

INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN-ENVIRONMENT SYSTEM (TOKYO 1991)

708
PRESENTATIONEXPERIMENTAL STUDY ON CONVECTIVE HEAT TRANSFER
COEFFICIENT OF THE HUMAN BODY

OHidekado ISHIGAKI*¹, Tetsumi HORIKOSHI*², Tomoki UEMATSU*³,
Masato SAHASHI*⁴, Tadahiro TSUCHIKAWA*⁵, Tohru MOCHIDA*⁶,
Tetsuya HIEDA*⁷, Norio ISODA*⁸, Hiroko KUBO*⁸

*1 Toho Gasu Co. Ltd.

*2 Nagoya Institute of Technology

*3 Kajima Corp.

*4 Takenaka Corp.

*5 Gifu National College of technology

*6 Hokkaido University

*7 J.Morita Corp.

*8 Nara Woman' University

It is most important to calculate convective heat loss from the human body in the study of the effect of wind upon the human body. The convective heat transfer coefficient of the human body is essential to predict convective heat loss and the effect of air movement upon the human body, even in the calculation of the operative temperature in radiant environment. Moreover, local convective heat transfer coefficient is necessary to estimate the effect of local wind on the local skin surface of the person. The objective of this paper is to calculate convective heat transfer coefficient of the human body by a heat flow meter, and to estimate new weighting coefficients for calculating mean skin temperature involving the wind effect and thermally equivalent sphere and cylinder to the human body. Four kinds of experiments were conducted to measure the dry heat loss by heat flow meter in an artificial climate chamber. Designed wind speeds were as follows: natural convection, mixed convection(0.15, 0.25m/s), 0.4, 0.5, 0.6, 1.0 and 1.5m/s. Air temperature was selected from 20, 24, 25, 28° C in each experiment. Skin temperatures and local heat flow were measured on 9 points of the local skin surface. The following results were obtained. The experimental formulae of the convective heat transfer coefficient for the whole body, h_c , were obtained by regression analysis as follows:

$$h_c = 1.0 \Delta T^{0.33} \quad \text{for natural convection}$$

$$h_c = 11.4 V^{0.57} \quad \text{for forced convection}$$

$$h_c = 93.7 V^{0.257} / \Delta T^{1.28} \quad \text{for mixed convection}$$

The local convective heat transfer coefficient and the weighting coefficient of calculating mean skin temperature were estimated. Diameters of thermally equivalent sphere and cylinder of the human body were calculated as 12.9 cm and 12.2 cm, respectively.

人体の対流熱伝達率に関する実験的研究

○石垣 秀圭^{*1} 堀越 哲美^{*2} 植松 智樹^{*3} 佐橋 政人^{*4}
 土川 忠浩^{*5} 持田 徹^{*6} 稗田 哲也^{*7} 磯田 憲生^{*8} 久保 博子^{*8}
^{*1}東邦ガス ^{*2}名古屋工業大学 ^{*3}鹿島建設 ^{*4}竹中工務店
^{*5}岐阜工業高等専門学校 ^{*6}北海道大学 ^{*7}モリタ製作所 ^{*8}奈良女子大学

1. 研究の目的

人間の側に立脚した熱環境を設計するための温熱指標、例えば新有効温度¹⁾やPMV²⁾が基礎とする熱平衡式中の対流熱流量の算出には対流熱伝達率が必要である。この対流熱伝達率については多くの研究が行われているが日本人に対する研究は殆ど行われていない。そこで本研究では、日本人に対する人体の対流熱伝達率を求め風速の人体影響について検討を行った。最近精度の向上した熱流計を使用し、被験者を用いた生理的実験によって人体の顕熱放散量を測定し、対流放熱量を算定した上で人体の全身対流熱伝達率および人体部位対流熱伝達率を求める。さらに、求められた人体の対流熱伝達率を用いて、風速の影響を加味した平均皮膚温算出用の重み係数を求め、人体モデルとして対流熱伝達的に人体と等価な球および円柱の代表径の算出を行った。

