

第 23 回 人間—生活環境系シンポジウム（札幌 平成 11 年 12 月）
THE 23rd SIMPOSIUM ON HUMAN-ENVIRONMENT SYSTEM (SAPPORO 1999)

PMV と SET*の独創性と適用限界

持田徹*

*北海道大学大学院

Originality and Application Range for PMV and SET*

Tohru MOCHIDA*

*Graduate School of Hokkaido University

1. 緒言

人とそれを取りまく環境との間の熱移動現象を考究する目的の一つは、暖冷房や空気調和の設計や制御、創り出された熱環境の評価や管理を行う際に使用する温感指標作成の基礎資料を得ることにある。この温感指標は、人の熱的な生理反応や心理反応を正確に表現していることは勿論であるが、それと同時に熱伝達の法則を満足することも重要である。温熱感覚や快適感覚は、体内の熱反応によって産生された熱と、人と環境間の熱授受により引き起こされるので、熱伝達論に反する伝熱形式を基にした温感指標は有り得ず、経験則あるいは実験より作られた指標と言えども例外ではない。

温冷感や熱的な快・不快感は、環境側の物理的な要素と、人体側の生理的な要素の双方から大きな影響を受ける。これらの要素は種々あるが、第一義的に考慮すべきは、気温・放射温・湿度・風速・着衣と代謝量の 6 要素である。このほかにも曝露時間、気圧、空気組成も重要な要素となる場合があり、また、年齢・性別・健康・馴れ・種族・民族なども考慮しなければならない場合もある。

ISO-7730¹⁾に規定されている Fanger の PMV^{2),3)}と、ASHRAE (米国暖房冷凍空気調和学会) のスタンダードである SET^{4),5)}は、現在の二大温感指標として世界的に多用されている。二つの指標とも時代を画した優れた指標であるが、発表されてから既に四半世紀を経ており、不合理な点も数多く指摘されている^{6),7),8),9),10)}。

本稿では、PMV と ET* (SET*) について、その成り立ちと長所短所について解説する。なお、本誌別稿の、「PMV の熱負荷に関する理論的および実験的検討」および「暑熱環境における ET*の実験的検討と等温感線の形状」も併せて参照願いたい。

2. PMV の独創性と適用範囲

2.1 PMV の独創性

PMV の成り立ちや内容については、原著やその他の参考書に紹介されているので本稿では省略し、独創的な点のみを列挙すると、1) 不感蒸泄と発汗に伴う放熱量を具式化したこと。2) 呼吸に伴う放熱量を具式化したこと。3) 対流および放射放熱と 1)、2) を合わせ、人体と環境との間の熱平衡式をたて、実験データを組み入れた快適方程式を示したこと。4) 快適時の平均皮膚温が労作量に反比例して低下することを実験により発見したこと。5) 快適状態にある人が、任意の環境に置かれた時の熱負荷と人の温熱感覚を結びつけ、PMV を定義したこと。6) ある熱環境に曝露された人々の不満足な割合を示す予測不満足率 PPD を提案し、PMV と関連付けたこと、などが挙げられる。

温冷感や熱的快適性を、主として人の熱収支式から解明しようとする試みは Fanger 以前にもなされたきたが、後述するように不完全ながらも蒸汗放熱式と呼吸放熱式を導入した熱収支式ははじめてであり、この点が何よりも評価されるべきで、PMV や PPD の創作と共に大きな独創点と言えよう。

2.2 不感蒸泄と発汗に伴う放熱式の熱伝達論的検討

Fanger は不感蒸泄に伴う放熱量を次式で表現した。

$$E_d = \lambda m (P_{sk} - P_a) \quad (1)$$

但し、 E_d : 不感蒸泄による放熱量[W/m²C]、 P_{sk} : 皮膚温 t_{sk} に対する飽和水蒸気圧[kPa]、 λ : 水の蒸発潜熱[J/g]、 m : 水の透湿係数[g/m²・s・kPa]。

式 (1) で、 $(P_{sk} - P_a)$ を位差量、 E_d を流通量と見なすと、 $1/\lambda m$ が抵抗を示し、この関係は図 1 で表される。

