

模擬皮膚からの熱伝達 —模擬皮膚湿潤時と乾燥時の比較—

薩本弥生, 竹内正顯*, 石川欣造

(文化女子大学家政学部, * 桐蔭学園横浜大学工学部)

平成7年12月8日受理

Heat Transfer from a Simulated Skin Surface —A Comparison between a Wet Surface and a Dry Surface—

Yayoi SATSUMOTO, Masaaki TAKEUCHI* and Kinzo ISHIKAWA

Faculty of Home Economics, Bunka Women's University, Shibuya-ku, Tokyo 151

** Faculty of Engineering, Toin University of Yokohama, Midori-ku, Yokohama 227*

Heat transfer accompanied with mass transfer of water vapor is one of the most important issues concerning the thermal comfort of the human body. A simple theoretical model is employed which makes use of an analogy between heat transfer and mass transfer. At the same time an experiment is carried out to examine the theoretical model using a vertical hot-plate with constant evaporation. Through perspiration at least 80% of the heat supply is dissipated as latent heat. In the case of a constant simulated skin temperature, the buoyancy under a wet condition is about 50% larger than that under a dry condition. Nevertheless, the convective heat transfer coefficient increases only 10%, because the coefficient is proportional to the one-fourth power of buoyancy. When an experiment is conducted using a thermal manikin, the heat transfer coefficient under a dry condition is sometimes substituted for the coefficient under a wet condition. This is because it is difficult to maintain a constant skin temperature under the wet condition due to the large heat dissipation of the manikin. The above result suggests an error factor of about 10%.

(Received December 8, 1995)

Keywords: convective heat transfer coefficient 対流熱伝達率, sensible heat 顕熱放熱, latent heat 潜熱放熱, buoyancy 浮力.

1. 緒 言

体温や代謝などの恒常性を保つことはヒトのもつ重要な機能の一つである。ヒトは代謝による産熱を熱伝導, 対流, 放射, 蒸発により放熱している。特にヒトが高い活動レベルまたは高温環境におかれ発汗した場合, 汗の蒸発はこのような熱ストレス状態によりヒトの皮膚温が上昇し過ぎないようにするのに非常に役立つ。水が蒸発する時, 非常に多くの熱を奪うからである。この時, 皮膚からの汗の蒸発が十分に行われるためには皮膚近傍の水蒸気圧が低く保たれることが望ましい。水蒸気圧勾配が大きいほど水蒸気移動が起きやすいためである。

発汗状態では, 人体回りで熱水分の移動性が良いか

否かが温熱的快適性に影響する。発汗状態のヒトの心理応答を調べた従来の研究では環境の相対湿度と快適感の関係が検討された。被験者実験により皮膚近傍の相対湿度が高くなるほど不快感が増すと報告されている^{1)~3)}。また, 最近の研究では相対湿度よりも絶対湿度が心理量へ影響すると述べた報告がある。深山らは, 発汗状態のモデル実験を行うに当たって皮膚近傍の水蒸気圧が低いほど快適であると述べている⁴⁾。潮田らは, 皮膚表面の発汗状態は相対湿度よりも絶対湿度に左右され, これが皮膚の濡れ感覚に影響することを明らかにしている⁵⁾。これらの知見より, ヒトは皮膚近傍の水蒸気の絶対量を感じて発汗量を調節していることが考えられる。ヒトがおかれた環境に対してどの

ような発汗挙動をするかについて明らかにすることは、快適性に関する研究の上で非常に重要である。また、人の汗の出方の生理反応の研究とともに、出た汗の蒸発の機構を詳細に把握することが大切である。さらにヒトからでた汗が蒸発していく過程で起きる熱、水分移動現象を明らかにする必要がある。

人体側の環境に対する発汗量や分布などの挙動については、今後の生理的検討の成果を待たなければならない。本研究では、皮膚から外の物理現象に注目し皮膚が完全に濡れた条件を想定した模擬皮膚を用いて裸体時の熱、水分移動現象を明らかにしようと試みた。

発汗し皮膚が濡れたときの皮膚からの熱伝達は主に対流、放射で行われる。一方、水蒸気移動は拡散と湿り空気に含まれて対流により運ばれる。以上のように、対流は熱・水蒸気移動の両方に寄与している。しかし、発汗時の対流に関して数量的に詳細に検討した論文は見あたらなかった。そこで本研究では、発汗により皮膚が湿潤した時の対流の生じ方が皮膚乾燥時と比べどのような相違があるか検討する。

