放射冷房による居住熱環境の改善に関する研究

第2報 熱放射環境評価のための居室者の簡易型モデル

STUDY ON IMPROVEMENT OF LIVING THERMAL ENVIRONMENT
BY RADIANT COOLING

—Part 2 Simplified model of occupant for evaluating thermal radiant environment—

宮 永 俊 之*, 占 部 亘**, 中 野 幸 夫***, 梅 干 野 晃****

Toshiyuki MIYANAGA, Wataru URABE, Yukio NAKANO

and Akira HOYANO

In this paper, the simplified model of occupant for evaluating a radiant cooled space was proposed. The model was constructed by combining some kinds of cylindrical and rectangular parts to simulate a shape of the real subject accurately. The geometrical validity of the model was examined. As a result, an effective body surface area which contributes to a radiation and convection heat transfer and an effective radiation area of the real subject agreed well with those of the model. Furthermore, a skin temperature at some typical positions on the body surface and a partial thermal resistance of clothing were defined respectively on the basis of measured values and they were added to the model as thermal properties. Finally, the model was applied to an analysis of thermal environment in the radiant cooled space and a local thermal environment around the model was evaluated quantitatively. The analyzed value of a mean surface temperature on the body agreed well with that on the real subject. The practical validity of the model was verified.

Keywords : Radiant cooling, Thermal radiant environment, Model of occupant, Effective radiation area, Projection area factor, Thermal properties

放射冷房、熱放射環境、居室者のモデル、有効放射面積、投影面積率、熱的特性

1 はじめに

放射冷房は室内の熱負荷を主に放射熱移動によって天井などに設置された放射パネルに吸収させ、冷房する空調方式である。鉛直方向に非対称熱放射環境である放射冷房空間は、均一な気温分布、小さな気流速度、頭寒足熱の状態が得られるなどの特長をもつ。しかし、居室者自身、照明、OA機器などの熱放射源に加え什器などの熱放射の遮へい物が混在するため、居室者は複雑な熱放射環境に常に身を置くことになる。居室者の熱放射環境は自身と周囲の幾何学的な関係とそれらの表面温度でほぼ決まる。よって、適正な冷房効果を得るように放射冷房空間を設計するには、適切な形状および熱的特性を兼ね備えた居室者のモデルを用いて熱放射環境を定量的に評価することが重要である。

人体と周囲環境との間の熱的な相互影響、特に熱放射環境の評価を目的として、人体を直方体など単純形状で表現したモデル^{(1)~(2)}から実際の人体形状により近い複雑なモデル^{(3)~(6)}まで様々なモデルが従来提案されている。モデル形状は実際により近い方が望ましいが、形状が複雑化するほど取り扱う情報量は増え、結果的に熱放射環境の解析に必要な計算量が指数的に増大することが問題になる。

人体内部の熱機構を数値的に模擬することを目的として、体温調節モデルに代表される生理モデルが開発されている^{(7)~(14)}。これらのモデルの多くは球や円柱形状を用いて立体的に作成されている。し

かし、表面積や容積の再現を重視し作成されるため、モデル形状が実際の人体とかなり異なることが指摘されている⁽¹¹⁾。これでは周囲環境との熱的な相互影響を適切に解析できないおそれがある。

一方、生理モデルは熱放射環境の解析に必要な人体の皮膚温度や表面温度を数値的に予測できるなどの特長をもつ。しかし、このモデルを用いて必要な情報を得るためには、複雑な伝熱式を解くなど煩雑な処理が必要となる。加えて、モデル自体が放射冷房空間へ適用できるかどうかはこれまで検討されてないため、この点を別途検証する作業が必要になることが問題になる。

そこで、比較的簡易な形状をしていながら居室者の形状や熱的な特徴を表現できるモデル（以後、簡易型モデルとよぶ）を新たに提案・作成し、放射冷房環境評価への適用可能性を示すことを本報の目的とする。具体的には、まず、簡易型モデルを提案し、その形状の妥当性を評価する。この際、人体形状を適切に表現するために実測データに基づき作成した精密なモデルを単純化するという二段階の手順を提案し、用いる。次に、モデルに与える熱的特性を検討する。放射冷房を想定した環境で実施した被験者の皮膚温度測定で得たデータに基づき、簡易型モデルの部位別の「皮膚温度」を決める。併せて部位別の「着衣」を数値計算上考慮できるようにし、生理モデルを利用せず人体の熱的境界条件を表現する。最後に、前報

* 御電力中央研究所 主任研究員・博士(工学)

** 御電力中央研究所 研究員・工修

*** 御電力中央研究所 上席研究員・工博

**** 東京工業大学大学院環境理工学創造専攻 教授・工博

Senior Researcher, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.
Researcher, Central Research Institute of Electric Power Industry, M. Eng.
Research Fellow, Central Research Institute of Electric Power Industry, Dr. Eng.
Prof., Dept. of Environmental Science and Technology Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

で提示した方法¹⁵⁾で簡易型モデルを含む放射冷房室内熱環境の解析を行い、得られた情報を実測データと比較するなどして簡易型モデルの妥当性を検証するとともにその実用性能を例示する。

