



Title	サーマルマネキンの局所および平均対流熱伝達率
Author(s)	桑原, 浩平; 持田, 徹; 長野, 克則 他
Description	第6回衛生工学シンポジウム (平成10年11月5日 (木) -6日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 測定・解析 . P5-5
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 6, 167-172
Issue Date	1998-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7343
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-5-5_p167-172.pdf



5-5

サーマルマネキンの局所および平均対流熱伝達率

○桑原 浩平（北海道大学大学院） 持田 徹（北海道大学大学院）
長野 克則（北海道大学大学院） 嶋倉 一實（北海道大学大学院）
中谷 貴弘（札幌市役所） 松永 和彦（いすゞ自動車）

1. 研究の背景と目的

人体と環境との間の主な熱交換は、対流・放射・蒸汗であるが、そのうち対流放熱量は、対流熱伝達率・温度差・面積の3つの積で表される。人体の対流熱伝達率については、過去多くの研究者によって種々の式が提案されてきた。その代表的な算出法には、人体実験を主とする方法と、熱伝達論を主とした理論的な方法とがある。前者によれば、関連する実験パラメータを観測して間接的に“人の対流熱伝達率”を得ることができるが、測定法や測定誤差などによりデータのばらつきを伴うことは過去の研究を見ても明らかである。一方、後者は人体と等価な円筒や角柱の代表長さを決め、それに対して対流熱伝達に関する無次元式を適用して、そこから算出式を導くものである。この方法によれば、無次元式から一義的に対流熱伝達率が求まるが、問題は複雑な形状をした人体を、如何に無次元式を適用できるように球や円筒などに単純化できるかにある。さらに、最近になって人体の熱特性を模擬したサーマルマネキンが開発されたので、それを用いて対流熱伝達率を算出することが可能となった。この方法は、形状的な点から人体の対流熱伝達率に近いものが得られるものと考えられ、またデータのばらつきも比較的少ない。

本研究では、人体の熱特性を考慮したサーマルマネキンを用いて、日常の室内風速域における対流熱伝達率を測定し、過去に発表された諸式との比較検討を試みる。

2. サーマルマネキンによる対流熱伝達率に関する基礎実験

2-1 サーマルマネキンを用いることの利点と欠点

人体に関する対流熱伝達率は、被験者実験を行って求めることが本筋である。しかし、人は複雑な形状をしており、また、様々な姿勢をとるので、その対流熱伝達率を求める実験は困難を要する。人には個人差があり、また、同一被験者でも実験のたびに必ずしも同じ測定値を示すとは限らず、むしろデータのばらつきは大きい。例えば、ある部位の皮膚温を測る場合を考えると、熱電対やサーミスターを貼った場所が、同一被験者でも偶々血管直上にあった場合と、少しずれた位置で測った場合では違った値を示し、さらに、部位毎に異なる皮膚温から全身の平均値を算出する過程で、多数提案されている平均化式のいずれを採用するかによっても違いが出てくる。このよ

表-1 対流熱伝達率に及ぼす皮膚温の影響

平均皮膚温 Ts[°C]	33.0	33.2	33.4	33.6	33.8	34.0
対流熱伝達率 hc[W/m²°C]	4.07	3.71	3.37	3.07	2.78	2.51

表-1の値は裸体時の熱平衡式より導かれる次式に、下記の裸体時の快適値を代入して試算した。

$$hc = \frac{M - Esk}{T_{sk} - T_a} - hr$$

産熱量 M=58.2 W/m²、蒸汗放熱量 Esk=11.6 W/m²、気温 (=放射温) Ta=28°C、放射熱伝達率 hr=5.22 W/m²°C

うな問題点に関して、平均皮膚温に1℃の差があった場合、最終的に対流熱伝達率の値に及ぼす影響をみたのが表-1である。表-1の結果から、平均皮膚温が33℃と34℃の1℃の違いで、対流熱伝達率の値に50%程度の差が見られるが、実測値そのものの誤差の他に、平均皮膚温の算出式が10数種提案されていることを考慮すると、どの算出式を用いるかにより、平均皮膚温の算出に0.5~1℃位の差、即ち後述の実験式に見られるように、対流熱伝達率に換算して倍近い開きはたびたび起こり得るものと想像できる。以上の点を考慮して、人体の対流熱伝達率を求める為に、本研究でサーマルマネキンを用いる理由は、第一に人体とほぼ同じ形態をしており、かつ、椅座あるいは立位など、任意の姿勢をとれること。第二に2-2節で述べるように人の熱的特性に近い制御がなされていること。第三にサーマルマネキンは無生物であるので、実測値に再現性があること、などの利点が主な理由である。なお、本サーマルマネキンは蒸汗および呼吸による放熱機能を有していないが、快適状態に近い環境では、蒸汗および呼吸の湿性放熱は、ほぼ一定値と取り扱えるので、使用条件を逸脱しない環境で実験を行えば、実際の人体に近い対流熱伝達率が得られるものと考えられる。

