

3次元人体形状モデルの投影面積算出と人体放射解析への適用

佐藤 大樹^{*1}・大黒 雅之^{*1}

Keywords : 3D human body model, projected area factors, thermal radiation analysis, angle factor

3次元人体形状モデル, 投影面積率, 放射解析, 形態係数

1. はじめに

人と周辺環境との熱伝達のうち、放射成分は2~4割を占める温冷感を左右する大きな要因であり、その数値予測は建築環境シミュレーションの重要な要素技術の1つである。しかし、全ての物体表面を微小面要素に分割し、その微小面要素同士の形態係数を求める一般的な放射解析手法(以下、Surface Model法)で、人体のような複雑な形状を扱おうとすると、微小面要素の数が膨大となり、計算負荷が大きくなる。そのため、解析で扱える人体は数人~10人程度に限られてしまうのが現状である。ここで、放射解析で最も計算時間を要するのは、微小面要素間の幾何的位置関係を表す形態係数を求める部分であり、放射解析全体の8割程度に及ぶケースもある。

一方で、事前に人体をあらゆる方向から見た投影面積率をデータベース化しておくことで、人体と周囲の対象面との形態係数を簡易に算出し、放射伝達量を評価する手法¹⁾(以下、Projected Area法)もある。この方法は、Surface Model法に比べ計算負荷を大幅に減らせる反面、①人体の近く(1m程度の至近距離)に対象面がある場合に形態係数の誤差が大きくなるため、人体が床・壁・天井・什器・窓等に近接する可能性のある室内空間には実質的に適用できない、②データベース作成に膨大な写真撮影とその画像処理が必要となるため、姿勢、体型等が変わった場合に対応できない、という問題がある。

そこで、本研究では、上記①を解決するため、計算負荷の小さいProjected Area法を至近距離にも適用可能なものに拡張することで、100人規模の室内空間でも人体の放射熱伝達解析を可能とし、さらに、上記②を解決するため、3次元の人体形状に関するデジタル

データを用いて容易に人体の投影面積率のデータベースを作成する手法を開発した。そして、本手法をガラスのカーテンウォールを有するオフィス空間における人体部位別の放射熱伝達量の数値予測に適用した。

2. 至近距離へのProjected Area法の適用

2.1 Projected Area法の課題と部位分割による改良

Projected Area法は、人体全身の平行投影面積 A_p と有効放射面積 A_{eff} から得られる全身の投影面積率 f_p を様々な方向から測定しておき、全身からみた対象面 A_n の平均形態係数 F を、式(1)により評価するものであり、 f_p が既知であれば、 R と θ_n のみから形態係数が算出することができる。

$$F = \int_{A_n} \left(\frac{f_p}{\pi R^2} \right) \cos \theta_n dA_n \quad (1)$$

ここで、 dA_n は面 n 上の微小面積、 R は人体と対象面の距離、 θ_n は微小面 dA_n の極角である。

しかし、人体と対象面の距離が小さい場合に、形態係数に誤差が生じることが知られている²⁻⁵⁾。その理由は、本来、透視投影で評価される形態係数を、平行投影から求めており、全身を一括で扱うと、至近距離から見た人体の透視投影面積を平行投影面積で近似できないためである。

一方、著者らは、人体を頭、腕等の部分に細分化し、その部位毎に投影面積率を計測することで、Projected Area法を、部位別の形態係数計算に拡張している⁵⁾。この方法を用いれば、全身一括の場合に比べ、平行投影が成り立つ距離を小さくすることが出来るはずであり、一般的な建築空間内で想定される近距離(0.5~1.0m程度)でも形態係数の評価にSurface Model法と比べて大きな差が生じないとすれば、計算負荷の小さい

*1 技術センター 建築技術研究所 環境研究室

Projected Area 法で遠距離から近距離まで一元的に計算できることになる。

そこで、至近距離での本手法での適用性を確認するため、Surface Model 法と部位分割した Projected Area 法による形態係数の比較を行った。

2.2 比較した2つの手法

2.2.1 Surface Model 法

複雑な人体形状を微小面の集合体で直接再現し、図-1に示すように、面 n 上の微小面 dA_n から見た部位 i 上の微小面 dA_i の形態係数を求め、部位 i で積分することで、 dA_n から見た部位 i の平均形態係数 F_{dAn-i} を算出する。さらに、 F_{dAn-i} を面 n について積分し、部位 i から見た面 n の平均形態係数 F_{i-n} を算出する (式(2))。

$$\begin{aligned} F_{i-n} &= \frac{1}{A_{eff}(i)} \int_{A_n} \int_{A_{eff}(i)} \frac{\cos \theta_n \cdot \cos \theta_i}{\pi R_i^2} dA_i dA_n \\ &= \frac{1}{A_{eff}(i)} \int_{A_n} F_{dAn-i} dA_n \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $A_{eff}(i)$ は部位 i の有効放射面積、 R_i は dA_n と dA_i の距離、 θ_n と θ_i はそれぞれ微小面 dA_n と微小面 dA_i の極角である。

