



Title	SETの検討と等温感線
Author(s)	佐古井, 智紀; 長野, 克則; 持田, 徹 他
Description	第7回衛生工学シンポジウム (平成11年11月11日 (木) -12日 (金) 北海道大学学術交流会館) . 4 室内環境・エネルギー利用 . 4-2
Citation	衛生工学シンポジウム論文集, 7, 115-118
Issue Date	1999-11-01
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/7275
Type	departmental bulletin paper
File Information	7-4-2_p115-118.pdf



4-2

SET*の検討と等温感線

○佐古井智紀 (北海道大学)
持田 徹 (北海道大学)

長野 克則 (北海道大学)
嶋倉 一實 (北海道大学)

1. 研究の背景と目的

有効温度 ET*は Gagge らにより提案¹⁾された温熱環境評価指標で、評価環境における平均皮膚温やぬれ面積率など生理状態に着目した熱平衡式に基づく指標であり、ASHRAE のスタンダードとして²⁾、米国を中心に広く使用されている。図 1 に示されるように³⁾、ET*はぬれ面積率を用い、湿度の影響を組み入れた指標であるが、ET*の熱的等価環境の定義と人体の生理応答の矛盾⁴⁾、⁵⁾や、温・湿度の影響度合いの定量に疑問⁶⁾も呈されている。提案以来現在に至るまで、標準環境や two-node model の諸数値に変更が加えられているものの、熱的等価環境を、等皮膚温かつ等ぬれ面積率、等熱収支として与える基本的な考え方に変更は見られない。

高温多湿の地域にあつては、温度や湿度の影響度合いを定量することは重要である。筆者らはこれまでに、発汗の上限に関する考察および被験者実験より得られた、蒸汗放熱量、平均皮膚温、ぬれ面積率などの特性より、湿り空気線図上において直線で表される等 ET*線とは異なり、等温感線は上に凸の曲線となることを論じてきた⁴⁾。また、伊藤、深井らも ET*算出に用いられる two-node model において、等皮膚温線と等ぬれ面積率線、等熱収支線は湿り空気線図上において異なる軌跡を描き、結果として算出される等 ET*線は等皮膚温線、等ぬれ面積率線、等熱収支線のどれにも当てはまらず、上に凸の曲線となる矛盾を報告している⁵⁾、⁷⁾。

本稿では、ET*の矛盾点の影響を被験者実験より検証し、ET*の使用にともなう留意点を示すとともに、独立変数としての環境変数である気温と水蒸気圧に着目し、一定温感時におけるぬれ面積率、蒸汗放熱量の変化特性および環境毎の特性を評価できる偏微分による式展開から、湿り空気線図上における等温感線の形状を明らかにする。以下に本論文で用いる記号を一覧する。

- E_{sk} : 蒸汗放熱量 [W/m²]
- h : 総合熱伝達率 [W/m²°C]
- h' : 皮膚と環境間の総合熱伝達率 [W/m²°C]
- h_c : 対流熱伝達率 [W/m²°C]

- h_e : 皮膚と環境間の湿分移動による熱伝達率 [W/m²°C]
- LR : Lewis の係数 [°C/kPa]
- p_a : 環境の水蒸気圧 [kPa]
- $p_{a,eq}$: ET*より算出される等価環境の水蒸気圧 [kPa]
- p_{sk} : 皮膚表面の水蒸気圧 [kPa]
- $p_{sk,s}$: t_{sk} における飽和水蒸気圧 [kPa]
- Q_{sk} : 皮膚からの全放熱量 [W/m²°C]
- t_o : 作用温度 [°C]
- $t_{o,eq}$: ET*より算出される等価環境の作用温度 [°C]
- t_{sk} : 平均皮膚温 [°C]
- w : ぬれ面積率 [N.D.]
- Ψ : ET*による湿り空気線図上の熱的等価線の勾配 [N.D.]