2-2 実験で使用したサーマルマネキンの熱特性

本実験で用いたサーマルマネキンを図-1に掲げる。これは、デンマーク工科大学断熱研究所(T. L. Madsen 教授)、いすゞ自動車株式会社およびお茶の水女子大学により共同製作されたものである。その概要を以下に記す^①。

サーマルマネキンの外殻は4mm厚のグラスファイバーで補強されたポリエステル製であり、0.3mmφのニッケルワイヤーが2mm以下の間隔で全身に巻かれている。保護のため0.1mmから10分の数ミリの塗料によって全身が被われている。温度計測と発熱を同じ導線を用いることで制御を行っている。導線保護のための塗料の厚みは充分薄いので測定された温度はほぼ皮膚温度と同じと見なせる。また、従来のサーマルマネキンと異なり、温度測定を同じ導線で行うことにより、分割された各部位の平均温度が計測されるという利点がある。表-2にサーマルマネキンの分割部位、計測された表面積を示す。全身は左右の不均一な環境を評価できるように16分割されている。個々の部分の形状が実際の人体に比較して簡略化されているので、体表面積は実際の人体よりやや小さい値となっている。各部位毎に制御・計測システムを内蔵しており、制御計測用コンピュータからのコントロールシグナルにより、各部位へ必要な電力量がパルスの形で供給されている。各部位へ供給される電力量は次の式(1)で表される拘束条件式に基づいている。

$$T_{sk}=36.4-0.054H \quad (1)$$

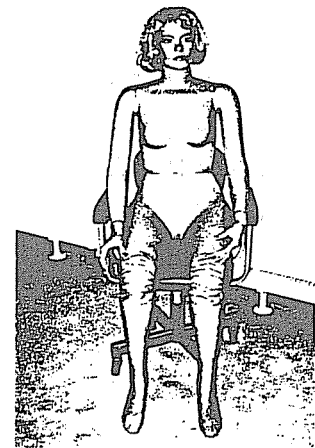


図-1 サーマルマネキン

表-2 マネキンの分割部位と表面積

	部位名	表面積 (㎡)
1	左足 (Left Foot)	0.0446
2	右足 (Right Foot)	0.0437
3	左下腿 (Left Leg)	0.0892
4	右下腿 (Right Leg)	0.0879
5	左大腿 (Left Thigh)	0.1630
6	右大腿 (Right Thigh)	0.1670
7	腰(Crotch)	0.1740
8	頭(Head)	0.1100
9	左手 (Left Hand)	0.0397
10	右手 (Right Hand)	0.0394
11	左前腕 (Left Arm)	0.0490
12	右前腕 (Right Arm)	0.0500
13	左上腕 (Left Shoulder)	0.0736
14	右上腕 (Right Shoulder)	0.0778
15	胸(Chest)	0.1380
16	背(Back)	0.1270
	全身(Total)	1.4739

ここに、

Tsk : サーマルマネキンの平均表面温度 [°C]

H : サーマルマネキンへの供給電力量
(= 顕熱損失量) [W/m²]

式(1)は Fanger の快適方程式において、気温と湿度を一定値と仮定することにより導かれている。16 分割されている各部位は、この式(1)を満たすように制御されている。

2-3 サーマルマネキンを用いた対流熱伝達率の実験

“人体”に関する対流熱伝達率を求めるために、試験室でサーマルマネキンを用いた実験を行なった。表-2 に示す設定条件の下に、60~90 分間サーマルマネキンを裸体状態で曝露し、気温、壁温、湿度、気流速度、サーマルマネキンの表面温度および供給電力量を測定した。対流熱伝達率は、定常状態においてサーマルマネキンと環境との間に成り立つ熱平衡式(2)より導かれる、式(3)を用いて算出した。

$$H=C+R+D=\zeta hc(Tsk-Ta)+\xi hr(Tsk-Tr)+D$$

$$=h(Tsk-To)+D \quad (2)$$

$$hc=\left(\frac{H-D}{Tsk-To}-\xi \cdot hr\right)/\zeta \quad (3)$$

ここに、

C : 対流放熱量 [W/m²] R : 放射放熱量 [W/m²] D : 伝導放熱量 [W/m²]

