

第21回 人間-生活環境系シンポジウム（横浜 1997年12月）

P M V 修正への試み

持田 徹* 長野克則* 嶋倉一實* 右田拓也* 高谷一毅**

*北海道大学大学院 **竹中工務店

An Approach to Revision of P M V

Tohru MOCHIDA*, Katsunori NAGANO*, Kazumi SHIMAKURA*,
Takuya MIGITA*, and Kazuki TAKAYA**

*Graduate School of Hokkaido University

and

**Takenaka Corporation

For evaluating thermal sensation or thermal comfort and for designing and controlling thermal environments, two logical indices, P M V proposed by Fanger and E T* proposed by Gagge et al, have been widely used throughout the world. These two indices were made in early 1970's and have influenced the basic research concerning H V A C. However, several questions concerning P M V and E T* have been repeatedly raised by some researchers.

The main point to be questioned of P M V is that equal P M V lines drawn on the psychrometric chart are all parallel straight ones and do not present faithfully the thermal physiological characteristics of the human body, especially man's sweating rate. Equal thermal sensation lines in the zone of evaporative regulation against heat are not parallel and its slope shows a smaller gradient at a higher temperature region.

The purpose of the present study are;

1. To clarify the limitations of P M V.
2. To incorporate the characteristics of skin wettedness regarding the evaporative heat loss into Fanger's basic equation.
3. To be a basis for revising P M V by presenting the thermal characteristics of human physiology more faithfully.

1. 問題の背景と研究の方向

環境の温熱性は、居住空間の快適性や労作時の健康状態・作業効率、さらには省エネルギー性に大きな影響を与える。温熱環境の評価・制御・設計に供するための温感指標は、人間の生理特性を正確に表現しているか否かが重要である。熱的快適性を評価する指標はこれまで多くの提案がなされているが、現在最も広く用いられている指標として、ISO-7730に規定されているFangerの予想平均温冷感申告PMV(Predicted Mean Vote)と、ASHRAEのスタンダードであるGaggeらの新有効温度E T*(New Effective Temperature)、ないしは標準新有効温度S E T*

がある。両者とも時代を画した指標ではあるが、提案以来四半世紀が過ぎ、それぞれに種々の問題点が指摘されてきている。

本研究ではP M V^①に理論的検討を加え、被験者実験による実験データと比較するとともに、実質的に蒸汗放熱が考慮されていないといわれるP M Vに、平均皮膚温とぬれ面積率の変化特性を加味した蒸汗放熱の機序を組み込み、P M Vの修正を試みる。

2. P M Vの構成と問題点

多くの温感指標は主として実験的あるいは経験則を

踏まえて作成されていたが、Fangerは人体と環境との熱交換を熱伝達論的に解明し、呼吸による放熱と不完全ながら蒸汗放熱を組み込んだ快適方程式をたてた。この快適方程式を基に「人体の熱負荷」を考え、これと人間の「温感」とを結び付けることでPMVを提案した。PMVは室内の温熱環境の代表的な評価指標の1つとして多用されている一方、種々の問題点も堀越・持田・西らによって指摘されている^{②,③,④}。PMVに関する問題点として、(1): 快適時の平均皮膚温を与える実験式、(2): PMVの基礎となった熱負荷と温冷感を結び付ける段階の実験回帰式と、その被験者実験自体が限られた環境でしか行われていないこと、(3): 着衣表面温の算出方法等が挙げられるが、なかでも最大の問題点は蒸汗放熱の機能が実質的に組み込まれていないことであろう。そのため、発汗を伴う暑暖環境においては使用することができないという欠点を有する。PMVでは皮膚表面からの蒸汗放熱量を、不感蒸泄による放熱量と体温調節のための蒸汗放熱量の和として、以下の式(1)で与えている。

$$E_{sk} = E_{diff} + E_{sw} \\ = 0.41(P_{s^*} - P_a) + 0.42(M - 58.15) \quad (1)$$

