

衣服と体温調節

Clothes and Body Temperature Regulation

池田寛子, 扇澤美千子, 長谷部ヤエ, 會川義寛

Hiroko IKEDA, Michiko OUGIZAWA, Yae HASEBE, Yoshihiro AIKAWA

(お茶の水女子大学)

1. はじめに

人は生きるために代謝反応を行なつてゐる。代謝反応は必然的に代謝熱の発生を伴ふ。発生した熱が溜まれば体温が上がる。したがつて体温を定常に保つためにはこの代謝熱を捨てねばならない。しかし捨て過ぎれば身体が冷え切つてしまふ。よつてこの代謝熱の捨て方は調節したものでなければならない。

この代謝熱の捨て方(または保ち方)は、第一には生理的に調節されてゐる。これは血流による見掛けの身体熱伝導率の上昇や発汗による蒸発熱を利用してゐる。しかしこれだけでは間に合はないので、第二に行動的に意志を以て調節する。すなはち暖かい場所や涼しい所へ移動する。日向や日蔭に行く、水浴をする、空調を入れる。そして、衣服を着る、蒲団を被るなどである。この最後の衣服を着ることは人間だけが行なつてをり、これにより人間は地球上のあらゆる場所に進出することができた[1]。

本稿ではまづ体温調節の機構を述べ、これに衣服着用がどの様に影響を与へてゐるかを解説する。

2. 人体と温熱調整

人体は体壁と体腔の2つの部分からなる。体腔には内臓が詰まつてをり、そこでは人体の生命活動に必要な代謝反応を行なつてゐる。体壁はこの内臓の容れ物である。のちにこの体壁から四肢が生えて来て、この代謝反応の化学装置である内臓の詰まつた人体の、地上での移動を可能にする。したがつて大まかに言へば、体腔は化学反応を行なふ場であり、四肢を含む体壁は物理運動を担当する部位である[2]。

化学反応はその活性化エネルギーに基づき温度に大きく影響される^{註1}。したがつて、多数の代謝反応の微妙な制御を行なふ場である体腔は、その温度は制御された一定のものでなければならない。ここに人体が温度調整をしなければならない基本的理由がある。温度一定に調節されてゐる体腔を基本とする領域を温熱生理学上の芯部と言ひ、この芯部温度を T_c で表はす[3]。芯部温度 T_c の臨床測定には便宜上直腸温を用ゐる。

基本的な代謝反応は生きてゐる限り行なはなければならないが、化学反応のエネルギー効率は100%ではあり得ないので、必ず熱の発生を伴ふ(代謝熱)。この熱がそのまま体腔内に溜まれば、芯部温度 T_c はそれとともに上昇してしまふ。しかし上述の様に、

代謝反応制御のためには芯部温度を一定にしなければならないので、体腔で発生した代謝熱は体壁を通して体表皮膚から外界に排出することになる。熱は温度の高い所から低い所に流れるので、体壁の温度は体腔の温度より低い必要があり、かつ外気温 T_a は体壁の温度よりもさらに低くなければならない。体壁の温度は必ずしも一定ではないが、これを平均してほぼ一定と見なせるとして、この部位を温熱生理学上の殻部と言ひ、殻部温度を T_s で表はす。したがつて、 $T_c < T_s < T_a$ である。殻部温度 T_s は具体的には体表各点の温度を平均して算出するので、平均皮膚温とも言ふ(Fig. 1)。

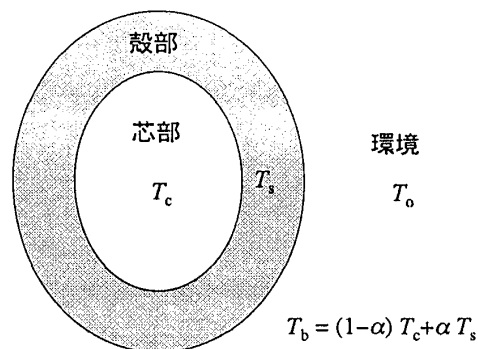


Fig. 1 Body temperature T_b as a weighted average of core temperature T_c and shell temperature T_s .