ζ : 有効対流面積率 [-] hc : 対流熱伝達率 [W/m²°C] Ta : 気温 [°C]

ξ : 有効放射面積率 [-] hr : 放射熱伝達率 [W/m²°C] Tr : 平均放射温度 [°C]

h : 総合熱伝達率 [W/m²°C] (h = $\zeta hc + \xi hr$)

To : 作用温度 [°C] (To = ($\zeta hcTa + \xi hrTr$) / ($\zeta hc + \xi hr$))

図-2 に示す気流発生装置を製作し、その前にサーマルマネキンを配した(図-3)。図-3 の正面図における黒点が気流の測定点であり、等間隔に計 27 点設けた。この 27 点における気流の平均値をデータとして使用した。なお、サーマルマネキンの平均表面温は表-2 に示した各部位の表面積に基づく面積加重平均値とした。

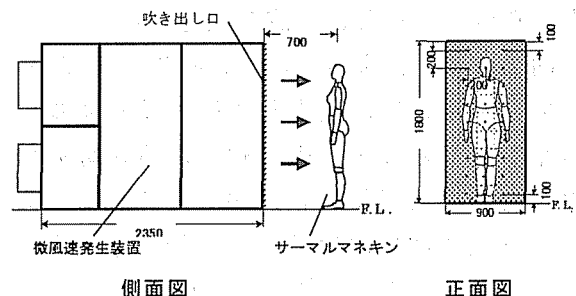


図-3 実験状態

3. 対流熱伝達率に関する実験の結果と考察

各実験の測定値はそれぞれ安定して得られたので、データの一例として、環境側の気温と

表-3 実験の設定条件

気温 [°C]	18~20
相対湿度 [%]	50
気流速度 [m/s]	静穏状態, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9, 1.1
姿勢	椅座, 立位
着衣状態	裸体

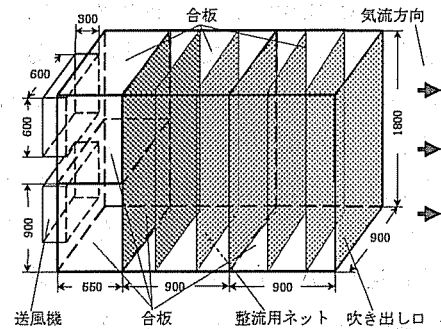


図-2 気流の発生装置

湿度および気流を図-4と表-4に掲げる。また、サーマルマネキンのデータを図-5に示す。

図-4に見られるように、上下の室温分布はほとんどなく、相対湿度はほぼ50%で安定している。表-4から、測定した気流は、ほぼ均質であると判断できる。また、図-5より気流速度が大きい場合はサーマルマネキンの表面がより冷却されるため、気流が低い場合に比べて表面温度が低く、供給電力量は大きいことがわかる。これは拘束条件式である式(1)に基づく制御の結果である。

全身の平均対流熱伝達率を算出する際に、有効放射面積率は椅座状態で0.76、立位状態で0.82とし、有効対流面積率は両姿勢とも1.0として計算している。

図-6~図-16に全身と各部位の対流熱伝達率の実測結果を示す。また、表-5に全身と各部位の対流熱伝達率の回帰式を一覧して掲げる。なお、気流発生装置を動かさない状態での静穏気流は計測の結果0.1m/sであった。全身の対流熱伝達率をみると、静穏状態では椅座・立位の両姿勢に差異は見られないものの、気流が大きい場合は立位状態の方が対流熱伝達率は大きいことを示している。気流が小さい場合の立位状態では、自然対流の影響によってサーマルマネキンの上半身の表面近傍で境界層が発達し、これが対流熱伝達を減少させていると考えられる。また、気流の大きい領域において両姿勢に差がみられるのは、気流に対する位置関係の相違によるもので、特に大腿についてはこれが大きく影響している。椅座状態において値が小さい原因としては、サーマルマネキン表面と椅子との接触による伝導放熱や気流の分布形状の相違が考えられる。また、立位状態における対流熱伝達率の方が気流の影響を受けやすい傾向がみられるが、このことは各部位についても同様であった。なお、上肢と下肢の左右には差が見られなかった。

