

CFD 解析用 Virtual Manikin の開発とグリッドライブラリ構築

堀田 太郎 (東京工芸大学大学院), 伊藤 一秀(東京工芸大学)

Development of Virtual Manikins and Its Grid Library for CFD Analysis

Taro HOTTA and Kazuhide ITO

ABSTRACT

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). This report provides an overview of the development of models for seven-year-olds child.

Keywords: CFD, Virtual Manikin, Coupled Simulation, Grid Library

1. はじめに

室内環境研究が人体周辺に形成される微気象レベルまでミクロ化している現在、解析に用いられる人体モデルに関しても、より実現現象に沿った現実的な詳細モデルが必要となる。すでに、実人体形状を詳細に再現した人体モデル(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¹⁾、Sorensen²⁾、Toppら³⁾のモデルならびに田辺、尾関らのモデル⁴⁾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。

すなわち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いる。しかしながら、詳細な人体形状を再現した Virtual Manikin のメッシュ生成には多大な時間を要することが多く、室内環境解析に Virtual Manikin 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のみ(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、それ以外の人体形状や人体スケールは殆ど扱われていない。

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が可能な各種の数値人体モ

デル(Virtual Manikin)を開発することを目的とする。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することを最終目的とする。

2. Virtual Manikin の開発概要

本報を含む一連の研究では、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 の開発を行うものである。特に本報では7歳児モデルの開発概要を中心に述べる。本報で開発する Virtual Manikin は2種類の姿勢(座位モデル(図 1)および立位モデル(図 2))を対象とする。詳細に人体形状を再現するため、耳、鼻等(図 3)の幾何形状も再現している。表 1 に本研究で開発する Male、Female、Child の各人体モデルの情報を示す。7歳児モデルの表面積は立位、座位共に約0.85m²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0.49m²、表面総メッシュは2万メッシュ前後としている。Virtual Manikin は、サーマルマネキンの制御に合わせて、17部位分割されており、各部位の放熱量、表面温度等を制御、解析することが可能である。本研究で開発する Virtual Manikin は汎用的な CFD コードでの使用を目的として、人体表面メッシュのみを施したグリッドデータ、人体表面法線方向に1mm幅でテ

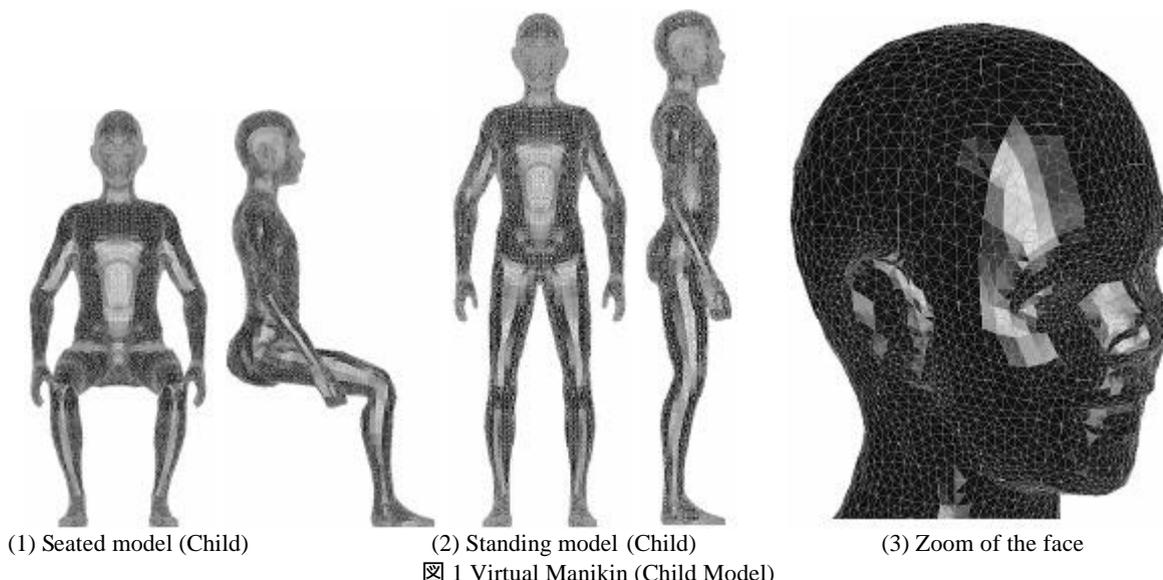


図 1 Virtual Manikin (Child Model)