もし、皮膚からの放熱量が皮膚湿潤時と乾燥時で一定と仮定すると、皮膚面で起こる蒸発により皮膚温が低下するため対流熱伝達は減少すると考えられる。一方、皮膚湿潤時も乾燥時と同等の皮膚温を保つと仮定すると、皮膚からの対流熱伝達は水蒸気移動を伴う分増加することが予想される。なぜなら、環境との水蒸気質量濃度差は環境との温度差と同様、対流の原動力となるからである⁶⁾。後者の場合を想定した実際的な問題としては、サーマルマネキンによる発汗模擬実験が考えられる。この場合、模擬皮膚からの対流熱伝達率を評価するのに、乾性伝熱時の対流熱伝達率で発汗状態の対流熱伝達率を代用する例がある⁷⁾。これは、模擬皮膚が濡れると大量に潜熱が奪われるため皮膚温を一定にするには大量の供給熱量が必要であるが、マネキンの供給電力の限界により乾いた時と皮膚温を同一にする事が困難であるためと考えられる。ここでの代用は、対流熱伝達率の模擬皮膚面が湿潤する事による変化はないという仮定に基づいている。本研究ではこの仮定の妥当性を主として検証する。

また、水分移動を伴う伝熱すなわち湿性伝熱時における水分移動が、対流熱伝達へおよぼす影響について検討する。すなわち、比較的長時間発汗している場合の裸体時の熱と水分移動を想定し、完全に濡れた湿潤加熱面を持つ垂直発熱平板を用いたモデル実験と、熱と水蒸気移動の類似則を仮定したモデルによる理論的

検討とを行う。

2. 実験方法

人体が立位した状態を模擬するため Fig. 1 に示すような実験装置を製作した。局所の放熱量を測定するため、熱流計を埋め込んだアクリル板をヒータ表面に張り付けた。また、発汗状態を模擬するためにアクリル板の表面にろ紙を張り付け、図に示すように装置上部の支持台上で傾斜させその上に水滴を定常的に滴下させた。供給水は滴下した時に発熱平板表面温度になるように、あらかじめ恒温水槽で暖めておいた。ろ紙は十分に濡れてから実験を開始し、実験中表面は完全に濡れた状態を保っている。よって、ろ紙の吸湿発熱は無視できると考えられる。人体の皮膚温の影響を検討するために供給熱量 0 W/m^2 、 25 W/m^2 、 50 W/m^2 、 100 W/m^2 、 150 W/m^2 および 200 W/m^2 の 6 通りの場合について実験を行った。

実験は温度 $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 5\%$ の人工気候室内で行った。模擬皮膚（湿潤加熱面）表面温、環境温と放熱量を高さ方向に（ヒータの下端から 70

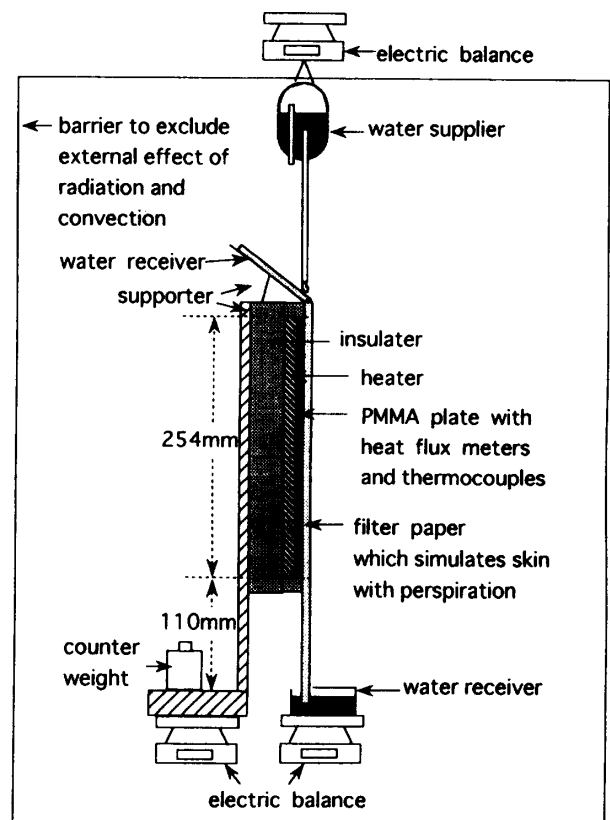


Fig. 1. Schematic diagram of an apparatus which simulates skin with perspiration

模倣皮膚からの熱伝達

mm 上方の高さから 30 mm 間隔) 7 点で 1 分ごとに 1 時間測定した。7 点の平均を後の解析に用いた。また、同時に蒸発速度を算出するため供給水質量 (W_s)、装置質量 (W_a)、装置下滴水質量 (W_d) を電子天秤で測定した。