2. ET*の問題点

ET*では、熱的等価環境を、「実際の平均皮膚温 t_{sk} とぬれ面積率 w の組み合わせに対して、等しい放熱量をもたらす 2 つの環境因子の組み合わせは熱的等価環境である」として与えており⁸⁾、実測環境 (t_o, p_a, t_{sk}, w) に対して、等価環境 ($t_{o,eq}, p_{a,eq}$) は式 (1) あるいは図 2 の等熱収支線により与えられている。

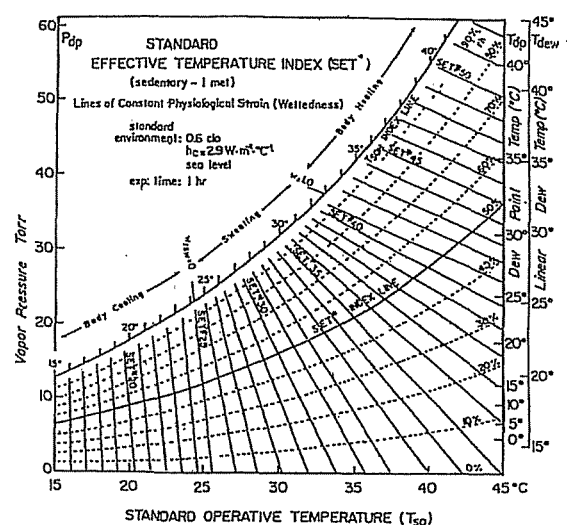


図 1 等 SET* 線図³⁾

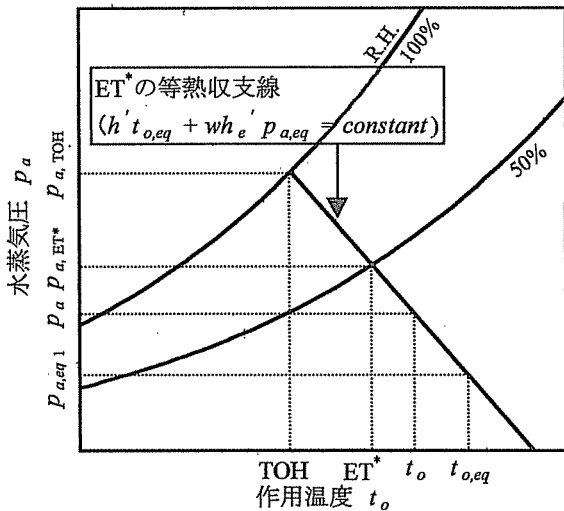


図2 等熱収支線とTOHおよびET*の図示⁸⁾

$$Q_{sk} = h'(t_{sk} - t_o) + wh_e'(p_{sk,s} - p_a) \quad (1)$$

$$= h'(t_{sk} - t_{o,eq}) + wh_e'(p_{sk,s} - p_{a,eq})$$

式(1)では、実測環境(t_o, p_a)における t_{sk}, w, Q_{sk} より熱的等価環境($t_{o,eq}, p_{a,eq}$)が逆算されている。この逆算は、算出される熱的等価環境において、実測環境と等しい t_{sk}, w, Q_{sk} が得られることを前提として成り立つものである。しかし、熱的等価環境において実際に t_{sk}, w, Q_{sk} が等しくなるとは限らず、ET*の算出に用いられる2-node modelにおいて、等皮膚温線と等ぬれ面積率線、等熱収支線が一致しないことも確認されている^{5), 7)}。また、一定温感「暖かい」を申告する環境にあって、ET*の定義とは異なり平均皮膚温 t_{sk} とぬれ面積率 w はともに一定値をとらず、環境とともに変動することも確かめられている⁶⁾。

3. ET*の実験的検討と等温感線の形状

ET*の熱的等価環境の定義における前述の矛盾が、温熱環境の評価に際してどのように作用するかを観るため、1995年11月～12月にかけて実験を行った。

「暖かい: T.S.V.=+2.0～+2.5」と申告された被験者実験⁶⁾(椅座・裸体、被験者4名、延べ21実験)の結果を分析し、等温感線の湿り空気線図上における形状について検討した。表1に実験に用いた温感スケールを、図3に「暖かい: T.S.V.=+2.0～+2.5」の申告が得られた実測環境を示す。