2.2.2 部位分割した Projected Area 法

部位 i を微小面 dA_n の方向から見た平行投影面積 $A_p(i)$ を用いて、微小面 dA_n から見た部位 i の平均形態係数 F_{dAn-i} を次式から算出する。

$$\begin{aligned} F_{i-n} &= \frac{1}{A_{eff}(i)} \int_{A_n} \frac{A_p(i) \cdot \cos \theta_n}{\pi R_i^2} dA_n \\ &= \frac{1}{A_{eff}(i)} \int_{A_n} F_{dAn-i} dA_n \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、部位 i の投影面積率 $f_p(i)$ を、

$$f_p(i) = A_p(i) / A_{eff}(i) \quad (4)$$

とすれば、部位分割した式(3)と全身を対象とした式(1)は同じ評価式となる。

2.2.3 有効放射面積率 $A_{eff}(i)$ について

これら2つの方法で、有効放射面積 $A_{eff}(i)$ は共通であり、式(3)における面 n として、表面積 A_n の十分大きな球体を考えると、 $F_{i-n} = 1$ となるため、式(3)を次式のように変形して求める。

$$A_{eff}(i) = \int_{A_n} \frac{A_p(i) \cdot \cos \theta_n}{\pi R_i^2} dA_n \quad (5)$$

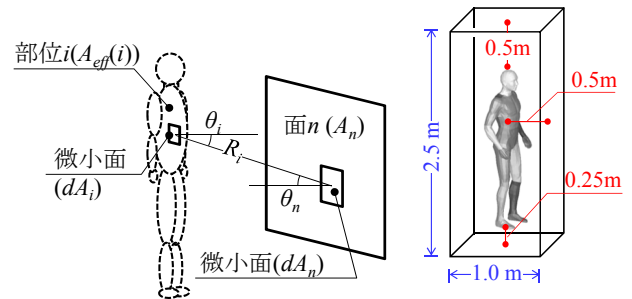


図-1 人体と対称面の関係

Fig.1 Configuration of angle factor

図-2 解析対象モデル

Fig.2 Analysis model

表-1 人体各部の表面積 (L : Left, R : Right)

Table 1 Surface area of body segment

No.	部位名称	表面積[m ²]
1	Head	0.119
2	Neck	0.028
3	Chest	0.166
4	Back	0.140
5	Pelvis	0.186
6	L Shoulder	0.079
7	L Arm	0.066
8	L Hand	0.031
9	R Shoulder	0.079
10	R Arm	0.066
11	R Hand	0.031
12	L Thigh	0.194
13	L Leg	0.108
14	L Foot	0.050
15	R Thigh	0.194
16	R Leg	0.108
17	R Foot	0.050

2.3 解析対象モデル

図-2に示す人体に近接した位置に壁面のある室の中央に、床から0.25m 浮いている状態で人体を配置した。室壁面は、全て0.1m 間隔に分割している。人体形状モデルは、伊藤ら⁶⁾が作成した CFD 用の成人男性・立位の形状データ (45092メッシュ) を基に、Surface Model 法での計算負荷を小さくするために、形状をできるだけ保持したまま、メッシュ数を5558メッシュまで削減し、表-1のような17部位に分割した。部位を分割する位置は、今後、部位分割に対応した温熱生理解析を行うことを想定していることから、田辺らの多分割型の温熱生理モデル⁷⁾等で採用されている分割に倣うこととし、それらのデータと各部の表面積の全身表面積に対する割合が同じ程度になるように設定した。

2.4 人体と各壁面の形態係数の解析結果

図-3 に人体各部位から見た室の各面の平均形態係数の算出結果を示す。横軸左端の「Whole 一括」は部位分割を行わず全身一括の Projected Area 法から算出したものであり、右端の「Whole 積算」は、部位分割した Projected Area 法で求めた部位別形態係数 (Head～

