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EVALUATION OF THERMAL ENVIRONMENTS WITH A SKIN-SURFACE-
TEMPERATURE-CONTROLLED THERMAL MANIKIN

田辺 新一*, 長谷部ヤエ**

Shin-ichi TANABE and Yae HASEBE

Control principle and evaluation method for thermal environment with the thermal manikin are described in this paper. Under the still air conditions, nude and clothed thermal manikin was exposed to measure skin temperatures and heat loss. Combined heat transfer coefficient for nude conditions were estimated and they were not depended on the surrounding temperatures and its averaged value was $7.9 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$. Those at foot and hand were bigger than other parts and thigh and crotch were smaller. The method to calculate PMV from total heat loss was described. Estimation of clo value from heat loss, skin temperature of manikin, and equivalent temperature were discussed here.

Keywords : thermal comfort, thermal manikin, convective heat transfer, evaluation, equivalent temperature

温熱環境, サーマルマネキン, 対流熱伝達率, 環境評価, 等価温度

1. はじめに

実際の空間内では, 上下温度分布, 不均一放射, 非等温気流, 体の一部への気流などにより, 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。通常, 温熱環境評価は空間内の複数点における空気温度, 気流速などの物理値を計測することによって行われている。しかし, 複数点で測定された環境物理要素は貴重なデータとはなるが, それらを総合化して不均一環境下での人体の温冷感, 快不快感を予測評価するのは難しい。

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。温熱環境指標は人体の熱平衡式に基づいているものが多い。実際に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, 新たに開発した皮膚温度可変型サーマルマネキンを用いた温熱環境評価法に関して述べることである。

2. サーマルマネキンについて

2.1 サーマルマネキンに関する従来の研究

サーマルマネキンは, 本来衣服熱抵抗測定のために作られたものであり, 人間の着衣状態における衣服の温熱特性を再現させるためのダミーである。初期のものとしては Winslow, Herrington らによって製作された立位姿勢のみ可能な銅板製マネキンがある¹⁾。その後, Kerslake らにより椅座位が可能なマネキンが作製されている²⁾。また, デンマーク工科大学では, Madsen らがマネキン (ヘンリック) を作製し, 多くの衣服熱抵抗に関するデータを提供している³⁾。米国カンサス州立大学では McCullough らを中心に多くの衣服断熱性値が測定・発表されている⁴⁾。

日本では戸田による立位銅製マネキン⁵⁾や, 三平らによる立位肩関節部旋回可能マネキンがある⁶⁾。また, 田村らは, 被服下空気層と熱抵抗との関係などについて研究を行っている⁷⁾。

三平らは着衣断熱性評価のみならず室内環境評価のためにマネキンを作製した⁶⁾。しかし, 三平らによる温熱環境評価法に関しては, ヒータ温度の取扱方法, 温冷感

* お茶の水女子大学生生活科学部生活環境学科
助教授・工博

** お茶の水女子大学生生活科学部生活環境学科
助教授・医博

Assoc. Prof., Dept. of Human Env. Eng., Ochanomizu Univ.,
Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Human Env. Eng., Ochanomizu Univ.,
Dr. Med.

申告値との相関性など研究されるべきことが多くある。また、田辺らはヒータ温度一定制御のサーマルマネキンを用い温熱環境評価を行っている^{8),9)}。

海外では自動車内の温熱環境評価にスウェーデンの Wyon らがサーマルマネキンを用いている¹⁰⁾。

Bánhidí らも、暖房環境評価に関して、Wyon が製作したサーマルマネキンを用いて研究を行っている¹¹⁾。しかし、Wyon らの研究では、評価例は公表されているものの、これらの計算の基礎となるサーマルマネキンの熱損失との数量的な関係は公表されていない。加えて皮膚温度一定制御型のサーマルマネキンを用いて実験が行われている。