3. 熱と水分移動の評価方法

(1) 実験データを用いた評価方法

ヒトは裸体でいて発汗し皮膚が湿潤している時は、皮膚からの対流や放射による顕熱放熱に汗の蒸発による潜熱放熱を加えて、産熱とのバランスをとっている。本実験における模倣皮膚からの単位面積当たりの汗の蒸発速度 $\dot{m}$ (単位: $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) は (1) 式より求められる。

$$\dot{m} = \frac{\Delta W_s - \Delta W_a - \Delta W_d}{\Delta t \times A} \quad (1)$$

ΔW_s : 測定間隔間の供給水量 (kg), ΔW_a : 測定間隔間の装置質量増加量 (kg), ΔW_d : 測定間隔間の装置下滴水量 (kg), Δt : 測定間隔 (s), A : 表面積 (m^2)。

水蒸気の移動しやすさを示す物質伝達率 h_D (単位: m/s) は、対流熱伝達と同様の形式で定義され、水蒸気移動の原動力は質量濃度差なので本研究の場合、皮膚と環境との水蒸気質量濃度差が原動力となり (2) 式のようになる。

$$h_D = \frac{\dot{m}}{C_w - C_e} \quad (2)$$

C_w : 模倣皮膚 (湿潤加熱面) における水蒸気質量濃度 (7 点の平均) (kg/m^3), C_e : 環境における水蒸気質量濃度 (7 点の平均) (kg/m^3)。

潜熱放熱量 q_l は (3) 式のように、蒸発速度に潜熱係数をかけて求める。

$$q_l = L \times \dot{m} \quad (3)$$

L : 潜熱係数 $= 2.4382 \times 10^6 \text{ J/kg}$ (300 K において)。

定常状態では放熱量と産熱 (供給熱量) とのバランスが保たれるため、顕熱放熱量 q_s と潜熱放熱量 q_l の和が供給熱量 q_o と等しくなる。よって (4) 式が成り立つ。

$$q_o = q_s + q_l \quad (4)$$

したがって各供給熱量の場合の顕熱放熱量は、供給熱量から (3) 式に基づいて求めた潜熱放熱量を差し引くことにより算出される。ここで顕熱放熱量は (5) 式で示すように、放射による放熱量 q_r と対流による放熱量 q_c の和である。

$$q_s = q_r + q_c \quad (5)$$

裸体時の放射による放熱量 q_r は (6) 式で表される⁸⁾。

$$q_r = \epsilon_w \sigma (\theta_w^4 - \theta_o^4) \quad (6)$$

ϵ_w : 皮膚面の放射率 ($= 0.95$), σ : ステファンボルツマン係数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$), θ_w : 皮膚温 (7 点の平均) (K), θ_o : 環境作用温 (7 点の平均) (K)。

対流による熱移動の原動力は皮膚と環境との温度差である。高さ方向の平均対流熱伝達率 h_c (単位: $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) は (7) 式によって求められる。

$$h_c = \frac{q_c}{\theta_w - \theta_e} \quad (7)$$

θ_e : 環境温 (7 点の平均) (K)。

(2) 自然対流と仮定した解析的評価方法

1) 浮力の評価方法

本研究では生じている対流を自然対流と仮定した。自然対流の原動力は浮力である。浮力は環境と発熱平板付近の空気密度差に比例する。浮力を算出するため発汗した場合の皮膚近傍の空気密度を以下の方法で導く。発汗時の湿り空気は乾き空気と水蒸気の混合気体である。両方の成分を理想気体と仮定するとドルトンの分圧法則が適用され (たとえば藤井ら⁹⁾)、全圧は分圧の和で一定であるので (8) 式が成り立つ。

$$P_t = P_v + P_a \quad (8)$$

P_t : 湿り空気的全圧 (Pa), P_v : 水蒸気圧 (Pa), P_a : 乾き空気分圧 (Pa)。

また、各々の成分を理想気体と仮定すると次の式が成り立つ。

$$P_t = \frac{\rho}{M_t} R_o \theta \quad (9)$$

$$P_v = \frac{\rho_v}{M_v} R_o \theta \quad (10)$$

$$P_a = \frac{\rho_a}{M_a} R_o \theta \quad (11)$$

ρ : 湿り空気密度 (kg/m^3), ρ_v : 水蒸気の質量濃度 (kg/m^3), ρ_a : 乾き空気質量濃度 (kg/m^3), M_t : 湿り空気 (混合気体) の平均分子量 (kg/mol), M_v : 水の分子量 (kg/mol), M_a : 空気の分子量 (kg/mol), R_o : 一般ガス定数 ($\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$)。

