

高風速域における気流方向が着衣熱抵抗および人体対流熱伝達率に及ぼす影響

○ 渡邊慎一¹⁾, 堀越哲美¹⁾, 米田喜正¹⁾, 兼子朋也¹⁾, 宇野勇治¹⁾, 石井仁²⁾, 富田明美³⁾¹⁾ 名古屋工業大学, ²⁾ 国立呉工業高等専門学校, ³⁾ 椋山女学園大学

Effect of Wind Speed on Thermal Insulation Values of Clothing and Convective Heat Transfer Coefficients of the Human Body under Various Wind Directions

Shin-ichi WATANABE¹⁾, Tetsumi HORIKOSHI¹⁾, Yoshimasa YONEDA¹⁾, Tomoya KANEKO¹⁾, Yuji UNO¹⁾, Jin ISHII²⁾, Akemi TOMITA³⁾¹⁾ Nagoya Institute of Technology, ²⁾ Kure National College of Technology, ³⁾ Sugiyama Jogakuen University

To predict the thermal comfort and to estimate the heat loss from the human body to its environment, the thermal insulation values of clothing and the convective heat transfer coefficients of the human body are essential parameters. These two parameters are included in the calculation of most thermal environmental indices. The objective of this paper is to clarify the effect of wind speed on the thermal insulation values of clothing and convective heat transfer coefficients of the human body under various wind directions. A series of experiments using a thermal mannequin was carried out under the following combination of conditions; wind speed conditions (still air, 0.5 m/s, 1.5 m/s, 3 m/s, 4 m/s, 5 m/s) and wind directions (0°, 45°, 90°, 135°, 180°). Air temperature in the chamber was 20 °C, and surface temperature of the thermal mannequin was maintained at 33 °C. Unclothed and five kinds of clothed conditions were tested. The thermal mannequin was designed on the basis of an average-sized Japanese male body. It is divided into 13 parts, the temperatures of which can be individually controlled. The result of the experiment shows that the thermal insulation value of clothing decreased with an increase in wind speed. Regression equations for estimating convective heat transfer coefficients of the standing mannequin were obtained.

1. はじめに

温熱的快適性の評価や予測に用いられる多くの温熱指標の計算には、着衣熱抵抗(クロ値)および人体対流熱伝達率が組み込まれている。これまで数多くの研究者により、様々な視点からこれら二つの要素の定量化が試みられてきた。本研究は、これらの要素に影響を及ぼす環境要因として気流速度と気流方向に着目し、サーマルマネキンを用いた実験により、気流が着衣熱抵抗および人体対流熱伝達率に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

2. 実験計画

実験は2000年7月4日～7月15日に、名古屋工業大学VBL人工環境条件制御室にて実施した。

2.1 実験装置

実験室の概要をFig. 1に示す。実験室中央に風洞を作成し、サーマルマネキンを風洞内に設置した。風洞の一方には、有圧換気扇8機と整流板により構成された自作の風速発生装置(Fig. 2)を設置した。気流の制御は電圧の調節によって行った。サーマルマネキンを風洞内で回転させることによって、気流方向を変化させた。

実験に使用したサーマルマネキン(京都電子工業株

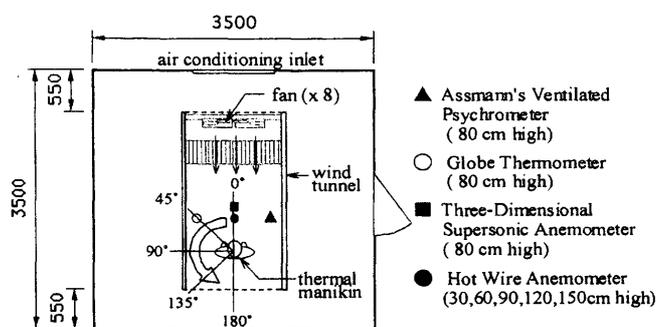


Fig. 1 Plan of Artificial Climatic Chamber

Table 1 Experimental Condition

Air Temperature	20 °C
Air Velocity	still air, 0.5, 1.5, 3, 4, 5 m/s
Wind Direction	0°, 45°, 90°, 135°, 180°
Clothing Ensemble	Nude Light Clothing-Y0 (underwear, socks, shirt-Y0, trousers-Y0) Light Clothing-Y3 (underwear, socks, shirt-Y3, trousers-Y3) Light Clothing-Y6 (underwear, socks, shirt-Y6, trousers-Y6) Suit (Light Clothing-Y3 + jacket) Coat (Suit + coat)