ここで平均体温 T_b の概念も導入しておかう。人体を温熱生理学的観点より芯部 c と殻部 s に分けたとき、人体全体に対する殻部の分率を α として、平均体温 T_b を、

$$T_b = (1-\alpha)T_c + \alpha T_s \quad (1)$$

と定義する。殻分率 α は芯殻間血流(皮膚血流)が大きくなるにつれて小さくなるが^{註2}、通常は $\alpha = 0.25$ とされる。平均体温 T_b の臨床測定には便宜上腋窩温を用ゐる。

人体としては以下の注意が必要である。芯部 c はその温度 T_c を一定に保たなければならないが、その際、温度低下よりも、代謝熱による温度上昇の方に特に気をつけなければならない。したがつて内臓部には高温検出機能を有する温受容器が発達してゐる。殻部 s は芯部温度を一定に保つためにその温度は芯部温度よりも低く設定されてをりかつ外界によつて冷却されてゐるが、余り低温になり過ぎて殻部を構成する細胞を傷つけない様にならなければならない。したがつて皮膚部には低温検出機能を

有する冷受容器が発達してゐる。人体はこのふたつの領域の温熱的要求，すなはち，芯部温度 T_c が上がり過ぎない様に，また殻部温度 T_s が下がり過ぎない様に，といふふたつの要求を満たすことを目標に，温熱生理学的制御を行なつてゐる[5]。通常，芯部温度 T_c は $T_{c0}=36.8^\circ\text{C}$ に，殻部温度 T_s は中性条件では $T_{s0}=33.7^\circ\text{C}$ に設定されてゐる。そのときの平均体温は(1)式より $T_{b0}=36.2^\circ\text{C}$ と求められる。

さて，人体は，芯部温度の恒常性ホメオスタシスを維持するために，生命活動の結果必ず生ずる代謝熱を，人体から外環境へ制御しつつ排出してゐるが，基本的にはこの熱流制御は自律生理的に行なはれてゐる。しかしこの自律機能だけでは対処しきれないことが多い。そこで，この熱の流れの中途に衣服を熱抵抗として直列に変挿入して，熱流制御をする，いはゆる体性行動的制御も同時に行なふ。したがつて以下では，皮膚温度（殻部温度） T_s と気温 T_a との間に衣服表面温度 T_f を入れて ($T_s < T_f < T_a < T_c$)，熱の流れを考へてみよう。

3. 人体から環境への熱の流れ

熱の流れ全体を3つに分けて考へる。ひとつは人体芯部 c における代謝熱の発生である。つぎは人体内の熱流で，芯部 c で発生した代謝熱が殻部 s を通して体表 s へと流れる。これは自律生理的に制御されてゐる。もうひとつは人体外の熱流で，体表 s から衣服 f を通して外部環境 o へと流れるもので，体性行動的に制御されてゐる。この3者は互ひに直列に結合されてゐるから，定常状態では3者の大きさは等しい。

(1) 体内での熱の発生

芯部 c で生ずる熱の湧き出し（代謝熱）は，その湧き出し速度（熱発生速度）が（したがつて代謝速度が），体重 m や人体体積 V ではなく，体表面積 S に比例することが知られてゐる（体表面積 S は，体重 m と身長 h からデュボア DuBois の式³を用ゐて簡便に概算できる。通常値として $S=1.8\text{ m}^2$ を用ゐることが多い）。

したがつて，単位体表面積当りの熱の発生速度 q を用ゐて論ずれば，体格が異なる人であつても同じ議論が可能となる。熱の単位は J（ジュール），したがつて熱の発生速度の単位は J/sec，すなはち W（ワット）であるから，単位体表面積当りの熱の発生速度 q の単位は $\text{J}/\text{sec}\cdot\text{m}^2=\text{W}/\text{m}^2$ である。これに伴ひ熱流も以下では，単位体表面積当りの熱流，すなはち熱流密度 i として論議することにする。単位は同じく $\text{J}/\text{sec}\cdot\text{m}^2=\text{W}/\text{m}^2$ である。作業強度（代謝速度）の常用単位としては $1\text{ met}=58.15\text{ W}/\text{m}^2$ も用ゐられてゐる。Table 1 に各作業の作業強度を示す[6]。