(8)~(11) 式より次の (12) 式が成り立つ。

$$\frac{1}{M_t} = \frac{W_v}{M_v} + \frac{W_a}{M_a} \quad (12)$$

W_v : 湿り空気中の水蒸気質量分率 ($= \rho_v/\rho$), W_a : 湿り空気中の空気質量分率 ($= \rho_a/\rho$)。

また、(9), (10) 式より次の (13) 式が成り立つ。

$$W_v = \frac{\rho_v}{\rho} = \frac{P_v M_v}{P_t M_t} \quad (13)$$

(12), (13) 式から計算し整理すると水蒸気質量分率は (14) 式で定まる.

$$W_v = \frac{M_v P_v}{(M_v - M_a) P_v + M_a P_t} \quad (14)$$

(9)~(12) 式から湿り空気の密度は (15) 式で定まる. (15) 式より湿り空気の密度は温度と水蒸気質量分率の関数であることがわかる.

$$\rho = \frac{P_t}{R_o \theta \left(\frac{W_v}{M_v} + \frac{W_a}{M_a} \right)} = \frac{P_t M_v M_a}{R_o \theta \{ W_v M_a + (1 - W_v) M_v \}} \quad (15)$$

湿り空気の密度は正確には (15) 式で定まるが本論文では湿性伝熱時の浮力の成分の内訳を知るために (16) 式で示すように密度の温度依存項と水蒸気質量分率依存項の両要因を線形近似し評価した.

$$\rho(\theta, W_v) = \rho_e + \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_e \cdot \Delta \theta + \left(\frac{\partial \rho}{\partial W_v} \right)_e \cdot \Delta W_v \quad (16)$$

添字 e, w: 各々環境, 模擬皮膚(湿潤加熱面)における各物性の値を示す. $\rho_e = \rho(\theta_e, W_{v_e})$, $\Delta \theta$: 環境と模擬皮膚(湿潤加熱面)との温度差 (K), ΔW_v : 環境と模擬皮膚(湿潤加熱面)との水蒸気質量分率の差(—).

(15) 式を偏微分してそれぞれの密度成分は (17), (18) 式で示される.

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_e = -\frac{\rho_e}{\theta_e} = \rho_e \beta \quad (17)$$

β : 膨張係数 = $1/\theta_e$ (1/K).

$$\left(\frac{\partial \rho}{\partial W_v} \right)_e = -\rho_e \frac{M_a - M_v}{M_a W_{v_e} + (1 - W_{v_e}) M_v} \quad (18)$$

(17), (18) 式を (16) 式に代入することにより皮膚における湿り空気の密度は (19) 式のように示される.

$$\rho_w = \rho_e \left[1 - \beta(\theta_w - \theta_e) + \frac{M_v - M_a}{M_a W_{v_e} + (1 - W_{v_e}) M_v} (W_{v_w} - W_{v_e}) \right] \quad (19)$$

浮力 b (単位: N/m³) は環境と模擬皮膚(湿潤加熱面)の密度差の関数であり, また, (16) 式の関係から温度差による浮力 $b_{\Delta \theta}$ と水蒸気質量分率差による浮力 $b_{\Delta W_v}$ の和と線形近似して (20) 式のように定められる.

$$b = g(\rho_e - \rho_w) = b_{\Delta \theta} + b_{\Delta W_v} = g \rho_e \left[\beta(\theta_w - \theta_e) - \frac{M_v - M_a}{M_a W_{v_e} + (1 - W_{v_e}) M_v} (W_{v_w} - W_{v_e}) \right] \quad (20)$$

g : 重力加速度 (m/s²).

ここで模擬皮膚(湿潤加熱面)における湿り空気の水蒸気質量分率は, 温度 θ_w における飽和水蒸気圧 $P_{v_s}(\theta_w)$ を用いて (14) 式より, (21) 式のように表される.

$$W_v(\theta_w) = \frac{M_v P_{v_s} \theta_w}{(M_v - M_a) P_{v_s} \theta_w + M_a P_t} \quad (21)$$

2) 対流熱伝達率, 物質伝達率の評価方法

本研究では垂直発熱平板モデルで放熱量が常に一定である. 本研究における対流が自然対流か, 乱流か評価した. 後に示す無次元数のプラントル数 Pr (流れと熱移動の関係を求める数) とグラスホフ数 Gr (浮力に関して無次元化した数) の関数の積が $10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$ の範囲であれば自然対流とみなせる¹⁰⁾. 本研究の範囲では模擬皮膚が湿潤した場合 $Gr \cdot Pr = 9.2 \times 10^5$ であり, 模擬皮膚が乾いた場合 $Gr \cdot Pr = 2.2 \times 10^6$ であり, いずれも自然対流と見なせる. 模擬皮膚(加熱面)が湿潤した場合, 乾いた場合とも垂直発熱平板の自然対流熱伝達で熱流束一定条件と見なせ模擬皮膚面の平均対流伝達率は (22) 式のようにプラントル数とグラスホフ数の関数として表される¹⁰⁾.

