



Title	等温感域に関する基礎的研究
Author(s)	佐古井, 智紀; 持田, 徹; 長野, 克則 他
Description	第6回衛生工学シンポジウム (平成10年11月5日 (木) -6日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 5 測定・解析 . P5-6
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 6, 173-178
Issue Date	1998-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7344
Type	departmental bulletin paper
File Information	6-5-6_p173-178.pdf



5-6

等温感域に関する基礎的研究

佐古井 智 紀 (北海道大学大学院)
長 野 克 則 (北海道大学大学院)
堅 田 兼 史 (東京ガス株式会社)

持 田 徹 (北海道大学大学院)
嶋 倉 一 實 (北海道大学大学院)

1 研究概要

体感温に及ぼす湿度の影響度合をみる為に被験者実験を行い、その結果と人体に関する熱平衡式から算出される等温感線の特徴について検討した。椅座・裸体状態で実験を行い、「少し暖かい」と「暑い」と申告した時の、平均皮膚温とぬれ面積率の関係を観察した。その結果、温感申告値が等しい時、高湿・中湿・低湿環境で平均皮膚温とぬれ面積率はそれぞれ独自の値をとり、かつ、両者が一定の関係を持って変化していることを知った。この特性を熱平衡式に組み込んで得られる等温感線は、湿り空気線図上で微係数がいずれもマイナス値を示し、高湿ほどその微係数が大きく、低湿に移行するに従って微係数が小さい曲線となり、体感温に及ぼす湿度の影響は環境によって異なることがわかった。

2 研究の背景と目的

ASHRAE のスタンダードである ET* と、ISO-7730 に記されている PMV は、熱的快適性を評価する指標あるいは温熱環境の設計指標として広く世界的に用いられている。二つの指標は一時代を画した優れた指標ではあるが、提案されてから既に 4 半世紀を経ており、定数などが度々改訂されてはいるものの、現時点において不合理な点も数多く指摘されている。本稿では、高温及び常温環境における被験者実験を行い、2 つの環境における生理反応の違いや体感温に及ぼす湿度の影響度合いを測り、実験によって得られた生理状態値を基に、高温環境での新たな温感指標の可能性を探った。

PMV (Predicted Mean Vote) ¹⁾ は、人体熱負荷算出式において蒸汗放熱量など汗の効果を実質的に評価できないこと、基礎となった快適方程式や、熱負荷と温冷感を結びつける段階の実験回帰式に疑問があること、またその実験自体が暑熱、寒冷環境で行われていないこと、などと指摘されている ^{2), 3), 4)}。一方、ISO-7730 には PMV を -2.0 ~ +2.0 の範囲さらには気温が 10°C ~ 30°C の範囲で使うように明記されているが、PMV はその値が -0.5 ~ +0.5 の快適環境が使用限界であるとの指摘もされている。

図-1 は湿り空気線図上で等 PMV 線が全て同じ勾配を持つ平行直線になることを示しているが ⁵⁾、湿度が暑さや暖かさの感覚に及ぼす影響度合いは等 SET* 線 ⁶⁾ と比較すれば、暑暖領域における PMV の不合理性がよく分かる。

