HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	放射熱交換の評価法に関する研究
Author(s)	佐古井, 智紀; 持田, 徹; 堀越, 哲美; 石井, 仁
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 9, 54-57
Issue Date	2001-11-01
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/7143
Type	bulletin (article)
Note	第9回衛生工学シンポジウム（平成13年11月1日（木）-2日（金） 北海道大学学術交流会館）. 1 建築環境とエネルギー利用 . P1-11
File Information	9-1-11_p54-57.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

1－11

放射熱交換の評価法に関する研究

佐古井智紀（北海道大学）　持田　徹　（北海道大学）
堀越　哲美（名古屋工業大学）　石井　仁　（呉高等専門学校）

1. 緒言

温熱環境の設計および評価において，人体の熱収支を明らかにすることは重要である．放射は対流や蒸汗とともに，主要な人体の熱交換の経路として位置付けられる．形態係数は，Lambert の余弦則に基づく均等拡散の性質を有する放射熱交換を表す上で用いられる．本稿では，立位および椅座の人体モデルに関する形態係数の積分計算結果を基に，人体の形態係数を回帰する式形態として，基準点より直交 3 方向を見込む形態係数による回帰式が有効であることを確認し，大・中規模空間における，形態係数の推定法を提案した．

2. 記号

b ：矩形面の横巾 [m],
d ：基準点と矩形面の距離 [m],
d' ：基準点と斜め矩形面の距離 [m],
F_{FB} ：基準点 O から人体前後方向を見込み得られる矩形面 P の形態係数 [N.D.],
$F_{H\to P}$ ：人体 H から矩形面 P を見込む形態係数 [N.D.],
F_{RL} ：基準点 O から人体左右方向を見込み得られる矩形面 P の形態係数 [N.D.],
F_{UD} ：基準点 O から人体上下方向を見込み得られる矩形面 P の形態係数 [N.D.],
l ：矩形面の縦巾 [m],
O ：人体基準点
P ：矩形面
γ ：斜め壁面の両端の角度 [°],
ε ：斜め壁面の上下端の角度 [°],
ϕ ：斜め矩形面が人体左右軸となす角度 [°],
ψ ：測定平面上における方向角 [°],

3. 直交する矩形面に対する人体の形態係数

人体が点要素ではないため，人体基準点と矩形面の角関係が一定であっても，人体と矩形面間の距離 d が短いほど，d の変化に依存する形態係数の変化は大きくなることが知られている [1)~4)]．他方，仮に人体を点要素と仮定したとしても，人体基準点を点要素から離れた位置に設定することにより，人体基準点と矩形面

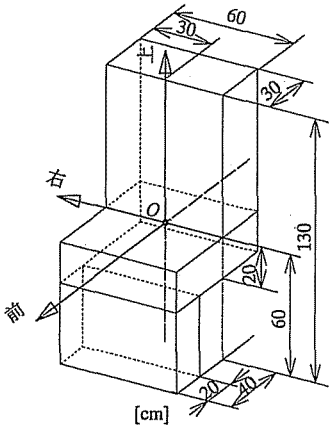

図-1a　椅座の人体モデル

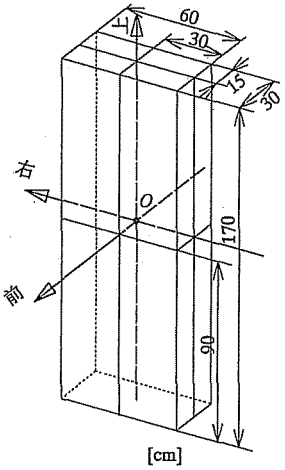

図-1b　立位の人体モデル

の角関係が一定であっても，距離 d に応じて形態係数は変化する．従って，人体基準点の設定もまた，d の変化に応じて生じる形態係数変動の要因と言える．実用上，d が 5m 以上の条件では，d の違いに起因する相対誤差は，十分に微少とみなされるが [2)]，ここでは，より大きな相対誤差を認め，人体基準点 O と矩形面間の距離が 2m 以上である大・中規模空間（床面のみ足裏で接触）へと対象を限定し，簡便な人体の形態係数の予測法を模索する．なお，本手法による誤差の具体的な大きさは後述して示す．