$$h_c = \frac{\lambda_a}{x} 0.651 Pr^{1/4} \left(\frac{Pr}{0.800 + Pr} \right)^{1/4} Gr^{1/4} \quad (22)$$

λ_a : 空気熱伝達率 (W/(m·K)) (常圧 (101.325 kPa), 温度 300 K にて 0.026 W/(m·K)¹¹⁾, Pr : プラントル数 = ν/α (空気は常圧, 温度 300 K にて 0.71 ¹¹⁾). ここで ν : 動粘度 (m²/s) (空気は常圧, 温度 300 K で 1.569×10^{-5} m²/s¹¹⁾, α : 温度伝導率 (m²/s) (空気は常圧, 温度 300 K で 0.222×10^{-4} m²/s¹¹⁾).

$$Gr = x^3 \rho_e b / \mu^2 \quad (23)$$

Gr : グラスホフ数, x : 代表長さ (m) (=本研究では装置の高さの半分の 0.125 m とした).

(23) 式に示すようにグラスホフ数は (20) 式で示した浮力 b (単位: N/m³) に関する無次元数であり (20) 式より皮膚温と水蒸気質量分率の関数である.

水蒸気の模擬皮膚(湿潤加熱面)平均の物質伝達率 h_D は熱移動との相似則を仮定すると (24) 式で表せる¹²⁾.

$$h_D = \frac{D}{x} 0.651 Sc^{1/4} \left(\frac{Sc}{0.800 + Sc} \right)^{1/4} Gr^{1/4} \quad (24)$$

Sc : シュミット数 = ν/D (常圧, 温度 300 K にて 0.61), D : 水蒸気の空気中への拡散係数 (m²/s) (常圧, 温度 25℃ にて 2.56×10^{-5} m²/s¹³⁾).

前述の (4) 式の関係より次の (25) 式が成り立つ.

$$q_o = Lh_D (\rho W_{v_w} - \rho_e W_{v_e}) + h_c (\theta_w - \theta_e)$$

境との温度差が負になり、温度差による浮力は負となる。ここで注目したいのはBの領域である。Bの領域では水蒸気質量分率差による浮力の絶対値が温度差による浮力の絶対値より大きい ($|b_{\Delta w_v}| > |b_{\Delta \theta}|$)。よって環境よりも皮膚温が低いにもかかわらずトータルの浮力は正となる。Fig. 4-b) で示される供給熱量約 30 W/m^2 以下のAの範囲では環境側の方が模擬皮膚面より密度が小さくなるので浮力は下向きに働くと考えられる。

模擬皮膚面が乾いた場合の熱移動では環境との温度差が負になると皮膚面では下向きの浮力となるが、模擬皮膚面が湿潤した状態では模擬皮膚温が環境温より

低くても水蒸気移動の寄与により浮力が生じる場合があることがわかった。

2) 模擬皮膚における浮力の皮膚湿潤時と乾燥時の比較

模擬皮膚からの蒸発速度は皮膚面と環境との水蒸気質量濃度差によって決まる。前述のように模擬皮膚湿潤時の湿り空気は水蒸気と乾き空気の混合気体と見なせる。ここで一般的な混合気体について述べる。成分要素を横切る方向に濃度勾配のある混合気体の物質移動には高濃度から低濃度への拡散によるものがある。一方、混合気体全体が流れに乗った対流に伴う物質移動もある¹⁴⁾。湿り空気に話を戻すと湿り空気中の水蒸

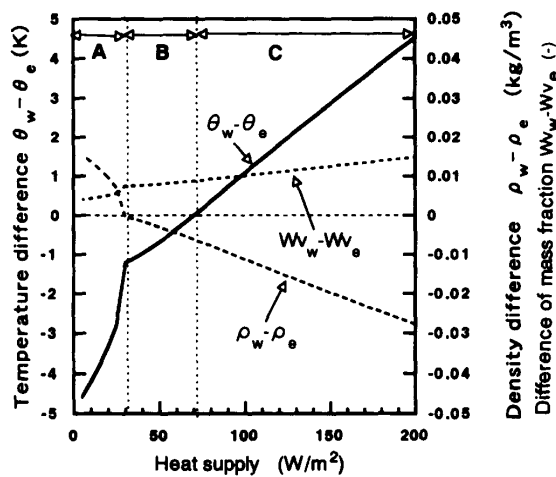


Fig. 4. a) Change of temperature difference $\Delta\theta$ ($=\theta_w - \theta_e$), density difference $\Delta\rho$ ($=\rho_w - \rho_e$), and difference of water vapor mass fraction ΔW_v ($=W_w - W_e$) against heat supply

Subscript w: values at simulated skin surface. Subscript e: values at environment.