式会社 THM-MS-13F) は、日本人成人男性の平均的なプロフィールを有する立位姿勢である。全身が13部位に分割され、それぞれに内蔵されたヒーターとファンにより、各部位を独立して温度制御が可能である。サー

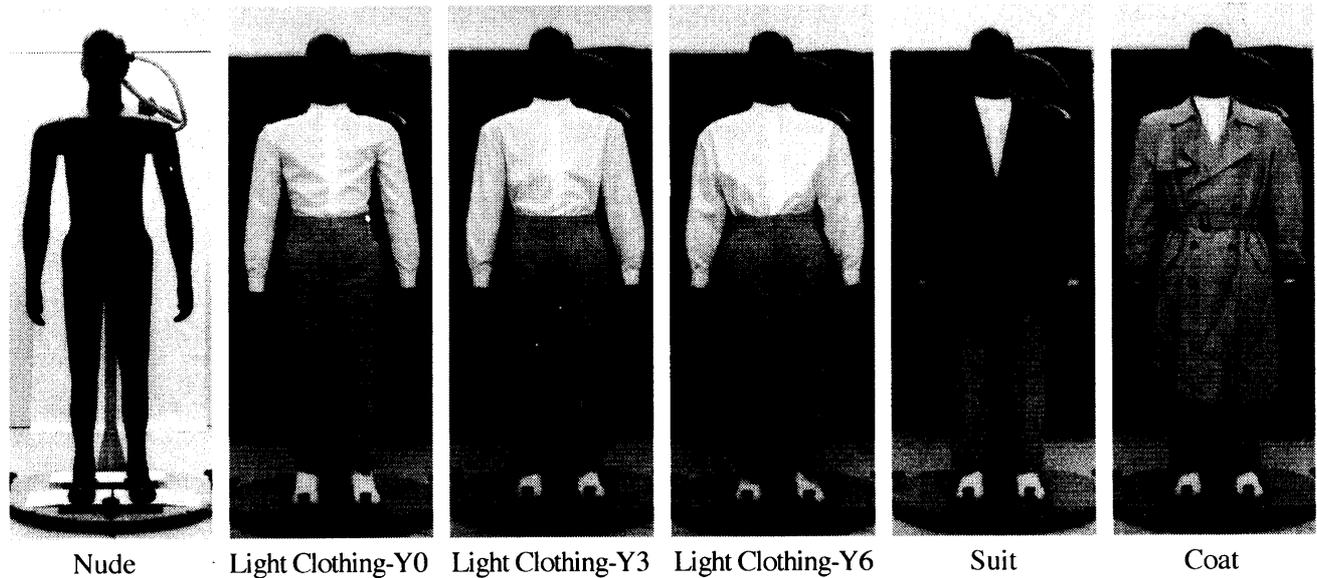


Fig. 2 Clothing Conditions

マルマネキンの制御方法は表面温度一定法を採用し、本研究では表面温度を33℃とした。

2.2 実験条件

実験条件をTable 1に示す。全ての条件で気温を20℃、相対湿度を50%とした。風速は、静穏気流、0.5m/s、1.5m/s、3m/s、4m/s、5m/sの6条件とした。気流は、サーマルマネキンの前方60cm、高さ80cmの位置に設置した3次元超音波風速計のサーマルマネキンに正対する成分が設定風速となるよう制御した。気流方向は、サーマルマネキンを左右対称として取り扱い、0°(前方)、45°、90°(側方)、135°、180°(後方)の5条件とした。着衣条件はFig. 2に示すように、裸体(N)、軽装-ゆとり0(Y0)、軽装-ゆとり3(Y3)、軽装-ゆとり6(Y6)、スーツ(S)、コート(C)の6条件とした。

