

温熱指標

我々が「寒い」、「暑い」と感じる温熱感覚は、気温だけでなく放射、湿度、風速を含む気象条件に大きく左右される。外環境と人体のあいだで生じる熱交換が皮膚、中枢神経、体深部の温度受感を通して脳の視床下部に伝わり、本来の望ましい体温よりも高ければ自律神経系統を通じて発汗や不感蒸泄（肺や皮膚からの蒸発）、末梢血管の拡張による血流調整などの体温調節が機能する。このあいだにも人体は外環境から常に熱負荷を受けながら皮膚温度、中枢神経温度、体深部温度がそれぞれ決定され、その結果、温熱感を覚えることになる。ホメオスタシスと呼ばれるこの人体の恒常性生理応答を考慮しながら、温熱感覚を簡易的な一元尺度として表現しようとしたものが温熱指標である。温熱感指標、温熱指数、体感指標など様々な呼称が存在するが、本稿では、最も多い表現と思われる温熱指標という言葉を使っていく。

温熱指標には一般に広く知られる不快指数から、建築や環境工学の分野でよく扱われるPMV (Predicted Mean Vote; 和名は予測平均温冷感申告) や SET* (Standard New

Effective Temperature; 和名は標準新有効温度)、熱中症の指標として最近注目されている WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature; 和名は湿球黒球温度) など、数多く存在する。欧州では先述の PMV と

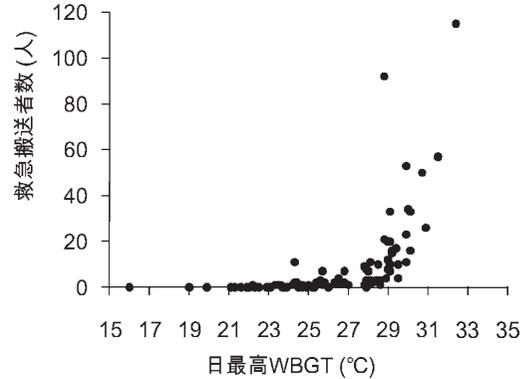
第1表 代表的な温熱指標の一覧 (作成された順に列挙してある)。

温熱指標 (和名)	略称	特徴	備考
有効温度	ET	現実環境と同じ温熱感覚を与える相対湿度100%、静穏 (風速0.1m/s) 時の気温として定義	放射の影響は無視している
作用温度	OT	気温と放射のみを考慮 $OT = (h_c T + h_r T_r) / (h_c + h_r)$ T : 乾球温度 (°C), T_r : 平均放射温度 (°C), h_c : 対流熱伝達率 (W/°C m ²), h_r : 放射熱伝達率 (W/°C m ²)	T と T_r の加重平均値
風冷指数	WCI	気温と風速の関数式から計算 $WCI = (33 - T)(10.45 + 10U^{0.5} - U)$ T : 乾球温度 (°C), U : 風速 (m/s)	冬季の凍傷・低体温症予防に利用される
熱ストレス指数	HSI	人体の水分蒸発に着目した計算 $HSI = (E/E_{max}) \times 100$ (%) E : 人体が熱平衡を保つために必要な蒸発放熱量 (W/m ²), E_{max} : 人体が完全に濡れた状態時の最大可能蒸発放熱量 (W/m ²)	皮膚温を35°Cに仮定した人体の熱平衡式より求める
湿球黒球温度	WBGT	気温と湿度に加え、気流と放射も考慮 $WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T$ T : 乾球温度 (°C), T_w : 湿球温度 (°C), T_g : 黒球温度 (°C)	ただし T_w は暴露した自然湿球温度 屋内条件では, $WBGT = 0.7T_w + 0.3T_g$
不快指数	THI	気温と湿度のみから算出される $THI = 0.72(T + T_w) + 40.6$ $THI = 0.81T + 0.01RH(0.99T - 14.3) + 46.3$ T : 乾球温度 (°C), T_w : 湿球温度 (°C), RH : 相対湿度 (%)	無風時の ET を簡易化して作成 米国では温度湿度指数 (Temperature-humidity index) と呼ばれる
予測平均温冷感申告	PMV	人体を均質1層と仮定した熱収支モデルと被験者実験による温冷感申告を組み合わせて作成される 温度を単位に用いない特有な温冷感スケールを採用	PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied; 予測不満率) も同時発表 暑熱環境下の発汗を考慮できない
標準新有効温度	SET*	標準環境の相対湿度を50%に設定し、さらに着衣量と代謝量も加える 人体を2層分割して人体生理応答も考慮した理論モデルから計算	ET, 任意の着衣量・代謝量とした ET* (新有効温度) から発展

PET (Physiological Equivalent Temperature) の指標が特によく使われるなど、地域や研究分野によって好まれる温熱指標があるようだ。代表的な温熱指標を第1表にまとめる。これらの温熱指標では、その数値をもとに温熱感や生理現象などが予測される。以降では、日本で快適性評価によく利用される SET*と、夏季の熱中症リスク評価に使われるようになってきた WBGT を中心に紹介する。