図-1 に，人体モデルと人体基準点 O，および座標系を示す．基準点 O は，人体モデルの幾何学的中心に近い位置となるように留意して設定した．O は，身長 170cm の人間において，立位で腰中央部，椅座でへそ部を想定している．また，著者らや Fanger らが行ったように，天井，床，左右前後の各面を，点 O を基準に分割し [4),5)]，基準点 O と図-2 の位置関係にある矩形面 P（距離 d，縦幅 l，横幅 b）の人体 H に対する形態係数 $F_{H\to P}$ を積分計算した．対象となる壁面は，左右対称の椅座モデルでは天井（前），天井（後），床（前），床（後），前壁（上），前壁（下），後壁（上），後壁（下），横壁（前上），横壁（前下），横壁（後上），横壁（後下）の 12 面，前後左右が対称である立位モデルでは天井，床，壁（上），壁（下），横壁（上），横壁（下）の6面である．なお，伝導による熱交換は，一般に放射

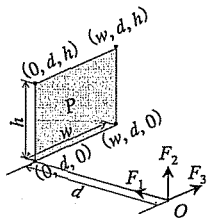

図-2　人体基準点と対象矩形面の位置関係および式（1）中の各形態計数が見込む方向

表-1　人体モデルに関する形態係数の計算条件

対称面	姿勢	距離 d [m]	対象矩形面の巾角度 $\mathrm{Tan}^{-1}(w/d)$ [°.]	対象矩形面の奥行き角度 $\mathrm{Tan}^{-1}(l/d)$ [°.]	データ数 [N.D.]
天井	椅座・立位	2, 4, 8, 16, 32	18, 36, 54, 72, 90	18, 36, 54, 72, 90	125
床 1 [1]	椅座	0.6	18, 36, 54, 72, 90	18, 36, 54, 72, 90	25
	立位	0.9	18, 36, 54, 72, 90	18, 36, 54, 72, 90	25
床 2※1	椅座	0.6	45※2, 52.5, 60, 67.5, 75, 82.5, 90	45※2, 52.5, 60, 67.5, 75, 82.5, 90	49
	立位	0.9	33※2, 42.5, 52, 61.5, 71, 80.5, 90	33※2, 42.5, 52, 61.5, 71, 80.5, 90	49
上（横）壁	椅座・立位	2, 4, 8, 16, 32	18, 36, 54, 72, 90	18, 36, 54, 72, 90	125
下（横）壁	椅座	2	18, 36, 54, 72, 90	16.7 [3]	5
	立位	2, 4	18, 36, 54, 72, 90	18, 24.2 [3] (d = 2 m において), 12.7 [3] (d = 4 m において)	15

※1　「床 1」は床の境界線が人体基準点直下 1.2m 四方において変化する場合を含み，「床 2」は含まない．
※2　これらの値は $\tan^{-1}((1.2/2)/d)$ と対応する．
※3　こらの値は $\tan^{-1}$（基準点高さ $/d$）と対応する．

項と対流項に含めて取り扱われるので，床への接触面も人体の放射面と見なして扱った．

数値計算より得られた $F_{H\to P}$ を，O から直交 3 方向に見込んで得られた形態係数 F_{FB}, F_{RL}, F_{UD} により回帰する（式（1））．なお，先述のように，計算対象となる面は O の投射点 $(0, d, 0)$ を一隅とする矩形面である（図-2）．

$$F_{H\to P} = A\cdot F_{FB} + B\cdot F_{RL} + C\cdot F_{UD} + D \qquad \cdots (1)$$

$F_{H\to P}$ の計算条件を表-1 に示す．なお，表-1 において，「床 1」は足下近くに床面の境界を含む条件を対象とし，「床 2」は大・中規模空間を念頭に，基準点直下を中心とする 1.2m 四方内に境界を含まない床のみを対象とし，また，上壁，下壁は前，後，横前，横後のそれぞれの壁である．

表-2 に，得られた結果を，また，図-3 に，表-2 と式（1）を用いて予測された $F_{H\to P}$ と積分計算より得られた $F_{H\to P}$ の関係を示す．なお，大・中規模空間を対象とすると，表-1 に示されるように，下壁，横下壁に関する条件は限定されることから，これらの壁を上壁，横上壁に合わせ，それぞれ，壁，横壁として整理した．

図-2 より，床 1（図-2b）を除いて，予測値と実測値が良い一致を示したことが見て取れる．床 1 において大きな誤差が認められた理由として，図-1a の椅座人体モデルの足裏接地面が，基準点の前方 20～40cm に位置していること，および，床の形態係数が，接地面に近く，人体基準点 O からは離れている足部や下腿の影響を大きく受けていることが挙げられる．

