

着衣の bellows action (ふいご作用) の 着衣の放熱性能への効果

お茶の水女子大学 薩本弥生

The Effect of Bellows Action on Heat Transfer in Clothing System

by

Yayoi Satsumoto

*Department of Human Environmental Engineering,
Ochanomizu University*

ABSTRACT

Bellows action is one of the most effective mechanisms to exchange air and heat inside clothing. The effect of bellows action on heat transfer in clothing system has been investigated with experimental model. The effect of bellows action on heat transfer has been expected being affected by both air permeability of clothing material and the size of air space in clothing. Contrary to our expectation, the effect of air permeability was small. On the other hand, the effect of size of air space was remarkable. When the size of air space "s" was set 5mm, the effect of bellows action on heat transfer in clothing was largest. The larger or the smaller "s" was, the smaller the effect of bellows action was. On contrary to other size of space, when "s" was 20mm, bellows action does not always increase heat transfer.

要 旨

着衣のふいご作用 (bellows action) が放熱に有効であることは経験的に周知のことであるが、その定量的な効果についてはあまり検討されていない。本研究は、ふいご作用の着衣の放熱性能への効果、さらにはそのメカニズムを明らかにするため、無風の環境において、人体の発汗していない皮膚を模擬する発熱平板および着衣のふいご作用現象を模擬する上下往復移動装置を用い、モデル実験を行った。着衣の熱伝達に影響を与えると考えられる衣服の素材要因と着衣の構成要因に対して、それぞれ素材の通気性および衣服下間隙の寸法や開口部との距離などを取り上げ、着衣の熱伝達へのふいご作用の効果を検討することを目的とした。ふいご作用の効果は開口部からの距離に比例してその放熱効果が大きく現れた。素材の通気性に関しては予想に反して着衣の放熱性能への影響は小さく、極端に通気性が小さいメッシュ素材以外はほとんど通気性による差は見られなかった。間隙の効果に関しては顕著な差が見られ、間隙 5mm で最もふいご作用の効果が現れ、それより間隙が小さくなくても、間隙が大きくなってもふいご作用の着衣の放熱性能への効果が小さくなった。間隙 20mm では逆に位置によっては着衣の熱抵抗がふいご作用により増す場合さえ見られた。

緒 言

ヒトは生理的な体温調節機構をもっているが、裸体ではその適応可能環境は狭い。衣服がこの機構を補助することより、ヒトは地球上のより広い環境に適応することができるようになった。また、衣服は温度だけではなく、湿度、気流、放射などの環境の変化や人体の活動状況に応じて、衣服内気候が最も快適な状態を保つように、ヒト-衣服-環境への熱や水分を移動させる調整機能を果たしている。

ヒトは作業や運動によって、代謝量が増加するが、筋肉の仕事効率は比較的に低いいため、産熱の大部分が熱に変換される。ゆえに、一定の環境条件において、安静時には熱平衡に達し、快適な着衣の熱抵抗が、運動時には必要以上の断熱になって、熱の発散を妨げ、衣服内はうつ熱状態となることがしばしばある。このような時不快感を感じる。これに対して、ヒトは行動性体温調節を行う。例えば、エアコンや扇子の使用など。エアコンにより生じた環境はすぐに定常状態になる。しかし、ヒトはエアコンによって得られた定常状態の空調より、むしろ扇子やうちわ、あるいは直接に手を使って、衣服の衿元などの開口部付近をパタパタ動かすことによって得られる非定常の気流を快適に感じやすい。実際、代謝量の明らかな増加を伴う長時間の人体の活動に対し採る行動性体温調節は、非定常な変化をもたらす多少リズムカルな衣服の動きと関連している。また、歩行時にも四肢部の動作とともに衣服のリズムカルな動きが生じる。人体と衣服との間に強制的な気流が生じ着衣の熱伝達に影響を与える。これらの現象はふいご作用 (bellows action) と呼ばれる。日常生活の中で、ふいご作用はよく見られる。

このような着衣のふいご作用が、放熱に有効であることは経験的に周知のことである。しかし、その定量的な効果については、これまであまり検討されていない。したがって、温熱的快適性の面から見ると、人体まわりによく生じるふいご作用は着衣系の熱伝達にどのように影響するかを定量的に明らかにする必要がある。

着衣系の熱伝達は衣服素材の性能によって大きく影響されるが、素材の性能だけには限らない。同様の素材を用いても衣服構成・着方によって人体からの放熱量は著しく左右され、その効果は衣服素材のもつ物性値の効果と同様、時にはそれ以上に大きい。ゆえに、快適な衣服内気候を形成するには、“衣服の素材”と“着衣の構成”という

二つの要因を十分に考慮しなければならない。前者の効果を見るには、保温性と関係の深い布の熱伝導率、厚さ、通気性などの物性値を尺度として衣服素材を選択することが重要である。また、後者の効果を見るには、衣服内の熱移動と関係の深い衣服下間隙によって作られる空気層、開口条件などが考えられる。とくに、衣服下間隙は、素材と比べ高次元要素の一つとして、その量がかなり重要である。

一方、従来から被験者実験や、幾何的にも熱的にも人体を模擬したサーマルマネキンによる実験によって、衣服の性能評価が多数行われてきた。しかし、人為的に生理状態や気流の影響を避けるにもかかわらず、人体やマネキンの幾何形状はしばしば着衣系の物理現象を複雑化させる¹⁾。よって、人体-衣服-環境、つまり衣服を介した熱伝達への衣服の物理的性質の効果を解析する場合、人体やマネキンのみでは熱伝達の要素を分けて細かく検討することが難しくなる、または、不可能になってしまう恐れがある。そうすると、衣服素材の性能設計、高機能性素材の開発や系統的な衣服設計などに応用するのは難しい。そのため、より単純化した実験を平行して行う必要があると思われる。今までも、人体形状を円筒や平板など単純な形にモデル化した研究が行われてきた。

従来の文献により、着衣系の熱伝達に及ぼすふいご作用の影響に関する研究は数少ない。

Beldingら²⁾の研究は、歩行によって、北極における着衣の熱抵抗が安静時の値の1/2までに低下することを示した。また、Vokac³⁾のトレッドミルを使った被験者実験の例がある。この研究では歩行時、歩行停止直後および歩行再開時の衣服内の温湿度、放熱量を比較し、歩行停止直後、衣服内の温湿度は急激に上昇したが放熱量は低下した。歩行を再開すると歩行停止直後における変化傾向と逆に変化したことを示し、これを、ふいご作用による衣服内気候の強制的な換気効果に