温熱指標には、環境側の温熱要素と呼ばれる気温、湿度、気流（風速）、放射の4要素と、人体側の温熱要素である着衣量と代謝量の2要素が深く関わっている。PMV や SET*は、これら6要素を総合的に取り扱った温熱指標である。特に、Gagge *et al.* (1971) によって開発された SET*は、臓器を中心とする体深部 (core) と皮膚で主構成される体表部 (shell) で体温が分けられることを利用し、人体を2層モデルとして血流量や発汗などの温熱生理調節過程を考慮している。温熱6要素を入力パラメータとして、大気側、人体 shell、人体 core のあいだの熱収支を解くことになる。ただし、現実環境の温熱感が相対湿度50%、着衣量0.6clo (衣服の熱抵抗を表す単位)、静穏気流 (風速0.1m/s)、代謝量1 Met (=58.2W/m²) という仮想環境の温熱感と等しくなるときの気温として、SET*の数値が定義される。したがって、SET*の単位は°Cで与えられる。

WBGT は、軍隊訓練の熱中症予防が目的で Yaglou and Minard (1957) によって提案された、暑熱環境下で使われる指標である。ISO-7243にも規定されて現在は日本でも熱中症予防にこの WBGT を利用することが多く、日本体育協会からは運動時、日本産業衛生学会からは労働作業時、日本生気象学会からは日常生活時の熱中症予防指針が WBGT をもとに公表されている。先述の PMV や SET*などの指標とは異なり、WBGT は3つの温度 (乾球温度、自然湿球温度、黒球温度) を計測した環境側4要素の把握で容易に計算できるが、元々被験者実験に基づいて作成された式であるため物理的根拠にやや欠ける。最近ではそのような指摘から、人体と外環境の熱平衡式から理論的に WBGT の計算式を導出した研究も報告されている (持田ほか 2006)。しかし、第1図に示すように、WBGT の数値には熱中症患者数と指数関数的な相関があらわれる。この特徴は日最高气温のときよりも明瞭となることから、WBGT の有用性が認識されている。



第1図 2007年7～9月に東京管区気象台の露場で観測された日最高WBGTと東京23区内で記録された熱中症救急搬送者数の相関。ホームページ「環境省熱中症予防情報サイト」(<http://www.nies.go.jp/health/HeatStroke>) 並びに「国立環境研究所熱中症患者速報」(<http://www.nies.go.jp/health/HeatStroke/spot/index.html>) の掲載データを解析した結果。

温熱指標は作成時の環境・人体条件に束縛がある場合が多く、実際の温熱環境下への適用や拡張には注意が求められる。このような問題から、種々の温熱指標の数値と被験者の申告を比較することで、温熱指標の適用範囲についての長所と短所を分析する研究が報告されている (たとえば、木内 2001; 磯田・都築 2008)。また、これまで開発されてきた温熱指標の多くが屋内空間を元々想定しており、現実にも多くの人が活動する屋外空間への適用には問題が残る。先述の PMV や SET*もそれに該当する。これは屋外の放射や気流などの気象条件が時空間的に局所性を強く持つことに起因するが、たとえば屋外に適用できる OUT_SET* (Pickup and de Dear 1999) などが提案されるなど、特に屋外暑熱環境への拡張が検討されつつある。近年の都市熱環境の悪化に伴う熱中症や睡眠障害など、人間生活の質低下とその予防策を考えていくうえで複数の温熱指標を効果的に利用して評価を行っていくことが必要となるであろう。

参考文献

Gagge, A. P., J. A. Stolwijk and Y. Nishi, 1971: An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response.

- ASHRAE Trans., 77, 247-262.
- 磯田憲生, 都築和代, 2008: 夏期の屋外温熱環境が運動時の人体に及ぼす影響. 日本建築学会第38回熱シンポジウム「暑熱環境と人間・社会」-温熱感研究の社会的貢献-, (38), 37-40.
- 木内 豪, 2001: 屋外空間における温冷感指標に関する研究. 天気, 48, 661-671.
- 持田 徹, 佐古井智紀, 栗原浩平, 2006: WGBT 式の導出と温感工学的分析. 空気調和・衛生工学会論文集, (108), 21-28.
- Pickup, J. and R. de Dear, 1999: An outdoor thermal comfort index (OUT_SET*): Part I - The model and its assumptions. Proc. 15th Int. Congr. Biometeorol. and Int. Conf. Urban Climatol., Sydney, Australia, 279-283.
- Yaglou, C. P. and C. D. Minard, 1957: Control of heat casualties at military training centers. Amer. Med. Assoc. Arch. Ind. Health, 16, 302-316.

(岡山理科大学 大橋唯太)