

# サーマルマネキンによる着衣・温熱環境分布の 快適性評価に関する研究

お茶の水女子大学 田 辺 新 一

## Evaluation of Clothing Comfort and Thermal Environment with a Thermal Manikin

by

Shin-ichi Tanabe

*Department of Human Environmental  
Engineering, Ochanomizu University*

### ABSTRACT

Evaluation method for clothing comfort and thermal environment with a thermal manikin are described in this paper. In real life thermal environment is not always uniform like in a climatic chamber. Recently in office spaces OA chairs are often used, but thermal insulation of chairs is not taken into account. In this report under the still air conditions, nude and clothed thermal manikin was exposed to measure skin temperatures and heat loss.

Combined heat loss coefficient for nude condition was  $7.9 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$  and convective heat transfer was estimated as  $3.2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Those at foot and hand were bigger than other parts and thigh and crotch were smaller. Estimation of clo value from heat loss, skin temperature of manikin, and equivalent temperature were discussed here. Thermal insulation of chairs was also measured. OA chair provides additional 0.15 clo insulation and it is corresponded to the  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  lower neutral temperature.

## 要 旨

サーマルマネキンを用いて着衣、温熱環境の評価を行う方法、椅子の熱抵抗に関して研究を行った。実際の空間内では、均一ではない温熱環境が形成されていることが多い。また、着衣に関してもOA椅子などによる部分的な着衣熱抵抗増加を考慮する必要がある。人体の部位を考慮したこれらの問題に関しては、これまで明確な結論が得られていない。

本研究では、均一な温熱環境が得られる人工気候室において裸体と着衣したサーマルマネキンを暴露し各部熱損失、皮膚温を測定した。その結果より各部位総合熱伝達率、着衣熱抵抗を算出した。裸体時の総合熱伝達率は、 $7.9 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ となった。また、対流熱伝達率は $3.2 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ と推定された。加えて、サーマルマネキンによる等価温度が提案された。椅子の熱抵抗が測定されOA椅子はメッシュ椅子より0.15 clo熱抵抗が増加することが示された。これは、オフィスにおいて中立温度を $1^\circ\text{C}$ 変化させることが示された。

## 緒 言

実際の空間内では、均一ではない温熱環境が形成されていることが多い。人工気候室のように温度分布、風速分布が均一な空間は現実には少ない。また、着衣に関してもOA椅子などによる部分的な着衣熱抵抗増加を考慮する必要がある。

熱的快適性は、人体からの熱損失の状態を把握することによりある程度の予測が可能と思われる。人体と環境との熱交換を模擬測定する方法の一つとして、人体形状をした発熱体、サーマルマネキンを用いる方法がある。本研究の目的は、サーマルマネキンによる着衣、温熱環境の分布評価法の開発および椅子に関する測定例について示すことである。

## 1. サーマルマネキン

### 1.1 サーマルマネキンの構造

本研究では、時応答性が良いという理由で皮膚表面発熱方式のサーマルマネキンを採用した。サーマルマネキンのシェルは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る。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。温度計測と発熱を同じワイヤーを用いることで制御を行っている。また、温度測定を従来のサーマルマネキンと異なり同じワイヤーで行うことにより、分割された各部位の面平均温度が計測されるという利点がある。

図1にサーマルマネキンを、表1にサーマルマネキンの分割部位、表面積を示す。分割は左右の不均一な環境を評価できるように16分割とした。表面積は測定値である。

本サーマルマネキンの制御方法は、温度一定制御法を基本とするが、設定温度と供給電力量の間に拘束条件式を用いている。

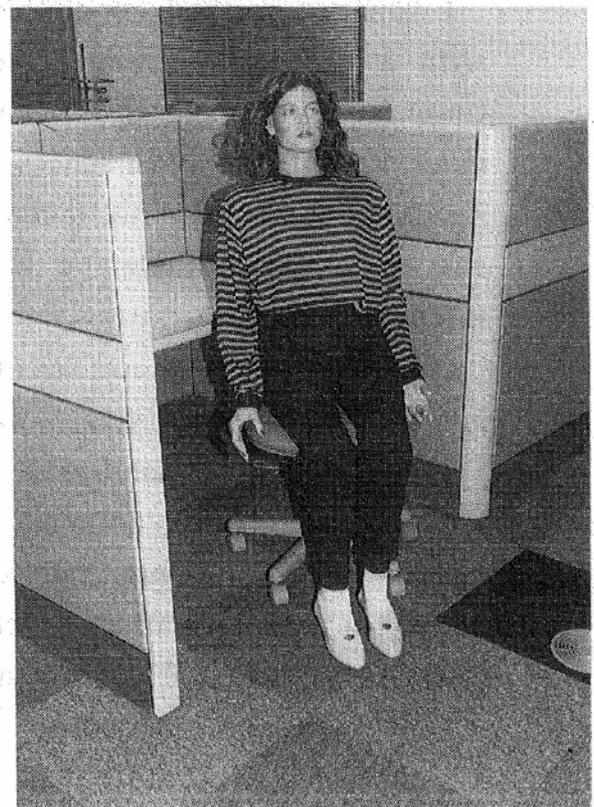


図1 Thermal manikin (Anne)

