

4 環境と人体との熱平衡

4.1 環境の物理的条件と人間

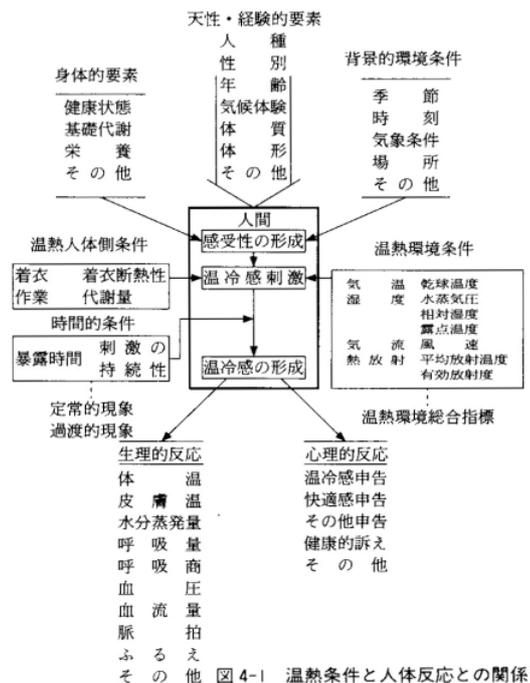
人間と熱環境とのかかわりを、単純化して示すと図4-1のように表現できる。人間に本来備わっている天性的なものや経験的事項や履歴などはすべて考慮していない。そこで対象とする状況によって考えるべき背景的条件を選んで取り扱うことにすれば、次のように単純に整理することができる。直接的に人間の温冷感(暑さ寒さ)にかかわる温熱条件を考えると、環境側の四つの条件、気温・湿度・気流・熱放射と、人体側の二つの条件、代謝量・着衣量を挙げることができる。これらを温熱6条件という。海底・宇宙・高所住居など低い気圧や高い気圧下での住居を考える場合には、気圧の条件が加わることになる。さらに、環境側の刺激の持続性や環境条件の時間的変化・変動を示すものとして暴露時間という時間的条件を考えることが必要である。それらの条件に対する人間側の応答として生理的・心理的反応をとらえるのである。これらの相互関係を知ることが、人間-熱環境系の本質理解の第一歩である。

人間の熱環境に対する感覚として、熱的快適性(thermal comfort)と熱的中性(thermal neutrality)あるいは、至適温度(optimum temperature)といわれる暑さ寒さに対する快適性や快適温度についての言い方がある。人間が“暑くも寒くもない”と感じる状態、つまりかなり狭い限定された範囲での寒暑の感覚が中位を示すものが“熱的中性”であり、“良い悪い”のような価値基準が加えられると“熱的快適”になると考えられる。一方日本語の“涼しい・暖かい”という言葉は、どちらかというとも寒暑の感覚に快適性を含んだ言葉だとされている。アメリカ暖房冷凍空気調和学会ASHRAEでは、“thermal comfort”は熱的な環境に満足する心の状態であるとしていて、これらはいずれも心理的に快適な状態を表している。このほかに肉体的生理的に至適・快適とする状態もある。人間に生理的に最も負担のかからない状態を生理的至適状態とす

るものである。例えば、代謝量が最も低い状態は、人体の熱収支の効率が最も良いとされる状態である。“熱的快適”の状態は、これら心理的、生理的状态とともに、人体の内部での熱産生と人体表面での環境との熱授受との熱平衡が成立していることが必要である。

4.2 人体と環境との間の熱平衡(収支)式

人体は、マクロ的に見ると、代謝によって体内で熱を産生し、それを滞りなく体外に放出することによって、体温を保ち生命を維持している。まず、人間の内部に目を向けると、栄養の吸収によって代謝活動が行われ、代謝量 M (W/m^2)が産熱されている。それが、熱伝導と血流により体表面へ運ばれ、皮膚表面から外界へ放熱される。それと同時に呼吸によっても外部へと放熱が行われる。つくられた熱と放散される熱とがバランスを取るようにして、体温をほぼ一定に保とうとする動きが行われている