但し、 E_{sk} : 蒸汗放熱量[W/m²] E_{diff} : 不感蒸泄による放熱量[W/m²] E_{sw} : 快適時の蒸汗放熱量[W/m²]
 0.41 : 皮膚の透湿係数[W/m²mmHg] P_{s^*} : 平均皮膚温に対する飽和水蒸気圧[mmHg] P_a : 水蒸気圧[mmHg]
 0.42 : 係数[-] M : 代謝量[W/m²]

不感蒸泄による放熱に関して、 P_{s^*} を原著者の説明通り皮膚面の飽和水蒸気圧を示すものとする、皮膚の透湿係数は皮膚表面の対流熱伝達率を意味することになる。一方、透湿係数の定義を尊重すれば、 P_{s^*} は皮膚内部に存在することになり、抵抗要素としては対流熱伝達抵抗と透湿抵抗が直列の形で入ることになる。また、快適時の蒸汗放熱は、快適条件として与えられているだけで、水蒸気圧も含まれず代謝量のみの関数で与えられている。不感蒸泄による放熱と同様に、発汗に伴う放熱の式にも、対流熱伝達率が組み込まれておらず、基本的な疑義がある。

3. 蒸汗特性式を組み込んだ修正PMV

PMVには種々の問題点はあるものの、快適方程式から熱負荷を算出し人間の温感申告尺度と結び付けるという考え方は、非常に分かりやすく有用であると思われる。そこで、本研究ではPMVに人体の蒸汗特性を組み込むことによってPMVの修正を試みる。Gaggeは体温調節のための蒸汗放熱量を熱負荷として捉え、作用温度の代わりに $E T^*$ を用いることでPMVを修正しPMV^{*}を提

案している。なお、 $E T^*$ では、等温感時には「皮膚表面からの全放熱量・平均皮膚温・ぬれ面積率」の3変数が等しいとしている^⑤。

3-1 ぬれ面積率と平均皮膚温の関係とその模式化

筆者らは被験者を用いた実験を重ねた結果、等温感時には例え平均皮膚温が一定であっても、ぬれ面積率は一定とはならず、ある幅を持ちながら変化することを見出し、 $E T^*$ の定義のような関係を示さないことがわかった^⑥。図1に、実験データと理論的考察によって求められた一定皮膚温に対して一定の幅を持って変化するぬれ面積率の特性を示す。本稿では、図1の特性を模式化して図2で表す。

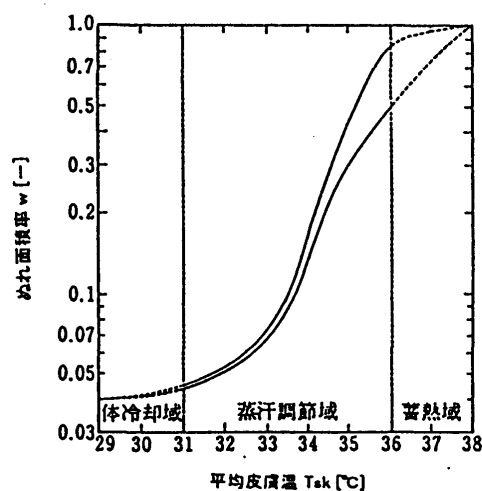


図1 平均皮膚温とぬれ面積率の関係^⑥

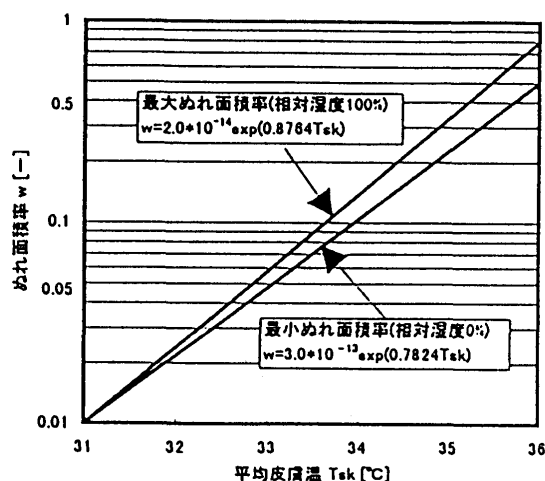


図2 模式化された平均皮膚温とぬれ面積率の関係

3-2 修正PMVの提案と実験的検討

Gaggeらは蒸汗放熱を熱負荷として捉え、作用温度の代わりに $E T^*$ を用いることで、蒸汗放熱の機序をPMVに組みこんだ。しかしながら、実験データから明らか

