(平成元年12月2日受理)

熱流計を用いたサーマルマネキンによる 着装の評価方法

お茶の水女子大学家政学部 長谷部ヤエ
桐蔭学園横浜大学工学部 竹内 正顯

EVALUATION METHOD FOR EFFECT OF WAY OF WEARING ON HEAT TRANSFER WITH THERMAL MANIKIN AND HEAT FLUX METERS

By Yae Hasebe^{*1} and Masaaki Takeuchi^{*2}

^{*1} Faculty of Home Economics, Ochanomizu University, Bunkyo-ku, Tokyo, 112 Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Toin University of Yokohama, Midori-ku, Yokohama, 227 Japan

ABSTRACT: The purpose of this study was to explain and prove a method to estimate heat transfer affected by the way of wearing clothing. We measured the surface temperatures of a thermal manikin and heat loss from it, when distance between the manikin and the inside surface of clothing at the neck line was changed. In order to understand the phenomena on experiments with manikin, we calculated the surface temperatures of aluminum flat plate and heat loss from it using a simple mathematical model. The common results from experiments and calculation with the simple mathematical model showed that 1) there was little or a little difference between surface temperature of the exposed part and that of the part covered with clothing, and that 2) heat loss from the exposed part was larger than that from the covered part, and the narrower the exposed part the larger the heat loss when clothing fits loosely. In order to investigate heat transfer affected by the way of wearing clothing, it is more effective to measure not only surface temperature of the thermal manikin but also heat loss from it.

(Received December 2, 1989)

1. 緒 言

人が衣服を着用する場合、同一の衣服でも着装の仕方によってより涼しく、或いはより温かく感じる。これは着装により人体から環境への熱の移動に差が生じるためであると考えられる。着装による衣服の熱抵抗の変化に関する研究は、従来、花田のスポーツウエアの胸の開口部の大小¹⁾、ワンピースのベルトの有無²⁾によって胸、上腹、腹等のブロック別の熱遮断効果がどのように異なるかを求めた研究がある。これによると、同一ブロック内での着装の変化による違いは求められておらず、また、適度な通気性を持つ布を試料とした場合にはベルトの有無による着装の差はほとんどみられない²⁾。サーマルマネキンは、日本では銅またはアルミニウムという熱伝導率の大きい素材で作られている。それ故、同一プロ

ック内での着装の変化による影響を見ようとしても、同一ブロック内の表面温度には部位による差がほとんど生じないため、マネキン表面温度とマネキン周囲気温との差を使って求められる熱遮断効果によって着装の変化による熱移動の部位間による差を明確に求めることは難しい。そこで、本研究では、このようなサーマルマネキンを用い、衣服の上部開口部を変化させて着装させたときのサーマルマネキン胸部の放熱量を、熱流計により局所的にとらえることにした。この手法により着装の変化による熱移動の差を明確にとらえることができた。さらに、この現象を理解するために、アルミニウム平板の一部を布でおおった場合のモデルを想定し、覆われた割合と覆った部分の熱通過率を変化させて、平板からの放熱量の変化を計算で求め、実験結果がモデルによる計算値で理解できるか否かを検討した。

Fig. 3. Distribution of surface temperatures of thermal manikin wearing (loose fit).

Fig. 4. Heat loss when the blouse fits tightly.

1.0mm)で測定した。また、熱流束は各2個のサーミスタの真中に貼付した5つの熱流計(英弘精機株式会社製熱流素子 cn-9 40×20×1.7mm)により測定し、その結果をペンレコーダに連続的に記録させた(図4、5参照)。熱流計1は密閉型するとき、その下端が衣服におおわれないように注意した。サーマルマネキンの制御方法は電流制御とした。マネキン各部位への供給電流を表4に示す。実験はできるだけふく射の影響を少なくするようにマネキンの周囲(約1.6×1.2×2.5m)を布で囲い、約7時間恒温に近い状態(7時間の温度変化は±0.5°C以内)を保つことができる室で行った。2種の素材各々を2回ずつ実験した。それゆえ、環境温は実験を

Fig. 5. Heat loss when the blouse fits loosely.