II 熱環境

(図4-2)。これが体温調節機構である。代謝熱は、体内で消費されたエネルギーが熱に変換されたものである。これは人間の活動のレベル・運動状態に密接に関係している。安静にしていれば成人でおよそ100Wの代謝量があり、立って約200W、マラソンで500～600Wが一応の目安である。外部に対して自転車こぎ等の機械的仕事 W (W/m²) をするとその分、体内での代謝量は減少する。代謝量は、単位体表面積当たりで表わすと比較的個体差がなくなる。椅座安静時の代謝量 60 W/m² を基準として 1 met という単位で表わしたものが met 数である。代謝量と活動レベルとの関係を表4-1に示す。

人間から環境への放熱はいろいろな経路を経て行われている。人間の体内から直接に放熱が行われるものとして呼吸による放熱がある。体内と体外の空気の温度差によって放熱される顕熱 C_{res} (W/m²) と内外の水蒸気量の差によって奪われる潜熱 E_{res} (W/m²) に分けられる。この呼吸による放熱量は、通常の平地では約1割以下で少なく、無視される場合も多い。温熱環境指標でもこれらの影響を入れないものも多いが、実用上はあまり問題にならないと考えてよいであろう。しかし、ヒマラヤ等の高地では気圧が低下することによって、気温が低い場合潜熱の放熱量が占める割合が高くなり人体全体からの放熱量の半分以上にもなるという試算が報告されている。

最も主要な放熱は、人間の皮膚表面で行われる放熱である。通常ではこの経路からの放熱が多くの割合を占めている。その伝熱の形式から対流 C ・熱放射 R ・蒸発 E ・伝導 C_d (単位はいずれも W/m²) に分けられる。皮膚表面から出た熱は、露出部を除いて着衣の中を熱伝導で伝わり、水蒸気は着衣中を透湿して、着衣表面でこの四つの放熱形態で放熱されることになる。この熱流のバランスから人体の熱平衡式は次式で表される。

$$M - W - C_{res} - E_{res} = C + R + E + C_d + S$$

$$S = C_q (dt_b / d\tau) \quad (4.1)$$

C_q : 人体の単位体表面積当り熱容量 [J/km²]
 $dt_b / d\tau$: 体温変化率 [°C/S]

ここで S は人体の熱収支のバランス量で、定常状態では $S=0$ である。非定常状態では、 $S>0$ で人体への蓄熱が起こり、 $S<0$ で身体冷却の現象が起こる。前者では、体温が上昇し、後者の場合には体温が降下する。通常は、 $S=0$ で体温がほぼ一定に維持されるように、体温調節機構が働き、体温調節が行われる。これをホメオスタシスという。

これを示したのが、図4-3である。至適温度付近では、血管の拡張・収縮による血流量の増減で末梢部への熱の輸送量を調節し体温調節を行う。血流調節による体温調節が限界になる温度領域より低温になると、ふるえ熱産生(シバリング)で代謝量を増

