特集

熱と人体

Heat and Human Body

大岡 龍三*

Ryozo OOKA

1. はじめに

Fig. 1 に、東京都内における熱中症による救急車搬送人員数の経年変化を示す。過去 15 年間に、その人数は急増していることがわかる。このことは東京都におけるヒートアイランドの進展と密接に関連しているものと推察される。またここには示さないが、年間搬送人員数と年間の夏日、熱帯夜の日数との間にも有意な相関が認められることが報告されている。このように、人体の健康問題と、屋外の熱環境は密接に関連している。本稿では、熱に関わる人体の反応と、熱環境を評価する指標について解説する。

2. 人体の熱収支と快適方程式

人間は、食べた食物を消化分解することにより、生活のためのエネルギーを取出している。例えば、デンプン（グルコース $6\text{CH}_2\text{O}$ ）を 1 モル（ $\approx 180\text{g}$ ）酸化すると、約 673 kcal （ $\approx 2826\text{kJ}$ ）のエネルギーを得ることができる。そのエネルギーは、体を動かしたり、体調を整えたり、体温を維持するために利用される。この場合の人体における熱エネルギーのバランス式は次で表される（Fig. 2）。

Fig. 1 熱中症の搬送人員数（3年移動平均）文1)

食物の消化分解による産熱＝人体への蓄熱＋外部への放熱＋外部への仕事 (1)

ここでいう外部への仕事（Fig. 2 中 W）とは、物を動かし、持ち上げたりすることにより熱以外の形で人体の外部にエネルギーを伝えることである。また、人体から外部へ放熱する経路としては、呼吸によるもの（Fig. 2 中：RES）と皮膚表面からの放熱があり、皮膚表面からの放熱の仕方としては、対流（顕熱：Fig. 2 中 C）によるもの、蒸発（潜熱：Fig. 2 中 E）によるもの、放射

Fig. 2 人体の熱バランス

* 東京大学生産技術研究所
Institute of Industrial Science, University of Tokyo

によるもの (Fig. 2 中 R), 伝導によるもの (Fig. 2 中 K) がある。例えば, 冬に木枯らしが吹いて寒いと感じるのは, 冷たい空気が体の熱を奪っていくためこれは対流の効果である。暑い夏に風に当たると涼しいと感じるのは一部には対流による効果でもあるが, 風が当たることにより皮膚表面の汗が蒸発し, その時に熱 (気化熱) を奪うためでもある。また電気ストーブの近くによって暖かいと感じたり, 氷の近くによって触れてもいないのに何となくひんやりとするのは放射による効果である。物に直接触れてその温度を感じたり, 床暖房や電気カーペット等であたまるのは伝導による効果である。これらの放熱方法のおおの割合は, その時の環境条件により大いに異なるが, 通常の室内の執務環境の場合には, 放射の効果がおよそ全体の 1/2 であり, 対流と蒸発の効果が各々全体の約 1/4 である。伝導による寄与分は通常は非常に小さい。式 (1) を Fig. 2 中の記号を用いて, 人体への蓄熱成分 (Fig. 2 中 S) を中心とした熱収支式に書き改めると次のようになる。

$$S = M - \text{RES} - C - E - R - K - W \quad (2)$$

ここで左辺の 2 番目の項以降は, Fig. 2 に示すようにエネルギーが人体から外部に向かう方向を正としている。式 (2) において, 人体からの放熱が大きく, S が負になれば, 体温は低下し寒さを感じる。また熱産生 M に比べ放熱が小さければ, 体温は上昇し暑さを感じるようになる。S=0 の時には, ちょうど熱的にバランスが取れているため快適となる。この意味で S=0 としたときの式 (2) を特に快適方程式と呼ぶ。

3. 寒さ・暑さに対する人間の反応

人間は寒冷環境や暑熱環境におかれた場合でも, 出来る限り式(3.1.2)の S (人体への蓄熱分) を 0 に近づけようとする。そうしないと体温が上昇しつづけたり, 低下しつづけたりして生命が危険にさらされるからだ。式 (2) の S を 0 に近づけようとする人間の反応には, 無意識のうちに行われる生理的反応 (ホメオスタシス) と, 意識的に行う能動的反応がある。

無意識の生理反応の例は以下のようにある。寒さに対するふるえは, 体を震わすことにより人体の熱産生 M を高め, 寒冷環境における多大な熱放散に対して, 少しでも S を小さくしようとするものである。また同じく寒さに対しての血管収縮があるが, これは人体の内部と皮膚表面の間を結ぶ血管の断面積を小さくすることによ

り, 人体内部の熱が出来るだけ外部に出て行かないようにするためである。一方, 暑さに対する代表的な反応例は, 発汗である。汗の蒸発により, 体熱放散を促進する。人間の皮膚温度はだいたい 34℃程度であるが, 外界周囲温度がこれよりも高くなれば, 対流や放射による放熱はほとんど期待できなくなり, 暑熱環境においては, もっぱら体熱放散は蒸発によることになる。また寒さの場合とは逆に, 暑熱環境においては, 血管が拡張し, 人体内部から皮膚表面への熱輸送が促進されることになる。これらの生理的反応は, 脳髓の視床下部に支配されている。特に暑さに対する反応は前視床下野 (温熱中枢) で, 寒さに対しては後視床下野 (寒冷中枢) で司られる。