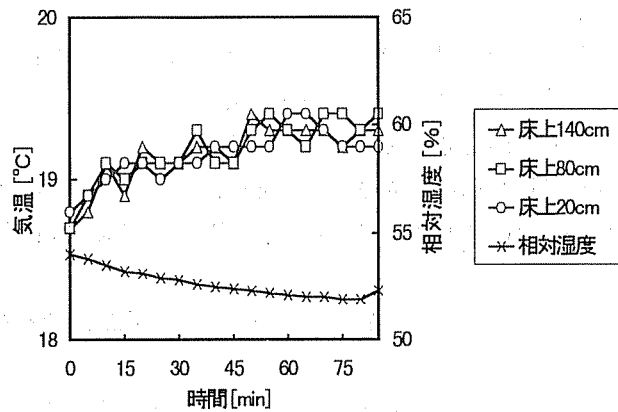


図-4 気温の垂直分布と湿度の時間変化

表-4 気流速度の測定結果

設定値[m/s]	測定値[m/s]	標準偏差[m/s] (空間変異)
0.3	0.30	0.022
0.4	0.39	0.021
0.5	0.52	0.022
0.7	0.71	0.033
0.9	0.91	0.041
1.1	1.11	0.045

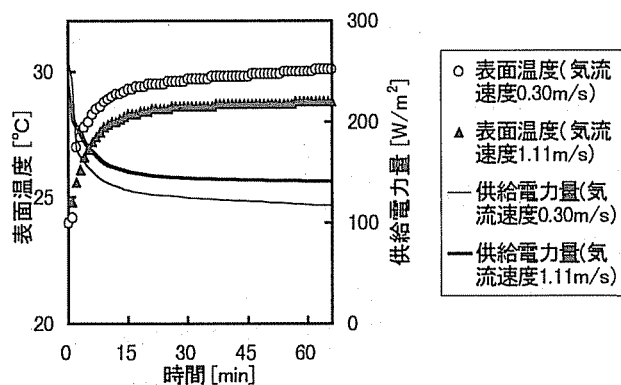


図-5 サーマルマネキンの表面温度と供給電力量の時間変化

と考えられる。また、気流の大きい領域において両姿勢に差がみられるのは、気流に対する位置関係の相違によるもので、特に大腿についてはこれが大きく影響している。椅座状態において値が小さい原因としては、サーマルマネキン表面と椅子との接触による伝導放熱や気流の分布形状の相違が考えられる。また、立位状態における対流熱伝達率の方が気流の影響を受けやすい傾向がみられるが、このことは各部位についても同様であった。なお、上肢と下肢の左右には差が見られなかった。

