

高風速域における人体対流熱伝達率の実測

○桑原浩平* 持田 徹* 近藤 基* 松永和彦**

*北海道大学 **いすゞ自動車(株)

Measurement of Convective Heat Transfer Coefficient of the Human Body in High Air Velocity

Kouhei KUWABARA* Tohru MOCHIDA* Motoo KONDOU* Kazuhiko MATSUNAGA**

*HOKKAIDO University **ISUZU Motors Ltd.

Many equations involving the convective heat transfer coefficient of the human body were proposed. They assume the indoor environment so that they can only use the low air velocity area. Authors need the convective heat transfer coefficient of the human body for the high air velocity area because we studied about the evaluation of the thermal sensation in outdoor environment.

People normally wear clothes in outdoor environments, but the convective heat transfer coefficient of the human body proposed until now assumed a naked body. Therefore, the convective heat transfer coefficient of the clothed human body was measured, and two conditions were compared.

1. はじめに

人体の対流熱伝達率については、これまで生理学及び生体工学などの分野から数多くの提案がなされてきた。しかし、それらは通常の室内環境を想定したものであるため、風速が 0.1~1.0m/s の範囲内で実験が行われているのがほとんどである。屋外環境の温熱性を評価する際にも、人体の対流熱伝達率は重要な役割を果たすが、屋外では風速が 1.0m/s 以上になることが多く、これまでに提案されてきた実験式では直ちに対処できない。また、屋外環境の場合は、室内環境に比べ着衣量の変化も大きい。これまでの研究では、裸体又は軽衣での実験が多く、寒冷環境における着衣状態での対流熱伝達率に関する実験はほとんど行われていない。

そこで本研究では、人体の熱特性を模したサーマルマネキン¹⁾を用いて、高風速域及び着衣状態での実験を行い、人体の対流熱伝達率の新たな実験式を提案することを目的とする。

2. サーマルマネキンの対流熱伝達率

人体と環境との顕熱交換は式(1)で表され、対流熱伝達率 h_c について解くと、式(2)が得られる。

$$DRY = h_c (T_{cl} - T_a) + \varepsilon \sigma \left((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right) \quad (1)$$

$$\therefore h_c = \frac{DRY - \varepsilon \sigma \left((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4 \right)}{T_{cl} - T_a} \quad (2)$$

ここで、

DRY : マネキンからの顕熱放熱量 [W/m²]

h_c : 対流熱伝達率 [W/m²°C]

T_{cl} : 平均衣服表面温度 [°C]

T_a : 気温 [°C]

T_r : 平均放射温度 [°C]

ε : 放射率 [N.D.]

σ : Stefan-Boltzmann 定数 (=5.67×10⁻⁸) [W/m²K⁴]

平均放射温度はグローブ温度計についての熱平衡式を解いて求めた。

$$T_r = \sqrt[4]{\frac{h_{cg} (T_g - T_a)}{\varepsilon \sigma} + (T_g + 273)^4} - 273 \quad (3)$$

ここで、

h_{cg} : 球の対流熱伝達率 [W/m²°C]

Table 1 Experimental condition

Air temperature	20, 25, 30 °C
Air velocity	1.0, 2.0, 3.0, 5.0 m/s
Clothed condition	Naked, Clothed
Posture	Standing