表 1 Surface Area of the Individual Segment of the Manikin

Segment	Seated Model			Standing mode		
	(1)Child	(2)Male	(3)Female	(1)Child	(2)Male	(3)Female
Area of Whole body [m ²]	0.848	1.688	1.594	0.847	-	-
Volume of Whole body [m ³]	0.022	0.064	-	0.022	-	-
Smallest Surface Mesh Size [mm ²]	0.490	1.042	-	0.490	-	-
Largest Surface Mesh Size [mm ²]	154.933	624.725	-	151.715	-	-
The Number of Surface Mesh	20,085	27,260	64,000	18971	-	-
Area of left and right Foot [m ²]	0.023	0.045	0.045	0.023	0.045	-
Area of left and right Leg [m ²]	0.063	0.120	0.108	0.060	-	-
Area of left and right Thigh [m ²]	0.079	0.165	0.186	0.071	-	-
Area of left and right Hand [m ²]	0.019	0.039	0.034	0.019	0.039	-
Area of left and right Arm [m ²]	0.030	0.062	0.052	0.030	0.062	-
Area of left and right Shoulder [m ²]	0.035	0.077	0.075	0.037	-	-
Area of Pelvis [m ²]	0.102	0.233	0.174	0.123	-	-
Area of Chest [m ²]	0.079	0.162	0.153	0.079	0.162	-
Area of Back [m ²]	0.073	0.124	0.142	0.068	-	-
Area of Face [m ²]	0.036	0.061	0.046	0.036	0.061	-
Area of Neck [m ²]	0.059	0.089	0.075	0.059	0.089	-

(Female model は DTU にて作成)

トラメッシュ(4 メッシュ分)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. Fanger の快適方程式モデル

本研究の Virtual Manikin は周辺環境と熱交換の収束値として皮膚温度が決定されるルーチンを導入する。Fanger らによって提案されている熱的中立状態における熱バランス式(1-1)を変形すると(1-2)式となる。

$$T_{sk} = 36.4 - (0.054 + R_{cl}) Q_t \quad (1-1)$$

$$Q_t = \frac{1}{(0.054 + R_{cl})} (36.4 - T_{sk}) \quad (1-2)$$

この Virtual Manikin は熱的中立を目指し、人体の熱中立温度である 36.4 と現在の皮膚温度 T_{sk} []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。ここで、 Q_t は頭熱放熱量[W/m²]を、

R_{cl} は衣服による熱伝達量[m²K/W]を示す。

4. 放射・対流連成解析手法

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- 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

