

着衣のふいご作用が放熱性能へ及ぼす影響

○ 薩本弥生¹⁾, 長谷部ヤエ²⁾, 竹内正顯³⁾

¹⁾横浜国立大学, ²⁾お茶の水女子大学, ³⁾桐蔭横浜大学

The Effect of Bellows Action on Heat Transfer in Clothing System

Yayoi SATSUMOTO¹⁾, Yae HASEBE²⁾, and Masaaki TAKEUCHI³⁾

¹⁾Yokohama National University, ²⁾Ochanomizu University, ³⁾Toin Yokohama University

Bellows action is one of the most effective mechanisms to exchange air and heat inside clothing. To study the effect of bellows action on heat transfer in clothing system, experiments were done by using a simulated skin (hot plate) and a clothing material plate which was shuttled up and down over a hot plate to simulate a bellows action of clothing. The effect of bellows action on heat transfer has been expected being affected by air permeability of clothing material and the number of openings. The number of opening were three patterns,[0],[1],[2]. Unexpectedly, the effect of air permeability was small. In comparison model[1] with model[2], the effect of bellows action from opening position to middle position of model[1] was larger than that of model[2]. A simple theoretical analysis was made to explain the heat transfer phenomena in clothing during bellows action. It was found that the nearer the distance from opening was, the larger the magnitude of velocity and thus effect of bellows action was. The velocity near entrance of model [1] was about twice as fast as that of model [2]. It was the reason that the effect of bellows action of model[1] was larger than that of model [2] around the opening position.

1 はじめに

人体と衣服の相対的な動きによる強制的な空気の流れが、着衣の熱伝達に影響を与える現象を着衣のふいご作用と言う。日常生活の中で、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が、その定量的な効果について研究されたものは少ない。

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数などを取り上げ、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。

2 実験方法

2.1 実験装置

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（開口部1モデル）に示す。発熱平板への供給熱量は表面温を人体の皮膚温になる量($50W/m^2$)に設定し、局所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、熱流計が埋め込まれている(No. 1~8)。また、同じ位置で模擬皮膚温を測定した。上下移動装置はパソコンに

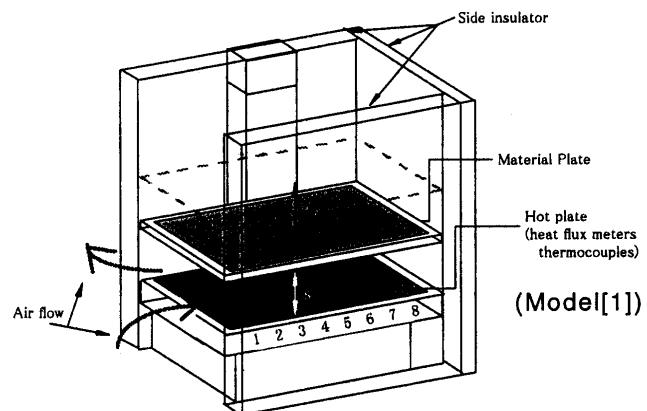


Fig.1 Schematic diagram of apparatus which simulates clothing system with bellows action.

より制御し、素材と発熱平板の間の衣服下間隙寸法、移動速度を調節する事ができる。動作中の平均速度は約 $32mm/sec$ であった。実験素材は通気性の異なるメッシュ、さらし、綿ブロード、デニム、綿ブロード+ラップを用い全ての素材は、 $254mm \times 127mm$ の大きさの木枠に貼った。

2.2 測定方法・手順

実験は人工気候室において温度 $25 \pm 0.2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 5\%$ 、気流 $0.1m/s$ 以下で行った。実験中は外界から

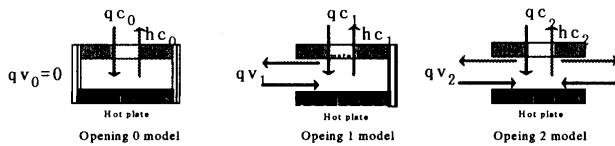


Fig.2 Three models which have different openings.

の放射や対流などの影響を避けるために消灯し、無人状態にした。開口部モデルを図2に示す。

開口部数を取って開口部0、開口部1、開口部2の3モデルとした。すべての素材に対して、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その間隙(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。綿プロード＋ラップの場合のみ間隙の影

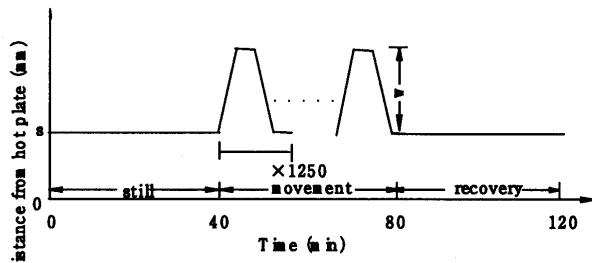


Fig.3 Time-table of experiment.