よると解釈した。

これらの研究は、総括的な研究のため、安静時における着衣全体としての熱抵抗との比較はできるが、ふいご作用に影響を与えられる衣服素材の物性や着衣の構成要因については検討されていない。また、ふいご作用に対するモデル実験を行った研究例は見あたらなかった。

そこで、本研究はふいご作用の着衣の放熱性能への効果、さらにはそのメカニズムを明らかにするための基礎研究として、無風の環境状態において、発汗していない皮膚を模擬する発熱平板および着衣のふいご作用を模擬する往復移動装置を用い、モデル実験を行う。着衣の放熱性能に影響を与えられる衣服の素材要因と着衣の構成要因に対して、それぞれ素材の通気性および衣服下間隙の寸法や開口部との距離などを取り上げ、着衣の放熱性能へのふいご作用の効果を検討することを目的とする。

1. 実験方法

1.1 実験素材

強制対流のある場合に着衣の熱伝達率へ影響を与える要因の一つは素材の通気性の有無と考えられる⁴⁾。実際の衣服素材の通気性と比較するために極端な状況（通気性極大と通気性なし）を含めて、網窓用のメッシュ（通気性極大）、縮縮緬、綿ブロードおよび綿ブロードの上にポリエチレンラップ（厚さは約 12×10^{-3} mmで、放射に対する透過度はほぼ100%である⁵⁾）1枚を密着させた（通気性なし、以下“綿ブロード+ラップ”と呼ぶ）4種類の素材を用いた。すべての素材は、254mm×127mmの大きさの木枠に貼った。2種の衣服素材の諸元を表1に示す。縮縮緬と綿ブロードは充填率がほぼ同じであるにもかかわらず、通気性については、前者のほうが著しく大きく、後者の約13.5倍である。縮縮緬は糸の強撚により厚くなり縮組織により織り目が粗くなったためと

表1 Characteristics of clothing materials

	Broad cotton cloth	Ro-chirimen
Composition	cotton 100 %	silk 100 %
Textile weave	plain weave	Fancy gauze
Yarn density (pieces/cm) ends × picks	54 × 26	38 × 17
Weight per area (g/cm ²) × 10 ⁻²	1.12	1.33
Thickness (mm) (at pressure=63Pa)	0.40	0.57
Bulk density (g/cm ³)	0.28	0.23
Packing factor (%)	18.18	17.29
$\eta = \frac{W}{\rho_f \times \delta} \times 100$	($\rho_f=1.54$) ⁶	($\rho_f=1.33$) ⁶
Porosity (%)	81.82	82.71
Air permeability ((m/s) /Pa) × 10 ⁻³	2.37	32.03

ρ_f : Density of fiber

考えられる。

1. 2 実験方法

実験は、温度 26 ± 0.2 °C、相対湿度 50 ± 5 %、気流 0.1m/s 以下の恒温恒湿室で行った。外界からの放射や対流などの影響を避けるために、実験中、消灯し無人状態にした。人体の模擬皮膚モデルである発熱平板とふいご作用を引き起こす上下移動装置の配置図を図1に示す。

発熱平板は $254\text{mm} \times 127\text{mm}$ のニクロム線を挟んだシリコンゴムの薄板ヒータ (Watlow 社製, 050100CI) の表面に熱流計と熱電対を埋め込んだ PMMA (poly methyl methacrylate) 板を張り付けその表面を皮膚の放射率に近い艶消し黒色に塗装

したものである。ヒータの側面と裏側の断熱のため各面に発泡スチロール板を張り付けた。断熱材を含めての発熱平板の寸法は $274\text{mm} \times 147\text{mm}$ である。PMMA 板の表面を模擬皮膚表面とした。発熱平板への供給熱量は PMMA 板の表面温を人体の皮膚温に近い値 (30 °C ~ 36 °C) になる量、すなわち 50W/m^2 に設定した。PMMA 板には局所の放熱量を測定し開口部からの水平方向の距離の影響を調べるために発熱平板の長さ方向 (254mm) に開口部側端部より 25mm の位置から 30mm 間隔で 235mm までの総計 8 点に熱流計が埋め込まれている (開口部側から各々 No.1 ~ 8 の番号をつけた)。また同様の位置に、模擬表面皮膚温を測定するために熱電対も埋め込んだ。移動装置を置く床面の発熱平板から十分離れた位置に、PMMA 支柱を立て高さ方向に下端より 70mm の位置 (模擬皮膚表面とほぼ同じ高さ) から 40mm 間隔で 270mm までの総計 6 点に熱電対を貼付し環境温を測定した。移動装置に伴う着衣の開口部付近の強制対流を捉えることを目的として微風速計 (本田工業株式会社製 SL-080) を開口部の中央付近に設置した (図1 参照)。すべての実験で、8ヶ所の発熱平板 (模擬皮膚) 温 (T_w) と発熱平板からの放熱量 (q_w)、6ヶ所の環境温 (T_e) および開口

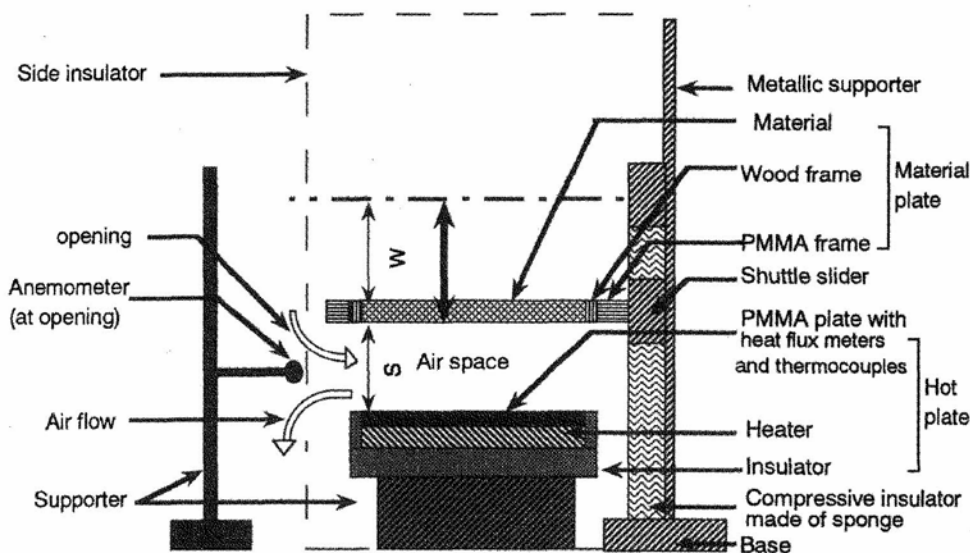


図1 Schematic diagram of apparatus which simulates skin and clothing material with bellows action