表1 Name and surface area of each body part

	Name of part	Area (m <sup>2</sup> )
1	Left Foot	0.0446
2	Right Foot	0.0437
3	Left Leg	0.0892
4	Right Leg	0.0879
5	Left Thigh	0.1630
6	Right Thigh	0.1670
7	Crotch	0.1740
8	Head	0.1100
9	Left Hand	0.0397
10	Right Hand	0.0394
11	Left Arm	0.0490
12	Right Arm	0.0500
13	Left Shoulder	0.0736
14	Right Shoulder	0.0778
15	Chest	0.1380
16	Back	0.1270
Total		1.4739

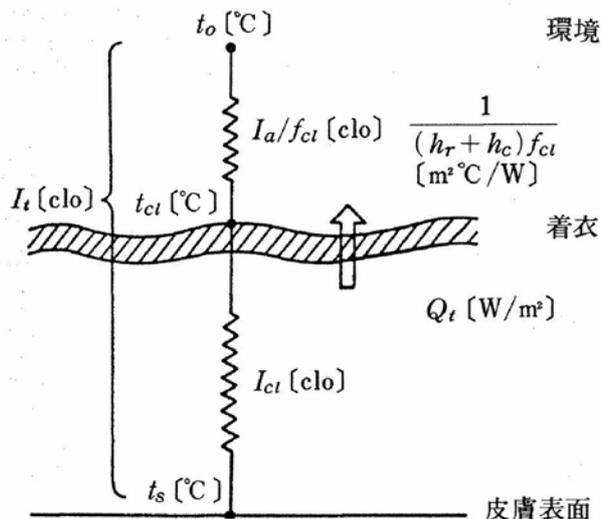


図2 Sensible heat transfer from skin surface to environment through clothing

1.2 環境との熱交換

図2に皮膚表面—着衣—環境の関係を示す。図に示した  $I_t$ ,  $I_a$ ,  $I_{cl}$ ,  $f_{cl}$  にはつぎのような関係が成り立つ<sup>1)</sup>。

$$I_t = (t_{s,cl} - t_o) / 0.155 Q_t \dots\dots\dots (1)$$

$$I_a = (t_{s,n} - t_o) / 0.155 Q_a \dots\dots\dots (2)$$

$$I_{cl} = I_t - I_a / f_{cl} \dots\dots\dots (3)$$

$$f_{cl} = 1 + 0.3 I_{cl} \dots\dots\dots (4)$$

定常状態では、ヒータへの供給熱量が皮膚表面からの着衣を通しての熱損失と等しくなる。熱損失量は、ヒータの消費電力量として測定することができる。

1.3 制御方法

各部位皮膚温と放熱量は以下の関係式を満たすよう制御されている。

$$t_s = 36.4 - 0.054 Q_t \dots\dots\dots (5)$$

この式を満足させるために、各部位皮膚温制御系に強制的に 0.054 m<sup>2</sup>°C/W のロードエラーを生じさせた。ヒータ供給電力量が増加され、各部位の皮膚温は式を満たすように環境との熱交換の結果、収束的に定まる。

2. 均一環境における測定

2.1 実験方法, 実験条件

サーマルマネキンよりの熱損失と皮膚温の関係を求めるため、お茶の水女子大学人工気候室にて測定を行った。実験に用いた人工気候室は、床全面吹き出し、天井全面吸い込み方式である。

表2 Experimental conditions for nude tests

Operative Temperature	19.8°C, 24.8°C, 29.7°C
Mean Radiant Temperature	= air temperature
Relative Humidity	approx. 50%rh
Air Velocity	0.1 m/s (still air)
Clothing	nude
Posture	siting

表3 Experimental conditions for clothed tests

Operative Temperature	24.7°C
Mean Radiant Temperature	= air temperature
Relative Humidity	approx. 50%
Air Velocity	0.05 m/s (still air)
Clothing	Sweat : Panty + Bra, Long Sleeve Sweat Shirt, Sweat Pants, Socks, Shoes Normal : Panty + Bra, Long Sleeve Shirt, Vest, Skirts, Panty Horse, Shoes
Posture	sitting

表2に実験条件を示す。裸体椅座静位の状態で作用温度 19.8°C, 24.8°C, 29.7°C の環境に暴露した。また、表3に示した着衣条件で作用温度 24.8°C, 24.9°C の環境に暴露した。ここで、Sweat と示した着衣条件の組み合わせを Sweat, Normal と示した着衣条件の組み合わせを Normal と以下呼ぶこととする。垂直空気温度分布は実験前に計測を行い、上下温度分布がないことを確認した。気流速は 0.10 m/s であった。16

部位の熱損失、皮膚温、作用温度が計測された。相対湿度はほぼ 50% に保たれた。1 時間以上同一条件に暴露し人工気候室の作用温度、サーマルマネキンの熱損失が定常になった時点で1分ごとに5回測定した。