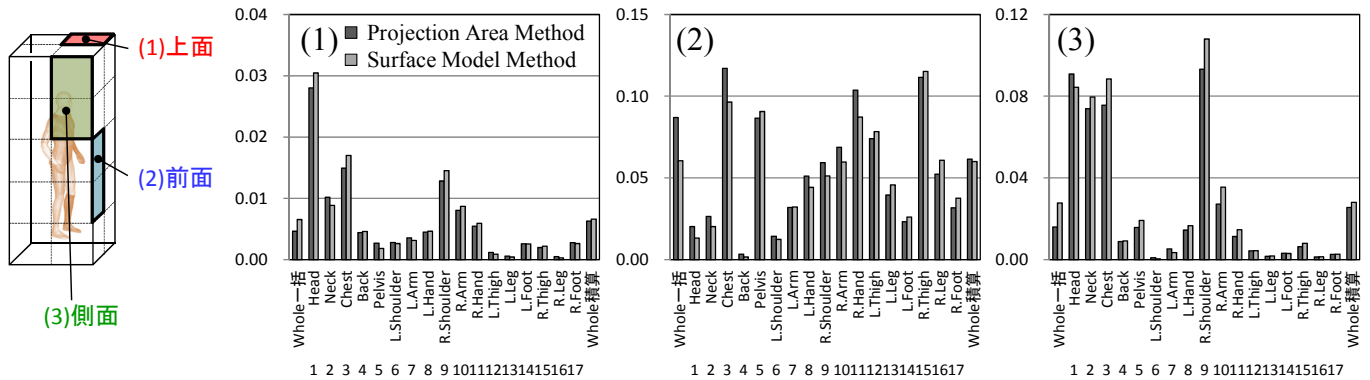


図-3 人体各部から見た室内各面の形態係数

Fig.3 Angle factor between each part of the human body and surrounding walls

R_Foot) を、各部位の有効放射面積で重みづけ平均して求めたものである。

「Whole 一括」では、従来からの指摘同様、Surface Model 法と Projected Area 法の差が大きく、特に前面では、約 30%程度、評価値にずれを生じている。一方で、部位別に形態係数を求めることで、「Whole 一括」に比べ 2 つの手法の差は小さくなり、さらに、それらから算出した全身の値「Whole 積算」としては、両者はほぼ同等の値となった。

以上より、0.5m 程度の至近距離でも、部位分割することで Projected Area 法でも、Surface Model 法と同等の評価は十分可能であると考えられる。

3. 3次元人体形状モデルを用いた投影面積率の算出

3.1 データベース作成上の課題と形状モデルの導入

Projected Area 法を利用する前提として、評価したい人体の体型、姿勢等に応じた投影面積率データベースを用意しておく必要がある。従来、そのデータベースの作成では、図-4 に示すように解析対象の人物、またはマネキン等を、あらゆる方向から写真撮影し、その写真から平行投影面積と有効放射面積を算出⁵⁾していたため、解析対象の姿勢を変更するだけでも写真撮影に立ち返らなくてはならない問題があった。実務における設計対象は、その建物用途に応じて建物の利用者の属性も様々に異なる。そのため、多様な体型(男性/女性等)、姿勢(立位/座位/臥位等)に応じたデータベースを容易に準備できることが必要となる。近年、人体形状の3次元モデルの整備が進んでいる^{6,8,9)}ことから、本研究では、写真撮影の代わりにこれらのデジタルデータを用いて、様々な人体の体型・姿勢に応じたデータベース作成することとした。