2. 実験計画

本研究は表1に示すEX#1、EX#2、EX#3、EX#4の4種の実験を行った。EX#1では低風速および自然対流域で実験を試み、EX#2では高風速域へ拡張し、また気流方向の影響を調べた。さらに、EX#3では未だに解明されていない自然対流と強制対流が共存している混合対流域で実験を行った。EX#4では床暖房時の自然対流について実験を行った。

湿度は各実験とも相対湿度50%を目標として設定した。気温、湿度は床上高さ80cm付近でアスマン乾湿計にて測

定した。上下気温分布測定はアルミ箔の放射よけを装着した0.2mmφもしくは0.3mmφT熱電対で行った。平均放射温度は気温と等しくした。風速は熱式風速計にて人体前方80cm付近で高さ分布を測定した。皮膚温の測定は0.2mmφT熱電対で行い、人体顕熱放散量は熱電堆型熱流計で測定した。人体の平均皮膚温および平均顕熱放散量はHardy-DuBoisの7点³⁾または7点に肩胛棘・下腿後の2点を加えた9点による面積重み平均で平均値の算定を行った。被験者は各設定条件に正味10分間暴露した。

3. 人体の自然対流熱伝達率

自然対流熱伝達率 hc_n はMcAdams⁴⁾によれば次熱伝達率の無次元式から次式のように書き表すことができる。

$$hc_n = a (\Delta T)^n \quad (1)$$

ΔT : 皮膚温と気温の温度差 $^{\circ}\text{C}$

本研究で得られたデータを用いて、式(1)の実験回帰式を求める。図1に気温と平均皮膚温の温度差と全身自然対流熱伝達率の関係を示す。本研究は、Nielsenら⁵⁾の"sitting manikin"による研究、およびBirkbak⁶⁾の2m円柱を用いた研究とほぼ等しい結果となった。これはNielsenらの研究はマネキンを用いているものの、本研究と同様に裸体椅座位での実験であり、人体とも相似しているため、本研究と等しい値となった。図2に部位皮膚温と気温の温度差と人体部位対流熱伝達率の関係を示す。下腿を除いて全て対数目盛りで正勾配の直線となっているが、全身対流熱伝達率と比較して勾配が急である。

Table 1 Method and instrumentation in this experiment(local body)

Experiment	EX #1	EX #2	EX #3	EX #4
Subject	10 males	3 males	4 males	4 males
Position	sedentary	sedentary	sedentary	sedentary
Air Temp. $^{\circ}\text{C}$	20, 24, 28	28	20, 24, 28,	25
Air Vel. m/s	0.25, 0.6	0.4, 1.0, 1.5	0.15, 0.5, 1.0	n.c.
	n.c.		n.c., m.c.	
Direction	F	F, S, R	F, R	FT=30, 35 $^{\circ}\text{C}$
Mes.P. cm	70	40, 80, 120	10, 40, 80, 120	
MST	7 points	9 points	9 points	9 points
HFR	4 points	9 points	9 points	9 points
TSV	---	WB	WB	WB, LP

Temp.: Temperature Vel.: Velocity Mes.P.: Measuring Point FT: floor temperature
 MST: measuring point number to calculate mean skin temperature
 HFR: measuring point number to calculate mean dry heat flow rate
 TSV: Thermal Sensation Vote WB: whole body LP: local point
 n.c.: natural convection m.c.: mixed convection F: front S: side R: rear

人間—生活環境系国際会議 (東京 平成3年12月)

Table 2 Waiting coefficient for calculating mean skin temperature

	Hardy-DuBois	Mochida	0.2 m/s	0.5 m/s	1.0 m/s
forehead	0.07	0.11	0.07	0.07	0.07
upper arm		0.07			
forearm	0.14	0.13	0.14	0.17	0.17
hand	0.05		0.03	0.04	0.04
chest	0.35	0.28	0.31	0.35	0.40
anterior thigh	0.19	0.21	0.15	0.17	0.20
shin	0.20	0.20	0.23	0.28	0.34
total	1.00	1.00	0.93	1.08	1.22