なように平均皮膚温が一定であっても、等温感線上（等皮膚温線上）においては必ずしも、ぬれ面積率は一定ではない。そこで、本研究ではPMV*の熱負荷算出法をさらに発展させ、温熱感覚と相関が高い平均皮膚温とぬれ面積率の変化特性を組み込むことで蒸汗放熱量をより正しく評価し、PMVにおける熱負荷を修正して、人の温熱感覚と結び付けた修正PMV（Corrected PMV = CPMVと略記）を提案する。

図4に示すように一定の平均皮膚温に対して取り得る最大・最小ぬれ面積率が存在することから、等温感線上における相対湿度50%の値と熱平衡式とを連立させることで、相対湿度50%における気温を求め、熱負荷はこの気温Tを用いて算出すると、修正PMVにおける熱負荷は以下で表すことができる。

$$\begin{aligned} L &\equiv M - (C_{res} + E_{res} + C + R) \\ &= M - \{0.0014M(34 - T) + 0.0023M(44 - 0.5P^*_{\tau}) \\ &\quad + h(T_{sk} - T)F_{cle}\} \\ &= LR \cdot hc \cdot F_{pcle}(P^*_{sk} - 0.5P^*_{\tau})w_{50} \end{aligned} \quad (2)$$

但し、L：熱負荷[W/m²] M：代謝量[W/m²] C_{res}：呼吸による乾性放熱量[W/m²] E_{res}：呼吸による湿性放熱量[W/m²] C：対流放熱量[W/m²] R：放射放熱量[W/m²] P^{*}_τ：気温Tに対する飽和水蒸気圧[mmHg] h：総合熱伝達率[W/m²°C] F_{pcle}：着衣の有効透湿効率係数[-] F_{cle}：着衣の有効伝熱効率係数[-] LR：ルイスの定数[-] hc：対流熱伝達率[W/m²°C] w₅₀：等温感線上において相対湿度50%の時のぬれ面積率[-]

温感申告Yは、代謝量M・着衣量clo・風速v・熱負荷Lの関数であると考え、式(3)によって表されるとした。

$$Y = f(M, clo, v, L) \quad (3)$$

代謝量・着衣量・風速を固定した条件下で、式(2)で表される熱負荷を算出し、温感申告と熱負荷の関係を回帰した。本研究では、等平均皮膚温線を等温感線と考えているので、代謝量・着衣量・風速が一定の場合、等平均皮膚温線は等熱負荷線であり等温感線でもある。そこで、熱負荷と温感申告の対応は、代謝量l_{met}での定常領域を平均皮膚温にして31～36°C、快適時の平均皮膚温は33.5°Cとして、表1のように温感申告と平均皮膚温を関連づけた。

l_{met}で風速を1.5m/sまで変化させた熱負荷と温感申告の関係を調べたところ、熱負荷と温感申告の関係が式(4)の形となった。

$$Y = \text{Exp}(0.460 - 0.035 \times clo + 0.030 \times v) \times L - \text{Exp}(1.482 - 0.254 \times clo + 0.154 \times v) \quad (4)$$

但し、Y：温感申告値[-] clo：クロ値[-]

v：風速[m/s] L：熱負荷[W/m²]

l_{met}・l_{clo}・0.15m/sの条件で、原PMVと修正PMVについて計算した結果を比較して図3と図4に掲げる。

表1 平均皮膚温と温感申告

平均皮膚温 [°C]	温感申告スケール
35.9	+3：暑い
35.1	+2：暖かい
34.3	+1：少し暖かい
33.5	0：中立
32.7	-1：少し涼しい
31.9	-2：涼しい
31.1	-3：寒い