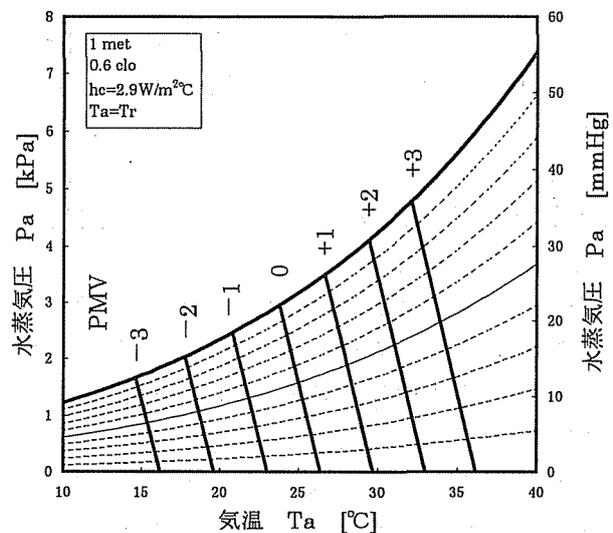


図-1 等 PMV 線図

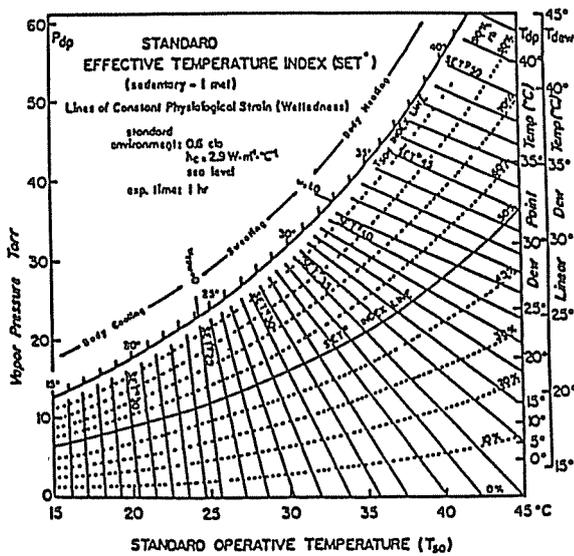


図-2 SET*線図 (原図) ㉑

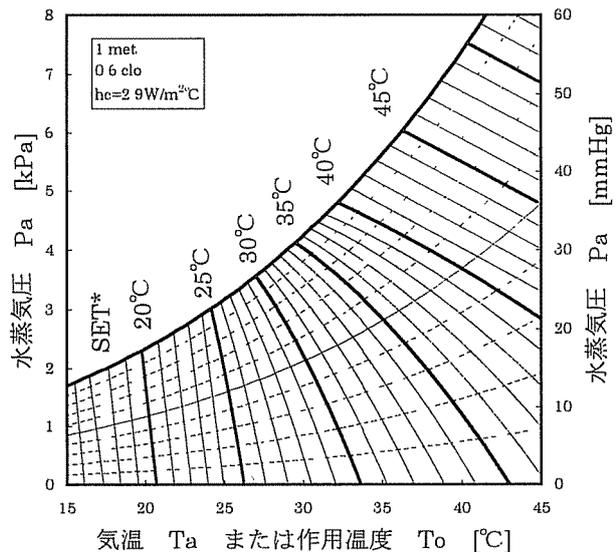


図-3 2ノード・モデルのプログラムより描いた等SET*線図

一方、新有効温度 ET^* (SET^*) は暑い環境に移行するに従い、等 SET^* 線の勾配が緩やかになり、等 PMV 線と比べるとより人体の生理反応に近い性状を示すが、等 SET^* 線が直線 ⁷⁾ のまま低湿域まで達すると、代謝量の数倍の発汗がなければ人体の熱平衡が保たれないことになり、人の発汗力の点から疑問が残る ⁸⁾。また、2 ノードモデルを解いて等 SET^* 線を図上に表すと図-2 のような直線とはならず、曲率の大きい上に凸な曲線が得られた (図-3)。

3 被験者を用いた実験とその結果

トランクスのみほぼ裸体に近い健康な青年男子 4 人を試験室に配し、高温及び常温の 2 種類の環境に曝露した。4 人の被験者は食後 1 時間以上経過した後、表-1 に示す設定条件の下に 60 分間在室し、Hardy-DuBois の 7 点部位法の位置における皮膚表面温・舌下温・気温・湿度・放射温・風速を測定した。温度感覚については ASHRAE の 7 段階スケールに「非常に暑い」($T.S.V.=+4$) を加えたスケールを用い、15 分間隔でアナログ的に申告を受け記録し、45 分以後は 5 分間隔の計測を行った。なお、試験室への入室は、1 実験につき 1 人とした。

被験者実験の時間経過の一例を図-4、図-5 に掲げる。

実験から得られたデータを整理し、被験者別環境データを図-6~図-9 に示す。データ整理にはほぼ定常状態に達している実験開始後 60 分の値を用いた。図より、高温環境 (気温 38°C 付近) において温度感覚に与える湿度の影響が高~中湿度域では大きく、中~低湿度域では小さいことが分かる。また、図中の直線は、 ET^* における Gagge らの「等しいぬれ面積率、等しい皮膚温で、かつ等しい放熱量を与える環境は、熱的な等価環境である」との等温感の定義 ⁷⁾ により算出される等温感線 (等 ET^* 線) である。図-8 で相対湿度 55% 付近にある