Table 3 Thermally equivalent sphere and cylinder to the human body

	spherical diameter	cylindrical diameter
whole body	12.9	12.2
forehead	17.1	16.1
forearm	18.0	11.9
hand	21.5	20.3
chest	19.6	18.5
anterior thigh	27.1	25.6
shin	7.8	8.2
Mochida		18
Ibamoto	30	
Rapp	75	30

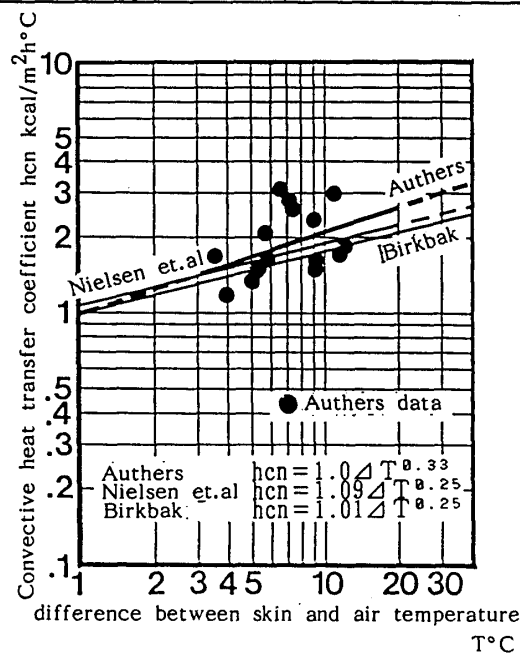


Fig.1 Convective heat transfer coefficient with temperature difference between skin and air(whole body)

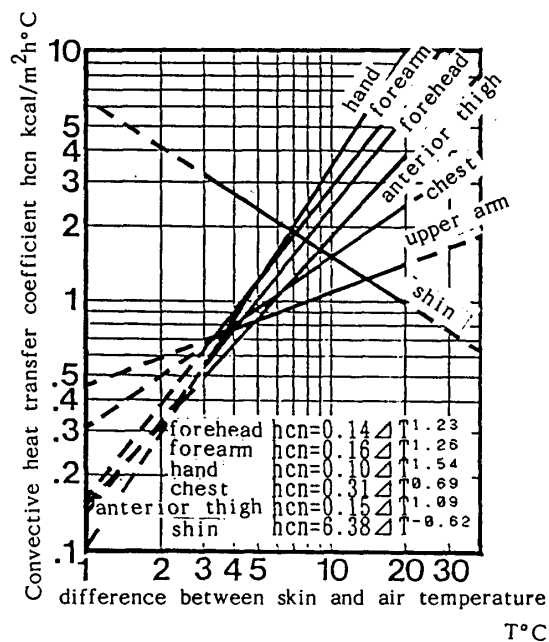


Fig.2 Convective heat transfer coefficient with temperature difference between skin and air(local body)

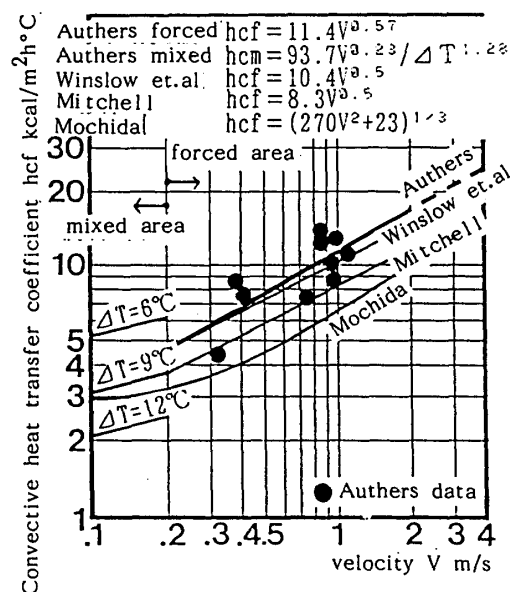


Fig.3 Relationship between air velocity and convective heat transfer coefficient (whole body)