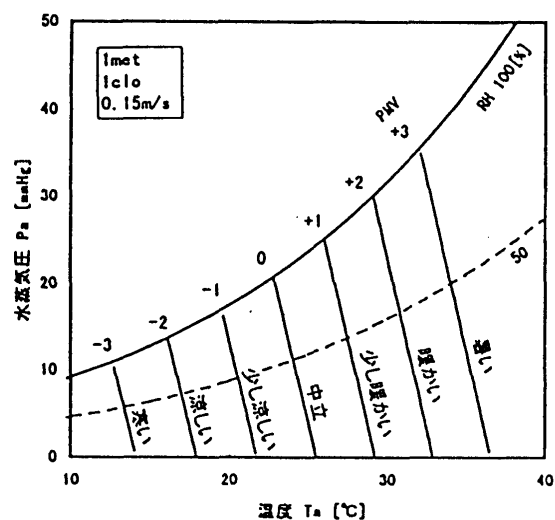


図3 等PMV線 (l_{met}, 0clo, 0.15m/s)

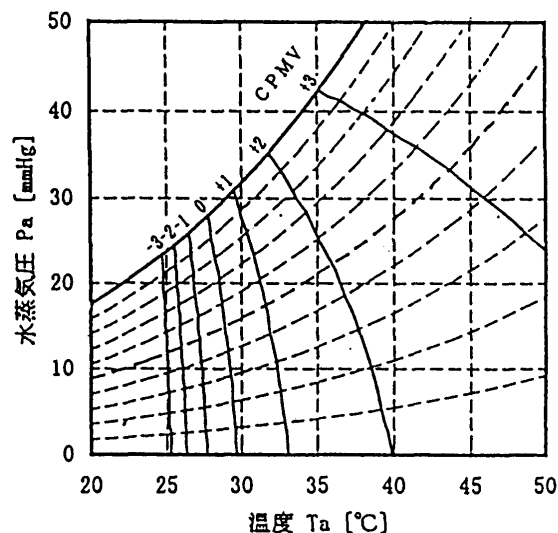


図4 等修正PMV線 (l_{met}, 0clo, 0.15m/s)

図3の湿り空気線図上に示したPMVでは、等温感線は全て平行であるのに対し、図4に示した修正PMVでは、等温感線が全て曲線を示し、かつ暑熱環境になるにつれ曲率が大きくなっている。同様に、0.6cloと1.0cloの場合の修正PMVを図5、6に示す。

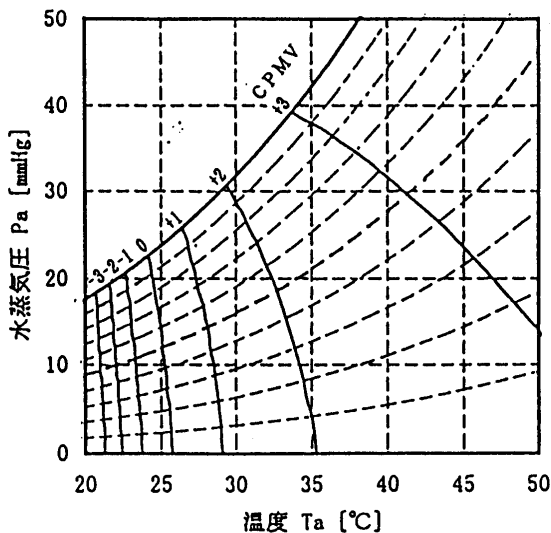


図5 等修正PMV線 (1met, 0.6clo, 0.15m/s)

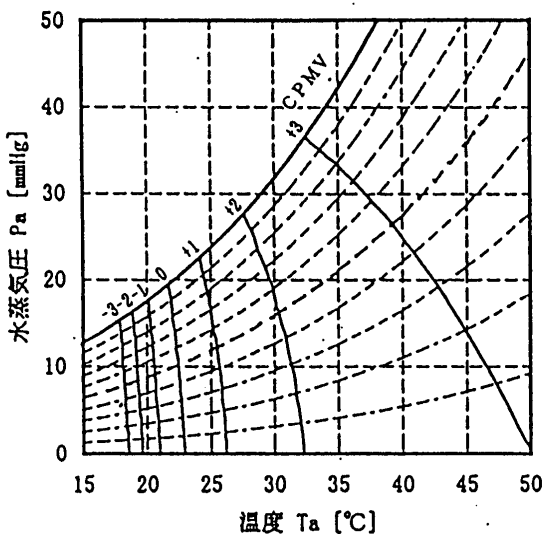


図6 等修正PMV線 (1met, 1.0clo, 0.15m/s)