等温感線の形状を考え

表1 実験で用いた温感スケール

T.S.V.
+3 : hot
+2 : warm
+1 : slightly warm
0 : neutral

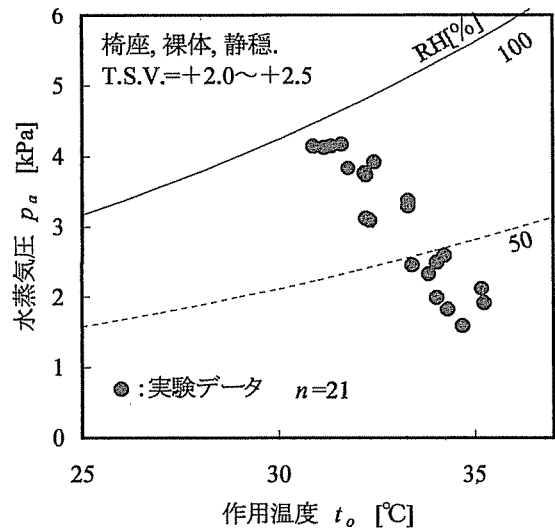


図3 実験環境

る上で、一定温感時のぬれ面積率および蒸汗放熱量の変化傾向に着目する。作用温度 t_o による蒸汗放熱量 E_{sk} の変化は次式で表される。

$$\frac{dE_{sk}}{dt_o} = LR \cdot hc \frac{d(p_{sk} - p_a)}{dt_o} \quad (2)$$

$$= LR \cdot hc \frac{dp_{sk}}{dt_o} - LR \cdot hc \frac{dp_a}{dt_o}$$

$$\frac{dE_{sk}}{dt_o} = LR \cdot hc \frac{d(wp_{sk,s} - wp_a)}{dt_o} \quad (3)$$

$$= LR \cdot hc \frac{dwp_{sk,s}}{dt_o} - LR \cdot hc \frac{dwp_a}{dt_o}$$

式(2)は蒸汗放熱への作用温度の影響を、皮膚表面の水蒸気圧の変動項と環境の水蒸気圧の変動項に分離して表している。式(3)は蒸汗放熱への作用温度の影響を、皮膚温の変動項と環境の水蒸気圧の変動項に分離して表している。一定温感において、環境の水蒸気圧とぬれ面積率の関係 dw/dp_a (図4)と式

(3)より表される作用温度変化に伴う水蒸気圧の蒸汗放熱への影響 dwp_a/dt_o (図5)に、各被験者および被験者全体を通じて良い相関傾向が見られた。そこで、水蒸気圧 p_a とぬれ面積率 w の間の微係数が一定($\equiv A$)であるとして、また、同じく水蒸気圧とぬれ面積率の積 wp_a と気温 t_o の間の微係数が一定値($\equiv B$)であるとして、湿り空気線図上における等温感線の微係数の算出を試みた。