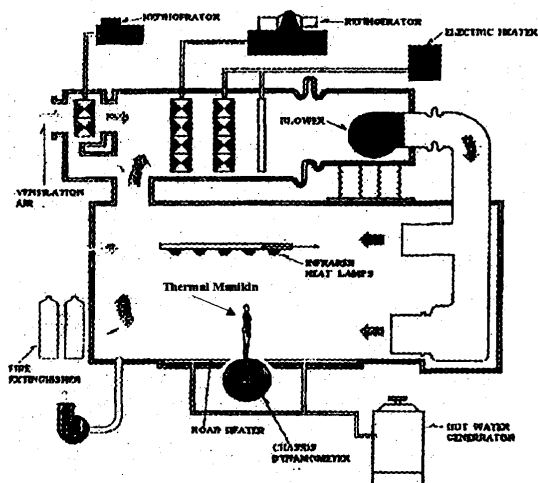


Fig. 1 Experimental equipment

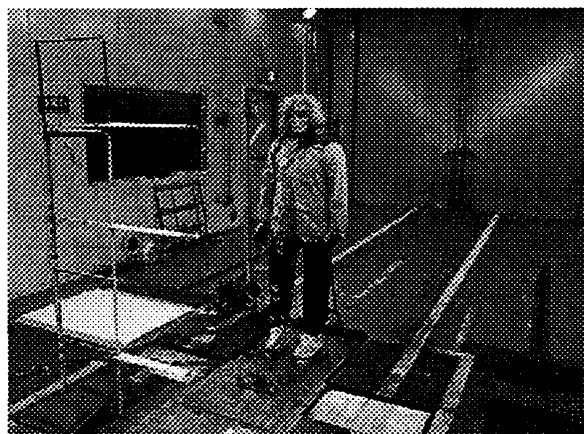


Fig. 2 Thermal manikin

Table 2 Clothing area

	segment	Clothing ensemble 1		Clothing ensemble 2	
		area[m]	ratio	area[m]	ratio
1	head	0.110	0.055	0.110	0.047
2	upper arm	0.211	0.104	0.279	0.120
3	forearm	0.197	0.098	0.208	0.090
4	hand	0.079	0.039	0.119	0.051
5	body	0.315	0.156	0.423	0.183
6	pelvis	0.316	0.157	0.325	0.140
7	thigh	0.437	0.217	0.463	0.200
8	leg	0.263	0.130	0.215	0.093
9	foot	0.088	0.044	0.176	0.076
	Total	2.017	1	2.319	1

Table 3 Clothing ensemble

Clothing ensemble 1	Clothing ensemble 2
Undershirt	Undershirt
Underpants	Underpants
Trousers	Sweat(×2)
Shirt sleeve	Shirt sleeve
Trainer	Trainer
Socks	Socks
	Shoes
	Anorak
	Gloves

T_g : グローブ温度 [°C]

3. 実験概要

実験は、いすゞ自動車(株)所有の Hot tunnel を使用して行なった。実験室の仕様を図 1 に示す。表 1 に示す実験条件の下にサーマルマネキンに曝露し、気温、放射温、気流速度、サーマルマネキンの表面温度、衣服表面温度、供給電力量を測定した。実験風景を図 2 に示す。実験着衣は、本研究室で衣服表面積を測定したものを使用した(表 2)。実験時の服装については表 3 に示す。裸体時と着衣時での熱伝達率の差を観るために、極端な厚さの服装による実験を行った。

4. 実験結果

試験室内の風速分布を図 2 に示す。測定点は、床から 30cm、100cm、170cm の 3 点である。これを見ると、気流が 1m/s 以下の場合には分布がほとんど見られないが、5m/s 付近になると約 1m/s の差が出てくる。これはマネキンの身長に対して送風装置の開口部が小さいために生じたものである。平均風速を求める際には、何らかの重み付けを行う必要があるが、今回は 3 点のみの測定のため単純平均とした。

図 3 は気温の垂直分布を表している。気温が低いほど床温と気温の差が大きくなっているが、気流が大きくなると差が小さくなる傾向が見られた。実験結果から、気温と壁温はほぼ等しいと見なせたが、図 4 を見ると、床温に関しては差が 2°C 程あるので、気温=放

射温と取り扱わず、平均放射温度をグローブ温度より計算した。

図 5 に、裸体実験における対流熱伝達率を示す。図 5 では強制対流域の実験にも関わらず気温によって差異が見られたが、本稿では平均の回帰式を求め、それを裸体時における高風速域の対流熱伝達率の式とした。