Table 1 Metabolic rate at typical activities

労作	作業量 /met
横臥	0.8
安坐	1.0
坐業	1.2
軽作業	1.6
中作業	2.0
重作業	3.0

(2) 体内から体表への熱の流れ

芯部 c から殻部 s への熱の流れを考へよう。いま殻部温度は均一としてをり，その結果，皮膚温度と等しいものと近似してゐることに注意しよう（殻部と体表とを同じ記号 s で表はしてゐる）。したがつて問題は，芯部温度 T_c と，殻部温度（皮膚温度） T_s との間の熱流といふことになる。この芯殻間熱流（正確には熱流密度であるが，以下略して熱流と表記する）は，血流熱流 i_b と傳導熱流 i_c の2つの並列な熱流からなる。

血流熱流 i_b は，芯部温度 T_c の動脈血が芯部 c から殻部 s への動脈を通つて来て，殻部毛細血管にて熱を放出して，殻部温度 T_s の静脈血となつて，静脈を通つてまた芯部に戻つていく，といふメカニズムにより生ずる。芯部から殻部への（単位体表面積当りの）血流を j_b ，血液の比熱（単位質量当りの熱容量）を $c_b=4.19\text{ J}/\text{g}\cdot\text{K}$ とすれば，血流熱流 i_b は上述のメカニズムより， $i_b=c_b j_b (T_c-T_s)$ である。この芯殻間血流 j_b は主に真皮毛細血管にて熱交換を行なふので，以降これを皮膚血流と呼ぶ。

また単に組織中の熱傳導によつて流れる傳導熱流 i_c は，両部間の熱傳導係数を $k_b=5.28\text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ として， $i_c=k_b (T_c-T_s)$ と表はせるので，結局，全熱流 $i=i_b+i_c$ は

$$i=(c_b j_b+k_b)(T_c-T_s) \quad (2)$$

となる (Fig. 2)。 (2) 式の右辺で，自律生理的に直接制御できる量は芯殻間血流 j_b である。したがつて，皮膚血流 j_b を増加させることによつて，芯殻間熱流 i を線型的に増加させることができることがわかる。

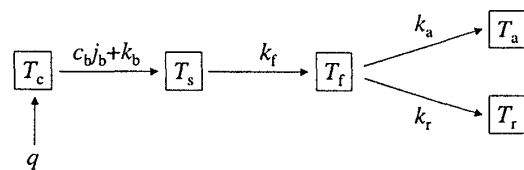


Fig. 2 Heat flow from body core to environment through body surface and clothes

(3) 体表から環境への熱の流れ

次に、人体外の、体表 s から衣服 f を通して外部環境 o へと流れる熱を考へてみよう[7].

この熱流 (正確には熱流密度) には、温度差 ΔT に基づく乾熱流 $i_d = k \Delta T$ (k は熱傳達係数) と、水の蒸発熱 λ と蒸気圧差 Δp に基づく湿熱流 $i_w = h \Delta p$ (h は湿熱傳達係数) との、互ひに並列な2つの熱流がある^{註4} (Fig. 2). 乾熱流は体表温度 T_s から衣服表面温度 T_f 、外部環境温度 T_a への温度勾配によつて流れる. 湿熱流は体表の濡れ (湿潤率 θ) とその体表蒸気圧 p_s からの蒸発 (蒸発熱 $\lambda = 2.4 \text{ kJ/g}$), そして衣服表面蒸気圧 p_f 、外環境湿度に対応する蒸気圧 p_a への圧勾配によつて流れる (Fig. 3).

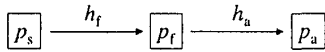


Fig. 3 Water vapor flow from body surface to environment through clothes

これらの体表 s から環境 o への熱流は以下の順で考察する. まづ、裸の体表 s から環境 o への熱流を考へ、これを基準とする. ついでこの熱流が衣服を着ることにより変更を受けるものと考へる. 具体的な考察手順としては、衣服の着脱によるモデル自体の変化を考へるのは面倒なので、衣服は初めから着用したままとし、その厚さが可変であるとする. したがつて裸の状態は衣服厚 0 に相当し、その場合の衣服外表面状態 f は体表状態 s に等しい. この様に衣服の効果は連続的なパラメータによつて表はし、メカニズムの変化としては扱はないことにする. よつてまづ、衣服外表面 f から外環境 o への熱の流れから考へよう.