本文中で使用する記号

A : 面積 (m^2)	α : 方位角 ($^\circ$)
A_{eff} : 有効放射面積 (m^2)	β : 高度 ($^\circ$)
A_p : 投影面積 (m^2)	ϵ : 放射率 (—)
f_p : 投影面積率 ($=A_p/A_{\text{eff}}$) (—)	σ : Stefan-Boltzmann定数
G : Gebhartの吸収係数 (—)	$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$
h : 対流熱伝達率 ($\text{W/m}^2/\text{K}$)	($0^\circ\text{C}=273.15 \text{ K}$)
K : 熱通過率 ($\text{W/m}^2/\text{K}$)	
N : 総面要素数 (—)	添え字
T_a : 気温 ($^\circ\text{C}$)	i, j, k : (面要素) 番号
T_{cl} : 人体の表面温度 ($^\circ\text{C}$)	hair : 頭部 (髪)
T_{skin} : 皮膚温度 ($^\circ\text{C}$)	head : 頭部 (髪以外)
T_{PRT} : 面放射温度 ($^\circ\text{C}$)	body : 胴体部
T_p : 放射パネル表面温度 ($^\circ\text{C}$)	leg : 下肢部
	mean : 平均値

2 簡易型モデルの作成手順

2.1 表面形状

人体は非常に複雑な形状をしている。また、性別、年齢、体型など個体差が大きい。よって、実際の人体形状を簡易化する場合、「簡易化を施す原型となる人体の素性が明確で、その形状が精密に模擬されていること」および「その人体形状の簡易化が適切に行われること」の二点を念頭に置き作業を進める必要がある。そこで、本報では、簡易型モデルを作成するために以下に示す2段階の手順を提案し、用いる。3章で詳細を述べる。

- (1) 文献 (6) の手順を参考に、複数の成人男性の被験者に協力してもらい体表面の寸法測定を行い、得たデータに基づいて被験者らの平均的形状を精密に模擬する。すなわち、「素性の明確な」モデル (精密型モデルとよぶ) を作成する。
- (2) 精密型モデルを正面、側面、上面からみた投影面積 (意味は図7参照) に一致するように、円柱と直方体パーツを組み合わせて簡易型モデルを作成する。

上記の手順の概要を図1に示す。作成した二つの居室者の精密型および簡易型モデルの幾何学的な性質を比較・評価し、「簡易化が適切に行われたかどうか」と簡易型モデル形状の妥当性を調べる。

図1: 人体形状の簡易表現

2.2 熱的特性

前節で作成した簡易型モデルの形状に熱的特性を付加して、放射冷房環境評価に適用できるようにする。熱特性として特に重要と考えられる熱的境界条件の「皮膚温度」と「着衣による熱抵抗」をできるだけ簡易な手続きで正確な情報として簡易型モデルに与えるため、以下に示す手順をとる。4章で詳細を述べる。

- (1) 皮膚温度については、図2に示すように大まかに分割した人体表面の部位ごとの皮膚温度を、熱環境制御室内で実施した被験

者の皮膚温度測定で得られたデータをもとに決める。この際、実際の放射冷房を想定した数種の定常熱環境において測定を実施する。

- (2) 着衣の熱抵抗をより実際に近いかたちで表現するため、繊維と空気の層からなる熱抵抗として表現し、簡易型モデルの熱的境界条件に反映させる。この場合、着衣状況は (1) の被験者と同じとし、図2に示すように部位ごとに独立に決める。

上記の手順では放射冷房を想定した実環境で測定したデータをモデルに反映させるので、解析の際の居室者の熱的境界条件の信頼性が高い。なお、本報では発汗や蒸発による潜熱移動は扱わない。

図2 人体の熱特性（皮膚温度、着衣熱抵抗）の簡易表現

3 簡易型モデルの形状

3.1 モデルの作成

3.1.1 簡易型モデルの基礎となる精密型モデル

精密型モデルの雛形にした5名の成人男性の被験者の概要を表1に示す。DuBoisの式¹⁶⁾と藏澄の式¹⁷⁾によって計算した体表面積を併記した。

表1 精密型モデルの雛形にした被験者の概要

	性別	年齢 (才)	身長 (cm)	体重 (kg)	体表面積 (m^2)	
					DuBoisの式	藏澄の式
平均値 (標準偏差)	男性	30 (3.7)	173 (7.0)	66 (5.8)	1.79 (0.09)	1.74 (0.08)
1	男性	34	178	68	1.85	1.80
2	男性	24	165	71	1.78	1.74
3	男性	30	182	67	1.87	1.82
4	男性	30	171	68	1.79	1.75
5	男性	32	168	56	1.63	1.61

$$\text{DuBoisの式}^{15)}: 71.84W^{0.425}H^{0.725}, \text{藏澄の式}^{16)}: 100.315W^{0.383}H^{0.690}$$

W: 体重(kg), H: 身長(cm)