表-1 実験の設定目標値と実測値

気温 [$^{\circ}\text{C}$]	31~34 (32.9~35.6)	34~37 (35.8~37.8)	37~40 (37.3~39.4)
	28~31 (29.5~30.1)	30~32 (30.6~31.8)	31~34 (31.2~32.4)
湿度 [%]	70~90 (70.0~85.5)	40~70 (47.4~68.1)	20~40 (25.2~37.2)
風速 [m/s]	0.15 (0.15)		
労作	椅座・読書		
着衣	裸体 (トランクスのみ)		

注 () 内は実測値。気温欄の上段は $T.S.V.=+3$ 、下段は $T.S.V.=+1$ に対応。

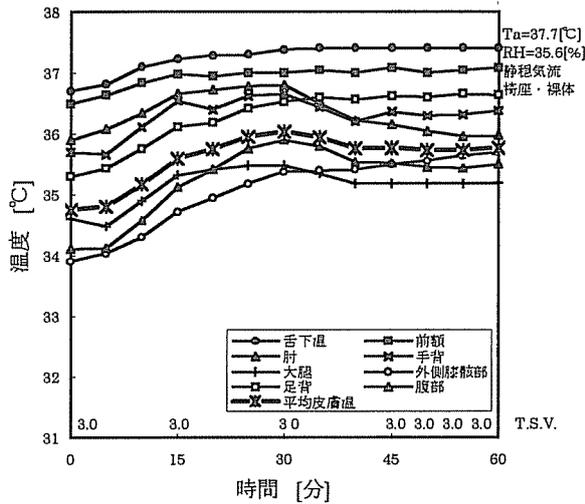


図-4 皮膚温・T.S.V.の時間的変動
 (「暑い」環境)

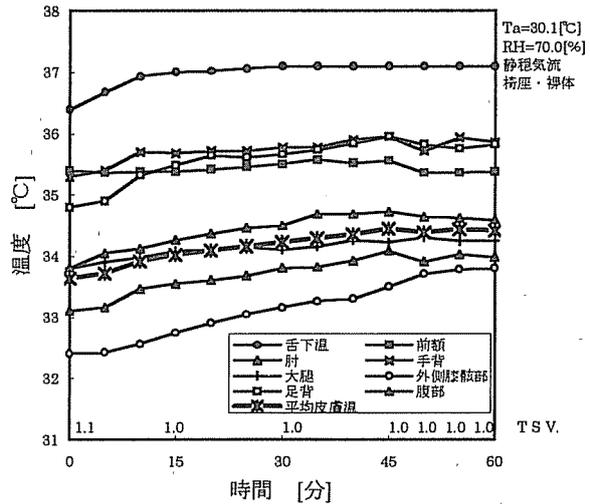


図-5 皮膚温・T.S.V.の時間的変動
 (「少し暖かい」環境)

T.S.V.=3.3 のデータと、相対湿度 25%付近にある T.S.V.=3.9 のデータにおける温熱感申告の違いからも、等温感線は等 ET*線のように直線ではなく、曲線になることが予想される。

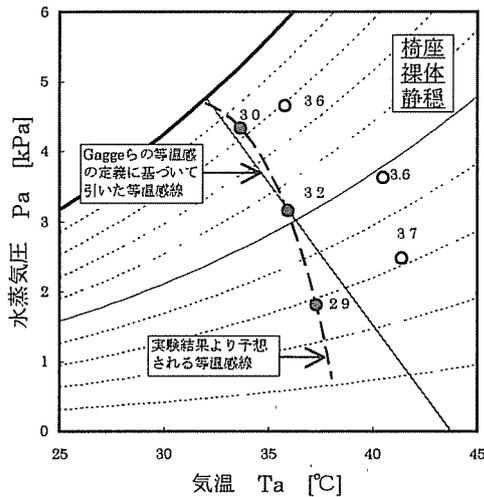


図-6 「暑い」環境データ (被験者 A)