Table 4 Heat Supply to the Thermal Manikin

Body part	Electric current supply
Head	59.1 (W/m ²)
Chest	60.7
Back	40.0
Abdomen	63.3
Buttock	74.2
Upperarm	78.8
Forearm	51.3
Hand	76.6
Thigh	63.2
Leg	51.0
Foot	59.3

行った日により異なり28-30°Cである。1実験中、定常状態が得られた後、3回の繰り返し測定を行う間の環境温の変化は±0.25°C以内であり、サーマルマネキンを電流制御にして測定した場合、この位の環境温の変化は熱流束 q の変化にたいした影響を及ぼさないと考える。また、日を変えて実験をおこなうと環境温が異なるが、着装の変化による実験結果の変化はほぼ一定であり(図4、5)再現性がある。

2.2 結果

図3は綿片ネルのブラウスを、腹部でルーズフィットとし、上部開口部で密閉型および開放型に変化させて着装させたときのサーマルマネキンの胸部(正中線上)の表面温度を示している。表面温度の最高と最低の差はヌードの場合ほとんどが約1°Cであり、綿片ネル、リバー

シブルウールの2種の素材ともルーズフィットで着衣の場合、そのほとんどが約 1.7°C であり、タイトフィットの場合は約 2°C である。これはマネキンが熱伝導率のよいアルミニウムでできているためマネキンシェル内を温度の高い方から低い方へ熱が容易に移動するので、表面温度は均一化される。それ故、露出されている point 1 の表面温度と衣服で覆われている point 2 の表面温度の差はヌード、開放型、密閉型各々約 0.8°C 、 1.5°C 、 1.8°C 以下である。開放型はネックライン中央で約 3.5cm 持ち上げられているので、着衣状態であっても環境温とはほぼ同じ温度の空気に触れる上胸部の面積は大きいと思われる。それにもかかわらず、ブラウスを密閉型にして着装している場合のマネキン表面温度と、密閉型にして着装している場合のそれとの間には各点とも 0.3°C 以下の温度差しかみられない。タイトフィットについても同様であり、着装による差は顕著とはいいがたい。

前節に記したようにマネキンに5個の熱流計を貼付したが、本研究では、露出されている部位に貼付されている熱流計1と衣服に覆われている部位に貼付されている熱流計2～5のうち一番上に貼付された熱流計2から得られた結果について述べる。図4は綿片ネルのブラウスを腹部でタイトフィットに着装させた場合、図5はルーズフィットに着装させた場合の着衣のネックラインを開放型から密閉型に変えたときの熱流束の変化を示している。どちらもマネキンの胸部への供給熱量は $60.0 \pm 0.4\text{W/m}^2$ である。

まず、タイトフィットの場合(図4)についてみると、露出している部分に貼付されている熱流計1による熱流束 q_1 は大きく、開放型では約 92W/m^2 、密閉型では約 87W/m^2 である。衣服で覆われている部分に貼付されている熱流計2による熱流束 q_2 はそれより小さく、開放型では約 62W/m^2 、密閉型では約 56W/m^2 である。開放型のネックラインは中央で約 3.5cm 持ち上げられているので、熱流計2は着衣下にあっても密閉型での熱流計2よりもより低い温度の空気に触れると考えられるが、開放型の熱流束 q_2 は密閉型のそれよりも僅かしか大きくならない。開放型での q_1 と q_2 の差と密閉型でのそれらの差はともに約 31W/m^2 である。

ルーズフィットの場合(図5)についてみると、開放型では露出している部分に貼付されている熱流計1による熱流束 q_1 はタイトフィットのそれより小さく、衣服で覆われている部分に貼付されている熱流計2による熱流束 q_2 はタイトフィットのそれよりも大きく、各々約 75W/m^2 、約 72W/m^2 であり、衣服で覆われているか否かによる差は顕著とはいいがたい。密閉型に変化させる

と露出している部分に貼付されている熱流計1による熱流束 q_1 は非常に大きくなり、約 108W/m^2 となる。しかし衣服で覆われている部分に貼付されている熱流計2による熱流束 q_2 は小さくなり約 51W/m^2 となる。開放型の q_1 と q_2 の差は僅か約 3W/m^2 であるのに対して密閉型でのその差は非常に大きく約 57W/m^2 である。

このようにタイトフィットでは熱流束の大きさには開口部の形態による差はほとんどみられないが、ルーズフィットではネックラインが開放型から密閉型へと変わると大きく変化する。リバーシブルウールについても同様な傾向が見られるが、開放型の熱流束 q_1 はわずかに大きい。