図3に示す被験者の箇所の寸法を大型のノギスで測定し、表2に示す平均寸法を得た。この寸法値に基づいて図4に示す精密型モデルを作成した。このモデルは三角形面要素の集合体で、その作成に文献 (5)、(6) で使用されている市販のソフトウェアを使用した¹⁸⁾。後述する簡易型モデルと形状を比較する都合上、図4に示すように体表面を頭部、胴体部、下肢部の3つの部位に分離した。部位ごとに含まれる面要素を全て抽出し、それらの面積を合計することによって部位ごとの表面積を計算した (図4参照)。精密型モデルの全体表面積 (1.73 m^2) のDuBoisの式¹⁶⁾による計算値 (1.79 m^2) と藏澄の式¹⁷⁾による計算値 (1.74 m^2) に対する誤差は、それぞれ、+4%、-0.6%で

あった。精密型モデルは被験者の形状を概ね忠実に模擬していると考えられる。

図3 被験者の採寸箇所および皮膚温度測定箇所

表2 精密型モデルの作成に用いた被験者の寸法
(測定した寸法の平均値、括弧内は標準偏差)

	長さ(mm)	幅(mm)	奥行き(mm)
頭部	229 (6)	162 (3)	192 (5)
頸部	46 (4)	111 (7)	119 (9)
肩部		412 (17)	168 (4)
胸部	胴体部長さ	311 (6)	225 (8)
腹部	661 (42)	266 (7)	191 (20)
腰部		292 (14)	214 (14)
大腿部	324 (19)	127 (14)	143 (16)
下腿部	371 (27)	86 (8)	91 (12)
足部	73 (4)	78 (13)	243 (3)
上腕部	231 (17)	88 (9)	68 (9)
前腕部	243 (16)	70 (9)	62 (10)
手部	187 (7)	41 (7)	82 (7)

図4 構築した精密型モデル (4392面要素)

3.1.2 簡易型モデル

本報では、居室者の姿勢を椅座位に限定する。まず、立位のモデルを変形させ、椅座位の精密型モデルを作成する(図4左)。これをもとに図5に示す簡易型モデルを作成した。すなわち、簡易型モデルを構成する基本パーツを(楕)円柱と直方体のみとし、図6に示すように正面、上面、側面の三方向からみた場合の精密型モデルの投影面積が簡易型モデルとできるだけ一致するように各パーツの形状および寸法を工夫した。簡易型モデルは基本的に四角形面要素の集合体とし、間接部などをなめらかに表現するために三角形面要素も併せて一部で使用した。また、頭部では髪部を考慮した。さらに、計算に必要なメモリを節約するため腕部を実質的に省略した。正面、上面、側面の精密型モデルに対する簡易型モデルの投影面積の誤差は表3に示す。いずれも誤差は小さい。

図5 提案する簡易型モデル (椅座位、617面要素)

図6 各モデルの3方向からみた投影図

表3 各モデルの3方向からみた投影面積
(括弧内は精密型モデルに対する誤差)

	精密型モデル	簡易型モデル
正面からみた投影面積 (m²)	0.37	0.37 (±0%)
側面からみた投影面積 (m²)	0.27	0.26 (-4%)
上面からみた投影面積 (m²)	0.20	0.19 (-4%)

3.2 形状の評価

3.2.1 部位別の表面積

精密型モデルと簡易型モデルの部位別の表面積の比較結果を表4に示す。頭部は比較的よく一致しているが、胴体部と下腿部で誤差が大きい。簡易型モデルでは腕部を実質的に省略しているため、胴体部で表面積の誤差が特に大きい。しかし、椅座位の精密型モデルから、上腕部と前腕部が胴体部に、手部が大腿部にそれぞれ接触するあるいはそれに近い状況の位置関係にあることがわかる。もし、姿勢が若干異なっても、前記の傾向はほとんど変わらない。

その接触（およびそれに近い）領域では基本的に顕熱移動が生じない。そこで、精密型モデルで前記に該当する面要素を抽出して、合計面積を求めると0.20m²となった。この面積を全表面積から引くと1.53m²となり、簡易型モデルの全表面積とほぼ一致した。また、差し引き後の精密型モデルの胴体部と下肢部の部位別の表面積は簡易型モデルとほぼ同じになった。よって、体表面での実質的な放射と対流の顕熱移動を模擬する上で簡易型モデルの表面積設定はこの場合適当と考えた。

表4 各モデルの表面積と有効放射面積
(括弧内は接触部の面積を各部位の面積から差し引いた値)

表面積 (m ²)		精密型モデル	簡易型モデル
表面積 (m ²)	頭部	0.13	0.14
	胴体部	0.90 (0.75)	0.74
	下肢部	0.70 (0.65)	0.66
	全体	1.73 (1.53)	1.52
有効放射面積(m ²)		1.22	1.29

3.2.2 有効放射面積

放射冷房空間の熱放射環境評価に用いる居室者のモデルは、居室者とそれを取りまく壁面および天井面等との総放射熱交換量を精度よく模擬する幾何学的な性質を備えていなければならない。3.1.2節での正面、上面、側面の三方向からだけの形状評価では、不十分である。そこで、有効放射面積 $A_{eff}^{(10)}$ を次式で計算した。

$$A_{eff} = \frac{4}{\pi} \int_{\alpha=0}^{\alpha=\pi} \int_{\beta=0}^{\beta=\frac{\pi}{2}} A_p \cos \beta \, d\alpha \, d\beta \quad \cdots (1)$$