まづ、乾熱流 i_d を考へる. 衣服表面 f から外環境 o への熱流である. この熱流には、衣服表面温度 T_f と空気温度 T_a との差に基づく傳達熱流 $i_a = k_a (T_f - T_a)$ と、衣服表面温度 T_f と外界の平均輻射温度 T_r との差に基づく輻射熱流 $i_r = k_r (T_f - T_r)$ とがある (Fig. 2). このふたつの熱流は並列、すなはち

$$i_d = i_a + i_r = k_a (T_f - T_a) + k_r (T_f - T_r)$$

である.

傳達熱流 i_a は、衣服表面の空気境界層 (厚さ δ) における温度勾配に基づくもので、その熱傳達係数 k_a は、空気熱傳導率 $\kappa = 20 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ と境界層厚 δ とから、 $k_a = \kappa / \delta$ として概算されるが、空気境界層厚 δ は風 v が吹くと (風速 v の $3/5$ 乗に反比例して) 薄くなるので^{註5}、傳達熱流 i_a は風とともに (風速 v の $3/5$ 乗に比例して) 増加する (風がなくとも体温などによる自然対流により境界層厚は $\delta = 6.3 \text{ mm}$ より大きくなることはなく、したがつて熱傳達係数

は $k_a = 3.1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ より小さくなることはない).

輻射熱流 i_r は本来温度の4乗の差に比例するが (Stefan-Boltzman の法則)、通常温度範囲では $i_r = k_r (T_f - T_r)$ と表はすことができ^{註6}、 $k_r = 4.7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ とする.

結局この衣服表面から外界への乾熱流 i_d は傳達熱流 i_a と輻射熱流 i_r との和、 $i_d = i_a + i_r$ であるが、外部環境温度として空気温度 T_a と輻射温度 T_r との2種類を考慮するのは煩はしいので、通常は

$$i_d = k_o (T_f - T_o) \quad (3)$$

として、2つの傳熱係数の和である衣服外全乾熱傳達係数

$$k_o = k_a + k_r$$

と、2つの外環境温度、すなはち空気温度 T_a と輻射温度 T_r との重みつけ平均である環境作用温度

$$T_o = (k_a/k_o) T_a + (k_r/k_o) T_r \quad (4)$$

とを以て表はしてゐる. k_a に風 (気流) の要素が入つてゐるので、この環境作用温度 T_o は気温、環境輻射温度、風の3要素を考慮に入れたものになつてゐる (風の効果は k_o にも入つてゐる).

次に体表面 T_s から衣服外表面 T_f までの乾熱流 i_d を考へる. 衣服および衣服下空間による熱抵抗を併せて $r_f = 1/k_f$ とすれば、乾熱流は

$$i_d = k_f (T_s - T_f) \quad (5)$$

と表はされる.

(3)式と(5)式で表はされる熱流は衣服外表面を挟んで直列なので、衣服外表面温度 T_f は

$$T_f = [k_f / (k_f + k_o)] T_s + [k_o / (k_f + k_o)] T_o$$

と、体表温度 T_s と環境作用温度 T_o との重みつけ平均となる. これを(3)式に代入して、乾熱流 i_d を体表温度 T_s と環境作用温度 T_o との差に比例する形

$$i_d = k (T_s - T_o) = F_k k_o (T_s - T_o) \quad (6)$$

にして表はす. ただし、 $k = F_k k_o$ は体表から外気までの総合乾熱傳達係数であり、

$$F_k = 1 / (1 + k_o r_f) \quad (7)$$

は衣服通熱率である. 乾熱傳達係数は、裸の場合の k_o から、衣服を着用することにより、衣服通熱率 F_k ($0 < F_k < 1$) の割合で小さくなる. すなはち(6)式は、衣服が体表からの乾熱傳達係数 k_o を F_k の率で調節してゐることを表はしてゐる.

次に、汗の蒸発に基づく湿熱流 i_w を考へる.