響と移動速度の影響を検討するため間隙2mm、30mmとを実験した。図3に実験手順を示す。

安静、動作及び回復の時間は各々40分間であり、動作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。すべての実験で、8ヶ所の発熱平板の温度(T_w)と放熱量(q_w)、3ヶ所の環境温(T_e)および開口部の風速(v)を30秒ごとに測定した。

3 結果及び考察

3.1 開口部数の効果

3.1.1 開口部を通しての換気の割合

発熱平板からの放熱は、布を介して、あるいは開口部を通しての換気によって放熱されるため、式(1)の様に表すことができる。

$$q_t = q_c + q_v \quad (1)$$

ここで q_t : 平板からの全放熱量 (W/m^2)

q_c : 布を介しての対流放熱量 (W/m^2)

q_v : 開口部を通しての換気放熱量 (W/m^2)

h_c : 布を介しての熱通過率 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)

h_v : 開口部を通しての熱通過率 ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)

h_t : 総熱通過率 = $h_c + h_v$ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$)

また、布を介しての放熱量は式(2)のように定義される。

$$q_c = h_c (T_s - T_e) \quad (2)$$

ここで T_s : 皮膚温 (K)、 T_e : 環境温 (K)

開口部がある場合もない場合も布を介しての熱通過率が一定 ($h_{c0} = h_{c1} = h_{c2}$) と仮定すると、開口部1, 2の場合、開口部からの換気効率は式(3)で求められる。

$$\frac{q_v}{q_t} = 1 - \frac{h_{c0}}{h_{t1} + h_{t2}} \quad (3)$$

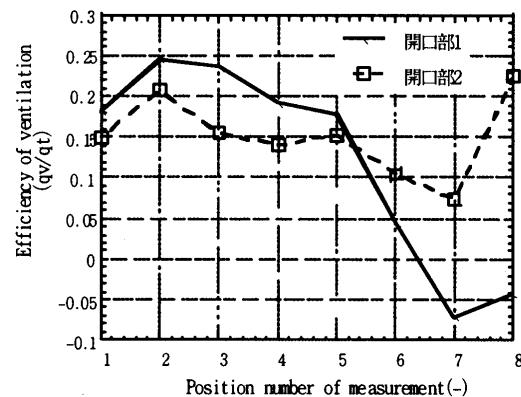


Fig.4 Efficiency of ventilation (Broad+Wrap).

これらの式で得た値をプロットしたのが図4である。

開口部2では開口部からの距離に対する顕著な差は見られなかった。一方開口部1では開口部からの距離が大きいほど効果が低くなった。開口部1, 2を比較するとNo. 1～5までは開口部1のモデルの方が開口部からの換気の効果が高かった。No. 7, 8において負の値が見られたのは開口部無の時、現実には素材枠と断熱材のわずかな隙間からの換気放熱があったための誤差と考えられる。

4 ふいご動作時の理論解析

4.1 解析モデル

発熱平板との間の空気層において、ふいご作用により生じた強制的な流れの流速および圧力分布について、簡単な理論解析を行った。本実験における素材平板(通気性無)と発熱平板を2枚の板と見なした理論解析のモ

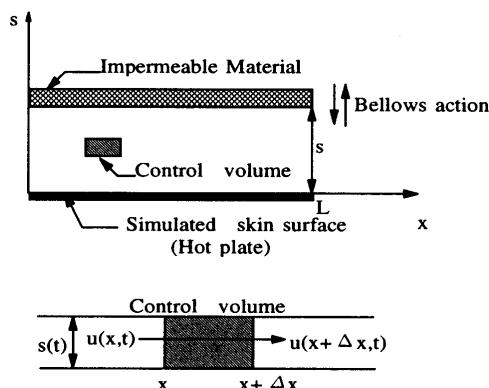


Fig.5 Model of theoretical analysis.

デルを図5に示す。

ここで s : 素材板と発熱平板との間隔（縦軸）
 x : 発熱平板の長手方向の位置（閉鎖側の端を原点とする）， L : 板の長手方向の長さ（m）
 u : 間隙 s 内の x 方向の流速（m/s）

図5のように、通気性がないと仮定した幅 L （長さ無限大）の板と基盤（発熱平板）との間隔 s が変化する場合、 s の時間変化 ds/dt が音速に較べて小さければ、空気の密度を考える場合の圧力は、ほとんど一様とみなされるので空気の密度 ρ を一定と仮定する。

4.1.1 流速の理論式

質量保存の法則に基づいてコントロールボリュームの質量の空間的変化と時間的変化がバランスするので式(4)が成り立つ。

$$\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

式(4)を x で積分し、境界条件 $x=0$ の時 $u_{x=0}=0$ であるにて、式(5)が得られる。

$$u = -\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt} \cdot x \quad (5)$$