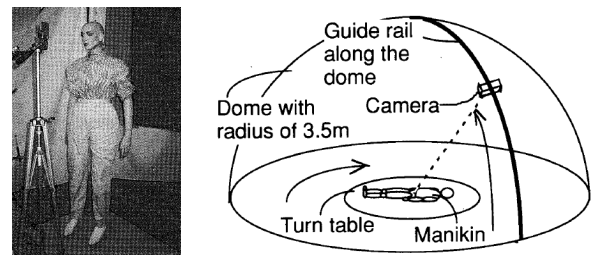


図-4 従来のマネキンを対象とした写真撮影法の例

Fig.4 Previous method based on photography

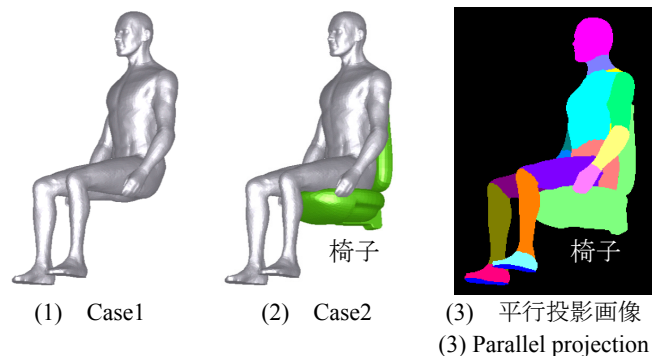


図-5 3次元人体形状モデル

Fig.5 3D human shape model

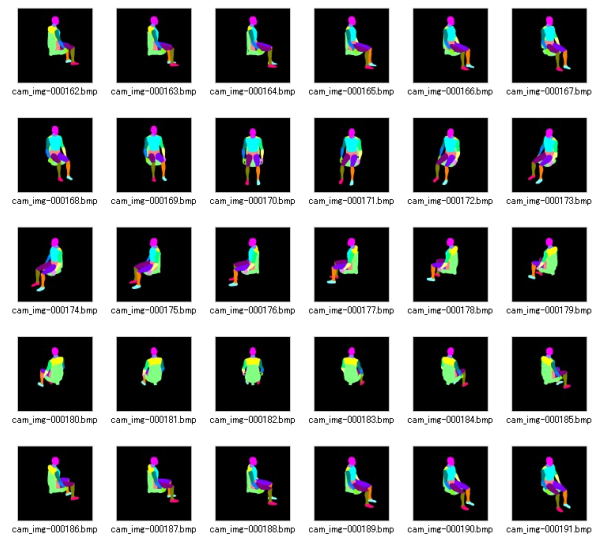


図-6 15°ピッチで取得した平行投影画像データの一部

Fig.6 Images of parallel projection interval of 15 degree pitch

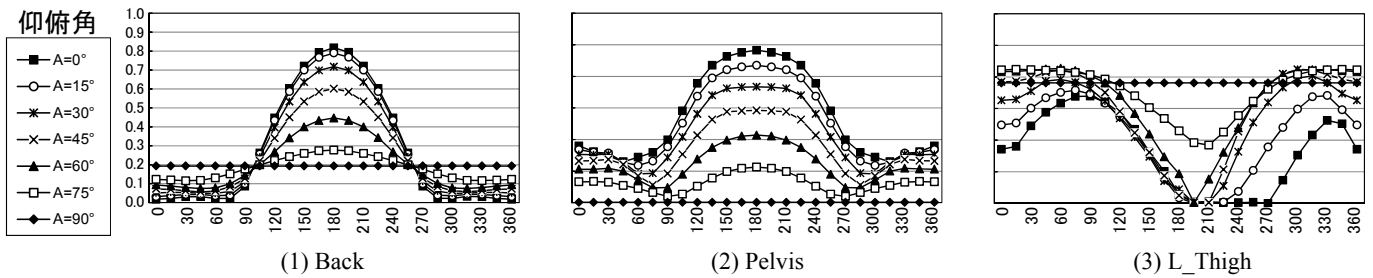


図-7 投影面積率の算出例(横軸は方位角 B)(Case1)
Fig.7 Calculation results of projected area factor (Case1)

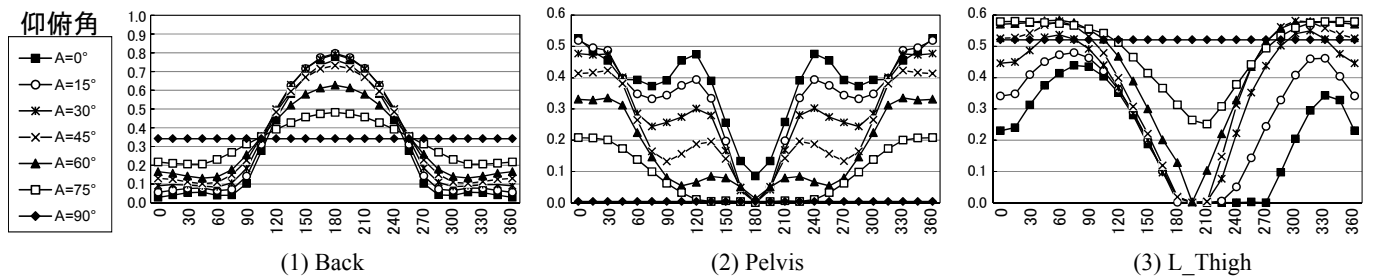


図-8 投影面積率の算出例(横軸は方位角 B)(Case2)
Fig.8 Calculation results of projected area factor (Case2)