部の風速 (v) を30秒毎に測定し、データロガーに記録し、各段階における定常状態の最後の10分間のデータを後の処理に用いた。図1のように、発熱平板を、素材の木枠の真下で素材平面と平行して水平に設置した。素材平面が上下移動で振動が生じないように素材を貼った木枠を、より硬直性のあるPMMA板の外枠内にはめ込み補強した。また、PMMA板の枠をねじ止めし移動装置の金属板と垂直にしっかり固定させた。また、着衣の開口部を1カ所としたモデルにするために、開口部以外の面、すなわち移動装置に向かって発熱平板と素材平面の間の空間の左右側面および移動装置側面をすべて断熱性の良い発泡スチロール板で密閉し、断熱状態とした。素材平板は移動装置につながって移動するため、移動に伴い生じる移動装置側および側面の発泡スチロール板側の隙間にスポンジを貼付し断熱と摩擦の低減を謀った。上下移動装置はパソコンにより制御し、素材と発熱平板(模擬皮膚)の間の衣服下間隙の寸法および上下移動の幅を調節できる。装置の上下移動は、加減速動作である。動作中の平均速度は約40mm/sであった。すなわち、上下移動幅20mm時に上下1往復に要する時間が約1秒かかる。これは、実際の歩行時の手足の1往復速度にほぼ相当する。

すべての実験素材に対して、移動装置の上下動作の振幅 (w) は20mmで、発熱平板と着衣素材との間隙 (s) は5mm, 10mmおよび20mmの場合をそれぞれランダムに3回実験した。間隙の影響を検討するため、綿ブロード+ラップのみ間隙2mmも実験した。図2に着衣時の実験手順を示す。安静、動作および回復の時間はそれぞれ40分であり、40分間における移動装置の上下往復動作回数は約2500回であった。

1. 3 着衣状態

本研究では、熱移動に影響を与える主な4つの要因を考えている。

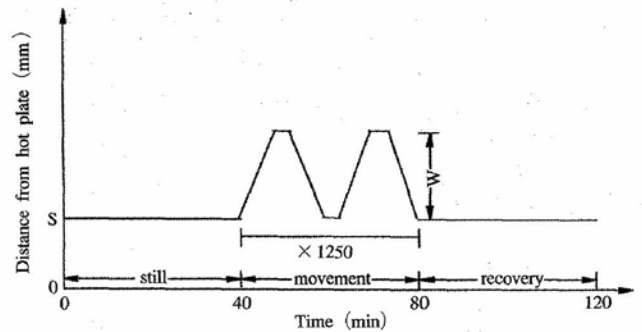


図2 Time-table of experiment (with clothing material)

- (1) ふいご作用の有無；
- (2) 衣服素材の通気性の大小；
- (3) 衣服下間隙の寸法；
- (4) 開口部との距離。

すべての状態において衣服下間隙が存在している。通気性の有無により図3に示す2種の着衣状態が考えられる。

通気性のない素材(綿ブロード+ラップ)に対して、熱移動の経路は開口部しかない。つまり、往復の上下移動とともに、間隙内の暖かい空気が開口部から外へ吹き出されたり、外部の冷たい空気が開口部から間隙内へ吸い込まれたりして、熱交換を行う。一方、通気性のある素材(メッシュ、縞縮緬と綿ブロード)の場合には、熱移動の経路が開口部のほか、素材を通したものがある。

2. 実験結果

2. 1 熱通過率の実測値

各素材各空気間隙における安静時(ふいご作用なし)と動作時(ふいご作用あり)の熱通過率の平均値、標準偏差を求め、ふいご作用の有無についてt検定 ($p < 0.05$) を行った。例として、縞縮緬の間隙毎の結果を図4(a)~(c)に示す。

全般的に、素材と間隙寸法の違いにもかかわらず、開口部との距離の一番遠い測定位置(8番)において、安静時と動作時の熱通過率の値はほとんど変わらず、有意差は見られなかった。また、メッシュの場合は各間隙寸法におけるふいご作用

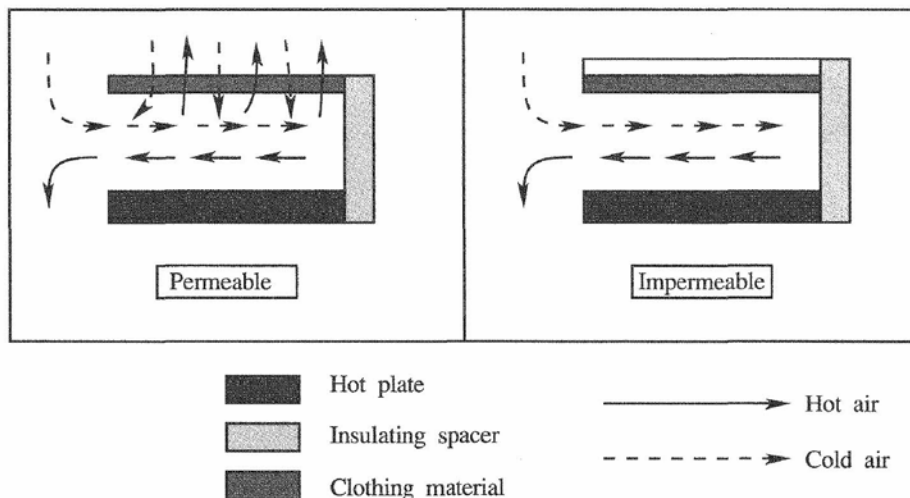


図3 Variations of “how to wear”