(1) 式を解析的に解けないので、(2) 式の二重和分式に変換して数値積分する。

$$A_{eff} = \frac{4}{\pi} \sum_{j=1}^{13} \left[\sum_{i=1}^{25} A_p(\alpha_i, \beta_j) \cos \beta_j \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta\beta \right] \quad \cdots (2)$$

$$\alpha_i = \frac{\pi}{24}(i-1) \quad \beta_j = \frac{\pi}{24}(j-1)$$

数値積分の手順を示す。まず、方位(0~180°)および高度(0~90°)をそれぞれ15°ごとに变化させた総計91(=13×7)の視点から見た精密型および簡易型モデルの投影図を図7に示す方法によって作成する。全方位・高度からみた簡易型モデルの投影図を図8に示す。次に、各図に含まれる画素数をカウントし、その値をもとに各図の投影面積 A_p を算出する。最後に、それらを数値補間して決めた総計325(=25×13)の A_p を(2)式に代入して A_{eff} を計算した。 A_{eff} の計算結果を表4に示す。簡易型モデルの A_{eff} は精密型モデルに対して約6%ほど大きい。

図7 モデルの投影図の作成

3.2.3 投影面積率

放射冷房空間では人体の局所的な放射熱交換量を把握することも重要となる。そこで、簡易型モデルの方位・高度別に投影面積率 $f_p^{(18)}$ を計算し、評価する。 f_p は A_p を A_{eff} で除した値で、モデル形状が適切かどうかを3.2.2節で議論した A_{eff} より詳細に評価できる。図9に簡易型モデルの精密型モデルに対する方位・高度別の f_p の誤差を示す。方位が90°と150°付近で誤差が大きい。これは胴体部形状に起因していると考えられる。しかし、それ以外は図9の網掛け部に示すようにほぼ±8%以内の誤差に収まった。さらに精密型モデルと簡易型モデルの方位・高度ごとに f_p の相関係数を計算したところ、全データの相関係数は0.96であり、非常に高い相関関係が認められた。

本章で得られたデータを有効に活用すれば、簡易型モデルと実際の人体形状（精密型モデル）との差異を定量的に把握しておくことが可能になるため、放射冷房空間の熱放射環境評価へ簡易型モデルを適用できると判断する。この際、簡易型モデル（617面要素）は精密型モデル（4392面要素）の約7分の1(=617/4392)の面要素数で作成できる。したがって、形態係数を格納するためのメモリは簡易型モデルが精密型の約50分の1ですむ。また、計算時間は障害面判定が少なくすむ分、簡易型モデルが精密型の約7分の1以下ですむ。

図8 高度・方位ごとの投影図（簡易型モデル）

図9 簡易型モデルの精密型モデルに対する投影面積率の誤差

4 簡易型モデルの熱特性

4.1 被験者の皮膚温度測定実験

放射冷房の大きな特徴である鉛直方向に非対称な熱放射環境における居室者の皮膚温度を正しく把握し、簡易型モデルに反映させる

ために図10に示す屋内に設置した熱環境制御室内で被験者の皮膚温度測定を実施した。熱環境制御室には天井一面に流水式の放射パネルが設置されており、パネル表面温度を制御できる。また、居室者の周囲には同様の方式で表面温度を制御可能なパーティション型放射パネルを設置している。さらに室外に設置した外調機によって室内の気温と湿度を制御できる。壁および床部に厚み60mmのグラスウールを張り付け、室外と簡易的に断熱している。また、床面以外の壁面には基本的に高放射率（0.95）の黒体塗料を塗布した。なお、測定中は室外空間は別途空調した。

図10 被験者の皮膚温度測定の概要

測定を行った熱環境条件を表5に示す。気温、天井放射パネル、パーティション型放射パネルの表面温度の組み合わせを変えて6つの対称熱放射環境（ケース1,2,3）と放射冷房を想定した非対称熱放射環境（ケース4,5,6）を形成した。気温、天井放射パネル、パーティション型放射パネルの表面温度全て等しいケースを対称熱放射環境とよぶ。気温とパーティション型放射パネルの表面温度が等しく、天井放射パネルだけ低い温度（18℃）に設定するケースを非対称熱放射環境（放射冷房）とよぶ。気温については一般的な冷房環境を想定し、24、26、28℃の3ケースを設定した。全ケースで水蒸気圧が約1.5kPaになるよう調整した。表5には相対湿度で表示した。

表5 測定時の環境制御室内の環境設定条件（6ケース）

		天井放射パネルの表面温度 (°C)	パーティション型放射パネルの表面温度 (°C)	気温 (°C)	相対湿度 (%)
対称熱放射環境	ケース1	28	28	28	40
	ケース2	26	26	26	45
	ケース3	24	24	24	50
非対称熱放射環境 (放射冷房)	ケース4	18	28	28	40
	ケース5	18	26	26	45
	ケース6	18	24	24	50