式 (1) の P_{sk} は原

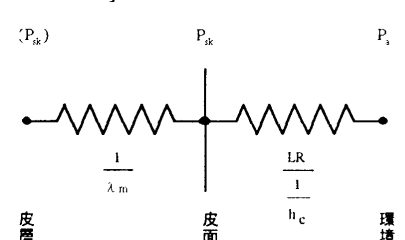


図1 式 (1) の図示

著³⁾に記されているとおり、皮膚温に対する飽和水蒸気圧とし、かつ、皮膚表面の状態を指すものと考え、抵抗に相当するのは、対流熱伝達率 h_c の逆数にルイスの係数 LR を乗じた量であり、 λm ではあり得ない。また、 P_{sk} を皮膚表面の状態ではなく、皮膚の状態と考えると、皮膚の透湿係数は意味を持つが、この場合の抵抗の形は $(1/\lambda m) + (LR/(1/h_c))$ であり、式(1)は不合理である。ただ、風速の項が大きくなると、 $1/\lambda m \gg LR/(1/h_c)$ となり、 $LR/(1/h_c)$ の項は無視できるが、通常の室内風速程度では無視できない。

一方、発汗に伴う放熱式は次式で与えられている。

$$E_{sw} = 0.42(H/A_{Du} - 58.15) \quad (2)$$

但し、 E_{sw} : 発汗蒸発放熱量[W/m²]、 H : 産熱量[W]、 A_{Du} : 全体表面積[m²]。

この式の意味は、ある労作時において、定常状態を維持するのに必要な、人体側から見た発汗量に相当する熱量を示しているもので、式(2)によって規定される E_{sw} 全量が環境に受け入れられるか否かについての環境側の条件については触れられておらず、不十分な表現である。

2.3 PMVの問題点と適用範囲

PMVの算出式に基づいて、水蒸気圧 P_a と気温 T_a を両軸とする湿り空気線図上に、等PMV線を描くと図2が得られる¹¹⁾。

図2よりわかるように、等PMV線の特徴は、全てのPMV値に対し、等PMV線が直線であり、かつ、平行なことである。日常我々が経験するように快適より寒冷の状態では、中立感や寒冷感に及ぼす湿度の影響は少なく、等温感線は湿り空気線図上で垂直に近く、平行的であっても誤差は少ない。換言すれば、寒冷から中立の領域では気温のみで温感が決まると言っても過言ではない。一方、暑暖領域では、湿度が暑暖感に及ぼす影響が、後述の等SET^{*}線図にみるように、中立状態から暑さが増すにつれて大きくなり、等温感線の勾配が小さくなってゆき、等温感線が図2の等PMV線のように、平行とはなり得ない。このように等PMV線が全て平行になるのは、蒸汗放熱の評価法に一つの原因がある。なお、等PMV線は等皮膚温線ではなく、各等PMV線上で、環境と共に皮膚温は変化している。

前述のようにPMVが暑暖環境で使えないことは明らかであ

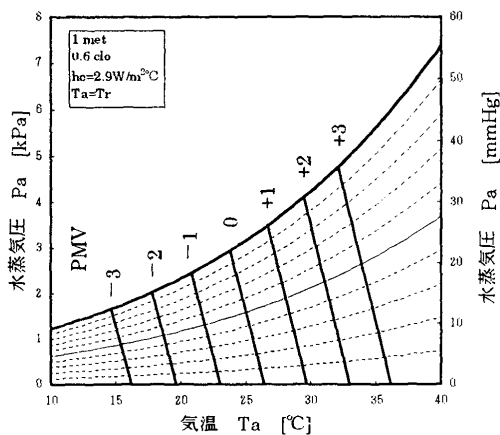


図2 等PMV線図

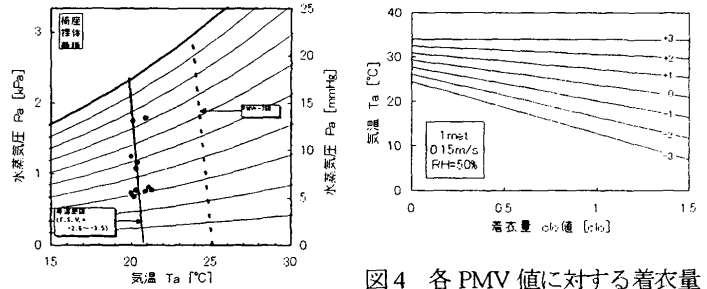


図3 実験で得られた等温感線とPMV-3線の比較

るが、寒冷環境での実験例を図3に示す¹²⁾。PMVの使用範囲外と言われる等PMV=-3線と、被験者実験の結果の比較であるが、気温で5°Cの開きがあることが判る。また、図4と図5はPMVの算出式から計