2.2 発熱方法と構造

サーマルマネキンの発熱方式には大別して以下の3つの方法がある。(1) 皮膚表面発熱方式、(2) シェル内表面発熱方式、(3) 内部空気加熱方式である。(2)、(3)の発熱方式の場合シェルに銅、アルミニウムなどの熱伝導率の良い素材を用いる。3方法それぞれに利点欠点があるが、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を採用した。この方法では外表面の電熱線ワイヤリングに高度の技術を要するが、この点は共同研究者であるデンマーク工科大学断熱研究所にて作業を行った。

サーマルマネキンのシェルは4 mm 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。0.3 mmφ のニッケルワイヤーが2 mm 以下の間隔で全身に巻かれている。保護のため0.1 mm 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ワイヤーを用いることで制御を行っている。ワイヤー保護のための塗料の厚みは十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、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。実際の人体に比較して個々の部分の形状が人体よりは多少簡易なので体表面積は実際の人体より小さくなっている。各部位は各々の制御、計測システムを内蔵している。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2.4 で述べる方法によって算出される。

サーマルマネキンの制御方法には大別して温度一定制御、供給電力一定制御の2 方式がある。供給電力一定方式では、温度制御のための回路が不要となるのでマネキンは簡便に製作できる。しかし、曝露される環境によっ

図—1 サーマルマネキン

表—1 サーマルマネキンの分割部位、各部位表面積

	Name of Part	Area(m ²)
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

ては皮膚温度が実際の人体のものとなかなり異なることもあり広範囲な環境条件には適用しにくい。本研究で製作したマネキン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。この点に関しては後述する。

2.3 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'_a , I_{cl} , f_{cl} には次のような関係が成り立つ。

$$I_t = (t_{s,cl} - t_0) / 0.155 Q_t \dots\dots\dots (1)$$

$$I_a = (t_{s,n} - t_0) / 0.155 Q_a \dots\dots\dots (2)$$

$$I'_a = I_a / f_{cl} \dots\dots\dots (3)$$

$$I_{cl} = I_t - I_a / f_{cl} \dots\dots\dots (4)$$

$$f_{cl} = 1 + 0.3 I_{cl} \dots\dots\dots (5)$$

定常状態では、ヒータへの供給熱量が皮膚表面から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

図—2 皮膚表面—着衣—環境の関係

消費電力量として測定することができ、各部位の熱損失量は単位面積あたりの消費電力量として求められる。ここで示した着衣面積比 f_{cl} は、McCullough らによる実験式である⁴⁾。

2.4 制御方法

本サーマルマネキンで用いられている制御は環境と人間との熱交換を基礎としている。人体の熱平衡は式(6)で示される。また、皮膚表面よりの熱損失は式(7)に示されるように顕熱項と潜熱項に分けられる。顕熱損失は式(8)のように放射熱損失と対流熱損失に分けられる。機械的仕事量が0でかつ定常状態では人体の代謝量(M)と全熱損失量(Q_m)は等しいとみなせる。

$$Q_m = M = Q_s + Q_{res} \quad (6)$$

$$Q_s = Q_t + E_s \quad (7)$$

$$Q_t = R + C \quad (8)$$

皮膚表面よりの顕熱損失量(Q_t)は、全熱損失量(Q_m)より呼吸による熱損失量(Q_{res})と皮膚表面よりの蒸発熱損失量(E_s)を差し引くことで得られる。

$$Q_t = Q_m - Q_{res} - E_s \quad (9)$$

ASHRAE¹²⁾, Fanger¹³⁾によると呼吸による熱損失量、皮膚表面よりの蒸発熱損失量は以下のように表される。なお、機械的仕事は0と仮定した。

$$Q_{res} = 1.7 \times 10^{-5} M (5867 - P_a) + 0.0014 M (34 - t_a) \quad (10)$$

$$E_s = 3.05 \times 10^{-3} (5733 - 6.99 M - P_a) + 0.42 (M - 58.15) \quad (11)$$

式(10)中に空気温度が含まれているが、このままではサーマルマネキンの制御時に空気温度を知る必要がある。このため本研究では空気温度を20°Cに固定した。この仮定は呼吸による顕熱損失量のみにはしか影響を与えないため、空気温度が10°Cから30°Cの範囲で全熱損失量に対して最大1.6%の誤差しか生じない。