体表 (体表湿潤率 θ , 水蒸気圧 p_s) から衣服表面 (p_f) を通つての外環境 (p_a) への湿熱流 i_w は、乾熱流の場合と同様に

$$i_w = \theta h (p_s - p_a) = \theta F_h h_a (p_s - p_a) \quad (8)$$

と表はされる (Fig. 3). ただし、 $h = F_h h_a$ は体表から外気までの総合湿熱傳達係数で、衣服の湿熱抵抗 $1/h_f$ と衣服表面の空気境界層の湿熱抵抗 $1/h_a = \delta / D_p \lambda$ との和の逆数であり ($D_p = D / RT$ は水蒸気圧拡散定数、 $D = 0.256 \text{ cm}^2/\text{sec}$ は水蒸気拡散定数、 $\lambda = 44 \text{ kJ/mol}$ は水の蒸発熱),

$$F_h = 1/(1+h_a/h_c) \quad (9)$$

は衣服通湿率で、裸の場合は 1、通湿性のない衣服のときは 0 となる。

体表湿潤率 θ は、発汗により増加し、 $0.06 \leq \theta \leq 1$ の値を取る。無汗時の最小値 $\theta = 0.06$ は不感蒸泄に対応する。

ここでちなみに湿乾熱傳達係数比 $L = h_a/k_a = 16.5$ K/kPa は空気境界層厚 δ によらぬ定数 (Lewis 数) である (Lewis の関係式²⁷)。

温度 T における水の飽和蒸気圧 $p(T)$ は Antoine の式²⁸ より精度よく計算できる。すると、 $p_s = p(T_s)$ 、 $p_a = \varphi p(T_a)$ であるから ($\varphi = p_a/p(T_a)$ は相対湿度)、湿熱流 i_w は、

$$i_w = \theta h [p(T_s) - \varphi p(T_a)] \quad (10)$$

と温度の関数として表はすこともできる。

したがって体外での熱流 i は、乾熱流 i_d と湿熱流 i_w との和として

$$i = k(T_s - T_o) + \theta h (p_s - p_a) = F_k k_o (T_s - T_o) + \theta F_h h_a [p(T_s) - \varphi p(T_a)] \quad (11)$$

と表はされる。

この式を見ると、外環境を表はす指標は温度 (気温 T_a と環境作用温度 T_o) と湿度 (相対湿度 φ) と風 (熱傳達係数 k_a 、 h_a を $v^{3/5}$ に比例して大きくする) であり、衣服着用の効果は通熱率 F_k と通湿率 F_h を小さくすることとして現はれてをり、人体の生理的状态は体表温度 T_s と発汗 (体表湿潤率 θ) の数値に現はれてゐることが分かる。

4. 有効温度

外環境の温熱的性質はこれまで温度 T_o と水蒸気圧 p_a (相対湿度 φ) と気流 v とで表はしてきたが、人体側の温熱環境の観点から見れば、単純に考へれば結局、環境にどれだけ熱が奪はれたかだけが問題になるのであつて、どの様な種類の熱流によつて熱が奪はれたかは問題ではない。そこで、体表 (温度 T_s 、水蒸気圧 p_s) から外環境 (温度 T_o 、水蒸気圧 p_a) への 2 つの熱流、すなはち乾熱流 $i_d = k(T_s - T_o)$ と湿熱流 $i_w = \theta h(p_s - p_a)$ のうち、湿熱流を生ずるのに相当する仮想の温度差 ΔT_w を

$$i_w = \theta h (p_s - p_a) = \theta k L (p_s - p_a) = \theta k \Delta T_w \quad (12)$$

として定義すれば (ただし、 L は Lewis 数 $L = h/k$ である)、 ΔT_w は

$$\Delta T_w = L (p_s - p_a) = L [p(T_s) - \varphi p(T_a)] \quad (13)$$

であり、乾湿併せた全熱流 i は

$$i = k (T_s - T_E) \quad (14)$$

と表はすことができる。ここで T_E は有効温度

$$T_E = T_o - \theta \Delta T_w \quad (15)$$

であり、外環境作用温度 T_o より $\theta \Delta T_w$ だけ低くなつてゐる。

この有効温度の概念の導入により、環境快適性の問題は、温度と湿度の 2 次元状態図上ではなく、有効温度 T_E だけの 1 次元的な問題として取り扱ふことが可能となる[8]。ただし、体表温度 T_s は芯部での熱発生速度に依存するから、快適性を論ずる場合には、衣服量 (熱抵抗) や風のほかに、さらに作業強度 (代謝速度) をパラメータとして取り入れなければならない[9]。これを Table 2 に示す。