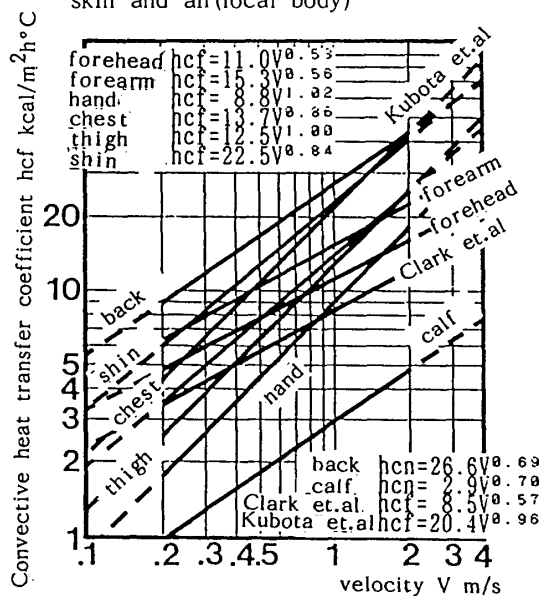


Fig.4 Relationship between air velocity and convective heat transfer coefficient

人間—生活環境系国際会議 (東京 平成3年12月)

4. 人体の強制対流熱伝達率

Hilpert⁷⁾は強制対流熱伝達率 h_{cr} を無次元式より次式のように表した。

$$h_{cr} = a V^n \quad (2) \quad V: \text{風速} \quad \text{m/s}$$

本研究で得られたデータを用い、式(2)の実験式を求める。図3に風速と人体強制対流熱伝達率との関係を示す。ここで風速は被験者前方で測定した上下分布風速の平均値とした。本研究で得られた強制対流熱伝達率はASHRAEで採用されているMitchellら⁸⁾の式と比較してやや大きな値となっている。本研究は風速の測定メッシュがMitchellらの研究に比べて大きく、風速を過小に評価したものと考えられる。既往の研究の中で本研究にもっとも近いものはWinslowら⁹⁾の古典的な式であるが、Winslowらの実験では被験者の姿勢がほぼ水平に近いリクライニング状態で、風速を人体表面から数cmの位置で測定しており、本研究とは単純に比較はできない。図4に風速と人体部位強制対流熱伝達率との関係を示す。手背および大腿は気流に対して水平な部位で平行の気流を受けるので他の部位より小さな値となっている。下腿、前膊外、前額、胸部は気流を正面から受け、これらの部位直前では乱れが大きく比較的大きな値となっている。本研究と同様な手法でClarkら¹⁰⁾、窪田ら¹¹⁾は頭部の対流熱伝達率を詳細に求めている。Clarkらのデータと比較した結果、本研究の頭部対流熱伝達率は近い値となっている。窪田らの実験では風速として噴流を用いたので本研究とは大きく隔たっている。

5. 混合対流領域での人体対流熱伝達率

Rapp¹²⁾によれば混合対流領域では風速の範囲が0.05~0.2m/sの所であり、風速が0.05m/s以下では自然対流、0.2m/s以上では強制対流としている。混合対流に対する無次元式を求めるため次のような展開を行った。対流熱伝達に関する無次元式¹³⁾は次式のように書き表せる。

$$Nu = k \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot Gr^c \cdot Gz^d \quad (3)$$

k, a, b, c, d : 定数 Nu : ヌセルト数

Re : レイノルズ数 Pr : プラントル数

Gr : グラスホフ数 Gz : グレツ数

自然対流で特徴的な無次元数はグラスホフ数 Gr であり、強制対流で特徴的な無次元数はレイノルズ数 Re である。混合対流では、自然対流と強制対流の混合であることから(3)式中のグラスホフ数とレイノルズ数を変数として採用し、本実験で一定値と見なせるものをまとめると、最終的に次式となる。

$$h_{cm} = k' v^a \cdot (\Delta T)^b \quad (4)$$

本研究の風速が0.1m/sから0.2m/sの範囲のデータと(4)式を用いて次の回帰式を得た。

$$h_{cm} = 93.7 V^{0.257} / \Delta T^{1.28} \quad (5)$$

図3の風速0.1m/sから0.2m/sの範囲に(5)式を描いた。混合対流領域では風速が大きくなるほど、また皮膚温と

気温の温度差が小さくなるほど混合対流熱伝達率は大きくなる傾向がみられ、ここで特徴的なことは、風速による勾配が強制対流領域と比較して緩やかなことである。持田¹⁴⁾の自然対流の影響を考慮した強制対流熱伝達率の式と比較してもこの傾向は一致する。