算されたPMVの特性であるが¹³⁾、両図からPMVが大きくなるにつれて、clo値や風速に無関係になることがわかる。

PMVは一般に±0.5の範囲内で使用するよう言われているが、ISO-7730では、労作量0.8~4met、着衣量0~2clo、気温10°C~30°C、平均放射温10~40°C、(相対)風速0~1m/s、水蒸気圧0~2.7kPa(RH.30~70%)において算出されるPMV=±2の範囲で用いるよう推奨している。西はPMV作成時の基礎データから、PMVの適用範囲はごく限られた環境に限定されると指摘し⁸⁾、堀越らも、PMVは±0.5の快適範囲と限られた寒冷環境のみで適用可能と述べている⁹⁾。また、創案者のFangerも、裸体や高風速域では、PMVの使用を避けるべきと報告しているが、PMVに限らず、いったん公の機関で承認され権威を持つてしまうと、不合理な点が指摘されても使用されてしまうのが現状である。Yaglouらの旧有効温度ETも、自身の自己批判も含め、多くの研究者から疑問が呈されたにも拘わらず、発表以来、約半世紀に亘って米国の学会の基準であり続けた例もある。

さらに付け加えると、温感指標であれ何であれ、評価関数が決定されると、それが実体を表していようがいまいが、コンピューターにかければ答えは出てくる。大切なことは緒言でも述べたように、温感指標の場合には、実験による生理反応と心理反応と合致することと共に、熱平衡式も満足すべき点にある。

3. SET^{*}の独創性と適用範囲

3.1 SET^{*}の独創性

SET^{*}はPMVとほぼ同時期に創案されたが、その内容については原著や解説書に委ね、独創的な点を列挙すると、1)ぬれ面積率の導入により、温感に及ぼす湿度の影響度合いをよく表現できること。2)相対湿度50%における環境での温感を基準として、

図4 各PMV値に対する着衣量と気温の関係

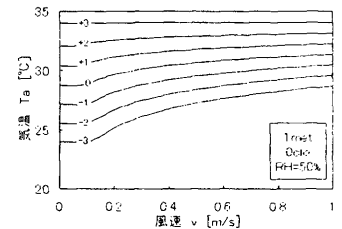


図5 各PMV値に対する風速と気温の関係

新有効温度 ET^* を定義したこと。3) SET^* を定義して、多くのパラメータの複合効果を単一の尺度で評価することを可能にしたこと。4) 放射環境への拡張を容易にしたこと。5) 人体を皮膚層とその他の層に分けた 2-node model を考案し、非定常計算を可能にしたこと、などが挙げられる。

SET^* は PMV と同様、人の熱収支式を基に温感の定量評価を試みた指標であるが、ぬれ面積率の導入と非定常域までに適用できるモデルの構築により、人の温熱生理・心理反応をより正確に表現できたことが大きな独創点であり、今までにない指標の特徴であろう。

3.2 新有効温度の定義とその特性

個々の状態の温感を評価する新有効温度 ET^* と、それらを一定の基準状態に変換して評価する標準新有効温度の特性は、基本的には同じであるので、本節では ET^* を中心に考察を行う。

一定の労作量・着衣量・風速における等 ET^* 線は、図 6 の湿り空気線図上で等 PMV 線同様、負の勾配を持つ直線で表される。但し、等 PMV 線と大きく異なる点は、寒冷環境から中立、暑暖環境に移行するにつれて、図 6 にみるように、等 ET^* 線（または等 SET^* 線）の勾配が緩やかになり、温感に与える湿度の影響度合いを的確に表現している点である。これは人が暑い状態になればなるほど、数値の大きくなる特性を有するぬれ面積率が、等 ET^* 線の方係数の分母に含まれているためである。