被験者は表1と同じである。各ケース5人ずつ、のべ30人（=5人/ケース×6ケース）が実験に参加した。測定中、夏季の軽装（Yシャツ、上下肌着、薄手のズボン、薄手の靴下、い草製スリッパ）をした被験者は椅子（パイプ式）に浅く腰掛け、1時間30分間その状態を保った。測定中の読書は許可した。HardyとDuboisが示した平均皮膚温度算出のための7つの部位¹¹⁾と腋窩温（図3の×印）を0.3mm径の

T型熱電対で30秒ごとに測定し、コンピュータに記録した。熱電対は布テープで固定した。各被験者の皮膚温は測定開始後30分以降は測定箇所によらず定常状態に落ち着くことを確認した。また、測定中に被験者の発汗がほとんどなかったことを確認した。皮膚温度測定と併せて放射カメラ（日本電気三栄社製TH3100：検出波長領域8～13μm）で被験者を含む室内壁面の熱画像を測定開始直後から30分ごとに撮影した。測定中の様子と撮影した熱画像の一例を図11に示す。測定中は天井および被験者を取り囲む放射パネル温度が全面ではほぼ均一なことを確認した。室内への吹き込む風量は常時10m³/分に調節し、被験者近傍の気流速度は約0.1m/秒であった。室内の気温のばらつきは上下、水平方向とも設定値に対して0.5℃以下であり、ほぼ一様とみなせた。相対湿度は設定値に対して±5%RHで制御された。また、無人状態での表5の各ケースの前記同様の測定も別途行った。この時、被験者の着座位置の床面から1.0mの高さに設置した直径15cmのグローブ温度計でグローブ温度を測定した。

図11 皮膚温度の測定風景例（ケース4）

4.2 測定結果に基づく簡易型モデルの皮膚温度の設定

被験者の7箇所の皮膚温度の測定結果（測定開始後30分から測定終了時までの全測定データの平均値）とHardyとDuboisの重み付け値¹¹⁾（図3参照）を用いて、全身、頭部、胴体部、下肢部の平均皮膚温度を算出した。被験者の平均皮膚温度を部位別に気温（測定開始後30分から測定終了時までの全測定データの平均値）についてプロットしたグラフを図12に示す。

図12 被験者の平均皮膚温度

平均皮膚温度は気温に対して比例して増加する傾向がある。各平均皮膚温度を気温の一次関数で表した場合、それぞれの相関係数（図

中R)は概ね高い値が得られた^(注2)。胴体部では相関係数が他より低い、この原因は主として熱電対の皮膚への密着状態の不良と考える。この不具合を改善すれば相関関係も向上すると考える。一方、対称熱放射環境(ケース1,2,3)および非対称熱放射環境(放射冷房:ケース4,5,6)における被験者の平均皮膚温度の気温に対する分布傾向はほぼ同じであった。本実験の範囲で天井放射パネルの表面温度の違いが被験者の部位ごとの平均皮膚温度に及ぼす影響はほとんど確認できなかった。この点については、皮膚温度測定個所の問題や天井面の高温部の照明によって影響が相殺された可能性がある。詳しい検討は今後の課題としたい。

以上から、本報告では、簡易型モデルの皮膚温度が便宜的に気温のみに依存すると考えることにし、気温の一次関数で表した被験者の部位別の平均皮膚温度を、簡易型モデルの同じ部位の皮膚温度とする。なお、熱画像を分析した結果、被験者の髪部の温度は若干の分布はあるもののケースによらずほぼ30℃前後であったため、簡易型モデルの髪部(図5参照)の温度については30℃一定とした。部位別に一次関数化された皮膚温度は次式のとおりである。

$$\begin{aligned} T_{skin, head} &= 27.7 + 0.20T_a & 24 \leq T_a \leq 28 \text{ and } 18 \leq T_p \leq 28 \\ T_{skin, hair} &= 30.0 & 24 \leq T_a \leq 28 \text{ and } 18 \leq T_p \leq 28 \\ T_{skin, body} &= 31.8 + 0.13T_a & 24 \leq T_a \leq 28 \text{ and } 18 \leq T_p \leq 28 \\ T_{skin, leg} &= 26.3 + 0.29T_a & 24 \leq T_a \leq 28 \text{ and } 18 \leq T_p \leq 28 \end{aligned} \quad \dots(3)$$

4.3 着衣部の熱的特性

簡易型モデルでは胴体部と下肢部でのみ着衣を想定し、着衣部を繊維層と非密閉空気層の組み合わせで表現する。具体的な表現方法を模式的に図13に示す。前節の被験者の着衣状況をもとに繊維層の組み合わせ方を決めた。熱的な取り扱いを簡単にするため、着衣部の厚みを無視し、熱は着衣の層に対して垂直に移動するとした。各繊維・空気層の熱伝導率および厚さから熱通過率を算出した(表6)。繊維層は空気を0.75、繊維素材を0.25の割合で含むとした⁽⁹⁾。繊維素材の熱伝導率については、ポリエステルを0.064W/m℃、木綿を0.083W/m℃、空気を0.024W/m℃とした⁽²⁰⁾。非密閉空気層の熱抵抗を0.07m²℃/Wとした⁽²¹⁾。各繊維層の厚さは小型のノギスによる測定値を用いた。