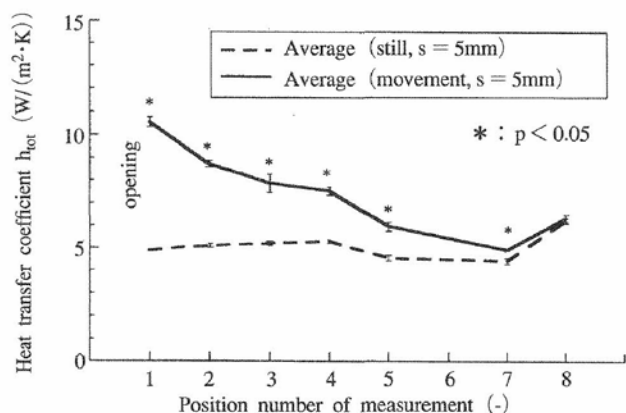


図4 (a) h_{tot} of Ro-chirimen in still and movement ($s=5\text{mm}$). Symbol “*” means the significant difference of h_{tot} with 95 % confidence level between “still” and “movement” situations

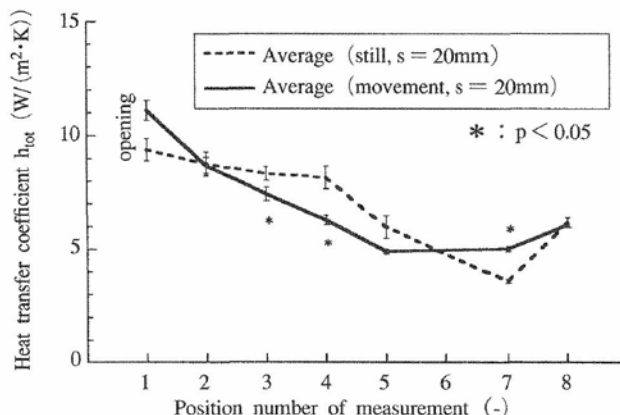


図4 (c) h_{tot} of Ro-chirimen in still and movement ($s=20\text{mm}$). Symbol “*” means the significant difference of h_{tot} with 95 % confidence level between “still” and “movement” situations

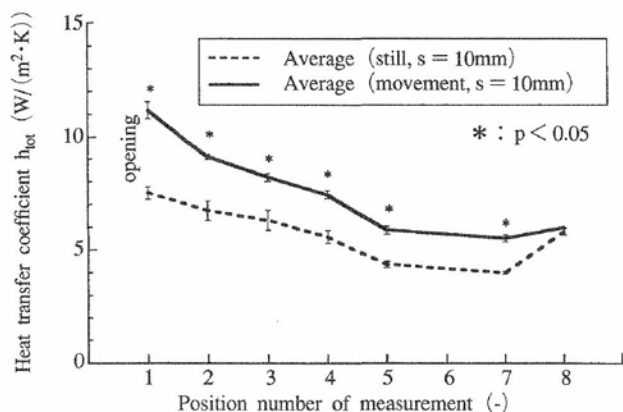


図4 (b) h_{tot} of Ro-chirimen in still and movement ($s=10\text{mm}$). Symbol “*” means the significant difference of h_{tot} with 95 % confidence level between “still” and “movement” situations

の有無による熱通過率の変化は小さかったが、紹縮緬、綿ブロードとブロード+ラップの場合は間隙5mmと10mmにおける1～7番の動作時の熱通過率が、すべて安静時より有意に大きかった。し

かし、この3種の素材に対しては、間隙20mmにおける熱通過率については有意な変化があまりみられなかった。また、発熱平板の測定位置の中央部(3番、4番、5番)において、動作中の熱通過率が安静時よりすべて低下したという逆の変化傾向が見られた。そのうち、紹縮緬の場合はその逆の変化傾向が一番顕著であった。

3. 考察

3.1 素材の通気性の効果

3.1.1 通気性の風速への影響

素材の通気性が開口部付近における動作時の風速に及ぼす影響を図5に示す。全体的に、綿ブロード+ラップから紹縮緬までの風速は通気性の増

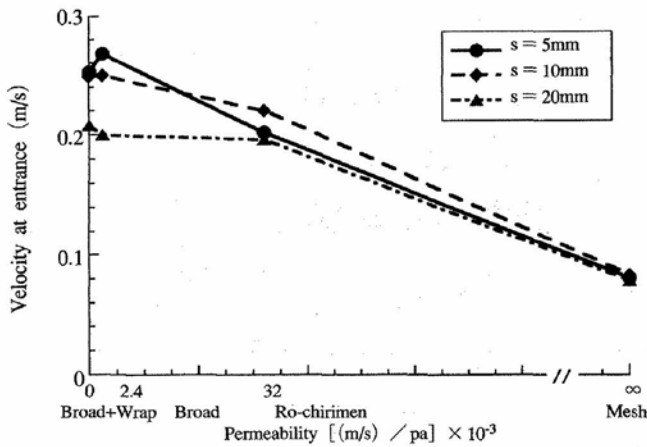


図5 Effect of materials' permeability on velocity at opening under three different sizes of air space

加につれて緩やかに減少するが、通気性が極大に達すると、風速は約0.2m/sから0.08m/sまで急激に低下する傾向が見られた。0.08m/sは安静時の風速とほぼ一致する。これは、ほかの素材と比較すると、メッシュの通気性がダルシー則に基づく測定方法で測定できないほど大きいため、ふいご作用があっても空気の流れが変わらず、安静時と同様に静穏気流であるためと考えられる。

また、通気性の小さい綿ブロードと通気なしの綿ブロード+ラップとの間に、どの間隙においても、風速についての差がほとんど見られず、ふいご作用への通気性の効果は小さいと考えられる。また、通気性が約13.5倍大きい縮縮緬と比較しても、風速についての差がわずかしかなかった。しかも、間隙寸法の増加とともにその差が小さくなる傾向が見られた。間隙が20mmに達すると、通気性の違いにもかかわらず、両者の風速は同じで、0.2m/sであった。したがって、本実験では、衣服素材に対して、間隙が大きいほど、風速への通気性の効果が小さくなることが判った。

3. 1. 2 通気性の熱抵抗の相対変化量への影響

ふいご作用の効果が最も現れた発熱平板の開口部側を代表する測定位置1番に対して、間隙sをパラメータとして、素材の通気性が熱抵抗の相対変化量に及ぼす影響を図6に示す。図の縦軸の値