2.3 着衣

軽装条件に用いた着衣は、以下の方法で制作した。まず、不織布を用いてマネキンの表面展開を採取し、これに基づいてパターンを作成し、マネキンに密着した着衣を作成した。これを軽装-ゆとり0(Y0)とした。そして、この密着型パターンに、前・後身の肩幅中央垂直線、袖山線、ズボンの正中線と脇線の中央垂直線を展開しそれぞれ3cm幅および6cm幅のゆとりを加えた着衣を制作した。これらをそれぞれ軽装-ゆとり3(Y3)、軽装-ゆとり6(Y6)とした。つまり、周方向にそれぞれ12cm、24cmのゆとりを持つ着衣である。尚、ゆとり3は通常のゆとりを想定し、ゆとり6はゆったりとしたゆとりを想定している。着装着衣はカッターシャツ、ズボン、トランクス型下着、靴下の4点である。スーツ条件(S)は、軽装-ゆとり3(Y3)に既製のジャケットを着装させた。コート条件(C)は、スーツ条件に既成のコートを着装させた。

2.4 測定項目

測定項目は、環境要素として気温、相対湿度、風速、グローブ温度、表面温度を30秒毎に自動測定した。サーマルマネキンに関しては、内部ヒーター温度、ヒーター

発熱量、マネキン表面温度、マネキン表面熱流量、着衣表面温度を30秒毎に自動測定した。測定は、実験室の空調装置およびマネキンの制御開始後、約1時間行った。各実験においてマネキン表面温度が安定していることを確認している。解析には測定終了直前の5分間のデータを平均して用いた。

3. 着衣熱抵抗および人体対流熱伝達率の算出法

3.1 着衣熱抵抗 I_{cl} の算出法

着衣熱抵抗 I_{cl} の算出にはこれまでにいくつかの方法が提案されている¹⁾。本研究では、Olessen et al.²⁾による算出法を用いた。この方法は、裸体と着衣状態の両方で同一の環境条件に曝露して、式(2)および式(3)を用いて、それぞれ I_a および I_t を求める。これらを式(1)に代入して、クロ値を算出する方法である。

$$I_{cl} = I_t - I_a / f_{cl} \quad (1)$$

$$I_t = (t_s - t_o) / 0.155Q \quad (2)$$

$$I_a = (t_{sn} - t_{on}) / 0.155Q_n \quad (3)$$

I_{cl} : 基礎着衣熱抵抗 clo, I_t : 全着衣熱抵抗 clo,
 I_a : 裸体時の熱抵抗 clo, f_{cl} : 着衣面積比 nd,
 t_s : マネキン表面温度 °C, t_o : 作用温度 °C,
 Q : 着衣時の発熱量 W/m², t_{sn} : 裸体時の表面温度 °C,
 t_{on} : 裸体時の作用温度 °C, Q_n : 裸体時の発熱量 W/m²

3.2 人体対流熱伝達率 hc の算出法

人体対流熱伝達率 hc は式(4)を用いて算出した。平均放射温度 tr は、マネキンを0.4m×0.2m×1.2mの立方体と見なし、各空間構成面に対する形態係数を求め、これらの形態係数と各壁面温度から算出した。

$$hc = [Q - f_{cl} hr (t_{cl} - tr)] / f_{cl} (t_{cl} - t_a) \quad (4)$$

hc : 対流熱伝達率 W/m²°C, Q : マネキン発熱量 W/m²,
 f_{cl} : 着衣面積比 nd, hr : 放射熱伝達率 W/m²°C,
 t_{cl} : 平均着衣温 °C, tr : 平均放射温度 °C,
 t_a : 気温 °C

3.3 着衣面積比 f_{cl} の実測

着衣熱抵抗および人体対流熱伝達率の計算には、着衣面積比 f_{cl} が必要となる。本研究では、Seppanen et al.³⁾ の方法を用いて実測により値を求めた。この方法は、マネキンを 0° (前方)~ 90° (側方)まで 10° 毎に回転させ、それぞれにおいて撮影した写像のマネキン部分の面積を求め、合計する。そして、この値を裸体時の値で除して着衣面積比を導出する方法である。得られた値を Table 2 に示す。また、比較のため着衣のパターン面積から重なり部分および上衣の下衣にしまいこむ部分を差し引いて求めた値も示す。

4. 実験結果

全実験の気温の平均値は 19.5°C 、相対湿度の平均値は 52.1% であった。風速分布を Fig. 3 に示す。全ての条件において床に近づくにつれて風速が弱くなる結果となった。以下の考察では、熱式風速計6点の平均値を平均風速として用いる。また、サーマルマネキンの表面温度は、全条件の平均で 32.7°C であった。

5. 考察

5.1 気流が着衣熱抵抗に及ぼす影響

Fig. 4-1~4-2 に各着衣条件における気流方向とクロ値との関係を示す。いずれの着衣条件においても、若干のばらつきはあるものの、同一の風速条件では、気流方向に依らずほぼ等しいクロ値となる傾向が示された。