大・中規模空間を対象として，床 1（図-2b）を除くと，

表-2　人体モデルと矩形面間の形態係数の推定に用いる重み係数

姿勢	対称矩形面	重み係数 前	後	左右	上	下	定数	データ数	重相関係数 R [N.D.]	標準誤差 s [N.D.]
椅座	天井（前）	0.255		0.139	0.146		0	125	0.9999	0.0004
	天井（後）		0.185	0.173	0.095		0	125	0.9994	0.0010
	床 1（前）	0.191		0.075		0.231	0.003	25	0.9946	0.0033
	床 2（前）	0.230		0.199		−0.039	0.035	49	0.9999	0.0003
	床 1（後）		0.255	0.192		−0.008	0.006	25	0.9994	0.0010
	床 2（後）		0.295	0.200		−0.080	0.014	49	0.9998	0.0004
	壁（前）	0.259		0.140	0.144※		0	130	1.0000	0.0003
	壁（後）		0.219	0.174	0.066※		0	130	0.9994	0.0011
	横壁（前）	0.257		0.144	0.143※		0	130	0.9999	0.0004
	横壁（後）		0.206	0.170	0.088※		0	130	0.9998	0.0006
立位	天井	0.295※		0.147	0.056		0	125	0.9999	0.0004
	床 1	0.238※		0.134		0.053	0.016	25	0.9992	0.0012
	床 2	0.264※		0.155		−0.019	0.025	49	0.9999	0.0006
	壁（前後）	0.291※		0.148	0.058※		0	135	0.9998	0.0007
	横壁	0.295※		0.146	0.056※		0	135	0.9999	0.0005

※　これらの値は見える方向にある面に対してのみ適用する．

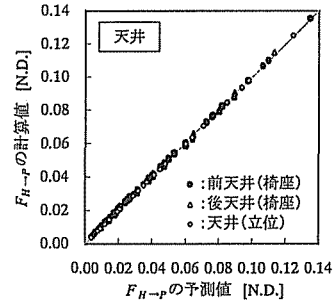

図-2a　$F_{H\to P}$ の予測値と計算値と比較（天井）

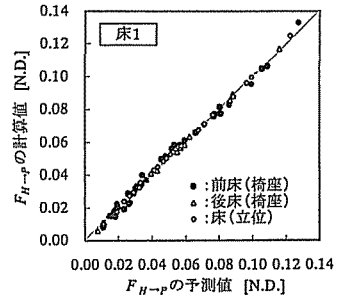

図-2b　$F_{H\to P}$ の予測値と計算値と比較（床 1）

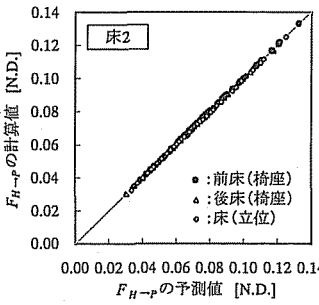

図-2c $F_{H\to P}$の予測値と計算値と比較（床 2）

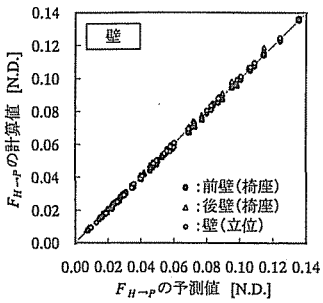

図-2d $F_{H\to P}$の予測値と計算値と比較（壁）

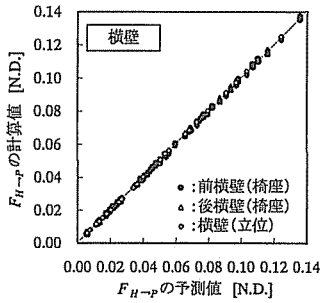

図-2e $F_{H\to P}$の予測値と計算値と比較

表-3 人体モデルと各壁面・天井面の間の形態係数算出に用いる重み係数

姿勢	対象面（床を除く）の方向	重み係数 前	後	左右	上	下	定数	データ数	重相関係数 R [N.D.]	標準誤差 s [N.D.]
椅座	前方の面	0.255		0.139	0.146※		0	385	0.9999	0.0006
	後方の面		0.209	0.173	0.081※		0	385	0.9993	0.0010
立位	両方	0.292※		0.146	0.058※		0	395	0.9998	0.0006

※ これらの値は見える方向にある面に対してのみ適用する.