次に、ペンレコーダで連続的に記録させたカーブの乱れを大、中、小に分類してみると、タイトフィットで開放型の場合 q_1 の乱れは非常に大きく、タイトフィットで開放型の場合の q_2 とルーズフィットで密閉型の場合の q_1 の乱れは中程度である。また、タイトフィットで密閉型の場合の q_1 、ルーズフィットで開放型の場合の q_1 および q_2 の乱れは小さく、密閉型の q_2 はタイトフィットでもルーズフィットでも腹部での衣服の着装状態に関係なく乱れない直線に近いカーブを示している。すなわち、上記の乱れは衣服間隙内とそれに続く上胸部の対流の様相に関係し、次のように考えられる。タイトフィットで開放型の場合、 q_1 、 q_2 では間欠的な不安定な対流、タイトフィットで密閉型の場合の q_2 、ルーズフィットで密閉型の場合の q_2 では連続的なスムーズな対流があることを示し、密閉型の q_2 は上部開口部が閉じられている着衣下にあるので腹部で衣服がマネキン表面に接触しているか否かに関係なく対流に乱れないことが推測される。

3. 数理モデル

上部開口部の影響はルーズフィットの場合の熱流束に大きくみられ、露出されている部位の熱流束は開放型よりも密閉型で大きい。この結果が妥当であるか否かを数理モデルによって検討する。

サーマルマネキンはアルミニウムの鋳物で作られているので、それを単純化してアルミニウムの垂直平板とみなした。平板の長さ方向を X とする。厚さを δ とする。 δ は 0.5cm であり、アルミニウムの熱伝導率 λ は大きいので、厚さ方向の温度分布は均一であると考えられる。図6のように平板の裏面を熱流束 q で熱したとき X 方向の熱伝導と環境への熱伝導率 $h(X)$ によって放熱されるとすると温度に関する方程式は

$$-\lambda \delta \frac{d^2 T}{dX^2} + hT = q \quad (1)$$

Fig. 6. A simple model of aluminum flat plate.

境界条件は

$$\left(\frac{dT}{dX} \right)_{X=0} = 0$$

$$\left(\frac{dT}{dX} \right)_{X=L1+L2} = 0 \quad \text{とする。}$$

h はアルミニウム平板表面から $T=0^\circ\text{C}$ の環境までの熱通過率, X は垂直方向の高さであり, アルミニウムの露出されている部分の長さを $L1$, 衣服で覆われている部分の長さを $L2$ とする。露出されている部分と被覆されている部分で h は階段状に異なった値を持つとみなし, 露出されている部分の $L1$ の熱通過率を $h1$, 被覆されている部分 $L2$ の熱通過率を $h2$ とする。前節で述べたように, 衣服間隙がある場合は衣服内で対流が生じていると思われるが, その場合の熱通過率は複雑なものになる⁴⁾。ここでは解析解を求められるまで単純化する。露出されている表面の自然対流熱伝達率を he , 衣服下の空気層の厚さを δa , その熱伝導率を λa , 衣服の厚さを δf , その熱伝導率を λf とすると, $L1$ でのアルミニウム平板表面から環境までの熱通過率 $h1$ は

$$h1 = he \quad (2)$$

衣服をアルミニウム垂直平板に接して覆った場合の $L2$ での熱通過率 $h2$ は

$$h2 = \frac{1}{\frac{\delta f}{\lambda f} + \frac{1}{he}} \quad (3)$$

衣服を間隙をもたせて覆った場合の $L2$ での熱通過率 $h2$ は

$$h2 = \frac{1}{\frac{\delta a}{\lambda a} + \frac{\delta f}{\lambda f} + \frac{1}{he}} \quad (4)$$

とあらわされる。以上のような条件で式(1)の解は次のようになる

$$\text{ただし } A = \frac{h1}{\lambda \delta}, \quad B = \frac{h2}{\lambda \delta}$$

(λ, δ はアルミニウム平板の値である)

$$0 \leq x \leq L1$$

$$T(x) = \frac{q}{h1}$$

$$+ \frac{\left(\frac{1}{h1} - \frac{1}{h2} \right) q \cosh(x\sqrt{A})}{\cosh(L1\sqrt{A}) + \sqrt{\frac{A}{B}} \sinh(L1\sqrt{A}) \coth(L2\sqrt{B})} \quad (5)$$