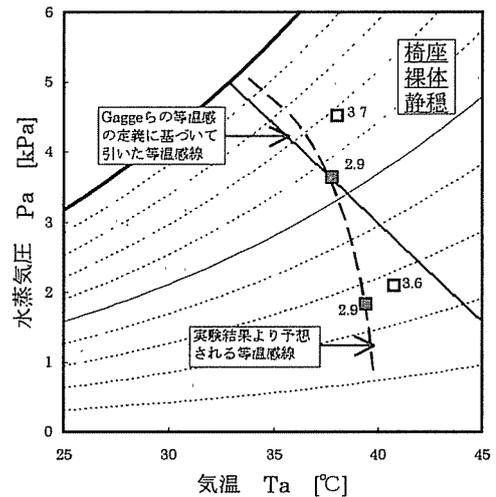


図-7 「暑い」環境データ (被験者 B)

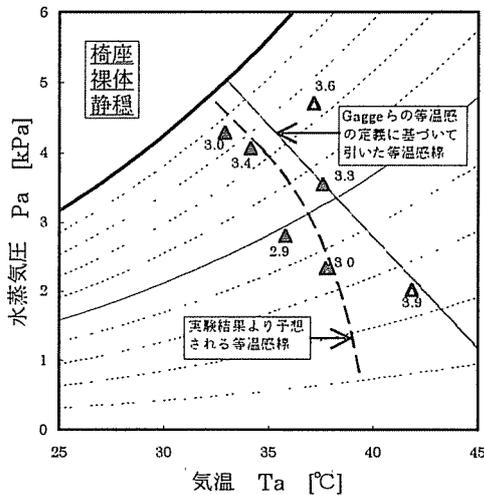


図-8 「暑い」環境データ (被験者 C)

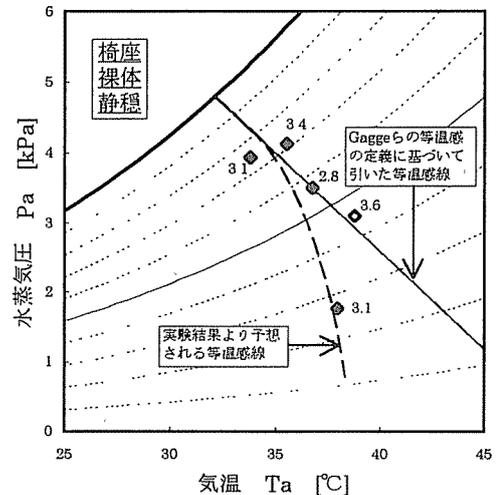


図-9 「暑い」環境データ (被験者 D)

高温環境実験で、被験者全員の結果をまとめたものを図-10 に示す。図-10 から、気温 36°C~40°Cの高温環境において、温熱感に与える湿度の影響が、高~中湿度域では大きく、中~低湿度域では小さいことが予想される。また、気温が 40°Cを越えると低湿度域でも人体にとって耐え難い暑さを感じることもわかった。

4 ぬれ面積率の変化特性

発汗の特性をよく表す生理状態値として、 ET^* の温階の規定に用いられているぬれ面積率がある。著者らの 1995 年における「暖かい」と申告した実験で、ぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係は良い相関傾向があることが分かった⁹⁾。

今回の実験で得られた、等温感時のぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係を図-11 に示す。本実験でも、ぬれ面積率と水蒸気圧の関係には良い相関が見られたので、後述のように本研究より得られる等温感線と等 ET^* 線を比較するため、本稿では Gagge らの 2 ノード・モデルに、実測より得られた環境データを入力し、算出したぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係を求めた。その結果を図-12 に示す。図-11 と図-12 を比べると、傾向的には 2 ノード・モデルで算出した w - Pa

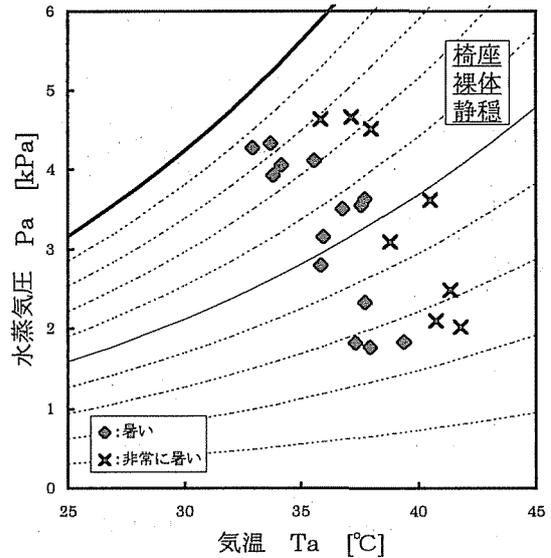


図-10 「暑い」環境データ (全データ)