3.2 データベース作成手順

ここでは、2 節同様、伊藤らの形状モデル⁶⁾を利用した例を示す(図-5)。本手法では、図-5(3)に示するような部位毎に色分けされた画像データから平行投影面積を取得するため、各色の面積を正確に計算できる程度に画像の解像度があればよく、人体形状モデルの表面分割の細かさは計算負荷に影響しない。そのため、解析のために表面メッシュを調整する作業は不要であり、より忠実に人体形状を再現しているモデルをそのまま用いることができる。また、デジタルデータを用いることで、図-5(2)の椅子のように、人体に対して周囲の壁面からの放射熱を遮蔽する障害物がある場合に、それを人体形状モデルと合成することで、人体の投影面積、及び有効放射面積を小さくする要因として容易に考慮できるというメリットもある。ただし、これは、人体の表面と障害物との間の放射熱伝達が無視できる程度に、両者間での表面温度の差がない、という仮定に基づいている。

本研究では、この人体形状に関する3次元のデジタルデータを用いて、従来の写真撮影による方法⁵⁾をコンピュータ上で再現した。すなわち、部位分割され、部位毎に異なる色付けを行った人体形状モデルをコンピュータ上で回転させ、人体をあらゆる方向から見た画像データを作成(図-6)し、各色の面積から各部の平行投影面積 $A_p(i)$ を求めた。さらに、 $A_p(i)$ を求めた球上の面の立体角 $\Delta\omega_j$ を用いて、次式より有効放射面積 $A_{eff}(i)$ を算出した。

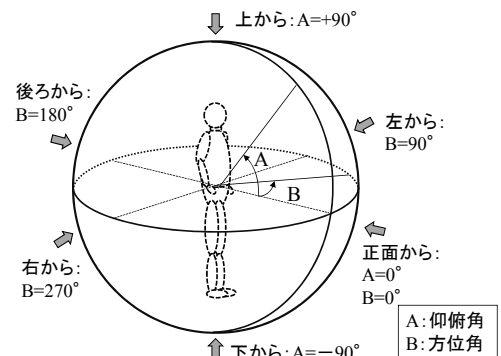


図-9 座標系

Fig.9 Coordination system

$$A_{eff}(i) = \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^j A_p(i) \cdot \Delta\omega_j \quad (6)$$

ここで、 j の値は、作成した画像の枚数である。図-6の例では、人体を仰俯角、方位角共15°間隔であらゆる方向から撮影しており、266枚の画像が作成されている。

3.3 各部の投影面積率の算出結果

図-7, 8 に、人体のみの場合 (Case1), 及び障害物として椅子を含む場合 (Case2) の部位別の投影面積率 $f_p(i)$ の算出結果を示す。図中の A, B は、図-9 に示す座標系による。ここでは特に、障害物 (椅子) の有無により大きな差が見られた Back 部, Pelvis 部, L_Thigh 部について、 $A=0 \sim 90^\circ$ の結果を示す。

Back 部, L_Thigh 部では、Case1 に比べ Case2 では椅子の影響により投影面積 $A_p(i)$ が小さくなるものの、式(6)で計算される有効放射面積 $A_{eff}(i)$ も小さくなるため、

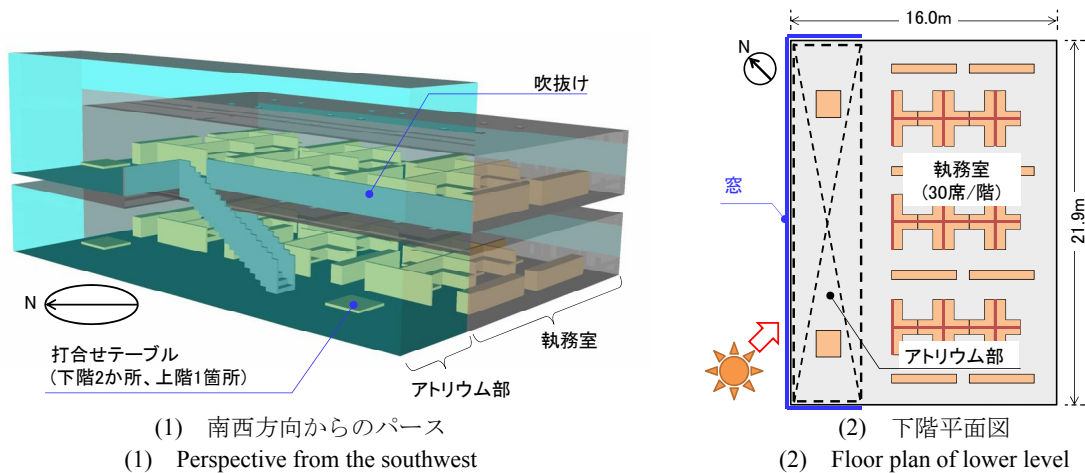


図-10 オフィス解析モデル
Fig.10 Analyzed model

投影面積率 $f_p(i)$ (式(4)参照) としては大きくなっている方位が多い。特に、 $A=90^\circ$ のような椅子の有無による投影面積に差の無い方位では、その差が顕著である。一方、Pelvis 部は、Case2 では、部位のほとんどが椅子と接触、または椅子の影になるため、Case1 と Case2 の傾向に大きな差が見られる。特に $B=180^\circ$ 付近 (後ろから) の方位では、Case2 では非常に小さな値となる。反対に $B=0^\circ$ 付近 (前から) の方位では、投影面積の差は小さいものの、有効放射面積が小さくなっているために、Case2 の投影面積率は、Case1 に比べ 2 倍以上大きな値となる。