Fangerによれば熱的中立状態にある人体の代謝量と平均皮膚温度の関係¹³⁾は式(12)のようになる。

$$t_s = 35.7 - 0.028 Q_m \quad (12)$$

本サーマルマネキンは発汗しないため、潜熱損失が取

り扱えない。そこで全熱損失量と皮膚表面よりの顕熱損失量の関係として水蒸気圧1.5 kPa時の関係を用いることとした。すなわち、水蒸気圧1.5 kPaを代入した式(11)と式(10)を式(6)、(7)に代入し式(13)を得た。したがって、発汗を生じるような環境でのサーマルマネキンの皮膚温度は実際の人体の平均皮膚温度とは同様にならない可能性がある。皮膚温度一定型のサーマルマネキンの皮膚温度は設定値であるのに対して、本サーマルマネキンでは環境との熱交換との収束値として皮膚温度が定まる。

$$Q_m = 1.96 Q_t - 21.56 \quad (13)$$

式(13)を式(12)に代入すると以下ようになる。

$$t_s = 36.4 - 0.054 Q_t \quad (14)$$

サーマルマネキンの各部位皮膚温度は、式(14)を基礎として制御されている。この式を満足させるために各部位皮膚温度制御系に強制的に0.054 m²°C/Wのロードエラーを生じさせた。図—3に皮膚温度、熱損失、熱抵抗の関係を示す。例えば、ヒータに電力を供給しない状態では皮膚温度は作用温度と等しくなる。破線のようにヒータ温度が作用温度と等しいとすると式(14)の皮膚温度と熱損失の関係式を満たさない。そこでヒータ供給電力量が増加され実線で示したように各部位の皮膚温度は式(14)を満たすように環境との熱交換の結果収束的に定まる。

2.5 環境温度との関係

図—3から明かなように全身に対して裸体時は式(15)、着衣時は式(16)が成立する。

$$t_o = 36.4 - (0.054 + 0.155 I_a) Q_t = t_s - 0.155 I_a Q_t \quad (15)$$

$$t_o = t_s - 0.155 (I_{cl} + I_a/f_{cl}) Q_t \quad (16)$$

同様に各部位についても式(17)が成立する。なお、衣服に被われていない部位では I_{cu} は0、 f_{cu} は1となる。

$$t_{oi} = t_{si} - 0.155 (I_{cu} + I_{ai}/f_{cu}) Q_{ui} \quad (17)$$

図—3 皮膚温度とロードエラーの概念

3. 人工気候室における熱損失と皮膚温度の測定

3.1 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度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、床全面吹出し、天井全面吸込み方式で、内壁に空気層を設けることにより、平均放射温度と空気温度が等しくなるように設計されている。

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 の環境に曝露した。また、表—3 に示した着衣条件で作用温度 24.8°C, 24.9°C の環境に曝露した。ここで、Sweat と示した着衣条件の組合せを Sweat, Normal と示した着衣条件の組合せを 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、皮膚温度が計測された。作用温度は人工気候室中央、床上 1.6 m においてグローブ温度計を用いて測定した。相対湿度はほぼ 50 % に保たれた。1 時間以上同一条件に曝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。サーマルマネキンの熱損失、皮膚温度は毎分 60 回の瞬時値測定が行われるため 1 分ごとの出力値は 60 回の平均値となる。以下の解析には 1 分ごとに測定した 5 回平均値を用いて行った。

3.2 実験結果

3.2.1 裸体時の熱損失と皮膚温度

図—4 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/m² となった。24.8°C 時には 64.4 W/m², 29.7°C 時には 37.7 W/m² 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

表—2 実験条件

Operative Temperature	Nude: 19.8, 24.8, 29.7°C Sweat: 24.8°C Normal: 24.9°C
Mean Radiant Temperature	=Air Temperature
Relative Humidity	approx. 50%rh
Air Velocity	0.1 m/s (still air)
Posture	Sitting