$L1 \leq x \leq L1+L2$ のとき

$$T(x) = \frac{q}{h2}$$

$$- \frac{\left(\frac{1}{h2} - \frac{1}{h1} \right) q \cosh\{(L1+L2-x)\sqrt{B}\}}{\cosh(L2\sqrt{B}) + \sqrt{\frac{B}{A}} \sinh(L2\sqrt{B}) \coth(L1\sqrt{A})} \quad (6)$$

前節のタイトフィットでも前正中線近辺ではネックライン付近および腹囲線の付近では衣服はマネキン表面に接しており, この場合の $h2$ は式(3)で表されるが, その他の部位のほとんどには間隙があり, この場合の $h2$ は式(4)で表されることになる。しかしながら衣服下端から上端までの $h2$ の正確な値は分からない。ただし平均間隙を求めるとすると, それはルーズフィットよりも小さいことは明かである。それ故, 細かい値を推定しても仕方がない現状なので $1/he, \delta f/\lambda f, \delta a/\lambda a$ ともに同程度の値とみなして, タイトフィットでは $h1:h2$ を $1:1/2$ (間隙が小さい場合), ルーズフィットを想定して $1:1/3$ (間隙が大きい場合) とし, 密閉型を想定して $L1:L2$ を $1:9$ (露出部小) あるいは, 開放型を想定して $1:4$ (露出部大) とした場合, $L1+L2=30\text{cm}$ について式(1)を解いた。その結果を図7~図10に描いた。

図7は $h1:h2=1:1/2$ (衣服をタイトフィットで着用したときを想定) の場合, 図8は $h1:h2=1:1/3$ (衣服をルーズフィットで着用したときを想定) の場合の平板の温度を推定している。 $T1$ は露出部分, $T2$ は被覆部分の平板の温度とすると, アルミニウムの熱伝導率が大いいため $T1$ と $T2$ の間にはほとんど温度差がみられない。しかし露出部分が1割から2割に増えると平板全体の温度は, 図7 (タイトフィット) の場合で約 1.8°C

Fig. 7. Temperature distribution on aluminum flat plate for $h_1 : h_2 = 1 : 1/2$ by calculation (narrow air space with tight fit blouse).

Fig. 9. Rate of heat loss for $h_1 : h_2 = 1 : 1/2$ by calculation (narrow air space with tightly fit blouse).

Fig. 8. Temperature distribution on aluminum flat plate for $h_1 : h_2 = 1 : 1/3$ by calculation (wide air space with loosely fit blouse).

Fig. 10. Rate of heat loss for $h_1 : h_2 = 1 : 1/3$ by calculation (wide air space with loosely fit blouse).

および、図8（ルーズフィット）の場合で約 4.5°C 低下する。図8の場合すなわち保温力の大きな衣服で覆われている場合の方が露出部分の大小（すなわち着装の仕方）によって平板の温度が大きく変わるように推定される。

図9は $h_1 : h_2 = 1 : 1/2$ （衣服をタイトフィットで着用）の場合と図10は $h_1 : h_2 = 1 : 1/3$ （衣服をルーズフィットに着用）の場合の放熱量を無次元化してあらわしている。どちらも露出部の放熱量は被覆部の放熱量よりも大きい。各図の $L_1 : L_2 = 1 : 9$ と $1 : 4$ の2つの分布を比較してみると、露出部の放熱量は図9（タイトフィッ

ト）では $1 : 9$ （露出部小）の場合 $1 : 4$ （露出部大）よりも0.16、図10（ルーズフィット）では0.36大きい。すなわち、露出している部分を小さくすると露出されている部分からの局所的な放熱量は大きく、特に保温力の大きな衣服で覆われている場合にその差が大きくなっている。

以上、計算の結果より次のようなことがいえる。サーマルマネキンが熱伝導率の大きいアルミニウムでできているため、マネキンの同一ブロック内においては、上部開口部を変化させて着装させても、それによって開口部の熱通過率が変化したとしても部位間の温度差は認め難い。従って、マネキンの表面温度を計測して、上部開口