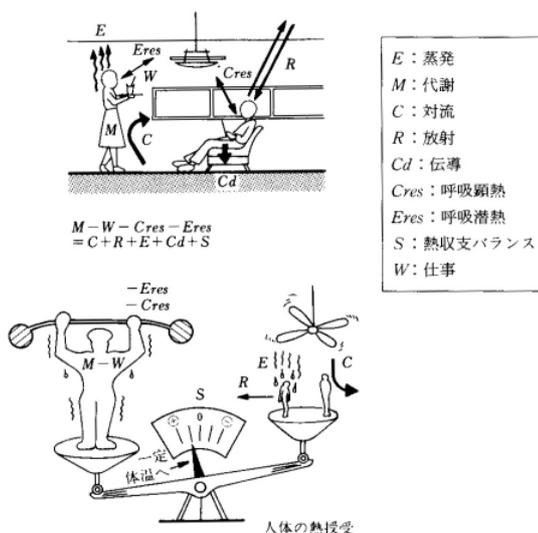


図4-2 人体と環境との間の熱授受と熱平衡

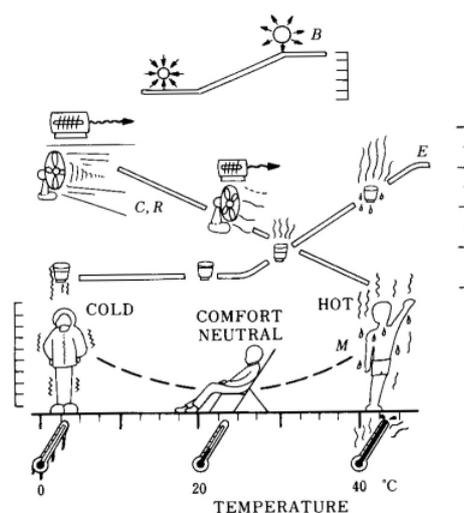


図4-3 体温調節のメカニズム

加させる。この調節で限界になると（一定の）体温が維持できず、身体冷却の状態となる。血流調節領域より高温側では、発汗が行われる。気温でほぼ30°C付近、皮膚温で34.5°C以上になると開始されるといわれている。発汗量も限界がある。限界以上では、蓄熱状態となり、体温は上昇する。これらの体温調節機構の作用の結果として、体温と関連して皮膚温は上下する。顕熱の放熱量は皮膚温と環境の温度（気温・放射温度）との差に関係して、環境の温度が低温側で大きく、高温側で小さくなり、環境の温度が皮膚温より高温になると、放熱から受熱へと変わる。ここでは、唯一の放熱は発汗に伴う蒸発である。蒸発しない（例えば皮膚から落ちてしまうような）汗は、放熱としては役立たず、無効発汗という。

人体皮膚表面からの各放熱量は、以下のように求められる。対流放熱量 C は、ニュートンの冷却則によって、次式で与えられる（図4-4）。

$$C = h_c F_{cl} (t_s - t_a) \quad (4.2)$$

ここで、 h_c ：人体の対流熱伝達率 [W/m²°C]

F_{cl} ：着衣の熱効率 [-]

t_s ：人体皮膚温 [°C]

t_a ：気温 [°C]

放射放熱量 R は、ステファン・ボルツマンの法則を線形化して、次式で与えられる（図4-5）。

$$R = h_r F_{cl} (t_s - t_r) \quad (4.3)$$

ここで、 h_r ：人体の放射熱伝達率 [W/m²°C]

t_r ：平均放射温度 [°C]

蒸発放熱量 E は次式で与えられる（図4-6）。

$$E = w L h_c F_{pcl} (p_s^* - p_a) \quad (4.4)$$

ここで、 w ：皮膚のぬれ面積率 [-]

L ：ルイスの関係の係数 [kPa/°C]

F_{pcl} ：着衣の透湿効率 [-]

p_s^* ：皮膚の飽和水蒸気圧 [kPa]

p_a ：環境の水蒸気圧 [kPa]

伝導 C_d については、二つの場合がある。ひとつは、人間が床や椅子などに接触して、その接触部分で伝導により熱のやりとりが起こる場合である。冷房環境での椅座姿勢での実測例では全放熱量のうち接触伝導によるものは8%にすぎず、通常は微量