Table 2 Effective temperature and thermal sensation

$T_E/^\circ\text{C}$	感覚
34.5 - 37.5	熱 (発汗淋漓)
30.0 - 34.5	暑 (発汗)
25.6 - 30.0	温 (血管拡張)
22.2 - 25.6	平
17.5 - 22.2	涼 (血管収縮)
14.5 - 17.5	冷
10.0 - 14.5	寒 (振顫)

5. 衣服の熱抵抗

衣服の熱抵抗 $r_i = 1/k_i$ の単位は、熱傳達係数 k_i の単位 $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ の逆数 $\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$ であるが、もともと衣服単独の熱抵抗ではなく、その衣服下の空気層を含んだ熱抵抗を意味してゐるので、衣服用の常用熱抵抗単位 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$) を用ゐて表はされることが多い。この 1 clo の熱抵抗は、欧米ビジネスマン正装 (下着・ワイシャツ・スーツ・靴下・靴) の総合熱抵抗に相当する。一般に下着から上着まで、帽子、靴などを含めて組み合わせさせて着用したとき、全体としての総合熱抵抗 R は各着用物の熱抵抗 r_i の和

$$R = \sum r_i \quad (15)$$

と見なしてよいことが分かつてゐる。すなはち熱抵抗の加成性がほぼ成り立つ。Table 3 に各着用物の熱抵抗を示す[6]。

Table 3 Thermal insulation of garments

衣服	熱抵抗 /clo
パンツ	0.03
シャツ	0.09
半袖シャツ	0.15
長袖シャツ	0.25
半ズボン	0.06
ズボン	0.25
スカート	0.20
セーター	0.28
ジャケット	0.35
コート	0.60
靴下	0.02
靴	0.03

6. 血流の調節

人体の体温制御に関する現時点における簡単なモデルを述べておかう。

体温制御中枢は視床下部にある。ここに人体各所の温度受容器で測定された温度情報が集められる。温度受容器には温受容器と冷受容器とがある。両受容器とも全身に分布してはいるが、前述の様に、温受容器は内臓や脳幹などの芯部に、冷受容器は皮膚すなはち殻部に、より多く分布してゐる。したがって単純化したモデル[10]では、芯部にある温受容器 T_c は中性芯部温度 $T_{c0} = 36.8^\circ\text{C}$ よりも高温の場合にのみ芯部温熱情報 $I_c = T_c - T_{c0}$ を発し、殻部にある冷受容器 T_s は中性殻部温度 $T_{s0} = 33.7^\circ\text{C}$ よりも低温 T_s の場合にのみ殻部寒冷情報 $J_s = T_{s0} - T_s$ を発するものと考へる。そして温熱情報 I_c は前視床下部に、寒冷情報 J_s は後視床下部に集められ^{注9}、前視床下部は I_c に応じて皮膚血管を拡張して血流 j_b を増大させ、後視床下部は J_s に応じて血管を収縮して血流を減少させる。すなはち、皮膚血流 j_b は

$$j_b = j_{b0} \frac{1 + \frac{I_c}{\Delta I_c}}{1 + \frac{J_s}{\Delta J_s}} \quad (17)$$

の様に変化すると概算されてゐる[8]。ここで j_{b0} は中性条件における皮膚血流 $j_{b0} = 1.75 \text{ g/sec}\cdot\text{m}^2$ である。 $\Delta I_c = 31.5 \text{ mK}$ および $\Delta J_s = 2 \text{ K}$ はそれぞれ、芯部温熱感度および殻部寒冷感度である。芯部の温度制御は殻部の63倍 ($= \Delta J_s / \Delta I_c$) の高感度で行なはれてをり、人体の芯部温度恒常性への配慮が伺へる。