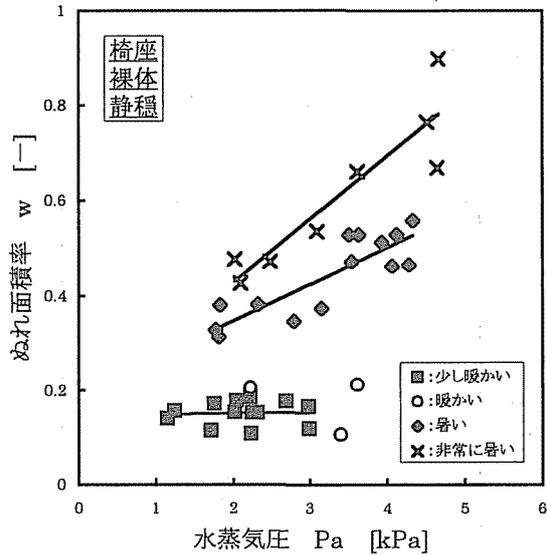


図-11 実験より得られた w と Pa の関係

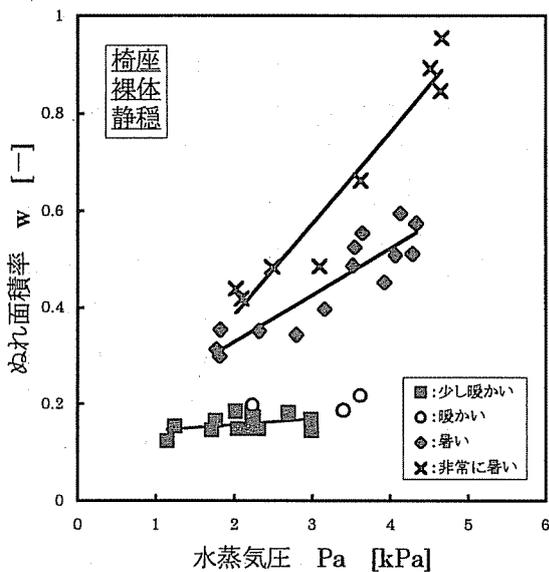


図-12 2 ノード・モデルより算出した w と Pa の関係

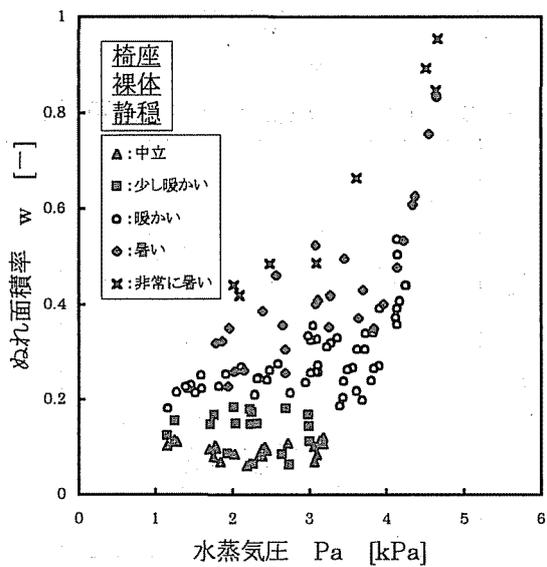


図-13 2 ノード・モデルより算出した w と Pa の関係 (過去の実験データも含む)

の関係も、温階が増すに従い $w-Pa$ の勾配が急になるというぬれ面積率 w の変化特性が読みとれる。

さらに、著者らの過去の実験データも含めて 2 ノード・モデルに環境データを入力し、算出したぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係を図-13 に示す。図-13 においても前述したぬれ面積率の変化特性が見られた。