なお、wettedness はぬれ面積率と訳されているが¹⁴⁾、その内実から判断して筆者は「ぬれ率」の方が適切と考えている。

ET^* の熱平衡式では、裸体時の蒸汗放熱量は基本的には次式で与えられている。

$$E_{sk} = LR \cdot h_c (P_{sk}^* - P_a) w \quad (3)$$

一方、蒸汗放熱量を表す式として、次式も考えられる。

$$E_{sk} = LR \cdot h_c (\phi_{sk} P_{sk}^* - P_a) \quad (4)$$

但し、 E_{sk} : 蒸汗放熱量 [W/m^2C]、 LR : Lewis の係数 [C/kPa]、 h_c : 対流熱伝達率 [W/m^2C]、 P_{sk}^* : 皮膚温 t_{sk} に対する飽和水蒸気圧 [kPa]、 w : ぬれ率 [-]、 ϕ_{sk} : 皮膚表面における相対湿度 [-]。

ぬれ面積率は汗量の度合と良い相関を示す一種の状態量であり、ある一定の条件のもとに成り立つ仮定の係数である¹⁵⁾。これに対し、式 (4) の ϕ_{sk} は皮膚表面における湿分境界層における相対湿度で、物理的な数値である。しかし、その厚さを特定できないことと、その境界層内の ϕ_{sk} を測るセンサーの制作が困難である為、直接 ϕ_{sk} を測定することは現状では不可能である。他方、 w も仮定の係数であり、直接測定はできないが、 ϕ_{sk} 同様、人体と環境側の全ての量を測定して、その値を間接的に知ることができる。 w は汗の状態をよく表現できる量として、ASHRAE で認められており、この w を式 (3) のように位差量 ($P_{sk}^* - P_a$) の外に置いたことが、等 ET^* 線が暑熱環境における人の生理・心理反応を良く表す結果となっている。なお、皮膚表面からの湿

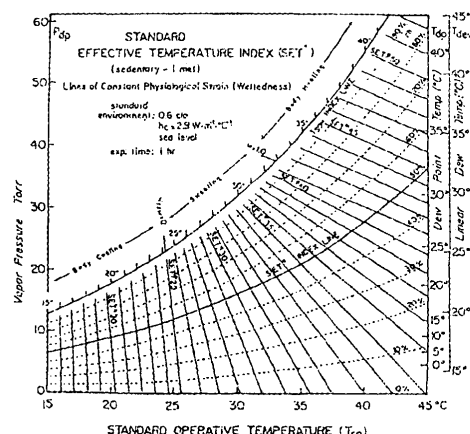


図 6 SET^* 線図

表 1 等温感時の平均皮膚温とぬれ面積率の組み合わせ

	平均皮膚温 t_{sk}	ぬれ面積率 w	湿り空気線図 上での挙動	等温感線の種類
I	一定	一定	直線	等 ET^* 線
II	一定	変化	曲線 or 直線	等平均皮膚温線
III	変化	一定	曲線 or 直線	等ぬれ面積率線
IV	変化	変化	曲線 or 直線	等温感線

性放熱量を式 (4) のように記述するに当たっての注意も指摘されている¹⁶⁾。

等 ET^* 線は、定義により、等皮膚温線、かつ、等ぬれ面積率線、かつ、等熱収支線でもある¹²⁾。等 ET^* 線は平均皮膚温 t_{sk} とぬれ面積率 w を与えて導かれる直線であるが、平均皮膚温とぬれ面積率により等温感