次に着衣実験について、気温別・着衣量別の結果を図 6 に示す。服装 1 を用いて 20°C と 25°C の 2 回実験を行ったが、この場合は両者にほとんど差は見られなかった。図 7 に着衣別の対流熱伝達率を掲げる。過去に持田²⁾は着衣時の人体対流熱伝達率に関して理論的

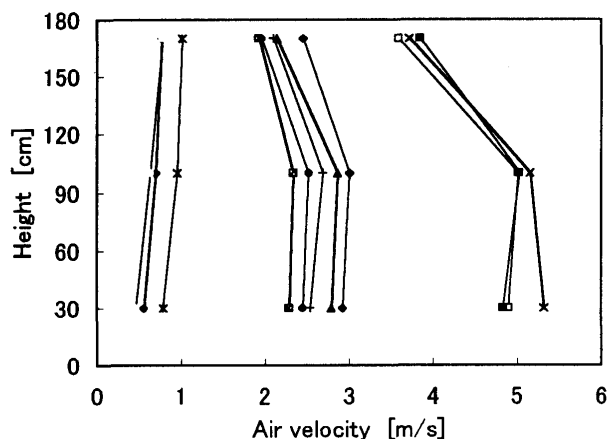


Fig.3 Vertical distribution of air velocity

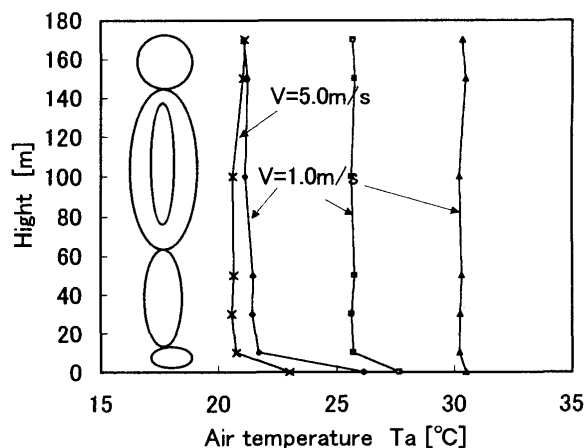


Fig.4 Vertical distribution of air temperature

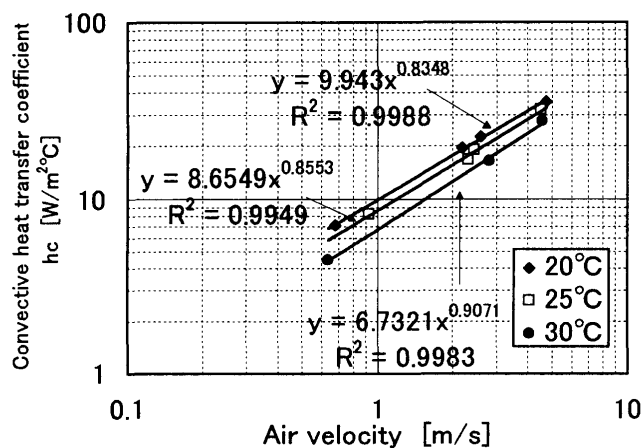


Fig. 5 Convective heat transfer coefficient for the naked manikin

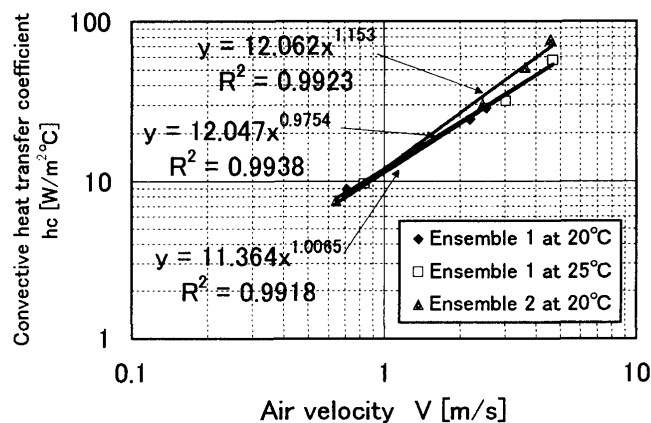


Fig. 6 Convective heat transfer coefficient for the clothed manikin

検討を行い、着衣量による面積増加とその時の環境の物性値が相殺されて、結局、裸体時のそれと変わらないという結論を導いている。今回の実測結果からは着衣量が増えるほど対流熱伝達率も大きくなる傾向が得られた。このことについてはさらに実験を重ねて検証する必要がある。