## 2.2 実験結果

### 2.2.1 裸体時の熱損失

図3に裸体時の各部位熱損失を示す。作用温度 19.8°C 時には全身の熱損失は 91.2 W/m<sup>2</sup> となっ

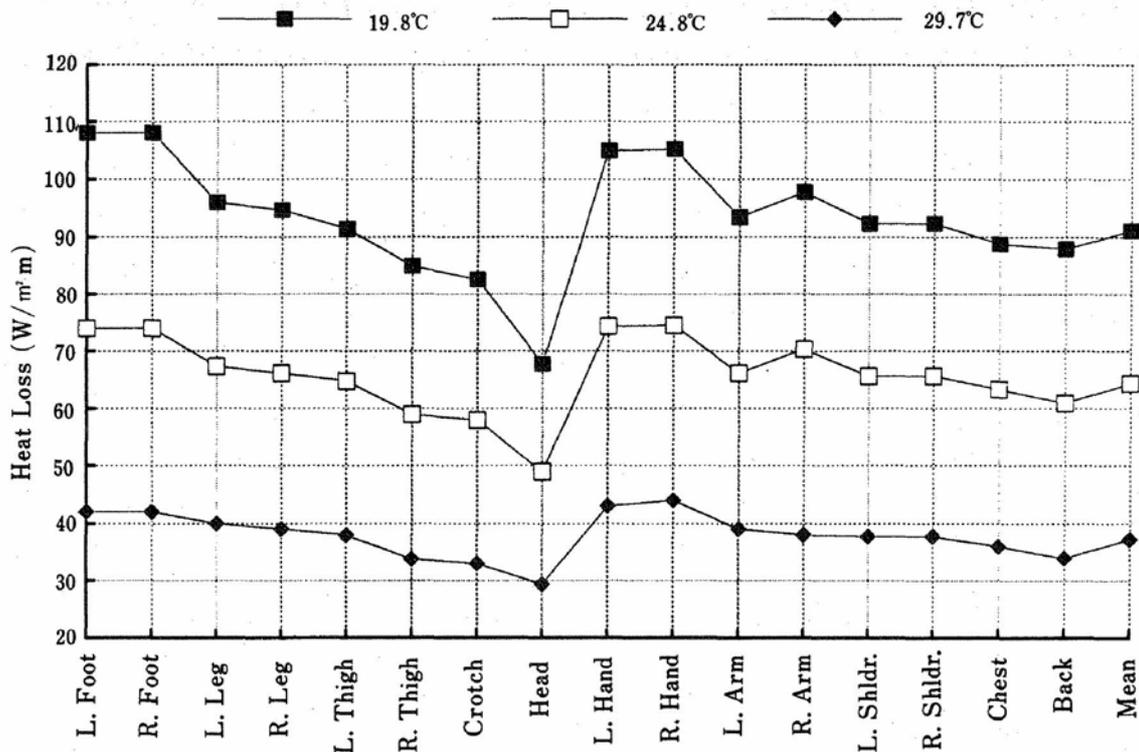


図3 Heat loss from each part of the nude body in sitting posture, for 3 different operative temperatures

た. 24.8°C 時には 64.4 W/m<sup>2</sup>, 29.7°C 時には 37.7 W/m<sup>2</sup> となった. 頭部の熱損失が他の部位よりも低いのは, かつらを用いているためである. 足部, 手の熱損失が, わずかながら他の部位よりも多いのは, これらの部位が他の部位に比較して他の身体部位の影響を受けにくいと, これらの部位の平均太さが他の部位に比較して小さいためと考えられる.

### 2.2.2 着衣時の熱損失

図4に着衣時の各部位の熱損失を示す. 比較のため裸体時の作用温度 24.8°C の結果もあわせて示している. Sweat 着用時の全身熱損失は 45.9 W/m<sup>2</sup>, Normal 着用時は 43.2 W/m<sup>2</sup>, 裸体時は 64.4 W/m<sup>2</sup> となった. おおのこの実験で作用温度がほぼ等しいため, 着衣条件に関係のない頭部の熱損失は等しくなっている.

### 2.3 皮膚表面総合熱伝達率

図5に実験時の作用温度より算出した裸体時の

各部位の皮膚表面総合熱伝達率を示す. 暴露作用温度に各部位の総合熱伝達率はほとんど影響を受けていないことがわかる. 3暴露条件平均総合熱伝達率は, 7.9 W/m<sup>2</sup>°C となった. 平均総合熱伝達率は, 各部位の表面積に基づき面積重み付けを行い算出した. 足部, 手の熱伝達率が他の部位よりも大きくなっている. また, 大腿, 腹部は他の部位よりも総合熱伝達率が低くなっている. これは, これらの部位が他の身体部位の影響を受け放射熱損失が減少するため, 平均太さが他の部位より大きいことによる対流熱伝達率の減少のためと考えられる.

図6に着衣時の各部位の皮膚表面より環境までの熱抵抗を示す. 比較のため裸体時の作用温度 24.8°C の結果もあわせて示している. Sweat 着用時の全身熱抵抗は 0.197°C m<sup>2</sup>/W, Normal 着用時は 0.214°C m<sup>2</sup>/W, 裸体時は 0.126°C m<sup>2</sup>/W となった.