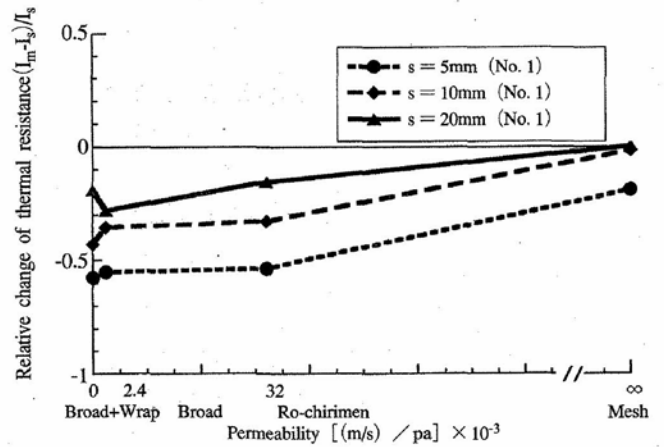


図6 Effect of materials' permeability on relative change of thermal resistance at No.1 under three different sizes of air space

は負に大きくなるほど、ふいご作用による熱抵抗の減少（着衣の放熱性能の向上）が大きいことを意味する。

図6によると、開口部に最も近い測定位置（1番）において、通気性が綿ブロード+ラップ、綿ブロード、縮縮緬、メッシュの順に0から無限大まで極端に大きくなるにもかかわらず、どの間隙においても、メッシュ以外の素材における熱抵抗の相対変化量は、全体的に各間隙毎にほぼ一定に近かった。つまり、ふいご作用による熱抵抗の相対変化量に及ぼす素材の通気性の影響が小さいことが判った。この傾向は発熱平板のどの位置でも同様であった。

3. 2 開口部との距離の効果

最もふいご作用の効果が現れた間隙5mmにおいて、代表点としての測定位置1、4と8番における熱抵抗の相対変化量をそれぞれ図7に示す。間隙5mmではメッシュ以外の素材に対して、熱抵抗の相対変化量の絶対値は1番、4番、8番の順にほぼ線形に低下していく傾向が見られた。開口部との距離は近いほど、その位置におけるふいご作用の効果がより大きいことを示す。この傾向は間隙10mmでも同様であった。また、すべての素材に対して、間隙寸法の違いによる熱抵抗の相対変化量についての差が8番、4番、1番の順に段々顕著になる傾向が明白に現れた。すなわち、開口部

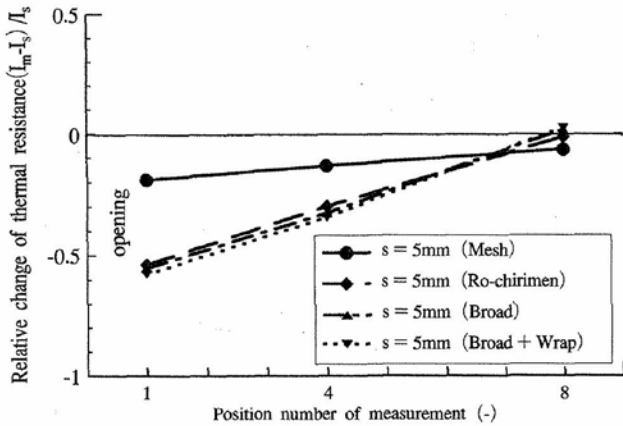


図7 Relative change of thermal resistance at No.1,4 and 8 for all materials when s=5mm

との距離の近い位置における間隙の効果が、遠い位置より顕著である。

しかし、綿ブロード+ラップ、綿ブロードと紹縮緬、その3種の素材に対して、間隙20mmの場合には、測定位置による熱抵抗の変化傾向が間隙5mm, 10mmと異なっている。その傾向をもっと明白に表すために、綿ブロード+ラップ、紹縮緬を代表として選択し、間隙20mmにおける熱抵抗の相対変化量を図8に示す。

図8によると、間隙20mmの場合に、紹縮緬と

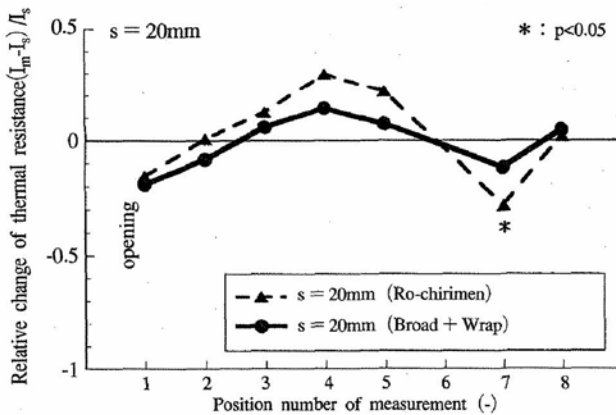


図8 Relative change of thermal resistance under s=20mm in case of Ro-chirimen and Broad+Wrap. Symbol "*" means the significant difference with 95% confidence level

綿ブロード+ラップに対して、ふいご作用により熱抵抗が、開口部に近い1~2番において低下し ($I_m < I_s$)、中央部の3~5番において逆に増加し ($I_m > I_s$)、そのうち、4番における増加の程度が極大になり、また、開口部との距離の遠い7番において再び低下し、閉鎖側に最も近い8番に達す

ると、ほとんど変わらず ($I_m \approx I_s$)、変化量がほぼゼロに戻るという特有な変化傾向が現れた。しかも、通気性ありの紹縮緬に対する熱抵抗の変化程度が、通気性なしの綿ブロード+ラップより顕著である傾向も見られた。とくに、7番における熱抵抗の減少の変化量は紹縮緬のほうが有意に大きかった。

上述の現象を説明するために、まず、通気性なしの単純な場合を選択し、間隙寸法s=20mmにおける発熱平板(模擬皮膚)-素材間の熱移動に関する模式図(図9)を示す。

本実験では、通気性なしの綿ブロード+ラップ

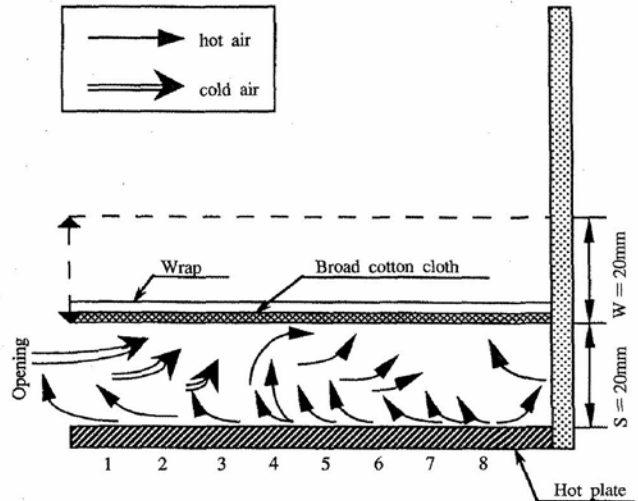


図9 Schematic diagram of heat movement between hot plate and material without permeability (Broad+Wrap) under s=20mm.