表—3 着衣条件

Sweat	Normal
Panty+Bra	Panty+Bra
Long Sleeve Sweat Shirt	Long Sleeve Shirt
Sweat Pants	Vest
	Skirts
	Panty Horse
Shoes	Shoes

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。

また、図—5 に各部位の皮膚温度を示す。皮膚温度と熱損失は式 (14) を満たすように制御されていることが皮膚温度の図との比較よりわかる。作用温度 19.8°C 時には平均皮膚温度 31.5°C, 24.8°C 時には 32.9°C, 29.7°C 時には 34.4°C となった。式 (14) が成立するように制御を行っているため皮膚温度の測定結果は熱損失と同様の傾向を示す。頭部の皮膚温度は他の部位よりも高くなり、足部、手の皮膚温度は他の部位よりも低くなっている。

3.2.2 着衣時の熱損失と皮膚温度

図—6 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 の結果も併せて示している。

Sweat 着用時の全身熱損失は 45.9 W/m², Normal 着用時は 43.2 W/m², 裸体時は 64.4 W/m² となった。各々

図—4 裸体時の各部位熱損失

図—5 裸体時の各部位皮膚温度

図—6 着衣時の各部位熱損失

図—7 着衣時の各部位皮膚温度

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。

また、図—7に各部位の皮膚温度を示す。比較のため裸体時の作用温度 24.8°C の結果も併せて示している。Sweat 着用時の平均皮膚温は 33.9°C, Normal 着用時は 34.1°C, 裸体時は 32.9°C となった。着衣時に左右差が生じているのは着衣方法によるものではないかと考えられる。

3.3 皮膚表面総合熱伝達率

図—8に図—4, 5および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。曝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 曝露条件平均総合熱伝達率は、7.9 W/m²°C となった。平均総合熱伝達率は、表—1に示した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—9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 の結果も併せて示している。Sweat 着用時の全身熱抵抗は 0.197°C m²/W, Normal 着用時は 0.214°C m²/W, 裸体時は 0.126°C m²/W となった。

Sweat の組合せ衣服全熱抵抗 (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 曝露条件時の平均値 0.81 clo を用いると, Sweat の組合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。

4. 温熱環境の評価法

4.1 サーマルマネキンによる等価温度 (t_{eq}) の算出

式 (16) において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}) と呼ぶこととする。

図—8 裸体時の皮膚表面総合熱伝達率

図—9 着衣時の各部位熱抵抗 (I_{it})

Wyon によって提案されている EHT⁽¹⁰⁾ と区別するために本論文では t_{eq} と表す。 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。ここで均一環境とは、空気温度と平均放射温度が等しく、静穏気流、相対湿度 50 %, 上下温度分布のない温熱環境 (Uniform Enclosure) を意味する。

全身に関して：

$$t_{eq} = t_s - 0.155 (I_{cl} + I_a / f_{cl}) Q_t \quad (18)$$

身体各部位に関して：

$$t_{eqi} = t_{si} - 0.155 (I_{ciu} + I_{ai} / f_{ciu}) Q_{ui} \quad (19)$$

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。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、図—8で示した皮膚表面総合熱伝達率の逆数となる。図—8で示したように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 3 条件を平均すると 0.127°C m²/W となる。

また、着衣条件を基準にすると図—9に示した熱抵抗値と測定によって求められた熱損失、皮膚温度を式 (18), (19) 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。

4.2 PMV

実際の環境において測定されたサーマルマネキンの全身熱損失より PMV を算出する方法に関して述べる。測定されたサーマルマネキンの着衣状態で 3 項で示したように人工気候室などの標準状態で皮膚表面熱抵抗を求めれば t_{eq} を算出することができる。本研究で用いられ