5. 過去の研究との比較

現在までに提案された人体に関する対流熱伝達率と、本実験から得られた結果との比較検討を試みる。まず著者らによる低風速域($0.1 < V < 1.1$)での実験データ³⁾と、今回の高風速域の実験データとを組み合わせた回帰式を求める。両式を別々に表したのが図8、一本にまとめたのが図9である。図9では、直線よりも曲線の方が相関は高かったため、 $h_c = a + bV^n$ の形式で表した。これを見ると、前回の実験は20°C付近で実験を行ったため、今回の実験データの20°Cあるいは25°Cの部分とつながりが見えるが、30°C付近のデータから

は少しずれているように見受けられる。本研究で使ったサーマルマネキンはFangerの快適方程式を基に制御されているので、快適環境で実験データの採取を要すると考える。

次に過去に提案された実験式と比較する。比較の対象としたのは同じ裸体・立位の実験式である、Colin⁴⁾、Nelson⁵⁾、市原ら⁶⁾の式である。また、同じ高風速域の実験式として椅座・裸体時のMitchell⁷⁾の式とも比較を試みた。本研究で得られた実験式とよい一致を見せているのはColinの式である。しかし、Colinの式は $0.2 < V < 1.2$ の範囲でしか使用できないため、この式を外挿して高風速域で適用すると、例えば4m/sでは1.5倍ほどの差異になった。椅座時のMitchellの式とでは、本研究で得られた実験式の方が高い値となった。