Fig. 5 に平均風速とクロ値との関係を示す。図中の回歸線は、全ての気流方向のデータを用いて描いた。いずれの着衣条件においても風速が強くなるにしたがって、クロ値が減少する傾向が示された。これは、気流によって、着衣下の空気層が薄層化し、熱抵抗が減少したためと考えられる。したがって、気流が存在する環境において温熱的な快適性を評価する上では、気流の強弱によって、クロ値を適切に推定する必要がある。

5.2 気流が人体対流熱伝達率に及ぼす影響

Fig. 6-1~6-2 に気流方向と対流熱伝達率の関係を示す。Nude 条件では、気流方向 90° において若干減少する傾向が見られるが、いずれの気流方向においてもほぼ等しい値を示した。Coat 条件では、気流方向 0° (前方) から 90° (側方) になるにしたがって対流熱伝達率が減少し、気流方向 90° から 180° (後方) になるにしたがって、再び増加する傾向がみられた。これは、気流の正対する見付け面積が正面よりも側面の方が小さくなり、気流により奪われる熱量が小さくなったためと考えられる。

Fig. 7 にマネキンと気温の温度差に対する静穏気流時の人体対流熱伝達率を示す。図中には全ての気流方向のデータをプロットしている。着衣条件では、対流熱伝達率の平均は $hc = 4.71 \text{ W/m}^2$ で、裸体条件では平均で $hc = 6.36 \text{ W/m}^2$ であった。既往の研究と比較すると、着

Table 2 Measured Clothing Area Factor

Clothing Ensemble	Seppanen's Method	Pattern Area
Nude	1.00	1.00
Light Clothing-Y0	1.19	1.13
Light Clothing-Y3	1.25	1.25
Light Clothing-Y6	1.29	1.36
Suit	1.28	-
Coat	1.44	-

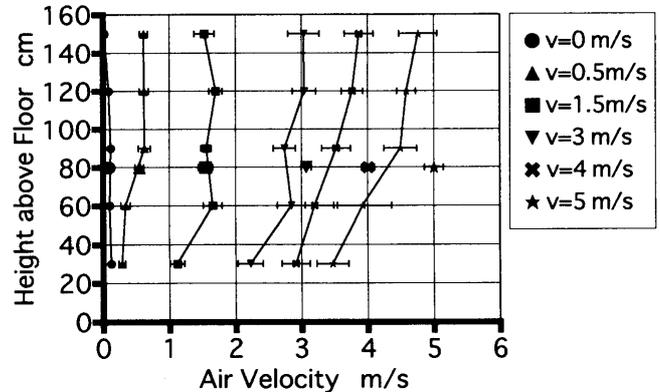


Fig. 3 Distribution of Air Velocity

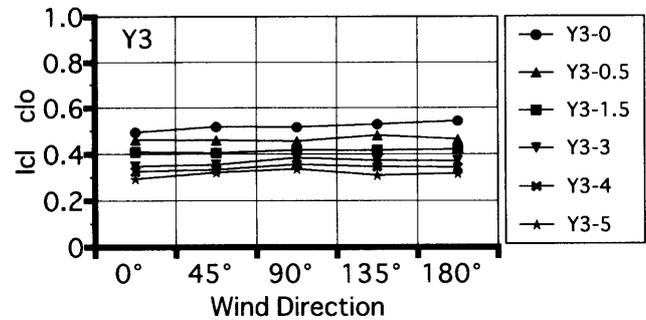


Fig. 4-1 Relation between Wind Direction and I_{cl} (Y3)

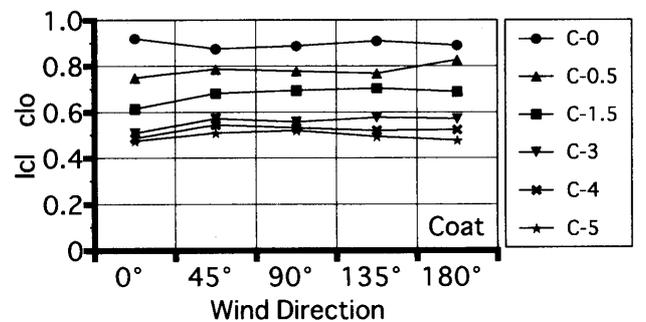


Fig. 4-2 Relation between Wind Direction and I_{cl} (Coat)