図—10 オフィスを想定した t_{eq} と PMV の関係

た人工気候室は平均気流速度が 0.1 m/s であったので PMV 算出プログラムに着衣量, 代謝量, 気流速度 0.1 m/s, 相対湿度 50 %, 気温と平均放射温度の項に t_{eq} を代入することで計算される。図—10 に夏期のオフィスを想定した着衣量 0.5 clo, 活動量 1.0 met および 1.1 met 時の t_{eq} と PMV の関係を示す。着衣条件により気流など人体影響が異なるため PMV 計算時に代入する着衣量に関しては実際のサーマルマネキンの着衣条件と同じであることが必要である。

各部位の t_{eq} の評価方法に関しては全身の t_{eq} と比較して大きく変動しないことが望ましいが, これらがどの程度の範囲にあれば許容できるのかに関しては今後さらに被験者実験データの蓄積が必要である。サーマルマネキンによる快適性の評価は, 測定された熱損失, 皮膚温度と被験者による温冷感申告のデータをどのように結びつけるかがキーポイントとなる。この点に関しては今後さらに研究を行う予定である。

5. 考 察

5.1 クロ値に関して

式 (1) から (5) にクロ値の算出方法を示したが, ISO 基準原案 (ISO/DIS-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, 試験される組合せ衣服を着せ, 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°C 以内, 相対湿度は実験中変動がなく 10~70 %, サーマルマネキンからの熱損失 40~80 W/m², 平均皮膚温 32~34°C となっている。Gagge らのクロ値の定義¹⁴⁾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 W/m² で平均皮膚温度が 33°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, 曝露作用温度, 設定皮膚温度, 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。この点, 皮膚温度と熱損失の間に拘束条件をつけて制御

している本マネキンの場合は, ある着衣条件に対して全身熱損失が熱的中立条件を満たすように人工気候室の作用温度を調整すればよい。

一般に SET^{*15)} や PMV などの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¹⁶⁾, この規格では全衣服熱抵抗 (I_a) のみについて言及しており着衣外表面熱抵抗 I_{cl} に関しては言及を避けている。有風時など着衣は気流を透過し必ずしもすべての熱移動が着衣外表面で行われるわけではないのでこの点に関しては今後検討が必要であろう。

5.2 等価温度との関係について

式 (18), (19) で示した 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 mm, 直径 190 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¹⁷⁾。その後, Bedford は等価温度を空気温度, 平均放射温度, 気流速により表す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員に関してのものである¹⁸⁾。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¹⁹⁾。しかし, 気流速が増加した際には基礎着衣熱抵抗 (I_{cl}) が減少することが報告されており²⁰⁾, サーマルマネキンの実験結果より求まる t_{eq} を空気温度, 平均放射温度, 気流速より定式化するのは式 (18) 中の Q_r のみを空気温度, 平均放射温度, 気流速の関数とし, 単純に人体の対流熱伝達率を増加させれば良いわけではないと考えられる。この点は様々な着衣条件で気流速を増加させた場合のサーマルマネキンを用いた測定を今後行われなければならないと思われる。

5.3 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 W/m²°C となった。人体の線型放射熱伝達率は 4.7 W/m²°C と仮定すると人体の対流熱伝達率は 3.2 W/m²°C と推定される。Mitchell によると²¹⁾ 椅座静位静穏気流時の対流熱伝達率は 3.1 W/m²°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。

5.4 制御に用いた熱損失と皮膚温度の関係について

本サーマルマネキンでは, 皮膚温度と熱損失の間に拘

束条件をもたせ制御を行った。その拘束条件として式(14)を用いたが、この式が実際の人体の全部位に関して常に成立するかについては検討の余地がある。

Bischof, Madsen らはこの点に関して被験者実験データとの比較を試みている²²⁾。足部での被験者の皮膚温度とサーマルマネキンの皮膚温の違いが大きくなっているが、他の部位は比較的良い一致を見せていることが示されている。温度一定制御のサーマルマネキンではヒータ温度を固定するため、熱損失、皮膚温度を環境条件によって繰り返し実験を行う必要がある。拘束条件式に変更を加え仮想上の熱抵抗をサーマルマネキンと環境との間にロードエラーとして挿入するという方法を採用する方法が本サーマルマネキンでは可能である。実際の人体の皮膚温度との比較をさらにに行い各部位に関して拘束条件式を改良する必要があると思われる。