以上より、人体近傍の障害物の状況により、人体の放射特性は大きく異なるため、障害物を考慮することで、より正確な評価が可能となると考えられる。

4. オフィス空間を対象とした人体各部の放射熱伝達量解析への適用

4.1 解析モデル

図-10 に示す北西面に 2 層吹抜けのアトリウム空間を有するオフィス空間に 90 人の人体を配置し、オフィスの放射環境を評価した。アトリウムに日射が入る 6 月 16 日 16 時を対象とし、標準気象データ¹⁰⁾ (横浜) の当該日時のデータ (外気温 24.4°C 、水平面全天日射量: 494W/m^2 、法線面直達日射量: 722W/m^2) を用いて放射解析^{11,12)}を行った。

室内各面の表面温度は、室温を 28°C とし、表-2 に示す物性値を基に表面熱収支を解いて算出した。窓の日射透過率は 0.16 である。上階の天井は天井輻射冷房、アトリウム部の床は全面床吹き出し空調を想定し、他の壁面よりも低い温度設定としている。また、全ての壁面で、長波放射率と対流熱伝達率は共通で、それぞ

表-2 主な室内壁面条件

Table 2 Wall conditions

名称	短波吸収率 [-]	内部温度 [$^\circ\text{C}$]	熱貫流率 [$\text{W/m}^2\text{K}$]
窓	0.58	-	2.6
壁面	0.30	26.0	2.0
執務室床	0.80	26.0	1.5
下階天井	0.30	26.0	2.0
上階天井	0.30	20.0	2.0
什器	0.75	26.0	2.5
アトリウム部床	0.80	18.0	1.5

れ、0.95、 $4.0\text{W/m}^2\text{K}$ とした。人体の短波吸収率は 0.5、長波放射率は 0.95 とした。

4.2 放射熱伝達量の算出方法

対象面からの短波・長波のラジオシエティを用いて、式(7)により、部位別 MRT (平均放射温度) を算出する。式(7)の F_{i-n} の算出において、投影面積率が用いられる。

$$\varepsilon(i)\sigma(T_r(i)+273.15)^4 = \varepsilon(i)\sum_1^n B_{Ln}F_{i-n} + \alpha(i)\sum_1^n B_{Sn}F_{i-n} + \alpha(i)f_{pd}S_d \quad (7)$$

ここで、 σ は Stefan-Boltzmann 係数 [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]、 $T_r(i)$ は部位 i の MRT [$^\circ\text{C}$]、 $\varepsilon(i)$ 、 $\alpha(i)$ は部位 i の長波放射率、日射吸収率、 B_{Ln} 、 B_{Sn} は対象面からの長波、短波のラジオシエティ [W/m^2]、 f_{pd} は直達日射方向から見た部位 i の投影面積率、 S_d は直達日射量 [W/m^2] である。

さらに、部位 i の着衣表面温度を $T_{ci}(i)$ [$^\circ\text{C}$]、部位 i の着衣による表面積の増加率を $f_{ci}(i)$ として、部位毎の放射熱伝達量 $Q_r(i)$ [W/m^2] を、有効放射面積率 $f_{eff}(i)$ [-] を用いた放射熱伝達率 $h_r(i)$ [$\text{W/m}^2\text{K}$] を用いて評価する。

$$h_r(i) = 4\varepsilon(i)\sigma f_{eff}(i) \left[(T_r(i) + T_{ci}(i))/2 + 273.15 \right]^3 \quad (8)$$