部を変化させた着装の違いによる熱移動の差をみるのは困難である。このことは実験で確認された温度分布と一致している。

一方、露出することによって熱通過率が大きくなればその局所放熱量は被覆されている部分の局所放熱量よりも大きくなるはずである。実験結果をみるとタイトフィットに着用している場合、上部開口部を変化させても局所放熱量の変化は小さいが、ルーズフィットに着用している場合、上部開口部を開放型から密閉型に変化させると露出部の局所放熱量の変化は非常に大きい。この結果から次のようなことがわかる。上胸部の開口の効果が著しいのは、ルーズフィットの場合であり、タイトフィットの場合は開口による熱通過率の増加は小さい。衣服の着装の仕方による熱移動の差をもとめたい場合、マネキン表面温度の測定と熱流計の使用を併せるのが有効であろう。タイトフィットとルーズフィットを開放型にするか密閉型にするかの差異が全く異なる。前節ではこの原因を熱流束の乱れから推測した。衣服下に間隙のない場合の熱通過率(式(3)の値)を h_t 、間隙のある場合の熱通過率(式(4)の値)を h_c 、間隙に対流がある場合を h_c' とする。これらおよび露出された面の熱伝導率 h_e を加えてその大小関係を考えると次のようになるであろう。

$$h_e > h_c' > h_t > h_c$$

したがって着衣の部位では1)ルーズフィットで開放型、2)タイトフィットで開放型、2')タイトフィットで密閉型、4)ルーズフィットで密閉型の順に h_2 の値が小さくなる。 h_2 の効果を図9、10でみると、 h_2 が小さいほど q_1 と q_2 の差が大きい。図4、5の q_1 、 q_2 の差はこの h_2 の順序に依っているようであろう。Fourtら³⁾が提唱している煙突効果はルーズフィットで開放型にして着装したときに生じており、衣服内を気流が下方から胸の上部まで上昇移動すると考えられ、この場合により涼しく感じられるものと思われる。

4. 結 論

サーマルマネキンを用いて衣服の上部開口部を変化させて着装させた時のマネキン表面温度と放熱量を測定した。一方、実験結果が妥当であるか否かをみるために、アルミニウム平板による数理モデルを解くことにより、露出部の大きさを変化させた場合のアルミニウム平板の温度と無次元化した放熱量を求めた。主な実験の結果と

数理モデルを解いた結果は次の通りである。

(1)サーマルマネキンによる実験の結果

A) マネキン表面温度は、露出されている部分と被覆されている部分との間に差はみられるが、着装状態による差はほとんどみられない。

B) タイトフィットに着用した場合、局所放熱量の大きさには上部開口部の形態による差は露出部でも被覆部でもみられない。

C) ルーズフィットに着用した場合、開放型から密閉型に変化させると露出部からの局所放熱量は大きくなり、被覆部の局所放熱量は小さくなる。

(2)数理モデルを解いた結果

a) アルミニウム平板の温度は露出されている部分と被覆されている部分とで差はみられない。

b) 露出部分の割合が増えるとアルミニウム平板の温度は低下する。

c) 露出部からの局所放熱量は被覆部からの局所放熱量よりも大きく、露出部が小($L1:L2=1:9$)の場合、露出部からの局所放熱量は大きい。それは保温力の大きな衣服に覆われている($h1:h2=1:1/3$)場合により大きくなる。

このように実験結果は数理モデルを解いた結果と同様な傾向を示しているので妥当な結果であると考えられる。サーマルマネキンは熱伝導率の大きいアルミニウムでできており、アルミニウムシェル内の熱の伝導が容易であるため同一ブロック内の温度はほとんど均一になる。衣服の上部開口部を変化させても着装させた場合の伝熱的な効果を評価するためには温度以外の計測量が必要である。本報では熱流計を使った。その結果、着装効果がはっきりすることがわかった。温度を均一化する働きはマネキンに限らず人体でも同様である。したがって上記の方針の重要さはマネキンに限られたものではないと思う。

文 献

- 1) 花田嘉代子, 繊消誌, **20**, 305 (1979)
- 2) 花田嘉代子, 繊消誌, **21**, 177 (1980)
- 3) L. Fourt and N. Hollies, "Clothing comfort and function" Marcel Dekker, Inc., New York p. 86 (1970)
- 4) 薩本弥生, 竹内正顯, 長谷部ヤエ, 石川欣造, 繊学誌, **46**, 206 (1990)