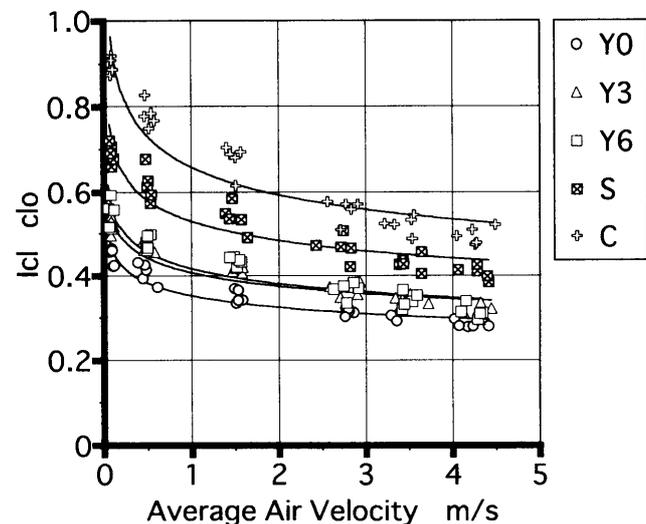


Fig. 5 Relation between Average Air Velocity and I_{cl}

衣条件では、市原ら⁴⁾の結果とほぼ等しい結果となったが、他の研究よりも大きな値となった。また、裸体条件では、既往の研究よりも大きな値を示した。これは、使用した人工気候室の制御特性などにより、厳密な意味での自然対流ではなかったためであると推察される。

Fig. 8に風速と強制対流時の人体対流熱伝達率との関係を示す。各着衣条件毎に全気流方向のデータを用いて回帰線を描いた。全ての着衣条件で、風速が強くなるにしたがって、人体対流熱伝達率が大きくなる傾向が示された。

Fig. 9に既往の研究との比較を示す。本研究では、裸体条件 $hc = 13.00V^{0.652}$ 、着衣条件 $hc = 10.38V^{0.666}$ の回帰式が得られた。また、他の研究と比較して、妥当な値であると考えられる。

6. まとめ

気流がクロ値および人体対流熱伝達率に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、サーマルマネキンを用いた実験を行い以下の知見を得た。

1. 本研究で用いた着衣においては、クロ値は気流方向によらずほぼ等しい値となる。
2. 気流により着衣下の空気層が薄層化し、風速が強くなるにしたがってクロ値が減少する。
3. 側方から気流を受けるとき他方向より対流熱伝達率が小さくなる。
4. 強制対流時の対流熱伝達率の回帰式として、裸体条件 $hc = 13.00V^{0.652}$ 、着衣条件 $hc = 10.38V^{0.666}$ を得た。

引用文献

- 1) 渡邊ら：日本建築学会東海支部研究報告集，541-544，2000
- 2) B.W.Olesen：ASHRAE Trans.，478-491，1985
- 3) O. Seppanen et al.：ASHRAE Trans.，78 (1)，120-130，1972
- 4) 市原ら：日本建築学会計画系論文集，501，45-51，1997
- 5) Nielsen, M. et al: Acta phys. Scandinav.，27，272-294，1952
- 6) de Dear, R. J. et al: Int. J. of Biometeor.，40，141-156，1997
- 7) Colin, J. et al: J. Appl. Physiol.，22(1)，31-38，1967
- 8) 桑原ら：第23回人間-生活環境系シンポジウム，168-171，1999

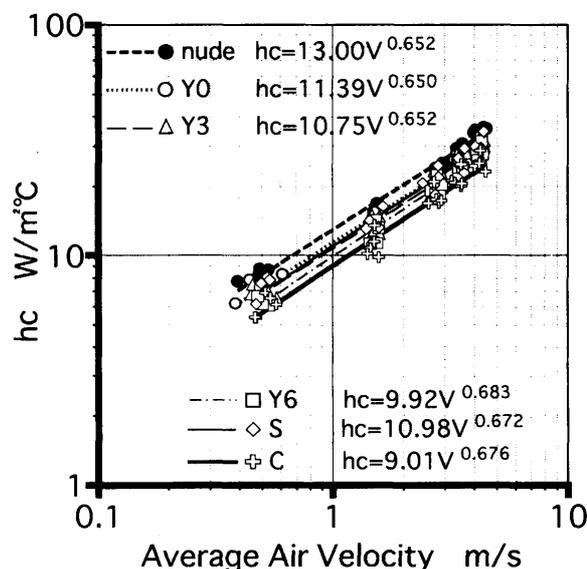


Fig. 8 Relation between Average Air Velocity and Forced Convective Heat Transfer Coefficients