に対して、間隙内の暖かい空気が素材を通過して環境へ移動できず、開口部のみからしか逃げられない。また、装置の上下移動の条件(速度や振幅など)が一定ならば、間隙20mmの場合に、発熱平板(模擬皮膚)-素材間の衣服下空気層の空気量が間隙10mmや5mmより多く、それぞれの2倍と4倍になるため、ふいご作用により空気の強制対流が生じたとしても弱いと推定される。これは、往復の上下移動とともに、間隙内の熱移動が以下のように行われるのではないかと考えられる。

- 1) 発熱平板の開放側(1番, 2番)において、間隙内の暖かい空気が開口部から吹き出されたり、外部の冷たい空気が吸い込まれたりし、

同時に熱交換も行われていた。結果としては、発熱平板（模擬皮膚）からの熱が外界へ発散され、熱抵抗が低下した。

2) 発熱平板の閉鎖側に最も近い8番において、放熱された熱が外へ出られず、閉鎖物におつかつてもとに戻った。結果としては、動作時の熱抵抗が安静時とほぼ同じで、ほとんど変化しなかった。一方、7番において、暖かい空気は開口部に向けて移動したが、駆動力が弱いので、開口部付近までに行けず、代わりに中央部に止まった。結果として、7番における熱が徐々に発散し、熱抵抗が低下した。

3) 発熱平板の中央部（3～5番）において、発熱平板（模擬皮膚）からの熱に暖められた空気は外部の冷たい空気との熱交換があるとしても少なく、また、閉鎖側からの熱にも影響されるため、熱が中央部に貯まってしまった。結果としては、動作時の熱抵抗が安静時より逆に大きくなった。3. 1節の“素材の通気性の効果”から、通気性の熱抵抗の相対変化量に及ぼす影響が小さいことが判った。よって、通気性の大きい素材としての紹縮緬に対して、間隙20mmの場合に、通気性なしの綿ブロード+ラップと似たような熱移動が行われると仮定できる。しかし、通気性があるため、素材を通して間隙内部と外部との熱交換が行われる。図10は、通気性の大きい紹縮緬に対して、間隙20mmにおける発熱平板（模擬皮膚）-素材間の熱移動に関する模式図である。

通気性ありの場合には、間隙外の冷たい空気の浸透流が開口部から、また素材を通して、間隙内へ浸入することがすでに判っている。しかし、間隙20mmにおいて、開口部からの浸透流が間隙5mm, 10mmより弱いため、発熱平板の開放側への影響を与える。しかも、その影響が1番, 2番, 3番の順に小さくなると、通気性なしの場合

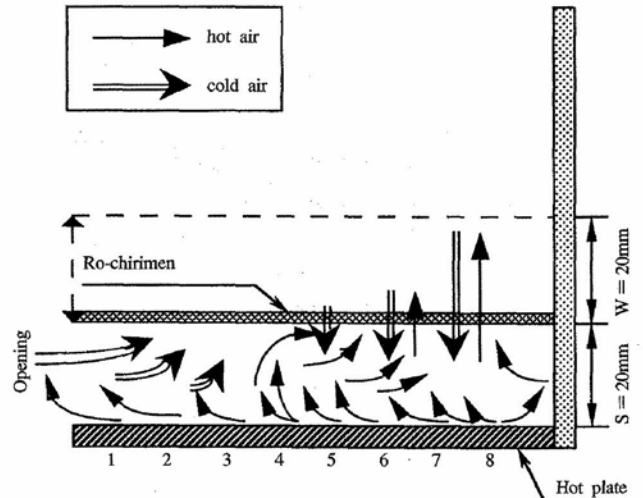


図10 Schematic diagram of heat movement between hot plate and material with permeability (Ro-chirimen) under $s=20\text{mm}$

と同じように考えられる。一方、素材を通す浸透流が、開口部からの浸透流より弱いかもしれないが、ふいご作用により間隙内外の空気の圧力差が1番～8番の順に段々大きくなるにつれて、素材を通す浸透流が徐々に強くなると推定できる。ゆえに、7番において、熱が中央部へ流れることと同時に、外部の冷たい空気が素材を通して浸入し、熱交換を行う。綿ブロード+ラップと比較すると、発熱平板（模擬皮膚）からより多くの熱が放出し、熱抵抗の減少の程度が有意に大きかった。一方、中央部において、その影響を受けるため、熱蓄積の速度が外気との熱交換よりはるかに速い。結果としては、熱抵抗の増加の程度が通気性なしの場合より大きい傾向が現れた。

3. 3 衣服下間隙の寸法の効果

3. 3. 1 間隙寸法の風速への影響

前節までに検討した範囲では、間隙 $s=5\text{mm}$ でふいご作用による風速および熱抵抗の相対変化量への効果が最大に現れたが、さらに狭い間隙寸法を検討するために、通気性の影響を避けた単純な綿ブロード+ラップを対象として、狭い間隙 ($s \leq 5\text{mm}$) に注目し考察した。綿ブロード+ラップに対して、開口部付近における動作時の風速へ及ぼす $2\text{mm} \sim 20\text{mm}$ の範囲で変化させた間隙寸法の影響を図11に示す。