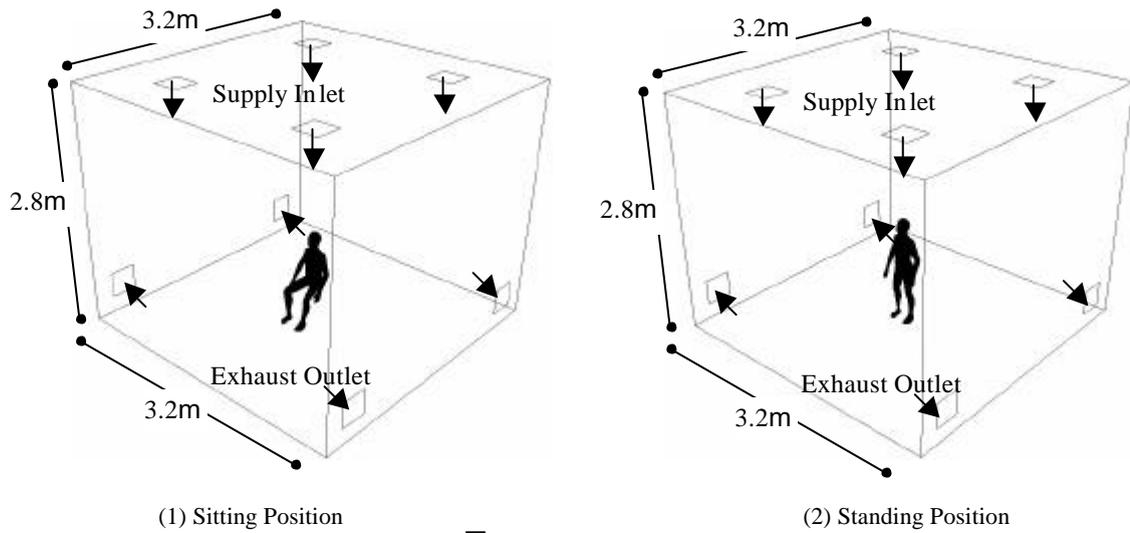


図2 Model Room Analyzed

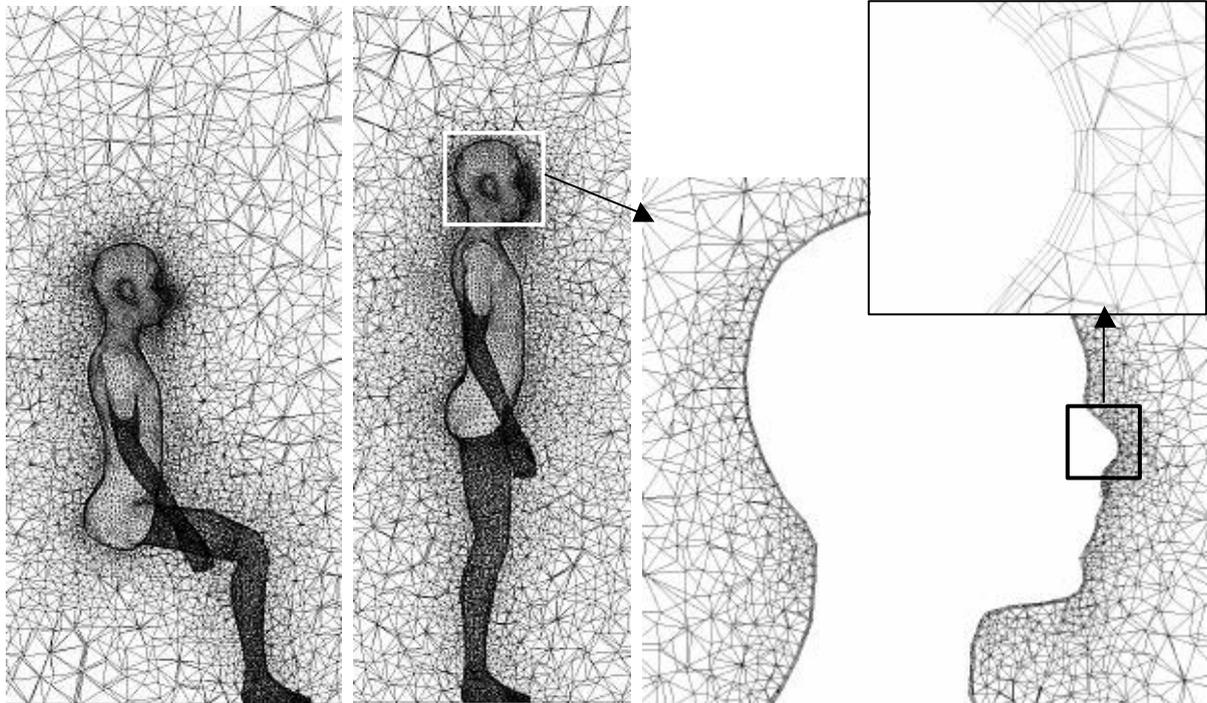


図3 Grid Design Around Virtual Manikin

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 (Fanger の快適方程式ルーチン) に送る。この手順を諸量が収束するまで繰り返す。

5. ベンチマークテスト概要

開発した Virtual Manikin による室内環境予測精度の確認を行う為、7 歳児モデル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。解析モデルを図2に示す。 $x=3.2m$, $y=3.2m$, $z=2.8m$ 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。座位モデルを設置した場合は約 95 万メッシュ、立位モデルの場合に

は約 96 万メッシュとなった。図3に Virtual Manikin 周囲のグリッドデザインを示す。人体表面は三角メッシュを配置し、人体表面から流体側への第 1~ 第 4 セル目まではプリズムメッシュを、第 5 セル目から部屋の内壁まではテトラメッシュを配置している。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。

6. 解析結果

6.1 速度分布 解析結果

紙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

表 2 Numerical and Boundary Conditions

Turbulence Model	Low Re type k-ε model (Abe-Nagano Model, 3-dimensional calc.)
Scheme	Convection Term: QUICK
Inflow Boundary	$U_{in} = 0.1$ [m/s], Area of Supply Inlet 300×300[mm] $k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.05)^2$, $e_{in} = C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$, $C_{\mu} = 0.09$, $l_{in} = (\text{Slot width}) \times 1/7$
Outflow Boundary	$U_{out} = \text{Free slip}$, $k_{out} = \text{Free slip}$, $e_{out} = \text{Free slip}$, $T_{in} = 273$ [K]
Wall Treatment	Velocity: No slip, $k _{wall} : \text{No slip}$, $e _{wall} = 2n(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Adiabatic condition, Emissivity: 0.9
Surface Treatment of Virtual Manikin	Velocity: No slip, $k _{wall} : \text{No slip}$, $e _{wall} = 2n(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Fanger's Equation, Emissivity of Radiation: 0.9