5 等温感線の形状

温冷感や快適感と良い相関を持つ生理的物理量の代表として平均皮膚温が長年に亘り用いられてきた。この平均皮膚温は人体側と環境側の双方から定まる生理的狀態値であり、暑さ寒さの感覚と良い相関を持つことが知られている⁷⁾。寒涼環境や快適環境では、蒸汗放熱量の変化幅が小さいので、平均皮膚温が体感温の評量に適している。しかし、暑暖環境では一定の温感のもとにおける平均皮膚温の変化幅が少ないので、温感の評量尺度としては感度が悪く、むしろ蒸汗量などの汗に関する生理的状態値が評量には有効となる。したがって、蒸汗量と関わりの深いぬれ面積率と、平均皮膚温を用いて温感の度合いを定めることができれば、より精度の高い指標の確立が予想される。

人と環境との間の定常状態における熱平衡式をたてると次式が得られる。なお、式(1)は等温感線の概形を見る為に単純化して、裸体時かつ気温と平均放射温を等しいと仮定している。

$$M=C+R+Esk+Cres+Eres \\ =(\dot{h}r+\dot{h}c)(T_{sk}-T_a)+LRhc(P_{sk}^*-Pa)w+M(0.1490-0.0173Pa-0.0014T_a) \quad (1)$$

ただし、 M : 代謝量 [W/m^2]、 C : 対流放熱量 [W/m^2]、 R : 放射放熱量 [W/m^2]、
 Esk : 蒸汗放熱量 (=蒸汗量 $G \times$ 蒸発潜熱 LH) [W/m^2]、
 $Cres$: 呼吸放熱量 (顕熱分) [W/m^2]、 $Eres$: 呼吸放熱量 (潜熱分) [W/m^2]、
 hc : 対流熱伝達率 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]、 hr : 放射熱伝達率 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]、
 LR : ルイスの係数 [$^\circ C/kPa$]、 T_{sk} : 平均皮膚温 [$^\circ C$]、
 T_a : 気温 (=平均放射温) [$^\circ C$]、 P_{sk}^* : T_{sk} に対する飽和水蒸気圧 [kPa]、
 Pa : 環境の水蒸気圧 [kPa]、 w : ぬれ面積率 [-]

6 等温感線と等温感域

図-13 で得られるぬれ面積率の各温感ごとの変化特性を用い、等温感線を算出することを試みた。図-13 を基に、ぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の間に直線的な相関傾向があると仮定し、温熱感が増すごとに $w-Pa$ 勾配を急にしていって引くと、図-14 に示すように、低湿度域で等しい温感を結んだ線が交わることになり矛盾が生じる。また、図-13 のデータの散布状況より、「等温感線」で考えるよりも、「等温感域」で考える方が適していると考えられる。

そこで、図-14 を基に高～中湿度 (湿度 40% 以上) において、各温感ごとに水蒸気圧 Pa の値からぬれ面積率 w の取り得る範囲を決め、ぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係で等温感域

