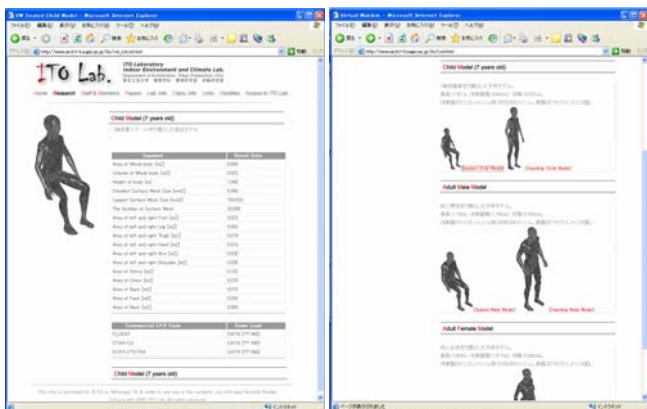
## 5. WEB 経由でのグリッドライブラリ公開

本報で示した Virtual Manikin のグリッドデータは WEB 上



にて公開しており、ダウンロードが可能である。グリッドデータは汎用の商用流体解析コードでの適用を意図して、FLUENT<sup>®</sup>、Star-CD<sup>®</sup>等の数種類のフォーマットで提供している。Virtual Manikin のグリッドデータを用意して公開することで、詳細な室内環境解析、微気象解析への適用が容易となり、その結果、より実現に沿った解析を実施することが可能となる。この点においても Virtual Manikin のグリッドライブラリ作成の意義があると言える。

ダウンロードサイトの URL は以下の通りである<sup>3)</sup>。



URL (<http://www.arch.t-kougei.ac.jp/ito/>)

## 6. 結論

6種類の Virtual Manikin グリッドデータを作成し、ライブラリ化を行った。更に作成した Virtual Manikin をモデル室内に適用し、放射・対流連成解析を行うことで、Virtual Manikin を用いた室内環境予測に関するベンチマークテストを行った。本報での報告事項をまとめると以下の通りである。

- (1) 人体の幾何スケール、幾何形状の異なる 6 種の Virtual Manikin のグリッドデータを作成するとともに、グリッドライブラリのダウンロードを可能とする WEB サイトの準備を行った。
- (2) Virtual Manikin と室内環境解析を連成したベンチマークテストを実施した結果、熱上昇流ならびに人体表面温度分布は既往研究と十分に整合する結果が得られた。
- (3) 表面積のみを一致させた Cylinder Model との比較を行うことで、幾何形状の相違が対流熱伝達率予測結果に大きな影響を与えることを確認した。

## 謝辞

Virtual Manikin 作成においては、小川匠氏(研究当時、東京工芸大学大学院)の労に負うところが大きい。記して深甚なる謝意を示す。

## 注

- (1) 本研究では各種の商用 CFD ツールに適用可能なメッシュデータを提供することに目的がある。そのため、本研究では、開発した Virtual Manikin の形状と人体生理モデ

ル、体温調節モデル等の適合性に関して十分な検討を行っていない(例えば Smith model の組み込みと人体各部位の表面積の関係等は考慮していない)。また、本報で示した Virtual Manikin は形状の固定化されたグリッドデータを提供するものであり、ソフトウェア側(メッシュジェネレータ)の性能に依存する姿勢変更や部位変更等の形状変更に関する操作性等は本研究での対象としていない。

- (2) 皮膚温制御ルーチンで使用した式(2)は、単純な一次元・定常の熱伝導方程式であり、汎用の熱・流体解析コードにおいては特別にユーザーサブルーチンを用意することなく簡単に適用が可能である。また、衣服による熱伝達量  $R_{cl}$  [ $m^2 \cdot K/W$ ]を組み込んだ解析を行う場合には、皮膚温度  $T_{sk}$  [K]は着衣表面温度  $T_{cl}$  [K]となる。
- (3) 現時点ではアカデミックユースを目的とした場合にのみフリーのダウンロードを許可することとしている。また、数値人体モデルのメッシュデータを公開している例としては、DTU の Sorensen, D.N.らのモデル(女性座位形状)等がある<sup>2)</sup>。

## 参考文献

- 1) Murakami, S., Kato, S., Zeng, J., (1997) Flow and Temperature fields around human body with various room air distribution, CFD study on Computational thermal manikin part 1., ASHRAE Transactions, **103**, Part 1
- 2) Sorensen, D.N. and Voigt, L.K. (2003) Modeling flow and heat transfer around a seated human body by Computational Fluid Dynamics, Building and Environment, **38** (6) 753-762
- 3) Topp C, Nielsen PV, Sørensen DN. (2002) Application of computer simulated persons in indoor environmental modeling, ASHRAE Transactions **108** (2) 1084-9
- 4) 尾関義一, 平松徹也, 小西正哲, 中野淳太, 田辺新一(2002) 日射環境下におけるサーマルマネキン周りの対流熱伝達率の評価、日本建築学会計画系論文集、No.555、pp.29-36
- 5) P.O.Fanger (1970) Thermal Comfort, Danish Technical Press
- 6) 田辺新一、中野淳太、小林弘造 (2001) 温熱環境評価のための 65 分割体温調節モデルに関する研究、日本建築学会計画系論文報告集、No.541、pp.9-16
- 7) 白石靖幸, 藤永隆史, 田辺新一, 木村建一(2006) 65MN モデルと CFD の連成解析に関する研究 (その 1) 連成解析手法の概要：日本建築学会九州支部研究発表会
- 8) 朱晟偉, 加藤信介他 (2005) 非定常・不均一温熱環境場における人体熱モデルに関する研究 (第 8 報) 対流・放射・SMITH モデルの連成解析による 不均一放射場における人体の表面皮膚温の予測：空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.193-196
- 9) Madsen, T.L. (1976) Description of Thermal Mannequin for Measuring the Thermal Insulating Capacity of the Clothing, Report No.48, Technical University of Denmark
- 10) 厚生統計協会 (2001)：国民衛生の動向
- 11) 中山昭雄 (1981)：温熱生理学
- 12) S. Tanabe, et. al. (1994) Evaluating Thermal Environments by using Thermal Manikin with Controlled Skin Surface Temperature, ASHRAE Transactions 100 (1), pp39-48

(2006年3月8日 原稿受付)

# Development of Virtual Manikins and Its Grid Library for CFD Analysis

By Kazuhide Ito<sup>\*1</sup> and Taro Hotta<sup>\*2</sup>

Key Words : *Virtual Manikin, CFD, Grid Library, Coupled Analysis*

**Synopsis** : Currently indoor environment studies focus on phenomena around the human body at the microclimate level, and therefore the need for more realistic and detailed human body models has been pointed out. Numerical models representing closely the actual shape of the human body have already been proposed for seated female models (or androgynous models based on female body shapes), and are available for indoor environment analysis applications. However, other human body shapes have not been modeled. In addition, since existing models use coarse meshes, sufficient detailed data on various parts of the human body has not been gathered. This study aims to develop virtual manikins that represent human body scales

for adult males and females as well as child (almost seven-year-olds). The virtual manikins developed in this study cover two types of posture models. The virtual manikin is divided into 17 parts for the control of the thermal manikin, allowing the control and analysis of radiation heat transfer, surface temperature, and other factors in each part. We examined the accuracy of indoor environment prediction by conducting a coupled convection and radiation analysis on a simple room. As a result, we confirmed that thermal environment prediction could be carried out with sufficient accuracy in the analysis of microclimates around the human body.

(Received March 8, 2006)

---

\*1 Tokyo Polytechnic University, Member

\*2 Hibiya Engineering Co., Ltd., Member