暑さ・寒さという環境条件が人間の体温調節能力を超えた場合には, 式(3.1.2)の S (人体への蓄熱分) が 0 とならず, +か-のどちらかとなる。S > 0 の場合には, 体温が異常に上昇し (高体温), うつ熱となる。神経系統の異常, ことに悪心, 嘔吐, 頭痛を伴い, ひどいときには昏睡状態となり, 体温が 42℃を長く超えると死亡する。熱射病はうつ熱の典型的なもので, 日射病は単なるうつ熱のほかに直射日光による熱線の脳内作用が加わったものである。うつ熱の療法としては, まず患者を氷や水で速やかに冷やすことである。体温調節中枢の異常ではないから, 解熱剤を用いても意味がない。なお, 病気などにより, 体温調節中枢が異常をきたし, 高体温になることを発熱と呼んでいる。逆に, S < 0 の場合が長く続けば, 低体温となる。これがはなはだしくなると身体障害が現れ (凍互), 最終的には凍死する。

4. 温熱快適性の 6 要素

前述したように, 人体は, 対流, 放射, 蒸発を通じて体外に熱を放散している。これらに影響を与える外界条件として考えられるものは, 気温, 放射温度, 湿度, 気流の 4 の要素である。

しかし, 「暑い」とか「寒い」と言った温熱感覚や温熱快適性を支配しているのはこの 4 つの要素だけではない。例えば, 冬に薄着なものと厚着なのでは感じる寒さが全く違う。これは, 衣服が人体と外界環境の熱交換において, 抵抗として働くためである。また同じ薄着でもマラソンの最中だとほとんど寒さを感じないだろう。これは服を着ると体からの熱が逃げにくくなること, 運動をすると, 体から熱が逃げていっても, 一方で熱がどんどん生産されているので (すなわち, 快適方程式 (2) 中の代謝量 M が大きくなり), 体の蓄熱量が減らないためである。このように着衣の量と人体の代謝量も温熱感

覚や温熱快適性を決定する大きな要素である。この 2 つの要素と先の 4 つの要素を合わせて温熱快適性の 6 要素と呼んでいる。このうち、人体側の要素である着衣量と代謝量について以下に説明する。

(1) 着衣量

上述したように、衣服は人体と外界環境の熱交換において、抵抗として働く。衣服の抵抗値として、通常 $0.155 \text{ m}^2\text{C/W}$ を 1 とした着衣量 (clo: クロ) がよく用いられる。裸体は 0 clo, 男子の背広姿で 1.0 clo, 夏の半袖姿で 0.6 clo 程度である。

(2) 代謝量

人間が生産する熱量 (Fig. 1 中の M) を、人体の単位表面積あたりの発熱量 (W/m^2) として表したものを代謝量という。特に、空腹時、仰向けに寝て安静状態にあるときの代謝量を基礎代謝量という。個人差はあるが、日本人の成人男子でだいたい 40 W/m^2 ぐらいである。代謝量の単位としては、椅子に座って安静にしているときの成人男子の平均的な代謝量 (58 W/m^2) を 1 とする、代謝率 Met (メット) がよく用いられる。日本人の成人男子の平均的な人体表面積は 1.7 m^2 ぐらいなので、代謝率 1Met とは、一人あたり凡そ 100 W の電球と同じぐらいの熱を放熱していることになる (Fig. 3.3.2)。Table 2 に典型的な活動状態における Met 値を示す。

5. 温熱環境指標

人間を取り巻く温熱環境は、温熱快適性の 6 要素によってほとんど決定されるといってよい。従って、この 6 つの要素を組み合わせて、いくつかの温熱環境指標が提案されてきた。ここでは代表的なものについて以下に述べる。

(1) 有効温度 ET (Effective Temperature) ^{文2)}

1923 年に Houghton と Yaglou の実験により提案された感覚温度である。湿度 100% で無風かつある気温の A 室と、気温・湿度・気流をいろいろ組み合わせた状態の B 室の 2 室を準備する。この 2 つの室の間を被験者が移動し、A 室と B 室の温度感覚が全く等しいと感じる時に、B 室の有効温度は A 室の温度と等しい値であるとした。快適域は、通常着衣の状態では、有効温度が冬季 $17\sim 22^\circ\text{C}$ 、夏季 $19\sim 24^\circ\text{C}$ 、ただし湿度 40~60% のときであると言われている。有効温度は、温熱快適性の 6 要素のうち、気温、湿度、風速の 3 つの要素を考慮していると言える。