一定の平均皮膚温に対して取りうる最大・最小のぬれ面積率の関係を図2で模式化することの妥当性を調べるために、図2による計算値と被験者実験による実測値を比較した。平均皮膚温の比較を図7に、ぬれ面積率の比較を図8に示す。両者とも大差はなく、図2を用いても問題はないと考えられるが、図4、5、6を見てわかるように、寒冷感を示す修正PMV値-2や-3がやや高温域に表われているのは、図1のぬれ面積率の変化特性を図2上で直線近似したことによるものであり、今後のこの検討が必要である。

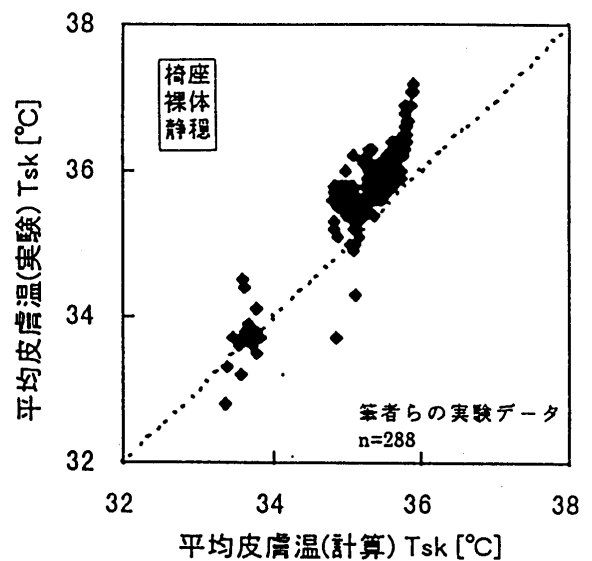


図7 平均皮膚温の比較

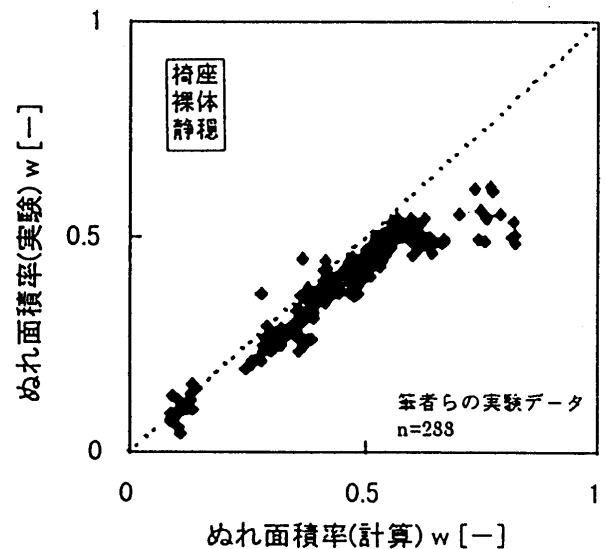


図8 ぬれ面積率の比較

〈参考文献〉①Fanger, P. O. : Thermal Comfort(1970), Danish Technical Press, Copenhagen ②堀越哲美 : 温感指標としてのPMVの評価と応用、建築設備と配管工事(1984. 10)、pp. 35-40, 堀越哲美 : PMVと快適方程式の検討、空気調和・衛生工学、60-10(1986)、pp. 963-969 ③持田徹 : 快適方程式の検討、空気調和・衛生工学会北海道支部第20回学術講演会論文集(1986. 3)、pp. 47-48 ④西安信 : PMVの成果と問題点、日本気象学会誌29(1992)、pp. 141-146 ⑤Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J. and Nishi, Y. : An Effective Temperature Scale Based on A Simple Model of Physiological Regulatory Response, ASHRAE Trans., 77(1970), pp. 247-262 ⑥持田徹、落藤澄、堀越哲美、嶋倉一實 : 蒸汗放熱の表示式とぬれ面積率の変化特性を考慮した等平均皮膚温線、空気調和・衛生工学会論文集、No. 48(1992)、pp. 39-47