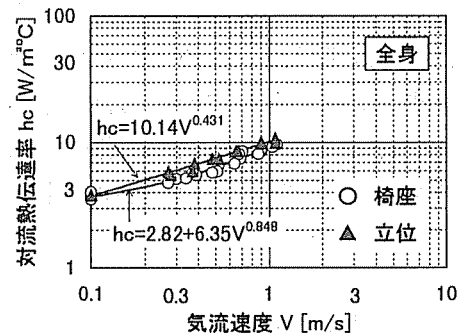


図-6 全身の平均対流熱伝達率

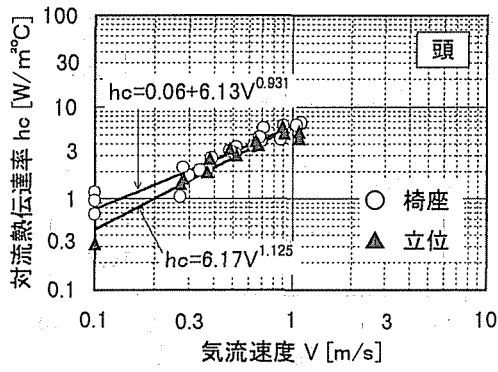


图-7 局所対流熱伝達率（顔頭）

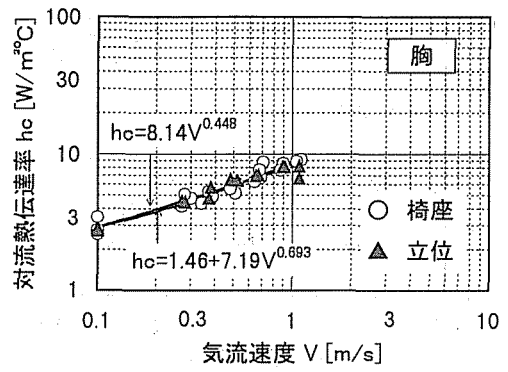


图-8 局所対流熱伝達率（胸）

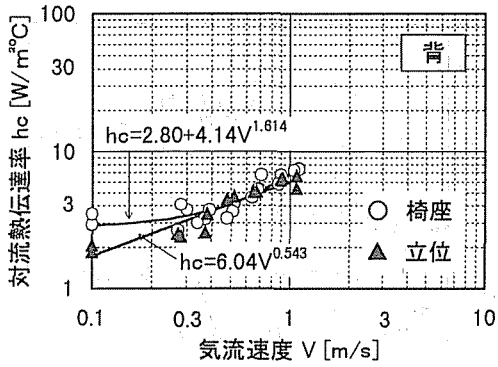


图-9 局所対流熱伝達率（背）

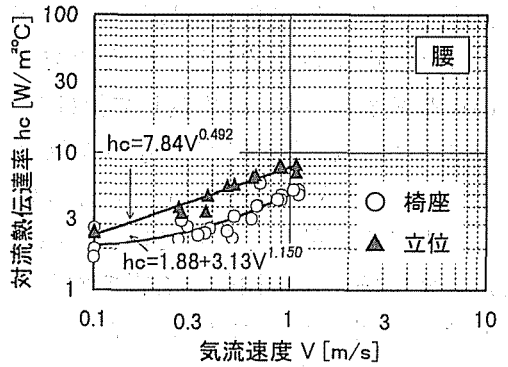


图-10 局所対流熱伝達率（腰）

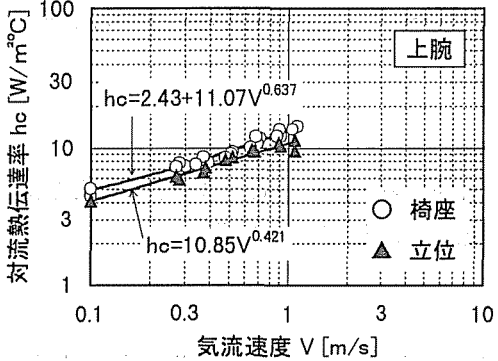


图-11 局所対流熱伝達率（上腕）

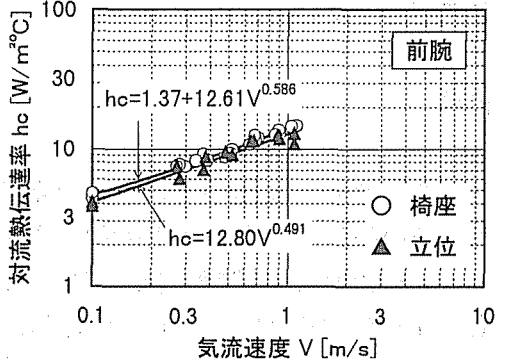


图-12 局所対流熱伝達率（前腕）

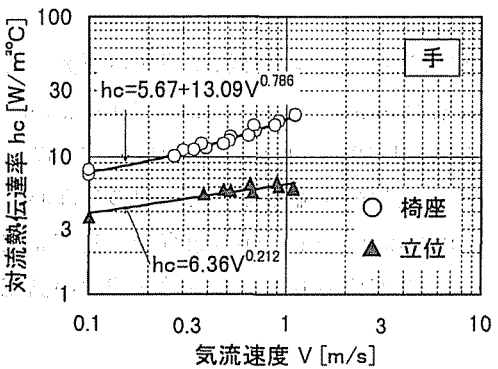


图-13 局所対流熱伝達率（手）

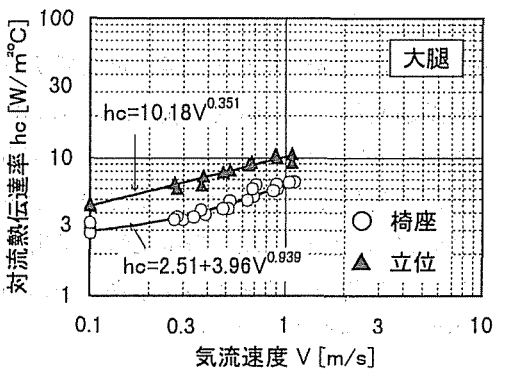


图-14 局所対流熱伝達率（大腿）

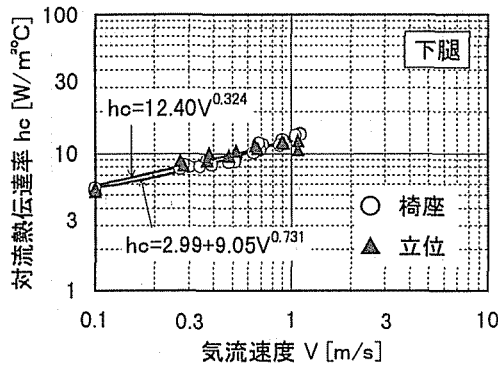


図-15 局所対流熱伝達率（下腿）

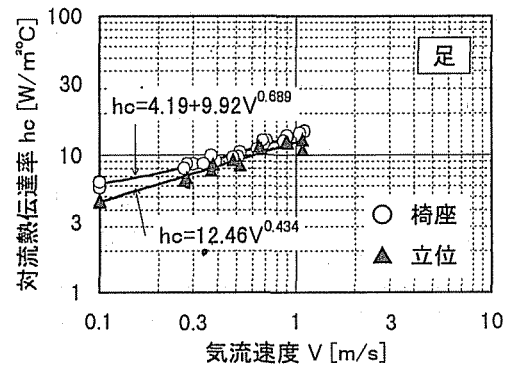


図-16 局所対流熱伝達率（足）

低風速での自然対流を考慮した Colin ら^②、石垣ら^③および市原らの式^④と、本実験で得られた全身の回帰式を図-17 に比較して掲げる。Colin らの結果では各風速で椅座の方が立位より大きな値となっているが、市原らと筆者らの結果は Colin らとは逆の結果となっている。Colin らは人を用いた実験により回帰式を得ており、一方、市原らと筆者らはサーマルマネキンを用いた実験の結果のため、これが被験者とマネキンに起因するかは判らない。この点に関しては、今後の検討課題としたい。