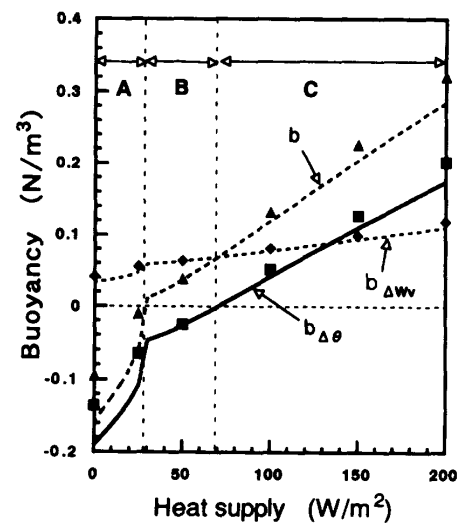


Fig. 4. b) Total buoyancy in wet condition b and two components of buoyancy, one is $b_{\Delta\theta}$: due to a temperature difference and the other is $b_{\Delta w_v}$: due to a difference of mass fraction of water vapor

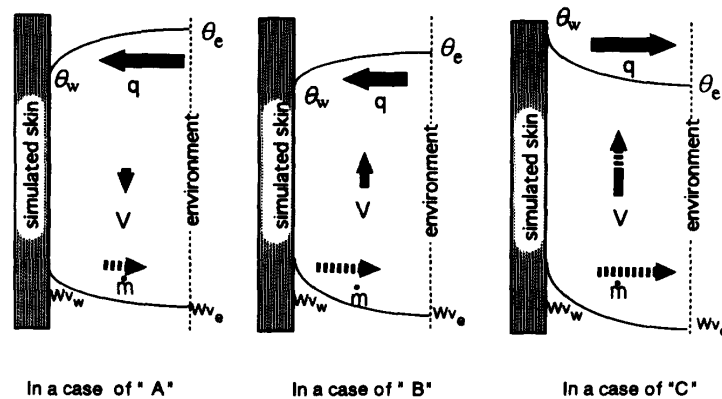


Fig. 5. Schematic illustration of heat flux q and mass flux of water vapor $\dot{m}$ and convection V in three cases

模擬皮膚からの熱伝達

気移動は水蒸気質量濃度勾配に比例する拡散によるものの他に湿り空気対流によるものもあると考えられる。水蒸気(分子量 18)は空気(分子量 28.8)より軽いので同温度で同体積なら水蒸気存在により対流が促進されるかもしれない。また、湿り空気対流は熱伝達を促すので模擬皮膚湿潤時の方が乾燥時よりも対流熱伝達率が大きくなるのではないかと考えられる。対流について考えると浮力が同じであれば模擬皮膚が濡れていても乾いていても対流熱伝達率は一定となるだろう。しかし、濡れている場合に水蒸気対流により浮力が増せば流れの生じやすさ、ひいては対流熱伝達率が乾いた時より大きくなるだろう。

そこで、模擬皮膚湿潤時のトータルの浮力を乾燥時と比較し、供給熱量に対する値を Fig. 6-a) に皮膚温に対する変化を Fig. 6-b) に示す。理論解析結果をラインで実験結果をシンボルで示してある。代謝一定の場合を想定し同一供給熱量で比較すると乾性伝熱時の浮力が大きい。しかし、実際ヒトが発汗した状態では代謝が放熱に対し過剰になったとき汗による潜熱で皮膚温の上昇をくい止められると思われる。その場合を想定し皮膚温一定と仮定して比較すると、たとえば模擬皮膚温 305K から 310 K で濡れた場合、乾いた時より浮力が約 1.5 倍大きくなるので対流の生じやすさに差があると言える。

(3) 対流熱伝達率の評価

1) 模擬皮膚湿潤時の対流熱伝達率

4-(2)の浮力の結果を元に (23) 式よりグラスホフ

数を求め、(22) 式に代入して模擬皮膚湿潤時の対流熱伝達率 h_c を算出した。また、実験値も求めた。

供給熱量に対する結果を Fig. 7 に示す。Fig. 4-b) に示したトータルの浮力が正になる B, C の範囲では浮力が単純増加なので対流熱伝達率は供給熱量が大きいほど徐々に 2 から 4 までわずかずつであるが増加する。(22) 式に示すように浮力(その無次元数であるグラスホフ数)の 1/4 乗に比例するためである。