図13 着衣部の熱抵抗の取り扱い

表6 簡易型モデルの着衣部の熱的特性

	繊維層 (素材)	熱伝導率 (W/m℃)	着衣の厚さ ×10 ⁻² (m)	熱通過率 (W/m ² ℃)
胴体部	Yシャツ (ポリエステル)	0.034	0.4	9.78
	肌着 (木綿)	0.039	0.8	
下肢部	ズボン (ポリエステル)	0.034	0.8	10.69

4.4 簡易型モデル着衣部表面の熱収支式

図13に示すように着衣部表面では放射、対流および伝導による熱移動を考慮する。定常時の熱環境における簡易型モデルの着衣部の表面温度を未知とすると、面要素iの熱収支式は次式で表せる。

$$\sum_{k=1}^N A_k \epsilon_k \sigma (T_k + 273.15)^4 G_{k,i} - A_i \epsilon_i \sigma (T_{cl,i} + 273.15)^4 + A_i h_i (T_a - T_{cl,i}) = K_i A_i (T_{cl,i} - T_{skin,i}) \quad \dots(4)$$

放射による放熱量 対流による放熱量 着衣部を通過する伝熱量

なお、着衣部以外の頭部(顔面部、髪部)は既知温度である。また、下肢部のうち足裏のみ完全に断熱されるとした。

5 簡易型モデルの妥当性の検証と実用性能の提示

5.1 平均表面温度

簡易型モデルを放射冷房空間内の定常時の熱環境解析へ適用し、モデルの妥当性を検証する。具体的には前章の被験者の皮膚温度の測定実験を解析対象とし、被験者の全身の平均表面温度を簡易型モデルを用いた熱収支解析でどの程度正確に模擬できるかを調べた。解析に用いた面要素モデルを図14に示す。測定装置類は無視した。椅子(パイプ式)は、居室者との接触面積が体表面積の約8%程度で、熱的影響が小さいと報告されている⁽²²⁾。よって、ここでは無視した。表5に示した6つのケースの熱環境解析を行った。それぞれのケースの天井放射パネル、パーティション型放射パネル、気温、湿度の解析条件は表5のとおりである。その他、壁面(東、西、南、北壁および床面)の表面温度を気温より2℃低い値、天井部に設置された蛍光灯の表面温度を45℃とした。これらの解析条件は実測時に撮影した熱画像(図11参照)を分析して決めた。また、全ての面要素を灰色面とみなし、放射率を黒体塗料と同じ0.95とみなした。

図14 熱環境制御室と居室者の解析モデル
(2185面要素、西側・南側の壁を省略している)

簡易型モデルの着衣部を構成する面要素ごとに(4)式の熱収支式をたて、それらを連立させて解き表面温度を計算した。遮へいを考慮した形態係数、Gebhartの吸収係数の計算方法および熱収支式の解法は前報⁽⁵⁾と同じとした。ほぼすべての面要素で形態係数の計算が高精度に達成されたことを前報と同じ手順で確認した。簡易型モデル表面の対流熱伝達係数は文献(23)を参考に部位ごとに決めた(前報と同じ)。簡易型モデルの表面温度分布のケースごとの可視化結果を図15に示す。気温の差による体表面温度分布の差異は明確であるが、熱放射環境が対称か、非対称かに起因して生じる差異はそれほど明確ではない。この結果をもとに簡易型モデル(617面要素)の平均表面温度を各ケースごとに次式で計算した。

$$T_{cl,mean} = \frac{\sum_{i=1}^{617} (T_{cl,i} \times A_i)}{\sum_{i=1}^{617} A_i} \quad \dots(5)$$

一方、実際の被験者の平均表面温度を以下に示す手順で計算した。まず、皮膚温度測定中に撮影した熱画像（図11参照）から被験者の領域のみを抽出し、それに含まれる全ての画素を色に応じて温度に数値変換した（画素ごとの色を8ビット（=256色）の温度・色テーブルに照合し変換した）。次に、1ケースあたり15枚の熱画像（3枚/1名×5名/ケース）に同じ処理を施した。最後に、15枚の熱画像で数値変換した画素全ての温度の平均値を計算し、被験者の平均表面温度とした。なお、被験者の熱画像はいずれも斜め前方から半身を撮影した一枚のみを用いた。この方法によって計算した平均表面温度が妥当なことを、異なるいくつかの方向から被験者を撮影した熱画像を併用して計算した値と比較するなどして予め確かめた。

簡易型モデルと被験者の平均表面温度の比較結果を図16に示す。

図15 簡易型モデル表面温度分布の可視化結果

図16 簡易型モデルと被験者の平均表面温度の比較

Fanger²⁴⁾ およびGagge²⁵⁾ が提示した方法によって計算した平均表面温度を併せて示す^(注3)。横軸はケースごとの設定気温である。簡易型モデルと被験者の平均表面温度の差異は、最大0.5℃以内であった。非対称熱放射環境（放射冷房：ケース4,5,6）では被験者の平均表面