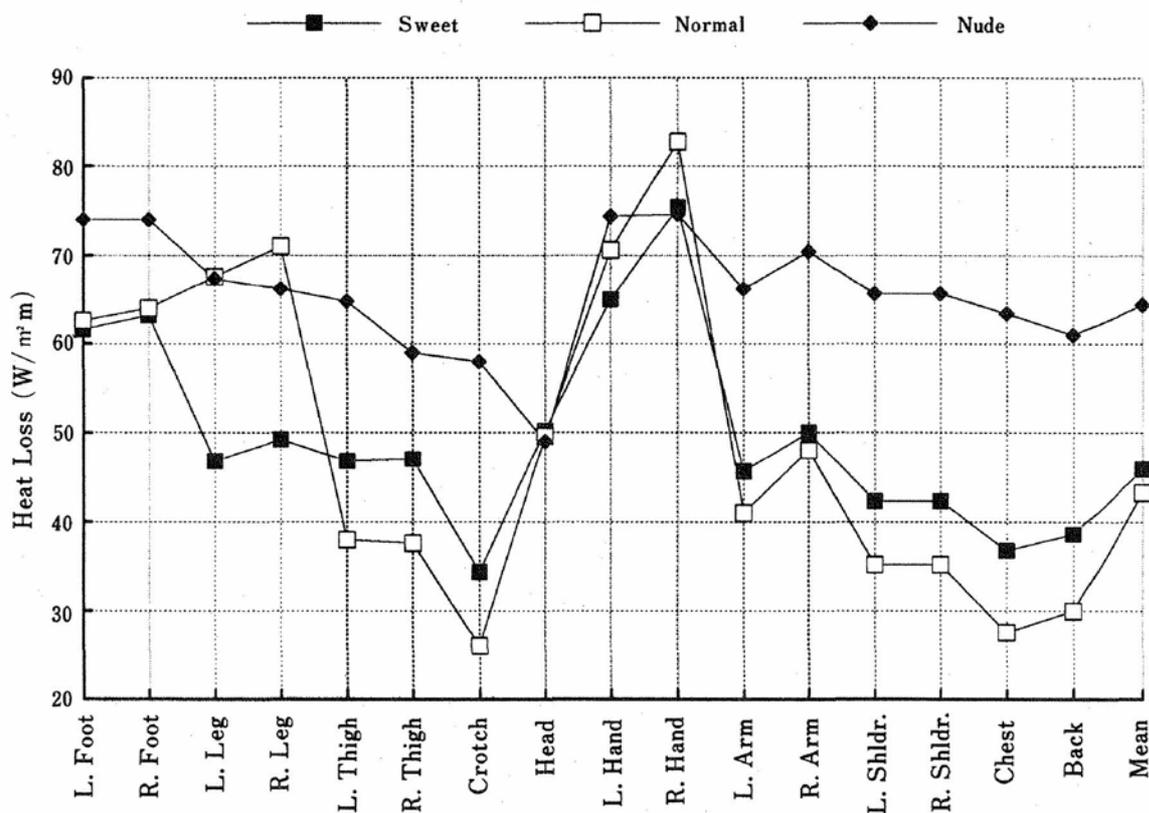


図4 Heat loss from each part of the clothed body

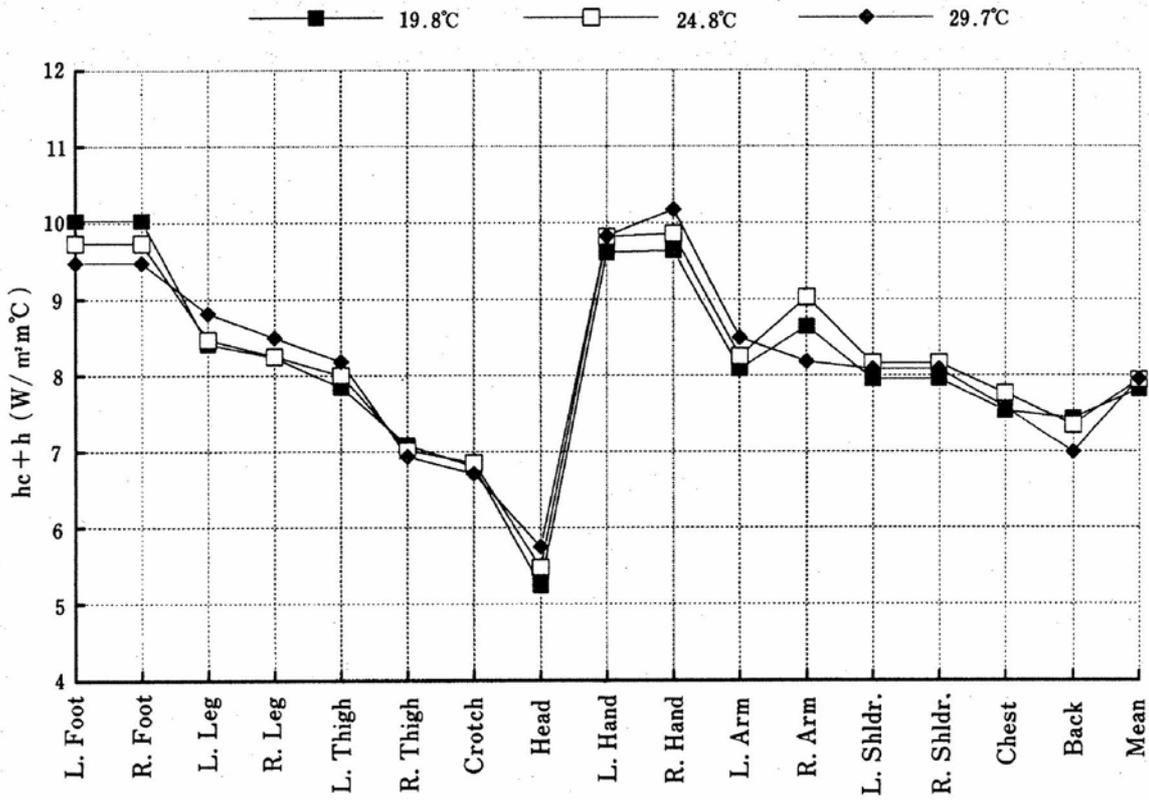


図5 Combined heat transfer coefficient for each part of the nude body sitting posture

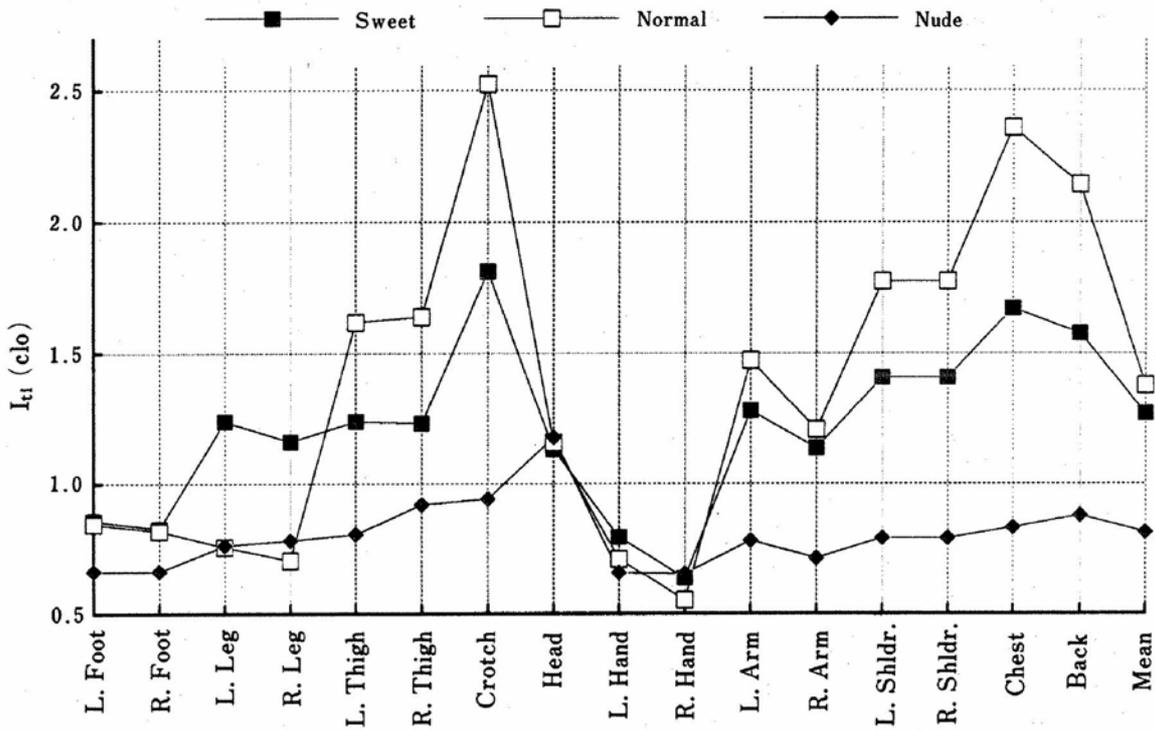


図6 Total clothing insulation value (It or  $I_{cl} + I_{al}/f_{cl}$ ) for each part of the body

Sweat の組み合わせ衣服全熱抵抗 ( $I_t$ ) は 1.27 clo, Normal は 1.38 clo となった。  $I_a$  値として裸体時の 3 暴露条件時の平均値 0.81 clo を用いると, Sweat の組み合わせ衣服の基礎熱抵抗 ( $I_{cl}$ ) は 0.58 clo, Normal は 0.71 clo と算出される。

### 2.4 椅子の熱抵抗

実験は人工気候室で行われた。表 4 に実験条件を示す。作用温度は 24.8°C で, 室内気流は 0.1 m/s 以下であった。3 種の椅子が実験に用いられた。String は通常被験者実験に用いられる網状の椅子である。座面も網状になっている。Simple 椅子は, 座面が鉄板製の折りたたみ椅子である。OA

