

各種 Virtual Manikin の開発とグリッドライブラリ構築  
 第 2 報 モデル室内を対象としたベンチマークテスト  
 Development of Virtual Manikins and Its Grid Library for CFD Analysis, Part 2

堀田太郎\* 伊藤 一秀\*\*  
 Taro HOTTA, Kazuhide ITO

Keyword : Virtual Manikin, Grid Library, CFD

はじめに

本報では前報(その1)で示した Virtual Manikin のグリッドライブラリデータを用いて、単純なモデル室内を対象として行った人体周辺微気象の予測精度に関するベンチマークテストの結果を報告する。特に Seated Child Model ならびに Seated Male Model の解析結果を示す。

1. 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 により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°C と現在の皮膚温度  $T_{sk}$  [°C] 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。

本報では裸体を仮定し、 $R_{cl}$  はゼロの条件で解析を行う。

2. 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 Reynolds 数型 k-ε 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  $Q_{cl}$  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。 $Q_{cl}$  と  $Q_{ri}$  の和より全熱流束  $Q_n$  が求められる。これを快適方程式ルーチン(1-2)式に送る。この手順を諸量が収束するまで繰り返す。

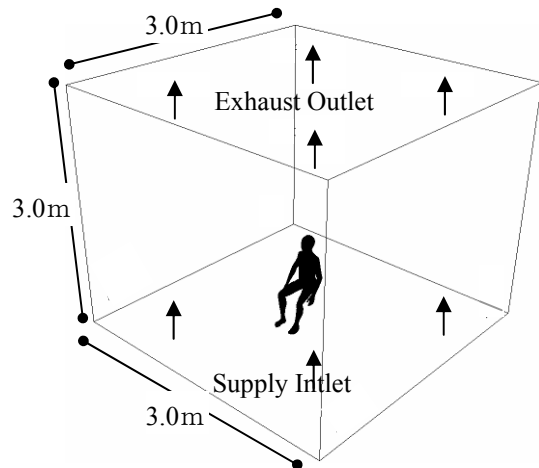


図 1 Model Room Analyzed

3. 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、Seated Child Model ならびに Seated Male Model 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 1 に示す。x=3.0m, y=3.0m, z=3.0m 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 ( $U_{in}=0.1$  m/s)、天井面全面吸込型で、モデル室内には一様流(静穏環境)が形成される空調方式を採用する。Seated Child Model を設置した場合の空間メッシュは約 102 万、Seated Male Model の場合には約 87 万メッシュである。Virtual Manikin 周囲のグリッドデザインは前報(その1)の図2を参照。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 セル目まではプリズムメッシュを、第 5 セル目からモデル室内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。室周壁は断熱条件とする。

4. 解析結果

4.1 皮膚表面温度 解析結果

図 2 に皮膚表面温度分布の解析結果を示す。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。脇部、股間部、腰部においては 307 K 前後、胸部、腹部では 306K 前後の温度となった。人体モデル形状の違いにより表面温度分布

\* 東京工芸大学大学院 修士課程

\*\* 東京工芸大学工学部建築学科 助教授 工博

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] $k_{in} = 3/2 \times (U_{in} \times 0.05)^2$ , $\epsilon_{in} = C_{\mu} \times k_{in}^{3/2} / l_{in}$ , $C_{\mu} = 0.09$ , $l_{in} = (\text{Slot width}) \times 1/7$
Outflow Boundary	$U_{out} = \text{Free slip}$ , $k_{out} = \text{Free slip}$ , $\epsilon_{out} = \text{Free slip}$ , $T_{in} = 273$ [K]
Wall Treatment	Velocity: No slip, $k _{wall} : \text{No slip}$ , $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Adiabatic condition, Emissivity: 0.9
Surface Treatment of Virtual Manikin	Velocity: No slip, $k _{wall} : \text{No slip}$ , $\epsilon _{wall} = 2\nu(\partial\sqrt{k}/\partial y)^2$ Temperature: Fanger's Equation, Emissivity of Radiation: 0.9

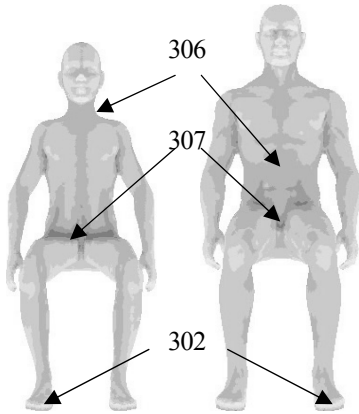


図 2 Surface Temperature (K)