7. 発汗と振顫

さらに体温が上昇して、血流調節だけでは対処できなくなつたら、前視床下部からの指令に基づき発汗 j_w

$$j_w = u_b I_b \exp(I_s / \Delta I_s) \quad (18)$$

が始まる。ここに u_b は発汗温度勾配 $u_b = 47 \text{ mg/sec}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}$ 、 $I_b = T_b - T_{b0}$ は平均体温からの温熱情報 ($T_{b0} = 36.2^\circ\text{C}$ は中性平均体温)、 $I_s = T_s - T_{s0}$ は体表からの温熱情報、 $\Delta I_s = 10.7 \text{ K}$ は殻部温熱感度である。体温と殻部の2つの温熱情報 (I_b と I_s) を参考にして発汗してゐる。

逆に体温が低下して、血流調節だけでは対処できなくなつたら、後視床下部からの指令^{注8}に基づき振顫 q

$$q = s_{sc} J_s J_c \quad (19)$$

が、体表からの寒冷情報 $J_s = T_{s0} - T_s$ と、芯部からの寒冷情報 $J_c = T_{c0} - T_c$ とに比例して始まり (ただし $s_{sc} = 19.4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^2$)、熱を発生する。

以上を簡略化してまとめると、体内温度調節系は

全体として Fig. 4 の様に表はすことができる^{注9}。

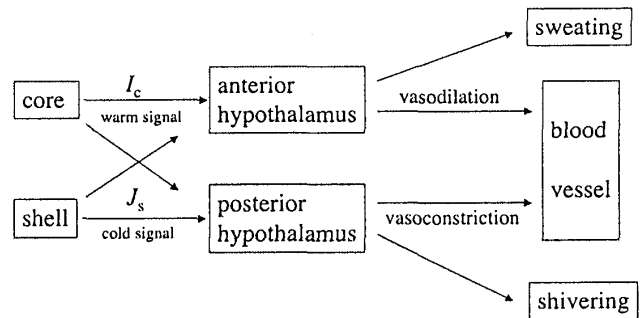


Fig. 4 Simplified diagram of thermoregulatory system

8. おわりに

人体の体温調節および衣服の役割について極めて簡略化したモデルを示した。実際にはこんな簡単なものではないことは勿論であるが、まづは簡単ではあつても全体を把握するモデルを持たなければ全体像が得られない。過ちも多いことと思ふがよろしく御指摘頂きたくお願い致します。

注1. 代謝反応の温度依存性は、温度が10 K上昇したときの反応速度増倍比である温度商 Q_{10} によつて表わされ、多くは約 $Q_{10} = 2.3$ 附近の値を取る、これはアレニウス Arrhenius の活性化エネルギー $E_A = 65 \text{ kJ/mol}$ に相当する。

注2. 芯殻間血流 j_b が増大すると、体内の高温域が体表側に拡大するので、温熱生理学上の殻分率 α は

$$\alpha = 0.1 + 0.255 \times [1 / (1 + (j_b / j_{b0}))] \quad (20)$$

として (ただし、 $j_{b0} = 1.1 \text{ g/sec}\cdot\text{m}^2$)、芯殻間血流 j_b の増加とともに減少する[8]。しかし一般には殻分率 α は $\alpha = 0.25$ と想定することが多い。

注3. DuBoisの式は、測定の容易な体重 m と身長 h から体表面積 S を

$$S = 0.202 \text{ m}^2 (m/\text{kg})^{0.425} (h/\text{m})^{0.725} \quad (21)$$

として求めるもので[11]、簡便なので体表面積算出に広く用ゐられてゐる。

注4. 乾熱流 $i_d = k \Delta T$ を境界層近似 (境界層厚 δ) で表はせば、 $i_d = \kappa \Delta T / \delta$ なので、熱傳達係数は $k = \kappa / \delta$ である。ここで、 κ は空気の熱傳導度である。

同じく、湿熱流 $i_w = h \Delta p$ を境界層近似 (境界層厚 δ) で表はせば、 $i_w = \lambda D \Delta c / \delta = \lambda (D/RT) \Delta (cRT) / \delta = \lambda D_p \Delta p / \delta$ なので、湿熱傳達係数は $h = \lambda D / \delta RT$ である。ここで、 $\lambda = 44 \text{ kJ/mol}$ は水の蒸発熱、 $D = 2.56 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ は水蒸気の (空気中での) 拡散定数である。室温では $RT = 2.5 \text{ kJ/mol}$ である。