椅子は, オフィスで用いられている背中が高いものである。以下これらを省略して呼ぶ。

図 7 に 3 種の椅子によるサーマルマネキンからの熱損失を示す。測定は裸体で行われた。背中, 大腿部の熱損失が大きく変化していることがわかる。図 8 に熱損失, 皮膚温, 作用温度より計算した, 総合熱伝達率を示す。全身に関しては, String, Simple, OA の順で小さくなった。

表 5 に実験結果を示す。String 椅子に対して Simple で 0.09 clo, OA 椅子で 0.15 clo の差があった。これを 0.5 clo の衣服を着ているオフィス作業者にあてはめ, PMV を用いて中立温度を

表 4 Experimental conditions for chair tests

Operative Temperature	24.8°C
Mean Radiant Temperature	= air temperature
Relative Humidity	approx. 50%rh
Air Velocity	0.1 m/s (still air)
Clothing	nude
Posture	sitting
Chair	String, Simple, OA

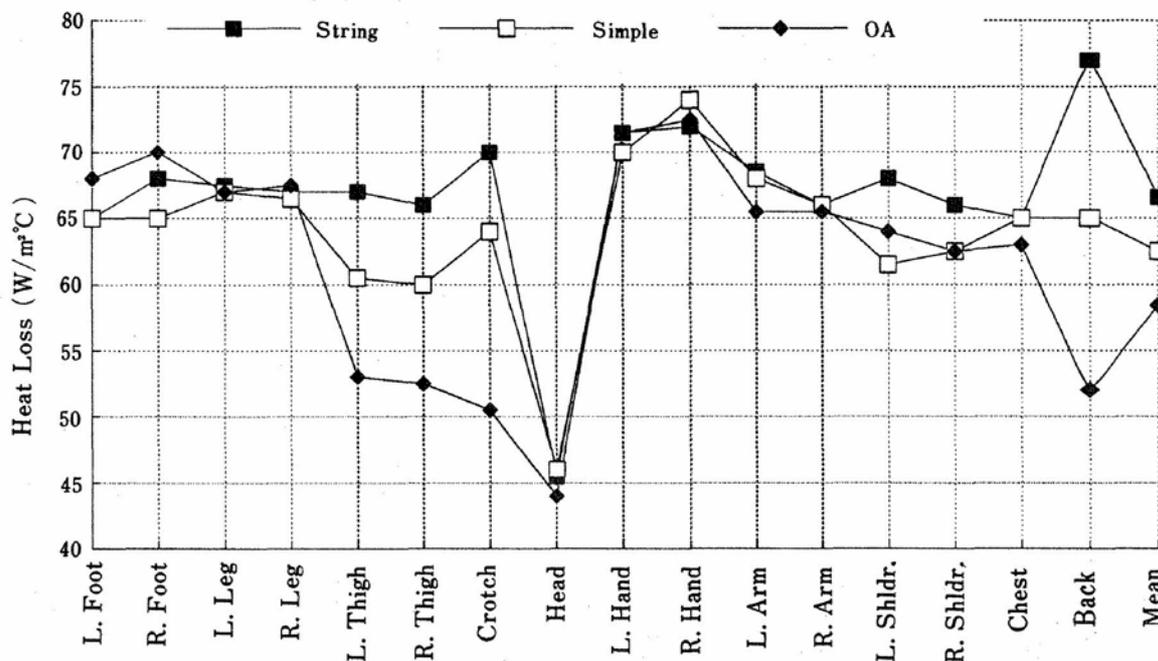


図 7 Heat loss from each part of the body with three types of chairs

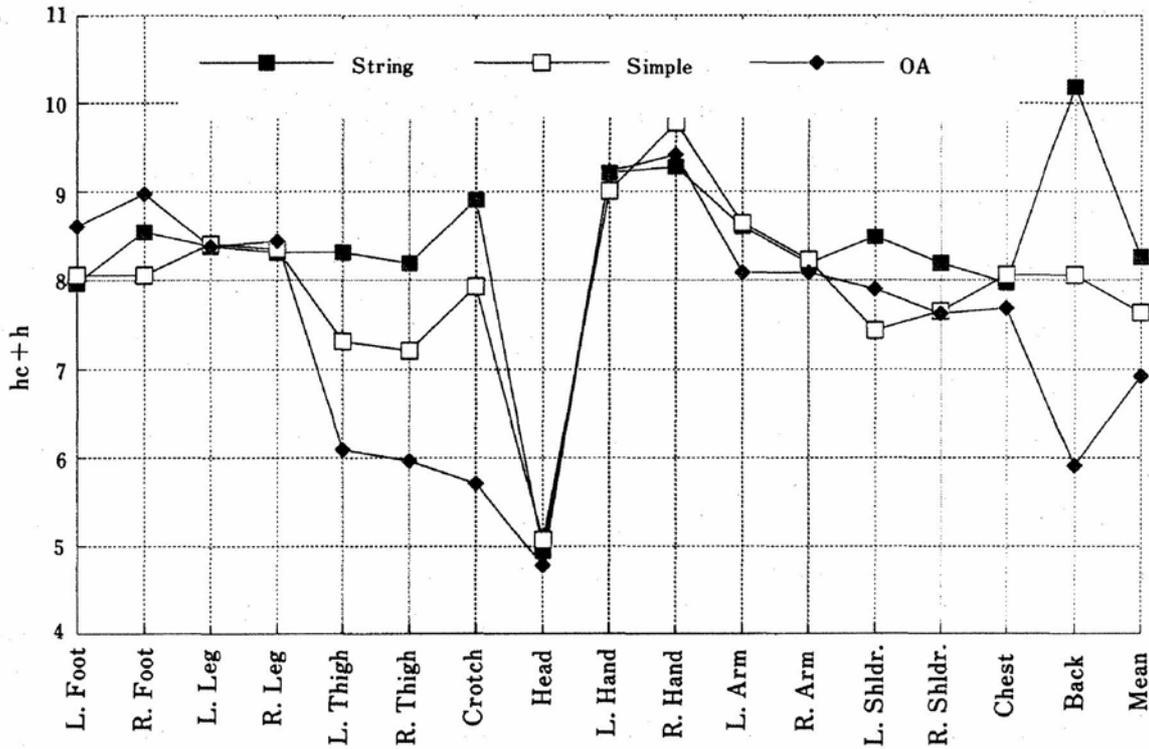


図8 Combined heat transfer coefficient for each part of the nude body with three chairs

表5 Clo value of three kinds of chairs

Type	Heat Loss (W/m <sup>2</sup> )	Skin temperature (°C)	Operative temp. (°C)	Total clo (I <sub>t</sub> ) (clo)
String	66.6	32.8	24.7	0.78
Simple	62.5	33.0	24.8	0.84
OA	58.5	33.2	24.8	0.93

表6 Neutral temperatures for three chairs

Type	Estimated clo	Neutral temp (°C)
String	0.50 clo	25.4
Simple	0.55 clo	25.1
OA	0.65 clo	24.5

算出した。その結果を表6に示す。OA椅子により約1°C中立温度が低くなっていることがわかる。

### 3. サーマルマネキンによる等価温度の算出

皮膚表面熱抵抗値をある値に固定し、実際のサーマルマネキンの熱損失を代入すれば、熱損失に基づく環境温度が求められる。この環境温度をサーマルマネキンによる等価温度 ( $t_{eq}$ ) と呼ぶ。