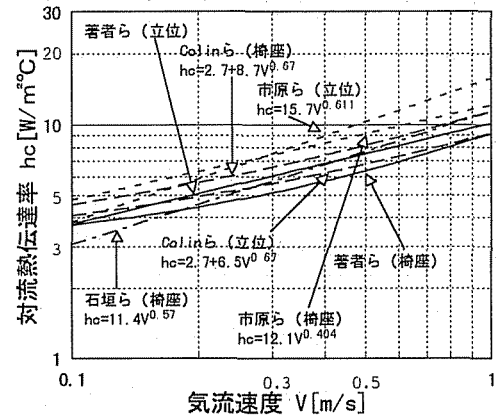


図-17 過去の実験式との比較

4. 結言

サーマルマネキンを用いて、人体の全身平均および部位毎の対流熱伝達率を求める実験を行った。その結果、椅座および立位状態の平均対流熱伝達率として次式を得た。

$$\text{椅座} : hc = 2.82 + 6.35V^{0.848} \quad (0.1 \leq V \leq 1.1)$$

$$\text{立位} : hc = 10.14V^{0.431} \quad (0.1 \leq V \leq 1.1)$$

また、強制対流域において、人体の対流熱伝達率は椅座状態より立位状態の方が大きく、立位状態の方が気流の影響を受けやすいことが観察された。

引用・参考文献

- ①田辺新一、長谷部ヤエ：皮膚温度可変型サーマルマネキンによる室内環境評価法に関する研究、建築学会計画系論文集，第 448 号，pp. 1-8，1993 ②J. Colin and Y. Houdas, Experimental determination of coefficient of exchanges by convection of human body, J. Appl. Physiol. 22, pp. 31-38, 1967. ③石垣秀圭，堀越哲美，持田徹，土川忠浩，磯田憲生，久保博子：人体の対流熱伝達と風速の生理心理反応に及ぼす影響，空気調和・衛生工学会学術講演論文集，pp. 865-868，1991 ④市原真希，斉藤正文，西村美加，田辺新一：サーマルマネキンを用いた立位・座位人体各部位の放射・対流熱伝達率の測定，建築学会計画系論文集，第 501 号，pp. 45-51，1997