注5. 衣服表面の空気境界層厚 δ は、風速 v により

$$\delta = (2.4 \text{ mm}) / (v / (\text{m/sec}))^{3/5} \quad (22)$$

の様に薄くなる。ただし無風状態でも体温などに基づく自然対流があるので、境界層が6.3 mmより厚くなることはない。この厚さは約 $v=20 \text{ cm/sec}$ の気流に相当する。

注6. 2つの温度 T_f と T_r の4乗の差 $T_f^4 - T_r^4$ は、その平均温度 $T=(T_f+T_r)/2$ に較べて差 $\Delta T = T_f - T_r$ が十分に小さければ、

$$T_f^4 - T_r^4 = (T_f^3 + T_f^2 T_r + T_f T_r^2 + T_r^3) (T_f - T_r) \approx 4T^3 \Delta T$$
と近似でき、 ΔT に比例する。

注7. 衣服表面の空気境界層厚 δ による乾熱傳達係数 k_a と湿熱傳達係数 h_a はそれぞれ空気の熱傳導度 κ と(空气中の)水蒸気圧拡散係数 $D_p = D/RT$ および水の蒸発熱 λ とを用いて $k_a = \kappa/\delta$ および $h_a = D_p \lambda/\delta$ と表はされる。したがって、乾熱に対する湿熱傳達係数の比 $L = h_a/k_a$ は

$$L_a = D_p \lambda / \kappa = 16.5 \text{ K/kPa} \quad (23)$$

となり、空気境界層厚 δ によらぬ定数となる。これをLewisの関係式といふ。

注8. 水の飽和蒸気圧 p の温度依存性はクラクラ Clapeyron-Clausius の式

$$-d \ln (p/\text{kPa}) / d (1/RT) = \lambda \quad (24)$$

より求められる。もし、右辺の水のモル蒸発熱($\lambda \approx 43 \text{ kJ/mol}$)が一定で温度依存性がないなら、簡単に積分して($R = 8.3 \text{ J/K mol}$),

$$p(T) = p_0 \exp(-5.18 \text{ kK}/T)$$

を得る。しかし、水のモル蒸発熱 λ には若干ながら温度依存性があるので、このまま定数 43 kJ/mol としては積分できない。そこで、精度のよい実験式である Antoine の式

$$p(T) = p_A \exp(-4.03 \text{ kK}/(T - T_A)) \quad (25)$$

がよく用いられる。ただし、 $p_A = 17 \text{ GPa} = e^{16.635} \text{ kPa}$, $T_A = 38 \text{ K}$ である。

注9. 最近の報告では、後視床下部が寒冷中枢であるとの説はほぼ否定されてゐる。したがってここでは単なるモデルとして述べた。

参考文献

1. 中島利誠, 「生活と技術」, p.4-26, コロナ社, 2002.
2. 三木成夫, 「生命形態学序説」, うぶすな書院, 1992.
3. 中山昭雄, 「温熱生理学」, p.7-10, 理工学社, 1981.
4. 入来正躬, 外山敬介, 「生理学2」, p.591, 文光堂, 1986.
5. E. Simon, "Effect of CNS temperature on generation

and transmission of temperature signals in homeotherms", *Pfluegers Arch.*, **392**, 79-88 (1981).

6. P.O. Fanger, "Thermal Comfort", McGraw-Hill, 1970.
7. ASHRAE, "Physiological principles, comfort and health", *Fundamentals Handbook*, Atlanta, 1989.
8. A.P. Gagge, J.A.J. Stolwijk, Y. Nishi, "An effective temperature scale based on a single model of human physiological temperature response", *ASHRAE Transactions*, **77**, 247-262 (1971).
9. A.P. Gagge, Y. Nishi, R.R. Gonzalez, "Standard effective temperature index of temperature sensation and thermal discomfort", *Proceedings of the CIB commission W45 Symposium*, Building Research Station, UK, 1972.
10. D.A. McIntyre, "Indoor Climate", Applied Science, London, 1980.
11. D. DuBois, E.F. DuBois, "A formula to estimate surface area if height and weight are known", *Archives of Internal Medicine*, **17**, 863 (1916).