温度が、対称熱放射環境（ケース1,2,3）より0.1～0.3℃ほど低いことなどを簡易型モデルはよく模擬した。また、これらはFangerおよびGaggeの方法で計算した値ともよく一致した。以上から簡易型モデルの妥当性を検証できた。

5.2 面放射温度と放射による放熱量分布

表面温度分布以外に熱環境解析で得られる定量情報の一例として、簡易型モデル表面の面放射温度と放射による放熱量分布の可視化結果（ケース1と4）を図17にそれぞれ示す。面要素 i の面放射温度 $T_{PRT,i}$ を次式で計算した。

$$T_{PRT,i} = \left[\left\{ \sum_{k=1}^N A_k \epsilon_k (T_k + 273.15)^4 G_{ki} \right\} / A_i \epsilon_i \right]^{0.25} - 273.15 \quad \dots(6)$$

また、放射による放熱量は(4)式の左辺項の計算結果から求めた。ケース1ではモデル表面のほぼ全域で面放射温度が均一に分布しているのに対して、ケース4では天井放射パネルからよく見える頭頂部や肩部、大腿部の T_{PRT} が周囲より低く、熱放射環境的には快適とされる頭寒足熱の状況が実現されている。ただし、両ケースにおいて足が向き合った領域や足部の付け根あたりは T_{PRT} が高く、居室者が熱放射源となって自分自身に熱影響を及ぼしていることがわかる。一方、 T_{PRT} が低いほど放射による放熱量は大きい。全身から放射によって放熱される総熱量は、ケース1で約31W、ケース4で約38Wと計算された。両者の7Wの差が天井放射パネルを冷却することによって増えた放熱量である。図17に示した定量的な情報によって、図15の体表面温度分布状況だけでは明確に知り得ない放射冷房空間における居室者をとりまく熱放射環境を数値的および視覚的に評価できる。

図17 面放射温度と放射による放熱量分布の可視化例（ケース1およびケース4）

6 まとめ

本報では、比較的簡易な形状をしていながら居室者の形状や熱的な特徴を表現できる簡易型モデル（成人男性、椅座位）を提案・作

成し、放射冷房環境評価への適用可能性を明確にした。得られた結果を以下にまとめる。

(1) 被験者 (5名の成人男性) の実測寸法をもとに作成した精密型モデルを正面、側面、上面からみた投影面積に一致するように、形状を工夫した円柱と直方体パーツを組み合わせて簡易型モデルを作成した。

(2) 簡易型モデルの幾何学的な性能を精密型モデルと比較した。簡易型モデルの放射と対流の伝熱に関わる実質的な体表面積が、精密型モデルとほぼ同じであること、および、簡易型モデルは、精密型モデルに対して約6%の誤差で有効放射面積を表現でき、実際の人体形状をよく模擬できることを明らかにした。さらに、簡易型モデルは形態係数を格納するためのメモリが精密型の約50分の1で、その計算時間は障害面判定が少なくすむ分、精密型の7分の1以下ですむという特徴を有する。

(3) 放射冷房を想定した環境で被験者 (のべ30名の成人男性) の皮膚温度測定を実施した。その結果を分析し、頭部、胴体部、下肢部の部位別の皮膚温度を気温の一次式で表せることを明らかにした。また、部位別の「着衣」を繊維層と空気層からなる熱抵抗として数値計算上考慮できるようにし、簡易型モデルの熱的境界条件を表現した。

(4) (3) の皮膚温度測定を簡易型モデルを用いた熱環境解析で模擬した。解析結果に基づき計算したモデルの平均表面温度は、測定値 (被験者の熱画像から計算した値) と0.5℃以内で一致し、簡易型モデルの妥当性を検証できた。また、面放射温度分布や放射による放熱量分布などを視覚的に評価できることを示し、簡易型モデルの実用性を示した。

今回は限定された条件の下での検証であるが、放射冷房空間で居室者の温熱快適性を重視してパネルの設置位置、表面温度、什器の配置を決めるような場面では、簡易型モデルは実用性を十分に発揮すると期待する。今回考慮できなかった人体熱的特性および周囲環境に関する事項は今後の検討課題とし、有益な知見が得られ次第、簡易型モデルに反映させてゆく予定である。

謝辞

被験者として (財) 電力中央研究所の職員の方々に参加いただきました。(株) トヨックス住設本部の方々にパーティション型放射パネルを作成していただきました。数値計算につきましては (株) 電力計算センター前田幸司郎氏に多大なご助力をいただきました。この場を借りて謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村：建築都市空間内の人体に対する熱放射場の表現方法について、日本建築学会計画系論文報告集、第376号、pp.29-35、1987。
- 2) 堀越ら：非対称および不均一熱放射環境の人体影響表現方法の研究、日本建築学会計画系論文報告集、第413号、pp.21-28、1990。
- 3) 土川ら：人体形状モデルを用いた人体と空間との放射熱授受に関する研究—第1報 有効放射面積および形態係数の算出理論と人体表面3次元座標測定法、日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿)、41178、1996。
- 4) 鈴木ら：体表面積と形態係数に基づいた人体形状モデルの開発、日本建築学会計画系論文報告集、第515号、pp.49-55、1999。
- 5) Ozeki, Y. *et al.* : Effective Radiation Area of Human Body Calculated by a Numerical Simulation, Proceedings of ROOMVENT, Vol.2, pp.173-180, 1998。
- 6) 宮本ら：立位姿勢人体および人体形状モデルの投射面積率に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)、41187、1998。
- 7) Gagge, A.P. *et al.* : An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Transactions, 77(1), pp.247-