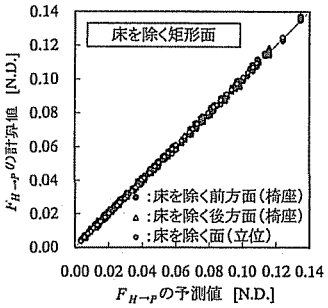

図-3 $F_{H\to P}$の予測値と計算値と比較（床を除く）

相対誤差の絶対値が 5%を越えるケースは，椅座では後天井の 20.8%，後壁の 9.2%，前天井の 4.8%，後横壁の 1.5%となり，前床 2，後床 2，前壁，前横壁では全く観られなかった．また，立位では，天井の 8.0%のみで，床 2，壁，横壁では全く観られなかった．なお，これらのケースは$F_{H\to P}$の理論計算値が 0.024 未満の場合のみ集中しているため，その絶対誤差は最大でも 0.0019 であった．表-2 に示されるように，重相関係数がいずれも高い値を示していることも考慮すると，式（1）はd ≧2m の大・中規模空間を対象とする，図-1 の人体モデルの形態係数を，簡便に推定する有効な手法と言える．また，椅座と立位，異なる人体モデルに対して，式（1）の予測式が，いずれも計算値とよい一致を示した事実は，人体の形態係数を回帰する上で，式（1）の形態が有効であることを示唆するものである．

4. 任意矩形面に対する人体の形態係数

まず，ここで，対象とする矩形面を床以外の面に限定して論を展開する．前方あるいは後方と，方向を限る場合であれば，表-2 より，椅座モデル，立位モデルに共通して，壁，横壁，天井に関する各重み係数が，近い値をとる傾向が見て取れる．そこで，同方向に位置する，壁，横壁，天井，三者に共通の係数を，重回帰分析から設定した．結果を表-3 に，また，表-3 と式（1）による予測値と積分計算値の関係を図-3 に示す．

椅座時において，予測値の相対誤差の絶対値が 5%を超えるケースは，後天井の 26.4%，後壁の 23.1%，前天井の 4.8%，後横壁の 4.6%，前横壁の 2.3%となり，前壁では観られなかった．また，立位時では，天井の 8%，壁の 0.7%で，横壁では観られなかった．なお，これらのケースは，$F_{H\to P}$の理論計算値が 0.042 未満の場合のみ集中したため，その絶対誤差は最大で 0.0026 であった．天井面，壁面，横壁面を，区別せず一様に取り扱う，表-3 と式（1）を用いる形態係数の予測法は，表-2 を用いる手法と比べて精度が若干劣るものの，簡便に人体の形態係数を推定できる実用的な手法である．

表-4 斜め矩形面の形態係数の計算条件※1

	壁の角度 ϕ [°]	距離 d [m]	方位角の母数 γ_s, γ_e [°]	仰角の母数 ε_u, ε_l [°]	データ数
上壁	-67.5, -45, -22.5, 22.5, 45, 67.5, 112.5, 135, 157.5	2	0, 18, 36, 54, 72, 90※2	0, 18, 36, 54, 72, 90	975
下壁	-67.5, -45, -22.5, 22.5, 45, 67.5, 112.5, 135, 157.5	2	0, 18, 36, 54, 72, 90※2	0, 16.7※3 (椅座) 0, 18, 26.6※3 (立位)	65 (椅座) 195 (立位)

※1 記号は図-4 の記号に対応.
※2 方位角γ_s, γ_eのとり得る値はθの値により制限される.
※3 これらの値は $\tan^{-1}$（基準点高さ/d）に対応.

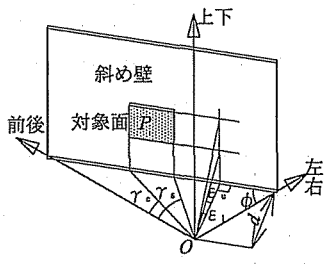

図-4 対象斜め矩形面と人体基準点の位置関係とそれを規定する記号

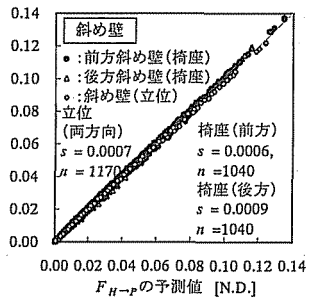

図-5 斜め矩形面（d = 2 m）の式（1）と表-3 による予測値と計算値の対応

表-3 の係数と式（1）を用いる予測手法は，直交 3 座標軸を法線ベクトルとする矩形面（前壁，横壁，天井）を対象に得られた．他方，任意の面は，これら直交 3 方向を法線ベクトルとする微少矩形面の和としても表現できることから，多様な矩形面に対して同予測手法が適用できると予想される．そこで，斜め壁上の矩形面を対象として，壁面と基準点の距離 d' が 2.0m となる条件の下，実際に積分計算を行い，本手法の適用可能性を検討した．計算対象とする斜め矩形面 P および人体基準点 O の位置関係を図-4 に，その計算条件を表-4 に示す．