4.1.2 圧力差の理論式

エネルギー保存の法則に基づいて、コントロールボリュームの運動量の時間変化、空間変化と空気の粘性によりコントロールボリュームに作用する摩擦力の力積や圧力による力積がつり合うので式(6)が成り立つ。

$$\rho \cdot \left\{ u \cdot \frac{ds}{dt} + s \cdot \frac{du}{dt} + \frac{ds}{dt} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \Delta t \right\} = \rho \cdot s \cdot \left\{ -2u \cdot \frac{\partial u}{\partial x} - \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \cdot \Delta x \right\} - \frac{12 \cdot \mu \cdot u}{s} - \frac{\partial P}{\partial x} \cdot s \quad (6)$$

ここで μ : 空気の粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)， P : 空気の圧力 (Pa) である。微少項を省略し、積分して、境界条件 $P_{x=L} = P_0$ (P_0 : 大気圧) を代入すると間隙内空気と外気との圧力差（差圧） $\Delta P = P - P_0$ が式(7)で表せる。

$$\Delta P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} - 2 \left(\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{12v}{s^3} \cdot \frac{ds}{dt} \right\} x^2 - \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{1}{s} \cdot \frac{d^2 s}{dt^2} - 2 \left(\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt} \right)^2 + \frac{12v}{s^3} \cdot \frac{ds}{dt} \right\} L^2 \quad (7)$$

5 理論解析結果

5.1 流速と差圧の分布（開口部1の場合）

ふいご動作中における間隔 s 、移動装置の速度 (ds/dt) および加速度 (d^2s/dt^2) の変化により、式(5)と式(7)に基づいて、間隙内空気の流速と圧力差の分

布を検討する。移動装置の速度 ds/dt の変化および式(5)、すなわち $u = -\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt} \cdot x$ により、間隙内空気の流速が図6のように分布していると考えられる。

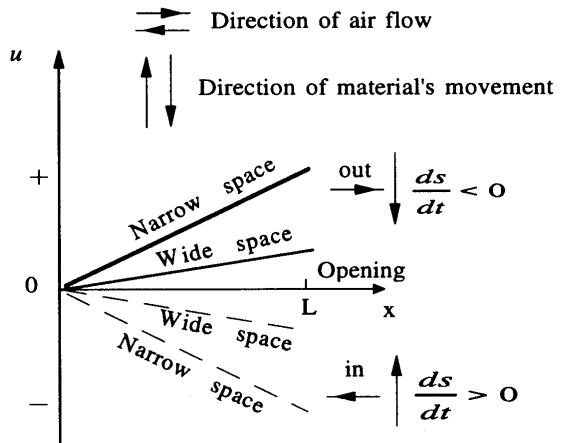


Fig.6 Distribution of air velocity in micro space of clothing during period of bellows action.

図のように、移動装置が上昇する場合に、流速 u が負となり、外界の空気が間隙内に流れ込む。一方、移動装置が下降する場合に流速 u は正となり、間隙内の空気が外に流れ出す。そして、流速 u は x に比例して開口部に近いほど、流速 u の絶対値は大きくなる。よって、開口部との距離が近いほど、その位置におけるふいご作用の効果がより大きいことがわかった。また、式(7)によると、間隔 s が大きいほど、比例定数 $-\frac{1}{s} \cdot \frac{ds}{dt}$ の絶対値は小さくなる。すなわち、狭い間隔（太線）より、広い間隔（細線）の場合のほうが、 x 方向に沿った流速 u の変化の割合は小さくなる（図6参照）。よって、間隔 s が大きいほど、ふいご作用（bellows action）の効果がより小さいと考えられる。間隙内で流れが生じる間隙 5mm以上では上記の傾向で説明される。これらの理論解析による定性的な結果は実験結果とよく一致している。

図6と式(7)より、衣服下間隙内空気の差圧が図7のように分布していると予測される。図からわかるように、開口部に近づくにつれて差圧が小さくなる。 $x=L$ の位置に達すると、圧力が理論的に大気圧に相当する。また、移動装置が上昇する場合は、間隙内の気圧が大気圧より低くなるため差圧が負となり通気性がないため、外気は開口部のみから間隙内に流れ込む。一方、移動装置が下降する場合には間隙内の気圧が大気圧より高くなるため差圧が正となり、間隙内の空気が開口部から外界へ流れ出す。

5.2 開口部数の比較

開口部数を比較すると、2つのモデルはNo.1～No.4において開口部からの距離が等しいにも関わらず、いずれの間隙においても、開口部1モデルの熱通過率の方が開口部2モデルよりも高い値を示した。この現象について式(5), (7)を用いて、流速と差圧の分布より説明する。