- 262, 1971。
- 8) Wissler, E.H. : A Mathematical Model of the Human Thermal System, Bulletin of Mathematical Biophysics, 26(2), pp.147-166, 1964。
- 9) Stolwijk, J.A.J. *et al.* : Temperature Regulation in Man -A Theoretical Study-, *Pfuger Archives*, Vol.291, pp.129-162, 1966。
- 10) Gordon, R.G. *et al.* : Mathematical Model of Human Temperature Regulatory System-Transient Cold Exposure Response, IEEE Transaction on Biomedical Engineering, Vol.1 BME-23, No.6, pp.434-444, 1976。
- 11) 横山：生体内熱移動現象、北海道大学図書刊行会、1993。
- 12) 田辺ら：分布のある温熱環境評価のための人体16部位分割モデル (その1) 数値マネキンの概要、空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集、pp.457-460、1994。
- 13) 竹森ら：人体熱モデルの開発 (熱的快適性評価のための基本モデル開発)、日本機械学会論文集 B編、61巻584号、pp.1513-1520、1995。
- 14) 庄司ら：人体着衣熱モデルの開発 (衣服内気候の数値計算モデル)、日本機械学会論文集 B編、63巻613号、pp.183-189、1996。
- 15) 宮永ら：放射冷房による居住熱環境の改善に関する研究 第1報：遮へいを考慮した形態係数の高精度計算法と熱環境解析への応用、日本建築学会計画系論文報告集、第518号、pp.37-44、1999。
- 16) Dubois, D. *et al.* : A formula to estimate approximate surface area, if height and weight are known, *Archives of Inter. Medicine*, 17, pp.863-871, 1916。
- 17) 蔵澄ら：日本人の体表面積に関する研究、日本生気象学会雑誌、第31巻(1)、1995。
- 18) Fanger, P.O. : Thermal Comfort, Danish Technical Press COPENHAGEN, pp.160-163, 1970。
- 19) 垣鎔ら：高圧ヘリウム混合ガス空間の温熱環境に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、第305号、pp.112-121、1981。
- 20) 日本機械学会編：伝熱ハンドブック 第1版、丸善、pp.376、1993。
- 21) 空気調和・衛生工学会編：空気調和衛生工学便覧 第12版 3 空気調和設備設計編、丸善、pp.35-36、1995。
- 22) 朝比奈ら：人体と座具との接触部の熱特性を考慮した熱環境評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 (九州)、41184、1998。
- 23) 堀越ら：不均一な熱環境における人間の快適性評価と熱収支、第2回複雑乱流場の熱輸送シンポジウム-人間-環境系のシミュレーションとその最新動向、pp.11、1997。
- 24) International Standard ISO 7730 : Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort—, 1984。
- 25) Gagge, A.P. *et al.* : A Standard Predictive Index of Human Response to The Thermal Environment, ASHRAE Transactions 91-B, pp.709-731, 1986。
- 26) ASHRAE STANDARD : Thermal Environment Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE 55-1981。

注釈

(注釈1) 本報で使用した主なソフトウェアを目的および章別に整理し、以下に示す。

1. 精密型モデルの基本形状の作成 (3章)
 - ① Poser3, Macintosh version, Meta Creations Corp.
2. 面要素モデル、方位・高度別の投影図の作成など (3章、5章)
 - ② FormZ ver.2.6.3, Macintosh version, auto.des.sys, Inc.
 - ③ MENTAT 3.2.0, MARC Analysis Research Corp.
3. 画像の数値処理 (投影面積の算出など) (3章、5章)
 - ④ NIH Image ver.1.61, National Institutes of Health, U.S.A.
4. 表面温度分布の可視化 (5章)
 - ⑤ AVS ver.5.0, Advanced Visual Systems Inc.

(注釈2) なお、作用温度と同様の関係についても別途調べた。作用温度と部位別の皮膚温度の相関の度合いは、気温と部位別の皮膚温度の度合いとほぼ同等であった。本報告では、便宜的に部位別の平均皮膚温度を記述するパラメータが一つですむ気温の一次関数で表すこととした。

(注釈3) 文献 (24) および文献 (25) に掲載されているプログラムを用いて居室者の平均表面温度を計算した。また、文献 (26) に記載されている個別の着衣のクロ値をもとに居室者の総着衣量を計算し、0.49cloとした。代謝量を1.0met (安静椅座位) とした。気温と湿度は表5に示すケースごとの設定値を用いた。気流速度を0.1m/秒 (測定結果) とした。ケースごとの平均放射温度は無人状態でのグローブ温度と気流速度の測定結果から計算し、ケース1~6の値を、それぞれ、27.9℃、25.8℃、23.8℃、26.9℃、25.2℃、23.4℃とした。

(1999年5月10日原稿受理、1999年7月12日採用決定)