2) 対流熱伝達率の皮膚湿潤時と乾燥時の比較

模擬皮膚湿潤時の対流熱伝達率を、皮膚乾燥時の対流熱伝達率と同一供給熱量に対し比較するため、Fig. 7 に皮膚乾燥時の対流熱伝達率の結果も図示してある。供給熱量の増加に対する浮力の増加は Fig. 6-a) に示すように皮膚乾燥時が明らかに大きい。同じ供給熱量では皮膚温が乾燥時に高いからである。対流熱伝達率も乾燥時が大きいとその差は供給熱量の大きさにかかわらずほとんど一定に近い。次に同一皮膚温で比較する。Fig. 8 にその結果を示す。Fig. 6-b) で浮力の差を比較すると皮膚温が増加するほど浮力の差が増加しているが比にすると、たとえば 305 K (31.9℃) と 310 K (36.9℃) と比較すると b_{wet}/b_{dry} が 1.5 から 1.4 へと変化したにすぎず変化は小さい。差は小さいが模擬皮膚湿潤時の方が対流熱伝達率大きい。対流熱伝達率は浮力の 1/4 乗に比例するので、湿潤時の対流熱伝達率は乾いた時の約 8 から 10% 増加した。

サーマルマネキンによる皮膚温一定条件で発汗模擬実験を行う場合に模擬皮膚が乾いた時の対流熱伝達率

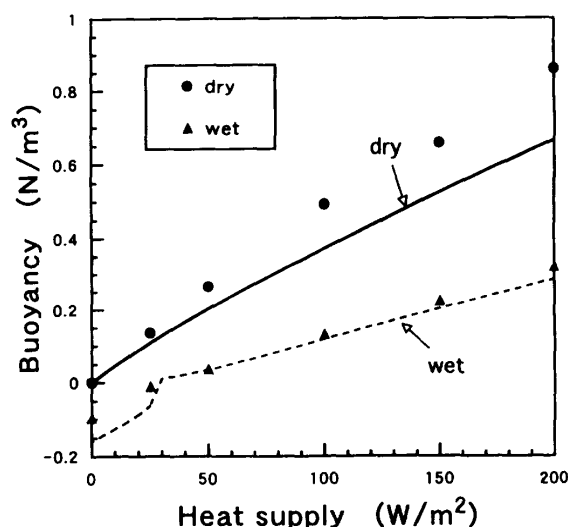


Fig. 6. a) Buoyancy under dry and wet conditions against heat supply

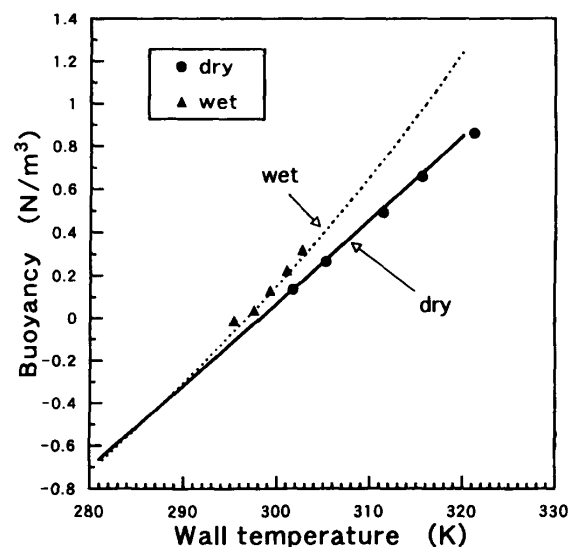


Fig. 6. b) Buoyancy under dry and wet conditions against wall temperature of simulated skin

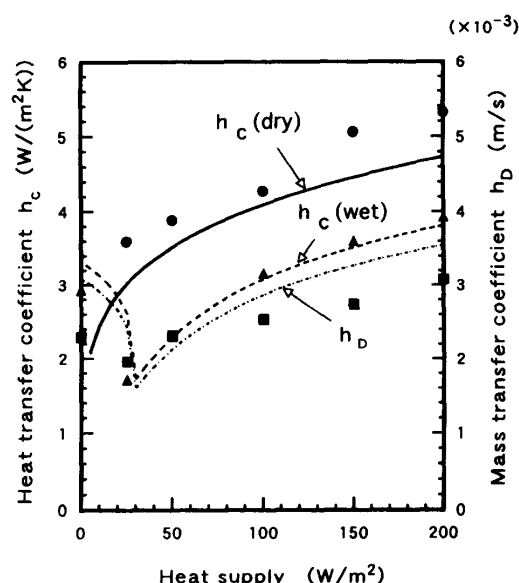


Fig. 7. Heat transfer coefficients under both dry and wet conditions, and mass transfer coefficient of water vapor against heat supply