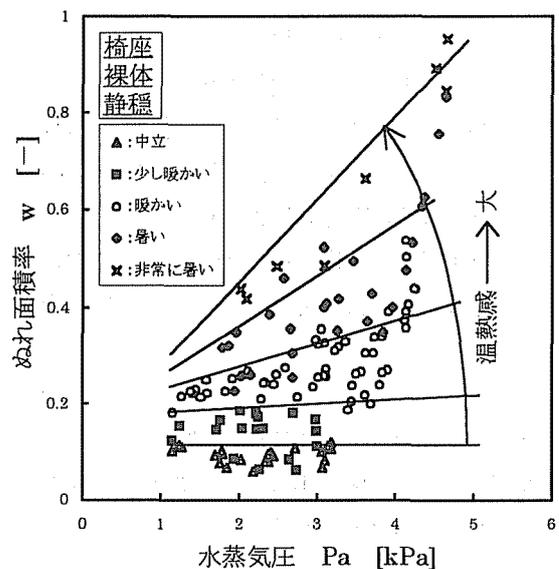


図-14 ぬれ面積率 w の変化特性

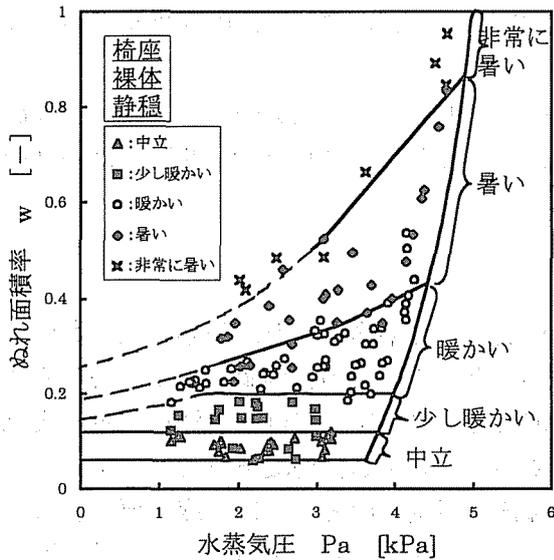


図-15 ぬれ面積率の変化特性を用いた等温感域の設定

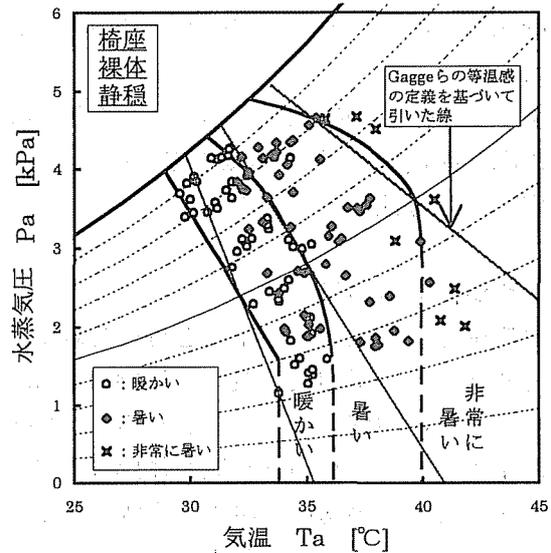


図-16 等温感域の表示

を求めた。図-15 に示すように等温感域の境界線を定め、この関係を熱平衡式(1)と連立して解くと図-16 が得られる。図-16 でみるように等暑暖線は相対湿度が 50%位までは湿度の影響を大きく受けるが、それ以下では湿度の影響は小さく、ほぼ気温のみで暑熱感が決まることを示している。なお、相対湿度 40%以下は実測データが少ないので破線にしているが、この破線部分は図-15 の破線部分に対応している。

7 結論

現在広く使用されている新有効温度 ET^* は、広範囲の環境に適用可能とされている。しかし、高温かつ中・低湿度環境への適用については、筆者らの実験結果や理論的考察からも種々の疑問点が浮かび、生理反応と温熱感の関係や、等温感の定義に再検討が必要と思われる。本研究では、発汗の特性をよく表す生理状態値であるぬれ面積率 w の変化特性を 2 ノード・モデルに組み込み、高温環境での等温感域を算出することを試みた。検討の結果得られた事項を以下に掲げる。

- 1) 被験者実験の結果、高温環境において温熱感に与える湿度の影響は、高～中湿度域では大きく、中～低湿度域では小さい。
- 2) 等温感時のぬれ面積率 w と水蒸気圧 Pa の関係は正の相関傾向を有し、温感が増すに従い、 $w-Pa$ の勾配が大きくなる傾向がある。
- 3) 湿り空気線図上において等 ET^* 線は負の勾配を持つ直線を描くのに対して、ぬれ面積率の変化特性を用いた、高温環境における等温感域の境界線の傾向は、上に凸の曲線を描き、低湿度域では湿度の影響をほとんど受けない。

<参考・引用文献>

- 1) P.O. Fanger: Thermal Comfort(1970), Danish Technical Press, Copenhagen.
- 2) 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).
- 3) 西友直: PMV の成果と問題点, 日本生気象学会誌 29, pp.141~146, (1992).
- 4) 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).
- 5) 持田徹: 一定の平均皮膚温のもとにおけるぬれ面積率の特性に関する基礎的考察 Ann. Physiol. Anthropol. 12(2), pp.59~69, (1993).
- 6) A. P. Gagge, et al.: An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Trans. 77, PP247~262, (1972).
- 7) 西友直: 人体と環境の熱交換 温熱生理学 (中山昭雄編), 理工学社, P60 & P63, (1981).
- 8) 持田徹: 新有効温度 ET^* の成果・特徴と問題点, 日本生気象学会誌 29, pp.136~140, (1992).