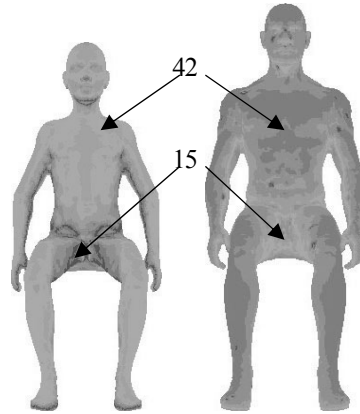


図 3 Radiation Heat Transfer Rate (w/m²)

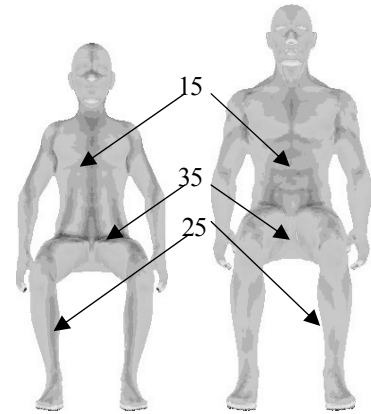


図 4 Convective Heat Transfer Rate (w/m²)

にも相応の変化が見られる。

#### 4.2 放射熱流束分布 解析結果

図 3 に人体表面における放射熱流束分布図を示す。Seated Child Model では平均値が 37.2W/m<sup>2</sup>、Seated Male Model では 35.8W/m<sup>2</sup> となった。

#### 4.3 対流熱流束分布 解析結果

図 4 に人体表面における対流熱流束分布図を示す。Seated Child Model では平均値が 31.2W/m<sup>2</sup>、Seated Male Model では平均値が 32.0W/m<sup>2</sup> となった。

#### 4.4 全熱流束分布 解析結果

図は割愛するが、人体表面の平均全熱流束は Seated Child Model で 68.4 W/m<sup>2</sup>、Seated Male Model で 67.6 W/m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup>)と比較して、極めて実現象に近い解析結果となった。

#### 4.5 人体周辺速度分布・温度分布 解析結果

人体周辺気流ならびに温度分布の解析結果を図 5 に示す。人体発熱による熱上昇流が観察できる。

### 5. 結論

開発した 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。人体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。

#### [参考文献]

[1] P.O.Fanger (1970) Thermal Comfort, Danish Technical Press

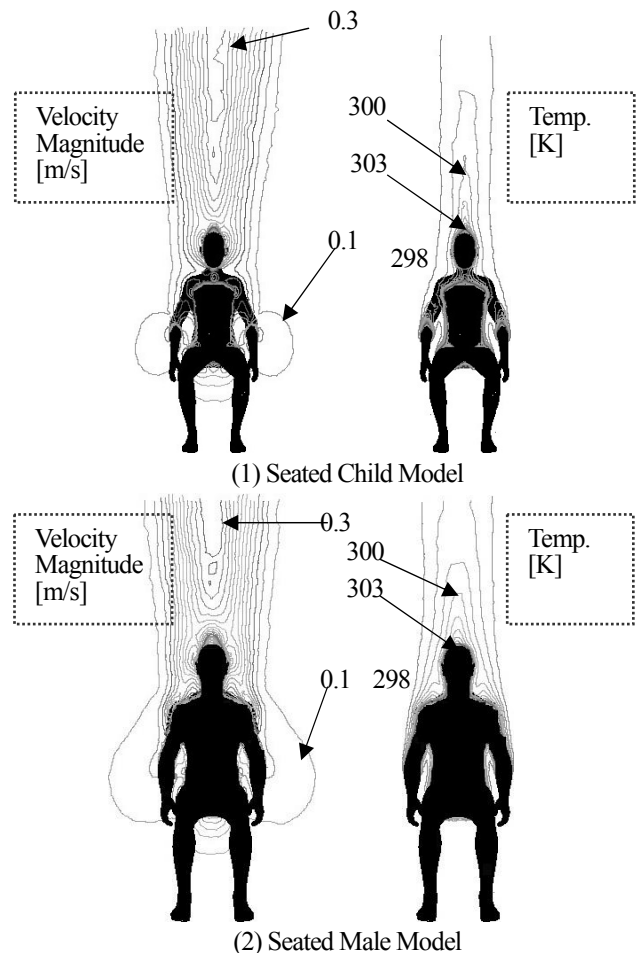


図 5 Flow and Temperature Fields around Virtual Manikin