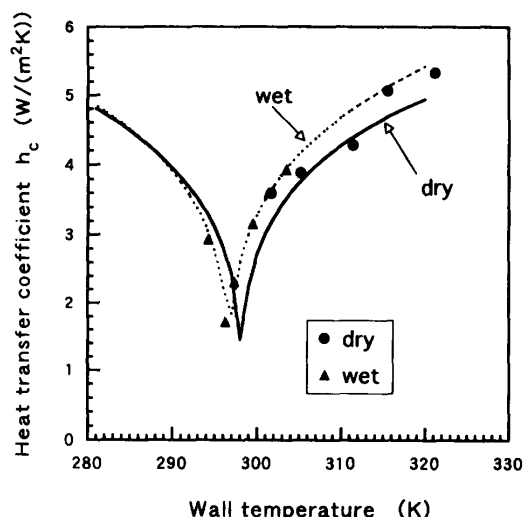


Fig. 8. A comparison of heat transfer coefficients under dry and wet conditions

を模擬皮膚湿潤時の対流熱伝達率の代わりに用いることは、約 10% の誤差を生むことが示唆された。

5. 結 論

発汗したときの熱と水分移動について検討するためにまず、裸体で比較的長時間発汗した状態を模擬して完全に濡れた湿潤加熱面を持つ垂直発熱平板を模擬皮膚として用い環境 25℃、相対湿度 50% の環境で 0 から 200 W/m² まで 6 通りの供給熱量で実験を行った。また、熱と水分移動の相似則を仮定して理論的検討を行った。その結果、次のことが明らかになった。

(1) 模擬皮膚湿潤時の潜熱放熱量は最小でも供給熱量の 8 割以上で潜熱による放熱の寄与が大きいことが確かめられた。

(2) 皮膚温一定と仮定すると模擬皮膚乾燥時よりも湿潤時に浮力が約 5 割大きく、流れの場に差がある事がわかった。

(3) 模擬皮膚湿潤時の対流熱伝達率は浮力の 1/4 乗に比例し同一模擬皮膚温で比較すると模擬皮膚乾燥時の約 8 から 10% 増加した。

(4) サーマルマネキンでの実験の場合、模擬皮膚湿潤時はマネキンの放熱量が大きくなるので供給熱量の限界で模擬皮膚湿潤時の現実に近い模擬皮膚温での対流熱伝達率を実測することが困難となる。その対処法として、模擬皮膚乾燥時の対流熱伝達率で湿潤時の対

流熱伝達率を代用する時がある。この代用は、(3) の結果より約 10% の誤差を生む可能性が示唆された。

引 用 文 献

- 1) Vokac, Z., Kopke, V. and Keul, P.: *Textile Res. J.*, **46**, 30~38 (1976)
- 2) Laing, R.M. and Ingham, P.E.: *Clothing Textiles Res. J.*, **3**, 31~34 (1985)
- 3) Markee, N.L., Hatch, K.L., Maibach, H.I., Barker, R.L., Radhakrishnaiah, P. and Woo, S.S.: *Textile Res. J.*, **60**, 561~568 (1990)
- 4) 深山雅代, 安田 武, Yasuda, H.: 家政誌, **43**, 1125~1131 (1992)
- 5) 潮田ひとみ, 中島利誠: 繊消誌, **36**, 44~52 (1995)
- 6) 甲藤好郎: 伝熱概論, 第 26 版, 養賢堂, 東京, 228 (1987)
- 7) McCullough, E.A., Jones, B.W. and Tamura, T.: *ASHRAE Trans.*, **95**, 3287~3299 (1989)
- 8) 甲藤好郎: 伝熱概論, 第 26 版, 養賢堂, 東京, 385 (1987)
- 9) 藤井寛一, 竹内 学: 理工学における定理・法則の事典, 東京電機大学出版局, 東京, 163 (1978)
- 10) 甲藤好郎: 伝熱概論, 第 26 版, 養賢堂, 東京, 95~96 (1987)
- 11) Holman, J.P.: *Heat Transfer*, 6th ed. McGraw Hill, New York, 643 (1986)
- 12) 甲藤好郎: 伝熱概論, 第 26 版, 養賢堂, 東京, 226~227 (1987)
- 13) Holman, J.P.: *Heat Transfer*, 6th ed. McGraw Hill, New York, 646 (1986)
- 14) 甲藤好郎: 伝熱概論, 第 26 版, 養賢堂, 東京, 221 (1987)