$t_{eq}$  は、実際の環境下でのサーマルマネキンの熱損失と等量の熱損失を生じる均一温熱環境時の作用温度と定義される。

全身に関して：

$$t_{eq} = t_s - 0.155 (I_{cl} + I_{a}/f_{cl}) Q_t \dots\dots\dots (6)$$

身体各部位に関して：

$$t_{eqi} = t_{si} - 0.155 (I_{cli} + I_{ai}/f_{cli}) Q_{ti} \dots\dots\dots (7)$$

ここで、椅座裸体時の熱抵抗を標準条件として、温熱環境評価を行うことを考えると、裸体であるので  $I_{cl}$  は 0,  $f_{cl}$  は 1 となる。裸体時の  $I_a$  は、皮膚表面総合熱伝達率の逆数となる。実験温度範囲では、皮膚表面熱抵抗には温度依存性がほとんどなかったため、平均すると  $0.127^\circ\text{C m}^2/\text{W}$  となる。

また、着衣条件を基準にすると、着衣熱抵抗値と測定によって求められた熱損失、皮膚温を式に代入することによってある着衣基準の  $t_{eq}$  が求められる。

#### 4. 考 察

##### 4.1 クロ値に関して

式(1)～(4)にクロ値の算出方法を示したが、ISO基準(ISO-9920)では、サーマルマネキンを用いた着衣量測定の実験条件として以下のことを述べている。クロ値は立位状態のマネキンに、試験される組み合わせ衣服を着せ、人工気候室に暴露する。測定は以下の条件で行われることが望ましいとされている。

静穏気流、空気温度と平均放射温の差  $5^\circ\text{C}$  以内、相対湿度は実験中変動がなく  $10 \sim 70\%$ 、サーマルマネキンからの熱損失  $40 \sim 80 \text{ W/m}^2$ 、平均皮膚温  $32 \sim 34^\circ\text{C}$  となっている。Gaggeらのクロ値の定義に厳密に従えば、その衣服を着た状態で熱的中立時であることが仮定されている。すなわち、人体からの顕熱損失が  $44 \text{ W/m}^2$  で平均皮膚温が  $33^\circ\text{C}$  とされている。温度一定制御型のサーマルマネキンでこの定義に従って測定を行うためには、暴露作用温度、設定皮膚温、測定されたクロ値の相互関係を把握しながらの繰り返し測定が必要となる。

一般に SET<sup>2)</sup> や PMV<sup>3)</sup> など計算に用いられて

いるクロ値は、皮膚表面から着衣外表面までの熱抵抗であり、計算の便宜のため着衣外表面から環境までの熱抵抗を分離して取り扱っている。ところが、実際には着衣外表面温度の測定は困難なので、裸体時の皮膚外表面熱抵抗値を用いている。1991年にASTMでサーマルマネキンによる着衣熱抵抗の測定法が規格化されたが<sup>4)</sup>、この規格では全衣服熱抵抗 ( $I_t$ ) のみについて言及しており、着衣外表面熱抵抗  $I_a$  に関しては言及を避けている。