$$Q_r(i) = h_r(i)(T_r(i) - T_{ci}(i))f_{ci}(i) \quad (9)$$

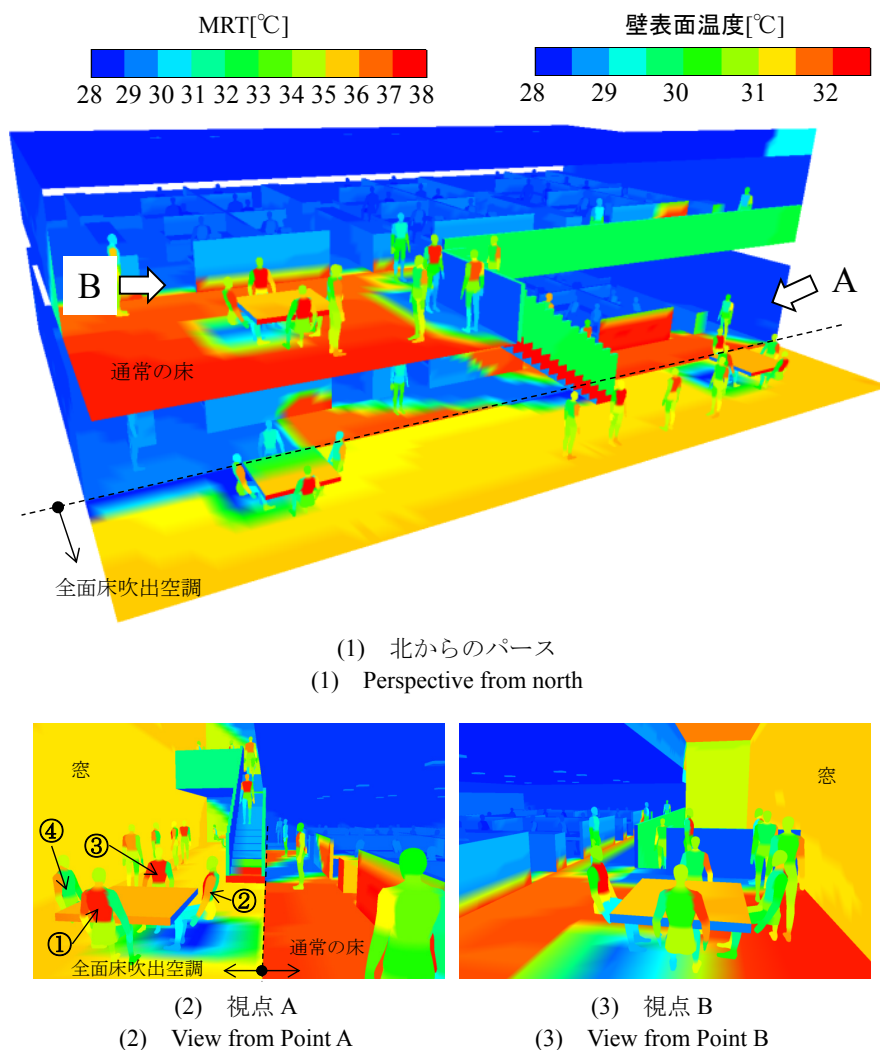


図-11 壁面表面温度と人体部位別の MRT の分布

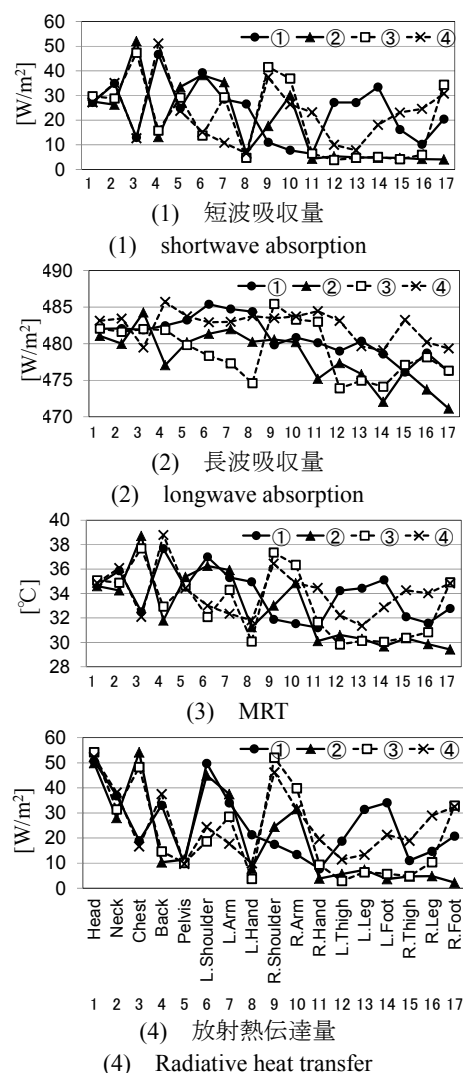


図-12 部位別の放射受熱量の解析結果
Fig.12 Results of each part of the body

4.3 解析結果

図-11 に壁面の表面温度と人体の部位別 MRT の分布を示す。部位別に放射熱伝達量を解析しているため、図-11(2)(3)に示されている人体からも分かるように、テーブルの下に位置し直達日射を受けない部位の MRT は小さく、窓側を向いており直達日射を受ける部位の MRT が大きくなる状況が評価できている。