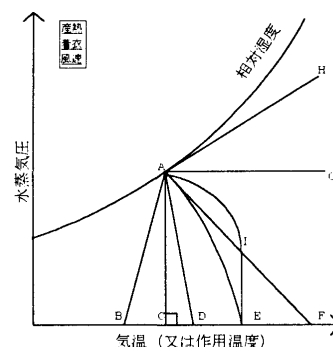


図 7 等温感線の軌跡と特徴の模式図

線を定めようとする時、表 1 の 4 つの組み合わせが考えられる¹¹⁾。

等 ET^* 線は表 1 の I の場合に相当するが、等「暑い」線の皮膚温とぬれ面積率が一定のまま、等 ET^* 線のように低湿環境にまで延びた場合には、逆算される汗量が労作量の数倍にもなり、実測値と合致しない¹⁵⁾。その場合には、人の発汗能力の制限から、結果的には、図 7 に示すように直線 A-I-F とはならず、折れ線 A-I-E となる。そして、直線 A-I 上ではぬれ面積率は一定値をとるが、直線 I-E 上ではぬれ面積率は変化し、蒸汗放熱量が一定となる。なお、発汗力を考慮して、直線 A-I-E で示される指標が等熱ストレス・インデックス線である¹⁷⁾。熱ストレス・インデックスは ET^* の原型とも言える指標である。なお、等 PMV 線は、直線 A-D に当たり、等 PMV 線から呼吸放熱量を差し引くと横軸に垂直な直線 A-C となる。

3.3 SET^* の問題点と適用範囲

一般的に言えば、 SET^* の適用範囲は PMV よりはるかに広く、かつ、非定常計算も可能である。しかし、前節でも述べたよう

に、低湿度環境での適用には問題が残る。

等 PMV 線や等 SET^{*}線で示されるように、等温感線が直線となるか、曲線となるかは、等温感線の微係数が一定値をとるか、変化するかを実験データと熱平衡式を用いて検証すれば良い¹¹⁾。

いま、式 (3) を微分して、 dP_a/dT_a を導くと、式 (5) が得られる。

$$\frac{dP_a}{dT_a} = \frac{\frac{dE_{sk}}{dT_a}}{\frac{dw}{dP_a} LR \cdot h_c \left[\frac{f(t_{sk})w}{\frac{dw}{dt_{sk}}} + P_{sk} - P_a \right] - LR \cdot h_c \cdot w} \quad (5)$$

$$\text{ここに、} f(t_{sk}) = \frac{4030.18}{(t_{sk} + 235)^2} \exp \left(16.65 - \frac{4030.18}{t_{sk} + 235} \right)$$

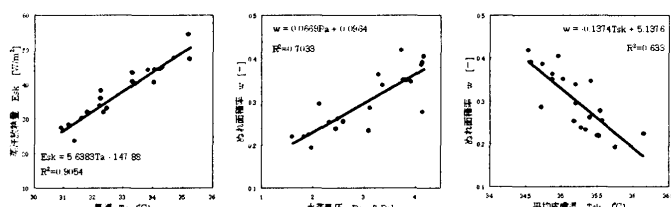


図8,9,10 E_{sk} と T_a , w と P_a , w と t_{sk} の関係¹¹⁾

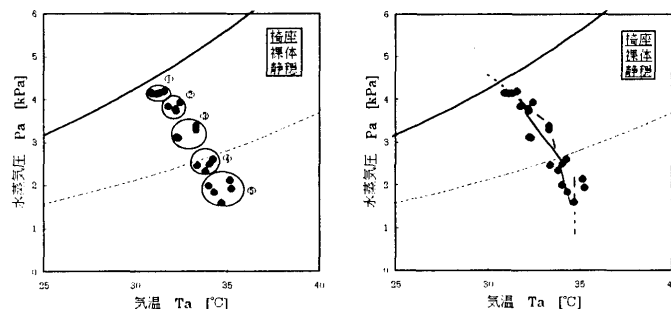


図11 各環境ごとの実験データ 図12 実験から得られた方向係数の傾向

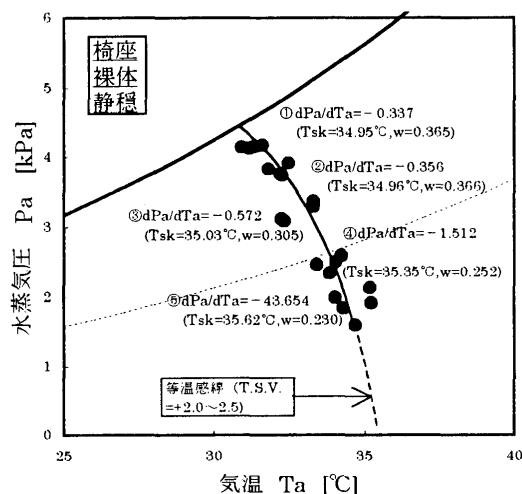


図13 実験から得られた等温感線の傾向

労作量・着衣量・風速を一定にした状態で等温感実験を行い、得られた実験データを式 (6) の右辺に代入すれば、等温感線の微係数を求めることができる。筆者らは暑熱領域において温感実験を行い、等しい暖かさを申告した環境 (図 11) における微分係数を求めたところ、図 12 に示すように、低湿環境に行くに従い、微分係数が小さくなり、等温感線は直線ではなく、曲線になる傾向が得られた。