##### 4.2 等価温度との関係について

サーマルマネキンによる等価温度 ( $t_{eq}$ ) は、発熱体の熱損失を基準に求められているので、ある意味で人体形状をした発熱体の等価温度と考えることができる。Duftonが提案した高さ  $550 \text{ mm}$ 、直径  $190 \text{ mm}$  の改良型 Eupatheoscope においても、環境との関係でシリンダー表面温度を変化させる手法を採用している<sup>5)</sup>。その後、Bedfordは等価温度を空気温度、平均放射温度、気流速によりあらかず方法に関して研究を行った。その基となったデータは、冬季に英国の軽作業が行われている工場作業者に関するものである。そのため、本研究の  $t_{eq}$  と比較するためには着衣条件を考慮する必要がある。これに対して、Madsenらによって衣服の修正が加えられた等価温度が提案されている<sup>6)</sup>。

##### 4.3 皮膚表面総合熱伝達率について

裸体時の皮膚表面総合熱伝達率には、本実験の範囲内では温度依存性がほとんどなかった。3暴露条件の平均値は、 $7.9 \text{ W/m}^2\text{C}$  となった。人体の線型放射熱伝達率を  $4.7 \text{ W/m}^2\text{C}$  と仮定すると、人体の対流熱伝達率は  $3.2 \text{ W/m}^2\text{C}$  と推定される。Mitchellによると<sup>7)</sup>椅座静位静穏気流時の対流熱伝達率は  $3.1 \text{ W/m}^2\text{C}$  と示されており、本実験で得られた値と非常に近くなっている。

## 5. 結 論

1) サーマルマネキンを用いて環境評価を行う場合の指標として  $t_{eq}$  を提案した.

2) 均一環境下に裸体のサーマルマネキンを暴露し熱損失, 皮膚温を測定した. 手, 足部の皮膚温は他の部位よりも低くなった.

3) 着衣時の各部位の熱損失, 皮膚温を測定した.

4) 皮膚表面総合熱伝達率を算出した. 平均総合熱伝達率は  $7.9 \text{ W/m}^2\text{°C}$  となった. 足部, 手の熱伝達率が他の部位よりも大きくなり, 大腿, 腹部は他の部位よりも総合熱伝達率が低くなることがわかった. 人体の対流熱伝達率は  $3.2 \text{ W/m}^2\text{°C}$  と推定された.

5) 椅子の熱抵抗が測定され, OA 椅子はメッシュ椅子より  $0.15 \text{ clo}$  熱抵抗が増加した.

## 謝 辞

本研究に関してお世話になった, お茶の水女子大学の関係各位に記して感謝致します. また, 研究助成をいただいた財団法人 石本記念デサントスポーツ科学振興財団に深謝いたします.

## 文 献

- 1) ASHRAE Fundamentals ; Chapter, 8 (1989)
- 2) Gagge, A. P. Nishi, Y. Gonzales, R. R.; Standard Effective Temperature — A Single Temperature Index of Temperature Sensa-

tion and Thermal Discomfort, Proc. of the CIB Commission W 45 (Human Requirements), Symposium, Thermal comfort and Moderate Heat Stress, BRS, pp 229-250 (1973)

- 3) Fanger. P. O.; Thermal Comfort, Danish Tech., Press (1970)
- 4) ASTM—F 1291, Standard Test Method for Measuring the Thermal Insulation of Clothing Using a Heated Manikin (1991)
- 5) Dufton, A. F.; The Equivalent Temperature of a Warmed Room, *JIHVE*, 4, pp 227-229 (1936)
- 6) Madsen, T. L., Olesen, B. W., Kristensen, N. K.; Comparison between Operative and Equivalent Temperature under Typical Indoor Conditions, *ASHRAE Trans.*, 90, I, pp 1077-1090 (1984)
- 7) Mitchell, D.; Convective Heat Loss from Man and Other Animals, In Heat Loss from Animals and Man, Ed. by J. L. Monteith, L. E. Mount, Butterworths, LONDON (1974)

## 記号表

- $I_a$  : 着衣外表面—環境間の熱抵抗 (clo)
- $I_{cl}$  : 基礎着衣熱抵抗 (clo)
- $I_t$  : 皮膚表面—環境間の熱抵抗 (clo)
- $Q_t$  : 皮膚よりの頭熱熱損失量 ( $\text{W/m}^2$ )
- $f_{cl}$  : 着衣面積比 (—)
- $h_c$  : 人体の対流熱伝達率 ( $\text{W/m}^2 \text{°C}$ )
- $h_r$  : 人体の線型放射熱伝達率 ( $\text{W/m}^2 \text{°C}$ )
- $t_{cl}$  : 着衣外表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t_{eq}$  : 等価温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t_o$  : 作用温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $t_s$  : 平均皮膚温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

添え字の n は裸体時, cl 着衣時, i は各部位をあらわす.