6. 対流放熱量を考慮した平均皮膚温算定のための重み係数と人体モデルの作成

持田¹⁵⁾は人体部位別の熱収支式を基礎とした平均皮膚温算定用重み係数を提案したが、その実験値について求めていなかった。本研究で求めた部位対流熱伝達率を用いて、この重み係数を算出することが可能となった。以後この重み係数を風速重み係数と呼ぶ。表3にHardy-DuBoisの面積重み係数と、風速0.2m/s、0.5m/s、1.0m/sの時の風速重み係数を示す。面積が小さく風速の影響を受けにくい前額・手背は面積重み係数と変わらないが、風速の影響を受けやすい胸部・大腿・下腿は風速が大きくなるほど風速重み係数が大きくなる。

本研究では、McAdamsの球の対流熱伝達率およびHilpertの円柱の対流熱伝達率の式に本研究の実験データを代入することによって対流熱伝達的に人体と等価な球および円柱の直径を逆算した。その計算結果を表4に示す。等価球直径は全身で12.9cmとなり射場本¹⁶⁾の30cmを下回る結果となった。部位については大腿がもっとも大きく、下腿でもっとも小さい値となった。等価円柱直径は全身で12.2cmとなり持田、Rappの値より小さい結果となった。

7. 結論

以上を総括し、本研究の結論を以下に示す。

○生理学的実験によって、次に示す人体の対流熱伝達率の実験式を求めた。

$$h_{cn} = 1.0 \Delta T^{0.33} \quad (\text{自然対流})$$

$$h_{cr} = 11.4 V^{0.57} \quad (\text{強制対流})$$

$$h_{cm} = 93.7 V^{0.257} / \Delta T^{1.28} \quad (\text{混合対流})$$

○人体各部位の対流熱伝達率を考慮した平均皮膚温算定のための風速重み係数を実験によって提案した。また、人体モデルとして等価球直径12.9cm、等価円柱直径12.2cmを得た。

【引用文献】

- 1) Gagge, A. P. et al.: ASHRAE Trans., 77, 247-262, 1971
- 2) Fanger, P. O.: "Thermal Comfort", McGraw-Hill, 35-37, 1970
- 3) Hardy, J. D. et al.: J. Nutr., 15, 1938
- 4) McAdams: "Heat Transmission", McGraw-Hill, 1954
- 5) Nielsen, L. et al.: Acta Physiol. scand. 27, 272, 1952
- 6) Birkebak, R. C.: Inter. Rev. Gen. & Exp. Zoology, 2, 269-344, 1966
- 7) Hilpert, R.: Forsch. Gebiete Ingenieurw., 4, 215-224, 1934
- 8) Mitchell, D.: Butterworth Publishing Inc., London, 59, 1974
- 9) Winslow, C.-E. A. et al.: Am. J. Physiol., 127, 505-518, 1939
- 10) Clark, R. P. et al.: J. Physiol. (London), 244, 295-302, 1975
- 11) 窪田ら: 日本建築学会学術講演梗概集, 865-866, 1989
- 12) Rapp, G. M.: ASHRAE Trans., 79, 75-87, 1973
- 13) 木村: "建築設備基礎理論演習", 学献社, 1970
- 14) 持田: 日本建築学会計画系論文報告集, 258, 63-66, 1977
- 15) 持田: 日本建築学会計画系論文報告集, 259, 67-73, 1977
- 16) 射場本: 東京大学学位論文, 1956