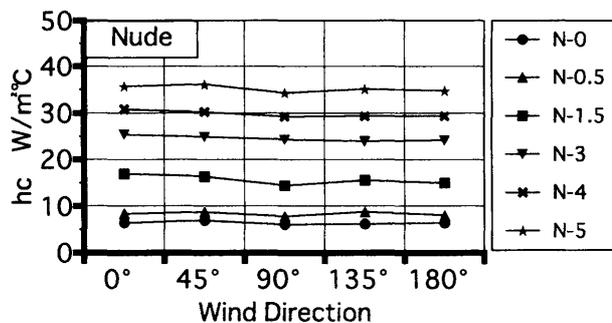


Fig. 6-1 Relation between Wind Direction and hc (Nude)

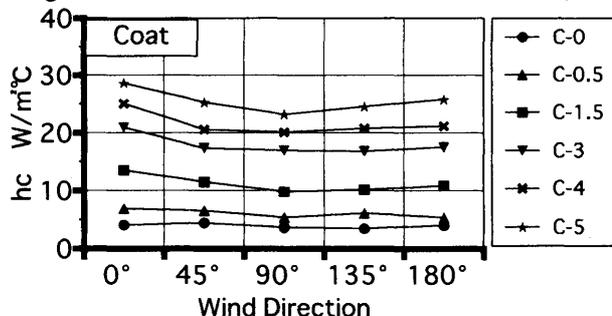


Fig. 6-2 Relation between Wind Direction and hc (Coat)

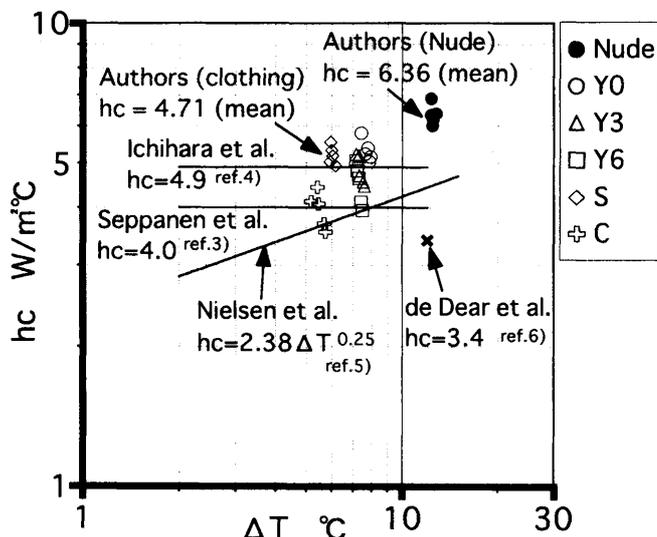


Fig. 7 Relation between Temperature Difference and Natural Convective Heat Transfer Coefficients

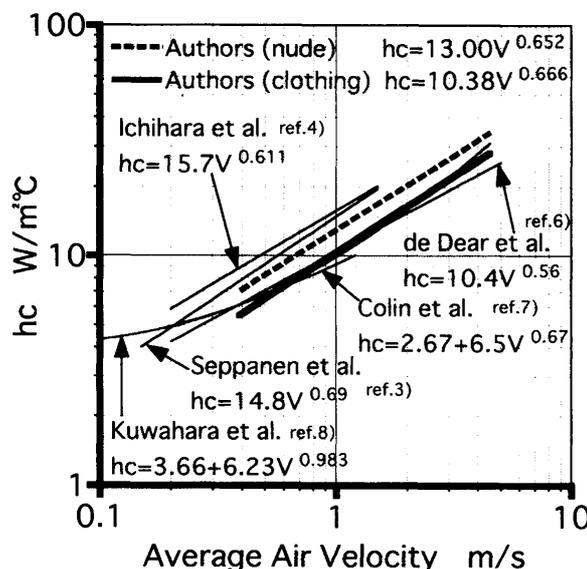


Fig. 9 Comparison between Regression Lines developed by Authors and earlier researchers