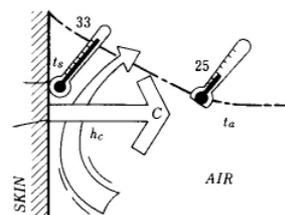


図4-4 人体皮膚表面からの対流放熱

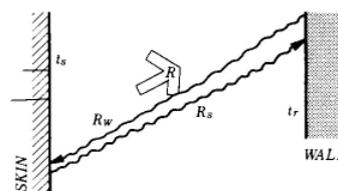


図4-5 人体皮膚表面からの放射熱交換

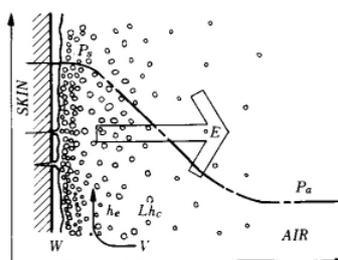


図4-6 人体皮膚表面からの蒸発放熱

表4-1 活動レベル代謝量²⁾

活動状況	代謝量 W/m ²	Met 数 met
睡眠	40	0.7
椅座安静	60	1.0
立位	70	1.2
歩行 0.89 m/s	115	2.0
1.79 m/s	220	3.8
椅座読書	55	1.0
書き物	60	1.0
タイプ	65	1.1
荷物の持ち上げ	120	2.1
自動車運転	60~115	1.0~2.0
料理	95~115	1.6~2.0
掃除	115~200	2.0~3.4
テニス	210~270	3.6~4.0
バスケットボール	290~440	5.0~7.6

II 熱環境

として計算等では省略する。しかし、床座の場合で床暖房を行っている場合は無視することができない。この量の評価には、床面と人体との接触面の熱伝導量をもとめることが必要であり、現在研究が進められている。もう一つは着衣内の熱伝導である。これについては、着衣の熱抵抗を表す単位としてクロ値があり、着衣内の伝導の計算と着衣の保温性の評価に用いられる。このクロ値を対流・放射・蒸発の各放熱量の計算時に、熱抵抗値・透湿抵抗値として組み込んで表現する。顕熱の場合、伝熱効率 F_{cl} 、潜熱の場合に透湿効率 F_{pcl} が定義され、対流・放射熱伝達率および湿気熱伝達率を補正するパラメーターとして組み込まれる。着衣中の伝熱量 Q_{cl} (W/m^2) は次式で与えられる (図4-7)。

$$Q_{cl} = (1/0.155I_{cl})(t_s - t_{cl}) \quad (4.5)$$

I_{cl} : 着衣のクロ値 [clo]

t_s : 皮膚温 [$^{\circ}C$]

t_{cl} : 着衣表面温 [$^{\circ}C$]

皮膚から着衣表面そして人体外側までの熱抵抗 R を、一つの量で表すと、

$$R = 0.155I_{cl} + \left\{ \frac{1}{(h_c + h_r)} \right\} \quad (4.6)$$

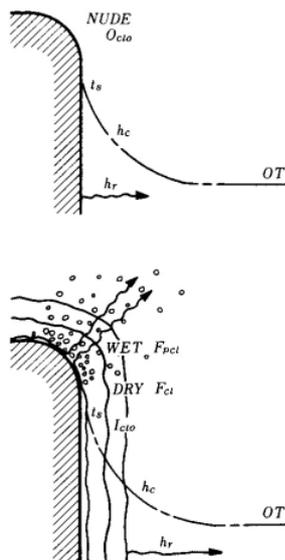


図4-7 着衣の熱抵抗の影響

となり、変形すると、

$$\frac{1}{R} = (h_c + h_r) \left[\frac{1}{\{1 + 0.155I_{cl}(h_c + h_r)\}} \right] \quad (4.7)$$

ここで、右辺大括弧内を F_{cl} とおくと、着衣による熱伝達率の補正係数である伝熱効率となる。同様に、湿気の場合も透湿効率が求められる。 F_{cl} と F_{pcl} は次式で表せる。

$$F_{cl} = \frac{1}{\{1 + 0.155I_{cl}(h_c + h_r)\}} \quad (4.8)$$

$$F_{pcl} = \frac{1}{(1 + 0.143I_{cl}h_c)} \quad (4.9)$$

これらを用いて、最終的な人体の熱収支式は次式となる。

$$\begin{aligned} M - W - C_{res} - E_{res} &= h_c F_{cl} (t_s - t_a) \\ &+ h_r F_{cl} (t_s - t_r) \\ &+ w L h_c F_{pcl} (p_s^* - p_a) \\ &+ C_a + S \end{aligned} \quad (4.10)$$

現在使用されている多くの温熱環境指標はこの人体の熱平衡式に基づいている。

1) 佐藤方彦編著：生活科学のすすめ，井上書院，1988
2) ASHRAE：ASHRAE Hand book, Fundamentals, 1993