6. 結 論

- 1) 皮膚温度可変型サーマルマネキンに関してその制御原理について述べた。
- 2) 本マネキンを用いて温熱環境評価を行う方法に関して示した。また、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。
- 3) 椅座静位静穏気流下に裸体のサーマルマネキンを暴露し各部の熱損失、皮膚温度を測定した。作用温度 19.8°C 時、全身熱損失 91.2 W/m^2 、平均皮膚温度 31.5°C 、 24.8°C 時、 64.4 W/m^2 、 32.9°C 、 29.7°C 時、 37.7 W/m^2 、 34.4°C となった。手、足部の皮膚温度は他の部位よりも低くなった。
- 4) 着衣時の各部位の熱損失、皮膚温度を測定した。Sweat 着用時の全身熱損失は 45.9 W/m^2 、平均皮膚温度は 33.9°C 、Normal 着用時は 43.2 W/m^2 、 34.1°C となった。
- 5) 皮膚表面総合熱伝達率を算出した。裸体時の各部位の皮膚表面総合熱伝達率は実験温度範囲で曝露作用温度にほとんど影響を受けていなかった。3 曝露条件平均総合熱伝達率は、 $7.9\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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。また、人体の線型放射熱伝達率を $4.7\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ と仮定すると人体の対流熱伝達率は $3.2\text{ W/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$ と推定された。
- 6) Sweat の組合せ衣服全熱抵抗 (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 曝露条件時平均値を用いると、Sweat の組合せ衣服の基礎熱抵抗 (I_{cl}) は 0.58 clo 、Normal は、 0.71 clo と算出された。
- 7) サーマルマネキンによる等価温度 (t_{eq}) より全身温冷感を予測する方法に関して示した。
- 8) 現在のクロ値の計算方法、制御に用いた熱損失と皮

膚温度に関して考察を行った。

謝 辞

本研究はお茶の水女子大学、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との共同研究成果の一部である。関係各位に記して感謝致します。

参考文献

- 1) Winslow, L. E. A. and Herrington, L. P. : Temperature and Human Life, Princeton Univ. Press, pp.132~144, 1949
- 2) Kerslake, D. McK. and Clifflord, J. M. : A Comparison of the Performance of Five Air-Ventilated Suits as Heated Manikin. N 67-10546, Flying Personal Research, Air Force Department, Ministry of Defence, UK, 1965
- 3) Madsen, T. L. : Description of Thermal Mannequin for Measuring the Thermal Insulating Capacity of the Clothing, Report No. 48, Technical University of Denmark, 1976
- 4) McCullough, E. A., Jones, B. W., and Huck, J. : A Comprehensive Data Base for Estimating Clothing Insulation, ASHRAE Transactions, Vol. 91, pp. 29~47, 1985
- 5) 戸田嘉秋：衣服研究用銅製人体模型の創作とその応用(第1報)，日本衛生学雑誌，Vol. 13, No. 1, p. 146, 1958
- 6) 三平和雄，多屋秀人，荒井 広：サーマル・マネキンに関する研究，人間工学誌，Vol. 13, No. 2, pp. 47~53, 1977
- 7) 田村照子，岩崎房子：サーマルマネキンによる被服の熱抵抗に関する研究(第1報)，文化女子大研究紀要，18, pp. 211~229, 1985
- 8) 田辺新一，木村建一，井上宇市：サーマルマネキンによる室内環境評価法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 875~876, 1989. 10
- 9) 田辺新一：サーマルマネキンを用いた室内環境の評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 817~818, 1990
- 10) Wyon, D. P., Larsson, S., Forsgren, B., and Lundgren, I. : Standard Procedures for Assessing Vehicle Climate with Thermal Manikin SAE, pp. 1~11, 1989
- 11) Bánhidí, L., Somogyi, S., Fabo, L., and Simon, T. : Compensation of Asymmetric Radiation Heat Loss to Cold Walls by Different Heating Systems-Analysis with Thermal Manikin, Environment International, Vol. 17, No. 4, pp. 211~216, 1991
- 12) ASHRAE Fundamentals, Chapter 8, 1989
- 13) Fanger, P. O., Thermal Comfort, Danish Tech. Press, 1970
- 14) Gagge, A. P., Nishi, Y., Gonzales, R. R. Standard Effective Temperature-A Single Temperature Index of Temperature Sensation and Thermal Discomfort, Proc. of the CIB Commission W 45 (Human Requirements), Symposium, Thermal Comfort and Moderate Heat Stress, BRS, pp. 229~250, 1973
- 15) Gagge, A. P., Burton, A., Bazett, H. C. : A Practical