6. 終わりに

本研究で得られた結果を以下にまとめる。高風速域における、サーマルマネキンの裸体・立位時における

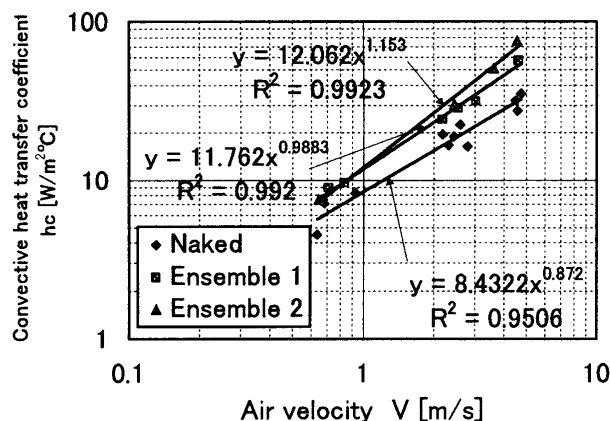


Fig. 7 Convective heat transfer coefficient for the naked manikin

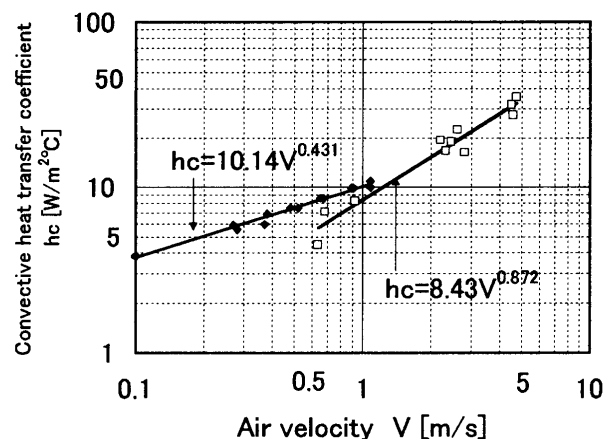


Fig. 8 Data on naked manikin at low and high velocity areas

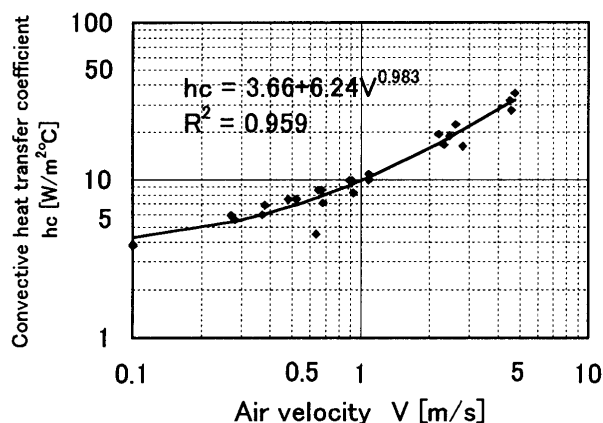


Fig. 9 Convective heat transfer coefficient for the naked manikin ($0.1 \leq V \leq 5.0$)

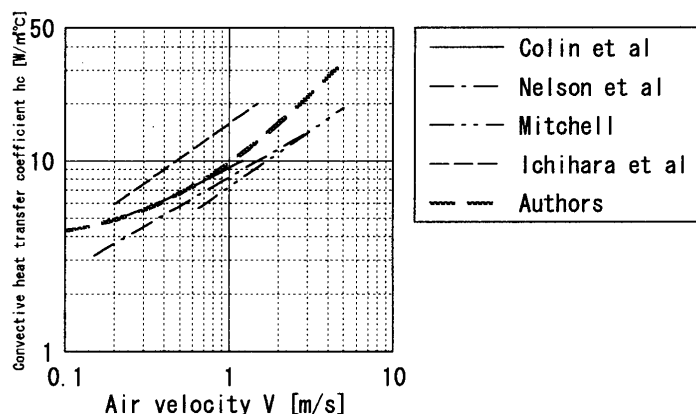


Fig. 10 Comparison of formulas for convective heat transfer coefficient

対流熱伝達率の実験式として次式が得られた。

$$h_c = 8.43V^{0.872} \quad (5)$$

また、着衣・立位時の対流熱伝達率としては、式(6)、(7)が得られた。

$$\text{服装 1 : } h_c = 11.76V^{0.988} \quad (6)$$

$$\text{服装 2 : } h_c = 12.06V^{1.153} \quad (7)$$

さらに、本実験データをもとに、低風速から高風速まで適用できる対流熱伝達率式として次式を得た。

$$h_c = 3.66 + 6.23V^{0.983} \quad (8)$$

着衣実験は、データ数が少ないので今後静穏気流時の実験を重ね、さらに比較検討を加えたい。

参考・引用文献

- 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, 日本建築学会計画系論文報告集, 第 448 号, pp.1-8, 1993.
- 2) 持田徹: 着衣時の対流およびふく射熱伝達率, 空気調和・衛生工学会論文集, 15, pp.1-6, 1981.
- 3) 持田徹・長野克則・嶋倉一實・桑原浩平・中谷貴弘・

松永和彦: 前面吹き出し気流曝露時のサーマルマネキンの対流熱伝達特性, 人間と生活環境第 6 巻第 2 号, pp.98-103, 1999.

- 4) Colin, J. and Y. Houdas: Experimental determination of coefficient of heat exchanges by convection of human body, J. Appl. Physiol., 22(1), pp.31-38, 1967.
- 5) Nelson, N., L. W. Eichna, S. M. Horvath, W. B. Shelley and T. F. Hatch: Thermal exchanges of man at high temperatures, Am. J. Physiol., 151, pp.626-652, 1947.
- 6) 市原真希, 齋藤正文, 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, 日本建築学会計画系論文集, 第 501 号, pp.45-51, 1997.
- 7) Mitchell, D., C. H. Wyndham, A. J. Vermeulen, T. Hodgson, A. R. Atkins and H. S. Hofmeyr: Radiant and convective heat transfer of nude men in dry air, J. Appl. Physiol., 26(1), pp.111-118, 1969.