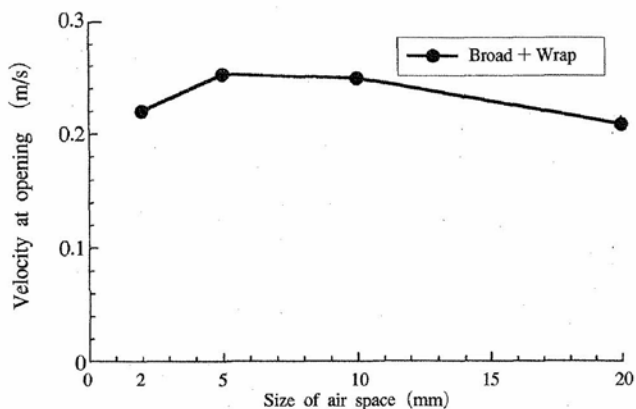


図 11 Effect of size of air space on velocity at opening in case of Broad+Wrap

図 11 では、20mm から 5mm まで間隙寸法の減少につれて、風速が増加する傾向が見られた。そのうち、5mm と 10mm における風速はほぼ同じであった。しかし、間隙を 5mm 以下にさらに減少させると、風速はもう増加せず、逆に低下する傾向が観測された。したがって、間隙 2mm ~ 20mm の範囲では、風速の最大値は、間隙 $s=5\text{mm}$ の時にあり、約 0.25m/s であることが判明した。

3.3.2 間隙寸法の着衣の保温効率への効果

通常、衣服下の空気層は保温性に影響する要素として知られている。着衣は衣服下の空気層の間隙内で流れが起きなければ、静止空気層をそれだけ多く含むことになり、間隙の寸法が大きくなるほど保温性は増加する。しかし、間隙内で対流が起きれば、間隙の寸法が大きくなるほど保温性が低下する。着衣内空気層および素材では静止空気を保ち垂直方向の熱伝導だけで、熱伝達が起きると仮定した、計算上の全着衣熱抵抗 $I_t(c)$ は式 (1) で定義できる。

$$I_t(c) = \frac{s}{\lambda_a} + \frac{d_c}{\lambda_c} + \frac{1}{h_e} \quad (1)$$

ここで、

- s : 発熱平板 - 素材間の間隙寸法 (m) ;
- λ_a : 空気の熱伝導率 (W / (m · K)) ;
- d_c : 素材の厚さ (m) ;
- λ_c : 素材の熱伝導率 (W / (m · K)) ;

h_e : 裸体時の平均熱通過率 = 衣服外表面

— 環境間の熱伝達率 (W / (m² · K)).

対流が生じる現実の環境における実測の全着衣熱抵抗 $I_t(e)$ は、発熱平板のモデル実験結果の測定位置 1 番 ~ 8 番の熱通過率の平均の逆数とする。ここで $I_t(c)$ に対する $I_t(e)$ の比は保温効率 (Thermal Efficiency) ⁷⁾ と定義されている。つまり、

$$TE = \frac{I_t(e)}{I_t(c)} \quad (2)$$

ここで

$I_t(c)$: 熱伝導のみと仮定した計算上の全着衣熱抵抗 (m² · K / W) ;

$I_t(e)$: 実測の全着衣熱抵抗 (m² · K / W).

通気性なしの綿ブロード+ラップに対して、間隙寸法と発熱平板の保温効率 TE の関係を図 12 に示す。

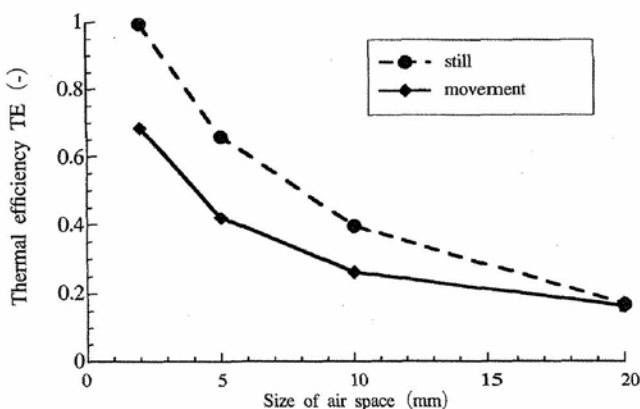


図 12 Observed effect of size of air space on thermal efficiency TE in case of Broad+Wrap

本実験の安静時には、間隙 2mm における保温効率が 1 になって、間隙内の熱移動を熱伝導のみと仮定しても妥当であることを示唆する。換言すると、間隙寸法が非常に小さい場合には、間隙内空気の流れが起こりにくい。これは流体としての空気に、粘性という物性があるからと考えられる。しかし、それ以上の間隙において、間隙が大きくなるほど保温効率が急激に低下する。間隙 20mm になると保温効率が 0.2 以下となり非常に小さく、

保温性の面から見ると効率が悪いと考えられる。保温性低下の原因は対流熱損失の増大である。また、発熱平板が水平に置かれた本実験において、安静時の場合に、間隙寸法の増加につれて保温効率の変化傾向は、発熱平板を垂直に設置した著者ら⁷⁾の実験の結果とよく一致している。

ふいご作用に対する間隙の効果をもっと明白に見るために、保温効率の相対変化量、つまり“(動作時の保温効率-安静時の保温効率)/安静時の保温効率” $((TE_m - TE_s) / TE_s)$ と間隙の関係を図13に示す。

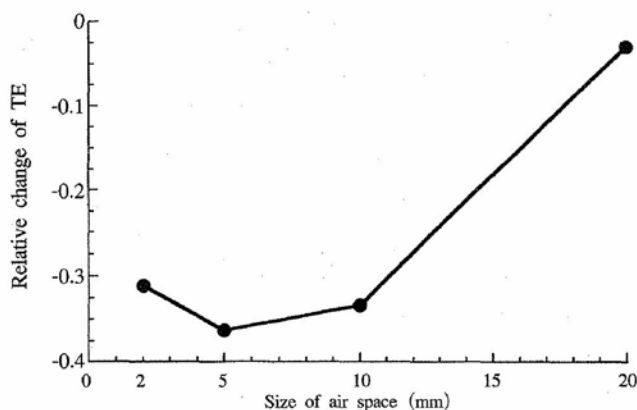


図13 Observed effect of size of air space on relative change of thermal efficiency TE in case of Broad+Wrap