- System of Units for the Description of the Heat Exchange of Man with his Thermal Environment, Science, Vol. 94, pp. 428~430, 1941
- 16) ASTM-F 1291, Standard Test Method for Measuring the Thermal Insulation of Clothing Using a Heated Manikin, 1991
 - 17) Dufton, A.F. : The Equivalent Temperature of a Warmed Room, JIHVE, Vol. 4, pp. 227~229, 1936
 - 18) Bedford, T. : Basic Principles of Ventilation and Heating, H.K. Lewis & Co., 1948
 - 19) Madsen, T.L., Olesen, B.W., Kristensen, N.K. : Comparison between Operative and Equivalent Temperature under Typical Indoor Conditions, ASHRAE Trans. Vol. 90, I, pp. 1077~1090, 1984
 - 20) 田辺新一, 長谷部ヤエ, 木村建一, 芳賀陽一 : PMV, SET* を用いた有風時の温冷感予測について, 人間—生活環境系国際会議 (ICHES '91), pp. 613~616, 1991
 - 21) Mitchell, D. : Convective Heat Loss from Man and Other Animals, In Heat Loss from Animals and Man, Ed. by J.L. Monteith and L.E. Mount, Butterworths, LONDON, 1974
 - 22) Bischof, W., Madsen, T.L. : Physiological Adaptation of Thermal Manikins, 人間—生活環境系国際会議 (ICHES'91), pp. 147~150, 1991

記号表

- C : 着衣外表面よりの対流熱損失量 (裸体時は皮膚表面) (W/m^2)
- E_s : 皮膚表面よりの蒸発熱損失量 (W/m^2)
- I_a : 裸体時体表面積基準の着衣外表面から環境までの熱抵抗 (clo)
- I'_a : 衣服着用時表面積基準の着衣外表面から環境までの熱抵抗 (clo)
- I_{cl} : クロ値 (Basic Clothing Insulation), 基礎着衣熱抵抗 (clo)
- I_t : 皮膚表面から環境までの着衣の全熱抵抗 (clo)
- M : 人体の代謝量 (W/m^2)
- P_a : 水蒸気圧 (Pa)
- Q_a : 裸体時の皮膚表面よりの顕熱損失量 (W/m^2)
- Q_m : 人体よりの全熱損失量 (W/m^2)
- Q_{res} : 呼吸による熱損失量 (W/m^2)
- Q_s : 皮膚表面よりの全熱損失量 (W/m^2)
- Q_t : 着衣時の皮膚表面よりの顕熱損失量 (W/m^2)
- R : 着衣外表面よりの放射熱損失量 (W/m^2)
- f_{cl} : 着衣面積比 (被服着用時の全表面積/体積面積)
- h_c : 人体の対流熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- h_r : 人体の線型放射熱伝達率 ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- t_{cl} : 着衣外表面温度 ($^\circ C$)
- t_{eq} : サーマルマネキンによる等価温度 ($^\circ C$)
- t_o : 作用温度 ($^\circ C$)
- t_s : 平均皮膚温度 ($^\circ C$)

(添え字の n は裸体時, cl 着衣時を表す。 i は各部位を表す)。

(1992 年 8 月 28 日原稿受理, 1993 年 3 月 8 日採用決定)