得られた積分計算値と予測値の比較，およびその標準誤差 s を図-5 に示す．なお，図-5 における絶対誤差 s の最大値は 0.0038 であった．よって，本予測法は人体基準点 O と斜め壁面の距離 d' が 2m 以上である面の形態係数を，最大絶対誤差が約 0.004 という精度で予測できたと言える．

最後に，F_{RL}, F_{UD}, F_{FB} を計算ではなく，著者らの鏡曲面[6]あるいは立体角投射カメラにより実測する場合について考える．式（1）は，図-2 に示されるように，基準点 O の矩形面上への投射点（0, d, 0）を一隅とする面を対象として得られたものであるが，床面を除くと，表-2, 3 に示されるように，式（1）は切片がゼロである線形の式であるので，基準点の垂直投射点（0, d, 0）を含まない壁面を実測した場合であっても，直交 3 方向において得られた形態係数の実測値をそのまま F_{RL}, F_{UD}, F_{FB} に代入できることとなる．他方，床のように，式（1）が切片を有する場合には，基準点の垂直投射点（0, d, 0）を含む面であれば切片を有する式に，含まない面であれば切片を除いた式に代入することとなる．本稿の人体の形態係数推定法は，体育館等の比較的大きな屋内空間のみでなく，放射天空率[7]や緑陰効果の影響を算出する用途においても，有益と考えられる．

5. 結言

本稿では人体の形態係数を精度よく，かつ簡便に推定する手法について論じ，回帰する式形態として，直交 3 方向を見込む形態係数による次の回帰式が有効であることを確かめ，対象物と基準点の距離が 2m 以上である大・中規模空間を対象とする，人体の形態係数推定式を提案した．

$$F_{H\to P} = A\cdot F_{FB} + B\cdot F_{RL} + C\cdot F_{UD} + D$$

ここで，

A, B, C, D：定数（表-2, 表-3 参照）

$F_{H\to P}$：人体から対象矩形面を見る形態係数 [N.D.],

F_{FB} ：基準点より人体前後方向を見込んで得られる対象矩形面の形態係数 [N.D.],

F_{RL} ：基準点より人体左右方向を見込んで得られる対象矩形面の形態係数 [N.D.],

F_{UD} ：基準点より人体上下方向を見込んで得られる対象矩形面の形態係数 [N.D.].

本研究の一部は，日本学術振興会特別研究補助金（佐古井智紀）によったことを付記します．

参考文献

1) Horikoshi T. and Y. Kobayashi（1977）: Configuration Factors between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of the Influence of Thermal Radiation on the Human Body －1. Calculation of Configuration Factors for the Rectangular Solid, 日本建築学会論文報告集, 第 253 号, pp.91-102.

2) Horikoshi T. and Y. Kobayashi（1978）: Configuration Factors between a Rectangular Solid as a Model of the Human Body and Rectangular Planes, for Evaluation of the Influence of Thermal Radiation on the Human Body －2, Characteristics of Configuration Factors For the Rectangular Solids, 日本建築学会論文報告集, 第 267 号, pp.91-99.

3) 堀越哲美, 小林陽太郎（1982）: 人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効輻射面積に関する研究－2. 椅座裸体の場合の実測と考察－, 日本建築学会論文報告集, 第 322 号：92-100.

4) 堀越哲美, 宮原英男, 小林陽太郎（1978）: 人体と矩形面との間の形態係数および人体の有効輻射面積に関する研究－1. 算出理論と椅座着衣の場合の実測－, 日本建築学会論文報告集, 第 268 号：109-118.

5) Fanger P. O., O. Angelius and P. Kjerulf-Jensen(1970): Radiation Data for the Human Body, ASHRAE Transactions, Vol. 76-Ⅱ, pp.338-373.

6) 佐古井智紀, 持田徹, 堀越哲美, 石井仁（2000）: 鏡曲面を用いた形態係数の測定, 第24回人間－生活環境系シンポジウム報告集：77-80.

7) 桑原浩平, 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實, 丹羽俊夫（2001）: 相互反射を考慮した平均放射温度の検討, 空気調和・衛生工学会北海道支部学術講演会論文集：107-110.