この様子を、図-11(2)中に番号を付した打合せテーブルに居る4名を対象に詳しく分析する。図-12に人物①～④の部位別の短波吸収量、長波吸収量、MRT、及びそれらの値を用いて、式(8)、(9)より放射熱伝達量を算出した結果を示す。図-12(4)では、人体への流入を正、流出を負とする。放射熱伝達量を算出するにあたり、 $T_{cl}(i)$ は全て 32°Cとし、 $f_{cl}(i)$ は文献13の値を利用した。短波吸収量(図-12(1))は、直達日射の向きと人体の向きの関係から、人体①、④はBack部で大きくChest部で小さくなり、②、③は逆の傾向となる。また②、③は

テーブルによる日影の影響で下半身の値が小さい。長波吸収量(図-12(2))は、図-11(2)から分かるように、テーブルによる日影部分の表面温度が低いため、②、③で下半身の値が低い。これらの影響が各人体の部位別 MRT、放射熱伝達量に影響している。例えば、②、③の下半身の各部位では、上半身に比べ放射熱伝達量が小さくなっている。

以上のように、本研究で開発した手法を用いれば、多人数が存在する大規模な建築空間でも、人体の放射熱伝達解析と、それに基づく室内各所の放射環境を評価が可能となる。

5. まとめ

対象面と人体との距離が近い場合でも、人体を適当な部位に分割することで、平行投影面積に基づき部位別の形態係数、および全身の形態係数を評価可能であ

ることを示した。また、そのための投影面積率データベース作成に、3次元人体形状モデルを用いる方法を開発し、人体に極端に接近した障害物を含めた投影面積率の算出を行った。以上の結果を、ガラスのカーテンウォールを有するオフィス空間に適用し、多人数が存在する大規模な建築空間でも人体の放射熱伝達解析が可能となることを示した。

参考文献

- 1) P. O. Fanger, O. Angelius, P. Kjerulf-Jensen, Radiation data for the human body, ASHREA Transactions, Vol. 76, pp.338-373, 1970
- 2) 土川忠浩, 小林陽太郎, 堀越哲美, 三輪恵美, 蔵澄美仁, 平山慶太郎, 実測による人体の有効放射面積および人体と矩形面との間の形態係数に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, No.388, pp.48-59, 1988
- 3) 尾関義一, 小西正哲, 成田千恵, 田辺新一, 数値計算による矩形面と全身との形態係数の評価, 日本建築学会計画系論文集, No.522, pp.15-22, 1999
- 4) 尾関義一, 小西正哲, 成田千恵, 田辺新一, 数値計算による人体の有効放射面積の評価, 日本建築学会計画系論文集, No.525, pp.45-51, 1999
- 5) M. Oguro, E. Arens, H. Zhang, K. Tsuzuki, T. Katayama, Measurement of projected area factors for thermal radiation analysis on each part of the human body, 日本建築学会計画系論文集, No.547, pp.17-25, 2001
- 6) 伊藤一秀, 堀田太郎, 数値解析用 Virtual Manikin のグリッドライブラリ作成, 空気調和・衛生工学会論文集, No.113, pp.27-33, 2006
- 7) 田辺新一, 小林弘造, 小川一晃, 温熱環境評価のための人体熱数値計算モデル COM の開発, 日本建築学会計画系論文集, No.599, pp.31-38, 2006
- 8) 独立行政法人産業技術総合研究所, 人間特性データベース検索システム構築検証に係る調査研究報告書 2010.2
- 9) 一般社団法人人間生活工学研究センター日本人の人体寸法データブック 2004-2006, 2008
- 10) 日本建築学会, 拡張アメダス気象データ, 1981-2000, 2005
- 11) 浦野明, 森川泰成, 斎藤正文, 建築・都市環境における放射シミュレーション(その 1), 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, pp.305-308, 1993
- 12) 大黒雅之, 森川泰成, 本橋比奈子, 街区スケールを対象としたヒートアイランド解析評価プログラムの開発と適用, 大成建設技術センター報, No.42, pp. 49.1-49.8, 2009
- 13) M. Oguro, E. Arens, R. de Dear, H. Zhang, T. Katayama, Convective heat transfer coefficients and clothing insulations for parts of the clothed human body under calm conditions, 日本建築学会計画系論文集, No.561, pp.31-39, 2002