ふいご作用による保温効率の相対変化量は、図13のように最大値が間隙5mmの時に現れた。つまり、間隙の効果が一番大きいのが間隙5mmで、ふいご作用のある動作時の保温効率がふいご作用のない安静時の約36%低下した。間隙5mmより間隙が狭くても(s=2mm)、広くても(s=10mm,20mm)、ふいご作用による保温効率の減少の程度が小さい。とくに、間隙が20mmに達すると、保温効率の相対変化量がゼロに近く、たとえ素材の通気性がなくても、ふいご作用の効果がほとんどないと考えられる。

4. 総括

本研究の目的は、ふいご作用に影響を与えると考えられる衣服の素材要因(通気性)と着衣の構

成要因(衣服下間隙の寸法や開口部との距離など)を取り上げ、無風状態における着衣の熱伝達へのふいご作用の効果を検討することである。そのため、人体の発汗していない皮膚を模擬する発熱平板と着衣のふいご作用を模擬する往復移動装置を用い、モデル実験を行った。通気性の異なる4種の実験素材(メッシュ、紹縮緬、綿ブロード、綿ブロード+ラップ)に対して、振幅20mmで、衣服下間隙は5mm、10mmおよび20mmの場合をそれぞれ実験した。(綿ブロード+ラップに対し間隙2mmの場合も実験した。)

主な結果は次の通りである。

(1) ふいご作用の効果について

紹縮緬、綿ブロード、綿ブロード+ラップ、3種の素材に対しては、衣服下間隙5mmと10mmの場合、1番~7番の測定位置における動作時(ふいご作用あり)の熱通過率がすべて安静時(ふいご作用なし)より危険率5%以下で有意に大きかった。換言すると、紹縮緬と同等あるいはより小さい通気性をもつ衣服素材に対して、衣服下間隙が10mm以下の場合に、ふいご作用の着衣の放熱性能向上への効果が顕著に見られる。

(2) 通気性の効果について

素材の通気性の大きな違いにもかかわらず、メッシュ以外の素材に対して、各間隙および各測定位置における熱抵抗のふいご作用による相対変化量は、素材の通気性によらず、ほぼ一定で、ふいご作用に及ぼす素材の通気性の影響が小さい。つまり、動作時(ふいご作用あり)に、衣服内で生じた熱交換の主な経路は、素材を通してではなく、開口部からであると考えられる。

(3) 開口部との距離の効果について

a) メッシュ以外の素材に対して、間隙5mmと10mmの場合に、熱抵抗のふいご作用による相対変化量の絶対値は、開口部に近い方から1番、4番、8番の順にほぼ線形に低下していく傾向が見られた。また、すべての素材に対して、間隙寸法

の違いによる熱抵抗の相対変化量の差は1番, 4番, 8番の順に徐々に小さくなる傾向も明白に現れた。したがって, 開口部との距離に比例して, その位置におけるふいご作用の効果および衣服下間隙の効果がより大きい。

b) 間隙20mm (振幅20mm) の場合に, メッシュ以外のすべての素材に対して, 発熱平板の開口部付近においては, ふいご作用により熱抵抗が低下し, 中央部においては逆に増加し, また, 閉鎖側付近において再び低下するという特有な変化傾向が現れた。そのうち, 通気性の大きい紹縮緬の場合に, その現象が最も顕著であった。これは, 間隙が大きすぎる ($s \geq 20$) 場合, ふいご作用により放熱の促進が期待されるにもかかわらず, 開口部との距離によっては熱抵抗が増加するという逆の効果をもたらす恐れがあることを示唆している。

(4) 衣服下間隙の寸法の効果について:

a) 間隙2mm ~ 20mm の変化範囲において, 間隙の効果が一番大きいのが5mmであった。ふいご作用により, 綿ブロード+ラップの平均保温効率は最大約36%の程度低下した。

b) 間隙 $s > 5$ mm の場合に, 間隙が大きいほど, ふいご作用の効果がより小さくなる傾向が見られた。間隙が大きすぎると ($s \geq 20$ mm), 素材の通気性がなくても, ふいご作用の効率が悪く逆効果となる位置もあると考えられる。一方, 間隙 $s < 5$ mm の場合に ($s=2$ mm), ふいご作用の効果はあるが, 5mmより小さかった。これは, 流体としての空気に粘性があり, 非常に狭い間隙内において空気の流れが起こりにくくなるためではないかと考えられる。

謝 辞

稿を終えるに当たり, 本研究に対して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感謝いたします。また, 本研究は元お茶の水女子大学大学院生の王海華さん, お茶の水女子大学教授の長谷部ヤエ先生, 元文化女子大学教授 (東京工業大学名誉教授) の石川欣造先生, 桐蔭横浜大学教授の竹内正顯先生との共同研究でなされました。ここに記して感謝いたします。さらに, 本実験の遂行のため重要な位置を占める移動装置の製作に当たりご助力いただきました桐蔭横浜大学の箱木北斗先生, および葉袋正恒先生に感謝いたします。

文 献

- 1) Yayoi Satsuomoto, Kinzo Ishikawa, and Masaaki Takeuchi ; "Evaluating Quasi-Clothing Heat Transfer: A Comparison of the Vertical Hot Plate and the Thermal Manikin" , *Textile Res. J.*, 67, 503-510 (1997)
- 2) H. S. Belding, H. D. Russell, R. C. Darling, G. E. Folk ; "Analysis of Factors Concerned in Maintaining Energy Balance for Dressed Men in Extreme Cold ; Effects of Activity on the Protective Value and Comfort of an Arctic Uniform" , *Amer. J. Physiol.*, 149, p. 223-229 (1947)
- 3) Z. Vokac, V. Křpke, and P. Keül ; "Assessment and Analysis of the Bellows Ventilation of Clothing" , *Textile Res. J.*, 43, 474-482 (1973)
- 4) 竹内正顯, 一色尚次, 石橋靖; 被覆された円柱の伝熱 (第1報), 日本機化学会論文集 (B編), 48, 425 (1982)
- 5) 工藤恵栄; 分光学的性質を主とした基礎物性図表, 共立出版株式会社, p. 538 (1972)
- 6) 石川欣造, 新被服材科学, 同文書院, 東京, p. 41 (1987)
- 7) 薩本弥生, 竹内正顯, 石川欣造; 着衣の保温性への下端開口部の効果, 織学誌, 53, 4 (1997)