以上のような微係数を有する等温感線は図 13 に示すように曲線となり、かつ、この線上で平均皮膚温とぬれ面積率はそれぞれ変化して一定値をとらず、表 1 の IV の場合に相当し、ET^{*}の定義と異なる結果を示す。

4. 結言

暑さ寒さの度合を定量的に捉えようとする試みは約 1 世紀に亘ってなされてきたが、現在では PMV と SET^{*}が世界の二大指標として多用されている。この他にも、それぞれの地域や状態に合わせた領域を限って使われる指標も多い。しかし、温冷感や快適感が熱移動に伴って発現することを考えれば、出来上がった温感指標が温熱要素に対する人の生理反応と心理反応を良く反映しているのと同時に、熱収支も満足していなければ指標としての信頼性が薄いと思われる。このことは、経験則と言われる指標にも当てはまる。また、PMV や SET^{*}は勿論、その他の指標も、それぞれの内容を良く知り、長所と短所を見極めた上での使用が肝要であろう。

<引用・参考文献>

- ISO-7730, Moderate Thermal Environments - Determinations of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort, ISO, 1984.
- P. O. Fanger: Calculation of Thermal Comfort—Introduction of a Basic Comfort Equation, ASHRAE Transactions, Vol. 73, Part II, 1967.
- P. O. Fanger: Thermal Comfort, Analysis and Application in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.
- Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. & Y. Nishi: An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Transaction, Vol. 77, pp.247-262, 1971.
- Gagge, A. P. & Y. Nishi: Heat Exchange between Human Skin Surface and Thermal Environment, Handbook of Physiology, 1976.
- 堀越哲美: 温熱指標としての PMV の評価と応用, 建築設備と配管工事, pp.35-40, 1984, 10.
- 堀越哲美: PMV と快適方程式の検討, 空気調和・衛生工学, 60-10, pp.12~19, 1986.
- 西安信: PMV の成果と問題点, 日本生気象学会誌 29, pp.141~146, 1992.
- 堀越哲美: 温熱環境の評価(3)—その2, 空気調和衛生工学, 70-1, pp.65~71, 1996.
- 持田徹: 新有効温度 ET^{*}の成果・特徴と問題点, 生気象学会誌, No.29, pp.135~139, 1992.
- 持田徹, 堅田兼史, 長野克則, 吉野博, L. G. Berglund, 佐古井智紀, 嶋倉一實: 暑熱領域における温熱感に及ぼす湿度の影響, 空気調和・衛生工学会論文集, No.72, pp.67~74, 1999.
- 持田徹, 長野克則, 嶋倉一實, 佐古井智紀, 相原利史: 寒冷領域における温熱感実験, 空気調和・衛生工学会学術講演会 (北海道支部) 論文集, pp.187-190, 1998.
- 持田徹, 長野克則, 木村研: めれ面積率の変化特性を組み入れた新しい温感指標の提案, 空気調和・衛生工学会学術講演会 (北海道支部) 論文集, pp.61~64, 1999.
- 西安信: 人体と環境の熱交換, 温熱生理学 (中山昭雄編), pp.33~72, 1981.
- 持田徹, 嶋倉一實, 森山敏彦, 伊藤誠, 今城忠宣: 暑熱環境におけるめれ面積率の挙動に関する基礎的研究, 空気調和・衛生工学会論文集, No.46, pp.1~10, 1991.
- 棚沢一郎: 伝熱つまみ喰い (2): 物質移動を伴う伝熱, 人間と生活環境, 第3巻, 第1号, pp.2-8, 1996.
- H. S. Belding & T. F. Hatch: Index for Evaluating Heat Stress in terms of Resulting Physiological Strains, Heating, Piping & Air-Conditioning, pp.129-136, 1955, 8.