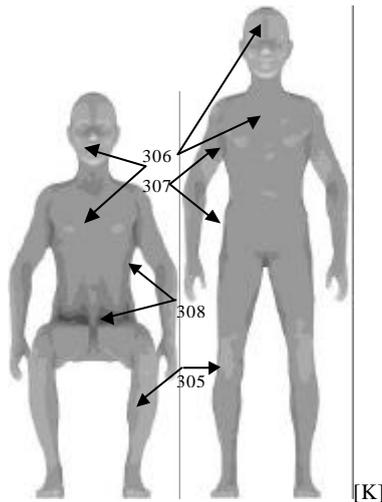


図 4 Surface Temperature

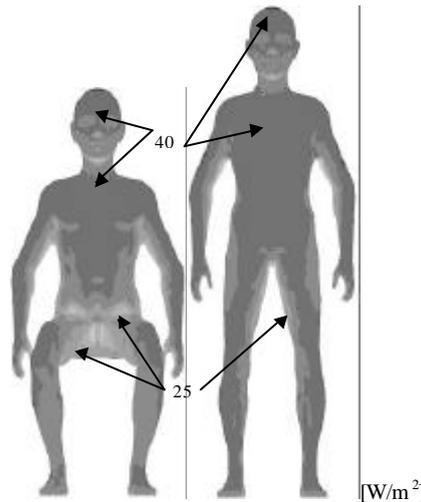


図 5 Radiation Heat Transfer Rate

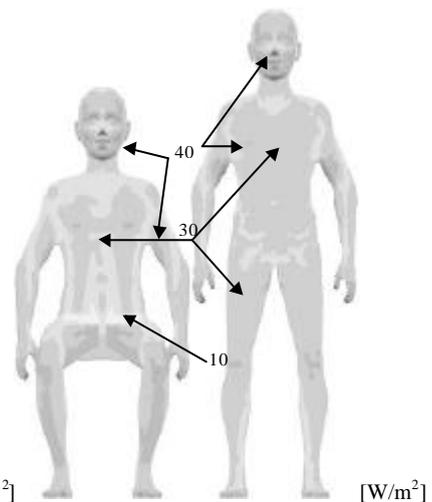


図 6 Convective Heat Transfer Rate

た。Virtual Manikinの頭上では、最大値約 0.25m/s 程度の熱上昇流が形成された。

6.2 皮膚表面温度 解析結果

皮膚表面温度は快適方程式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 35 前後、胸部、腹部では 33 前後の温度となった。

6.3 放射熱流束分布 解析結果

図 5 に放射熱流束分布図を示す。背中部で最大値となっており、36W/m² 前後である。最も値が小さいのは手部であり、立位モデルで約 29W/m²、座位モデルで約 26.5W/m² となった。人体表面における平均放射熱流束は、立位モデルで 33.6W/m²、座位モデルで 31.9W/m² となった。

6.4 対流熱流束分布 解析結果

図 6 に対流熱流束分布図を示す。手部の値が大きく、立位モデルは約 35.3W/m²、座位モデルは約 36.2W/m² となっている。最も小さい値の部位は各モデル共に首部で立位モデルが約 20.4W/m²、座位モデルでは約 19.9W/m² となった。人体表面における平均対流熱流束は、立位モデルで 27.0W/m²、座位モデルで 27.4W/m² となった。

6.5 全熱流束分布 解析結果

図は割愛するが、各モデル共に鼻、顎の部分で約 100W/m² と高い値となり、人体表面の平均全熱流束は、立位モデルで 60.6 W/m²、座位モデルで 59.3 W/m² となっており、

7 歳児平均基礎代謝量の統計データ(57.4 W/m²)と比較して、極めて実現象に近い解析結果となった。

7. 結論

- (1) Male・Female・Child の 3 種類かつ立位・座位の 2 種類の姿勢を対象とした Virtual Manikin 開発概要を示した。
- (2) 単純室内において対流・放射連性解析を行うことにより、その室内環境予測精度の確認を行った。
- (3) 人体周辺微気象解析において十分な精度で熱環境予測が可能であることを確認した。

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, Vol. 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, Vol.38, No.6, pp. 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