(2) 作用温度 OT (Operative Temperature) ^{文3)}

通常の室内環境では、人体と環境との熱交換のうち放

射による部分がかなり大きい (全体の約 1/2)。作用温度は、気温と放射温度の 2 つの要素を組み合わせたもので、1937 年 Gaggi によって提案された。作用温度は次式で定義される。

$$OT = \frac{h_c T_a + h_r T_r}{h_c + h_r}$$

ここで、 T_a : 気温、 T_r : 平均放射温度、 h_c : 対流熱伝達率、 h_r : 放射熱伝達率

(3) 平均予測申告 PMV (Predicted Mean Vote) ^{文4)}

Denmark の Fanger は人体の熱収支式の研究と被験者実験から、温熱快適性の 6 要素を全て含む総合快適指標 PMV を提案した。PMV は被験者の体感申告をもとに環境条件を (+3 暑い, +2 暖かい, +1 やや暖かい, 0 どちらでもない, -1 やや涼しい, -2 涼しい, -3 寒い) の 7 つのカテゴリーで評価する。国際規格である ISO7730 では、快適な PMV 範囲を、 $-0.5 < \text{PMV} < 0.5$ としている。ただし、PMV では人体からの蒸発散熱を代謝量のみに関数とおいているため、有風時の発汗を伴う場合には予測精度が低下するという報告もある。

(4) 新有効温度 ET* ^{文5)}

1971 年 Gaggi らにより提案された、感覚温度である。PMV と同じく温熱快適性の 6 要素を変数として含むが、被験者による申告ではなく、温熱生理学に基づいて理論的に構築されている所にその特徴がある。すなわち人体をコア (内部) とシェル (皮膚) に分けた 2 ノードモデルと呼ばれる人体モデル (Fig. 3) を用いて、ある環境において平均皮膚温度、発汗量を求め、人体からの放熱量を算定する。そして相対湿度 50% かつ静穏な気流下で人体からの放熱量が、この放熱量と等しくなるような気温を、新有効温度 ET* と定義する。ET* は任意の代謝量、着衣量に対して定義されるため、ET* の値のみで温熱感覚を直接比較できない。そこで更に、代謝量 1Met、着衣量 0.6clo を新たに標準状態の条件として加え、そのもとでの人体からの放熱量が等しくなるような気温を、新標準有効温度 (SET*) と定義する。Table. 1 に SET* と温熱感覚・生理現象・健康状態の関係を示す。

(5) その他の指標

神田ら文 ⁶⁾ は、屋外における人体熱バランスの熱的非平衡状態に基づき、仮想熱負荷量に基づいた温熱環境指標 VTL (Virtual Thermal Load) を提案している。また Hoeppe 文 ⁷⁾ も、人体熱収支に基づく PET (Physiological Equivalent Temperature) を提案している。

Fig. 3 2 ノードモデルの概念図

Table 1 SET*と温熱感覚, 生理現象, 健康状態の関係

SET* [°C]	温熱感覚		生理現象	健康状態
	[温冷感]	[快適感]		
40~45	・限界	・限界	・体温上昇 ・体温調節不良	・血液の循環不良
35~40	・非常に暑い ・暑い	・非常に不快	・激しい発汗 ・血流による圧迫感の増加	・ヒートショックの危険増加
30~35	・暖かい	・不快		・脈拍が不安定
25~30	・やや暖かい	・快適	・発汗、脈拍の変化による体温調節	・正常
20~25	・何とも無い ・やや涼しい		・生理的中立	
15~20	・涼しい	・やや不快	・放熱量が増加し衣服または運動が必要	
10~5	・寒い ・非常に寒い	・不快	・手足の血管収縮、ふるえ	・粘膜や皮膚の乾燥による苦情の増加
5~10				・体の抹消部分への血液の循環不良による筋肉痛

参考文献

- 1) 平成 12 年度 ヒートアイランド現象の実態解析
と対策のあり方について 報告書 ヒートアイラ
ンド実態解析調査検討委員会 社団法人 環境情
報科学センター 2001 年 3 月
- 2) C.P. Yaglou, W.E. Miller : Effective temperature
with clothing, ASHVE Transactions, Vol. 31,
pp.89-99, 1925
- 3) A.P. Gagge, A.C. Burton, H.C. Bazett, Practical
system of units for the description of the heat
exchange of man with his environment,
SCIENCE, pp.428-430, 1941.
- 4) P.O. Fanger, Thermal comfort, Danish Technical
Press, 1970
- 5) A.P. Gagge, A. Nishi, R.R. Gonzales, Standard
effective temperature -A single temperature
index of temperature sensation and thermal
discomfort, Proc. of the CIB Commission W45
(Human Requirements), Symposium, Thermal
Comfort and Moderate Heat Stress, Building
Research Station, pp. 229-250, 1973
- 6) 神田学, 柳本記一, 宇梶正明, 新しい屋外温熱感
指標の提案, 土木学会論文集 No.545/Ⅱ-36
pp.1-10, 1996 年 8 月
- 7) PR Hoeppe, The physiological equivalent tempe-
rature - a universal index for biometeorological
assessment of the thermal environment. Int J
Biometeorol., 1999