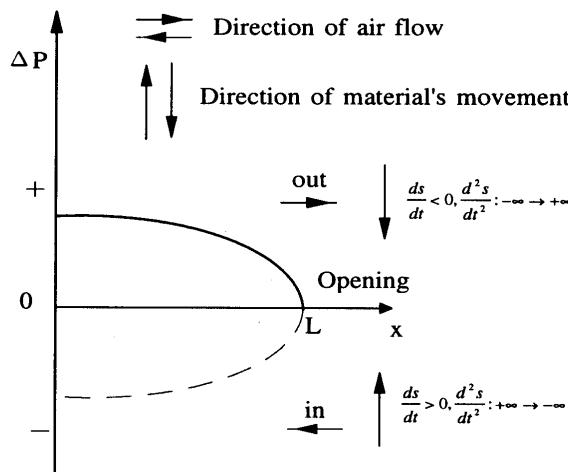


Fig. 7 Distribution of pressure difference between inside of clothing and environment during period of bellows action.

5.2.1 流速分布の比較

図8に開口部1の各モデルにおける各測定位置での流速の分布図を示す。

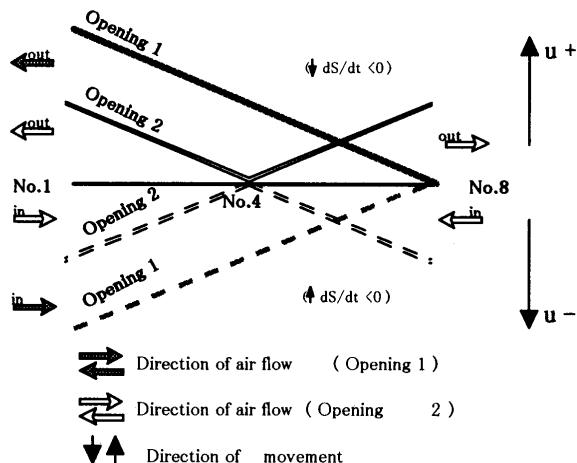


Fig. 8 Comparison of opening number in relative to rate of air flow inside of clothing.

開口部1のモデルでは測定位置No.1における流速が最も大きく開口部から離れるほど小さくなり開口部から最も離れたNo.8で最小値となる。開口部2のモデルでは流れが図9に示すように左右対称となり開口部のあるNo.1, No.8の流速が最も大きく発熱平板の中央(No.4)に向かって小さくなる。開口部1のモデルと開口部2の

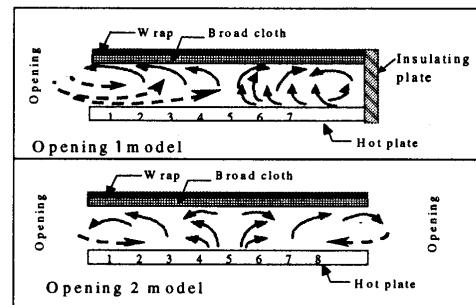


Fig. 9 Schematic diagram of heat flux inside of clothing.

モデルを比較すると、No.1～No.4までは開口部1のモデルの方が流速が大きく開口部2のモデルの約2倍であった。

5.2.2 差圧分布の比較

図10に各モデルの各測定位置での差圧の分布を示す。

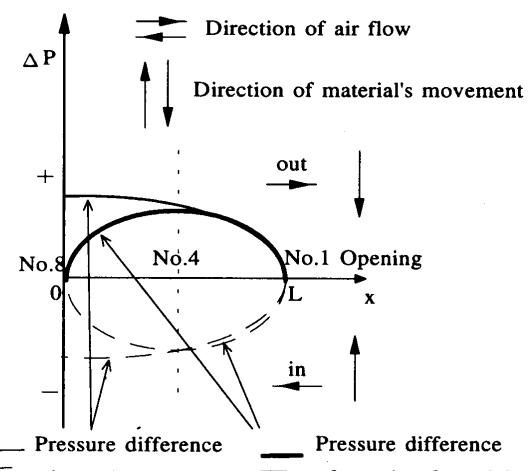


Fig. 10 Comparison of opening number in relative to rate of pressure difference inside of clothing.

図より開口部1のモデルでは開口部から最も離れた測定位置No.8における差圧が最も大きく、開口部に近づくにつれて差圧が小さくなる。測定位置No.1付近では差圧が0となる。開口部2のモデルでは、発熱平板の中央部測定位置No.4において差圧が最大になり開口部に近づくにつれ差圧が小さくなり測定位置No.1付近では差圧0すなわち圧力が大気圧に相当する。

開口部1のモデルと開口部2のモデルを比較すると、測定位置No.1からNo.4までは開口部の数による差圧分布の違いはほとんど無かった。ゆえにふいご動作時の熱通過率が、開口部1よりも開口部2の値の方が高くなるのは、開口部1のモデルにおける流速が開口部2のモデルの2倍あることが原因と思われる。