$$\frac{dw}{dp_a} \equiv A \quad (4)$$

$$\frac{d(wp_a)}{dt_o} \equiv B \quad (5)$$

他方、一定温感時に限らず、 dw/dp_a および $d(wp_a)$ / dt_o は、各環境におけるぬれ面積率 w の偏微分 ∂w

∂t_o , $\partial w / \partial p_a$ を用いて、式 (6) および式 (7) で表

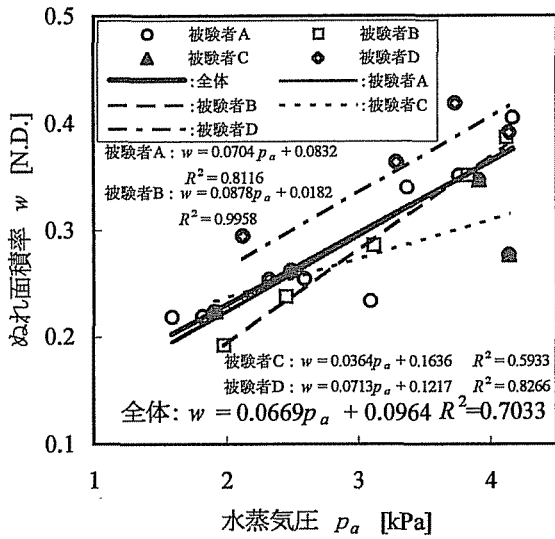


図4 p_a と w の関係

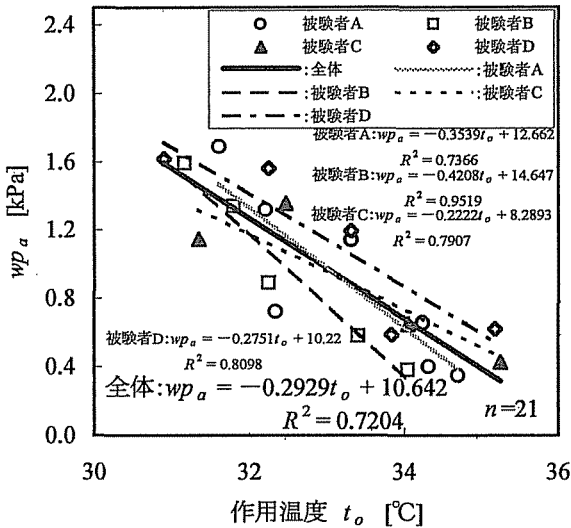


図5 t_o と $w p_a$ の関係

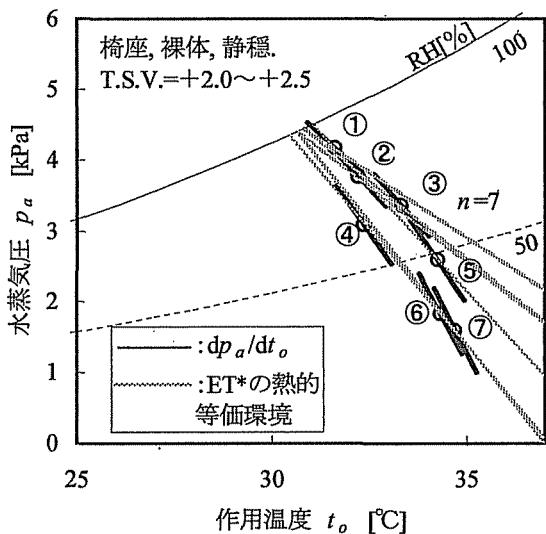


図6 各環境におけるET*の等熱収支線と等温感線の微係数の一例(被験者A)

される。

$$\frac{dw}{dp_a} = \frac{\partial w}{\partial t_o} \bigg|_{p_a} \cdot \frac{1}{\frac{dp_a}{dt_o}} + \frac{\partial w}{\partial p_a} \bigg|_{t_o} \quad (6)$$

$$\frac{d(wp_a)}{dt_o} = p_a \frac{\partial w}{\partial t_o} \bigg|_{p_a} + \left(w + p_a \frac{\partial w}{\partial p_a} \bigg|_{t_o} \right) \frac{dp_a}{dt_o} \quad (7)$$

式(6), (7)に、一定温感時における式(4), (5)の関係を代入することにより、湿り空気線図上における等温感線の微係数 dp_a/dt_o は次式で与えられる。

$$\frac{dp_a}{dt_o} = \frac{B}{Ap_a + w} \quad (8)$$

図6に、一例として、被験者Aの各実験において算出されたET*の熱的等価環境と等温感線の微係数を示す。

図6より、等温感線の微係数はいずれもマイナスの値を示し、かつ高湿度ほどその絶対値は小さく、低湿度に移行するに従いその絶対値は大きくなることが読みとれる。このことは、等温感線が湿り空気線図上において上に凸の曲線となることを意味している。

同じく図6より、一定温感時の実験結果より算出されたET*の定義に基づく各熱的等価線の勾配 Ψ の絶対値は、等温感線の微係数 dp_a/dt_o に比べて小さく、また、ET*の熱的等価線は、相対湿度50%では交点を持たないことが見て取れる。このことは、ET*のもとの定義より与えられる直線の等ET*線だけでなく、実際に2-node modelなどより得られる生理状態値 t_{sk} , w , Q_{sk} を用いて、熱的等価線がR.H.50%の一乾球温度において交わる環境の集合として与えられる等ET*線も、人体の生理・心理応答と合致していないことを表している。結果として算出されたET*は、湿度の影響を過大評価した値であり、実際にR.H.50%において等しい温感をもたらすであろう乾球温度と比べて、湿度が低いほど算出されるET*値は低く、逆に湿度が高いほど算出されるET*値は高くなった。

他方、図6より、ET*による熱的等価線が、高湿度に移行するに従い、その差が小さくなる傾向も見て取れる。そこで、ET*の熱的等価環境の定義より算出される、相対湿度100%における等価環境の乾球温度である湿り作用温度TOHとET*および温度感覚との対応が明示されている⁹⁾SET*のT.S.V.への対応を検討した。図7に、実験の生理状態値より得られたTOH、ET*、SET*、T.S.V.を、水蒸気圧 p_a に対してプロットする。SET*算出における標準環境は、1986年のGaggeらの文献に従った¹⁰⁾。なお、図中の水平の実線は、実験より推定された「暖かい」の温熱感を申告する

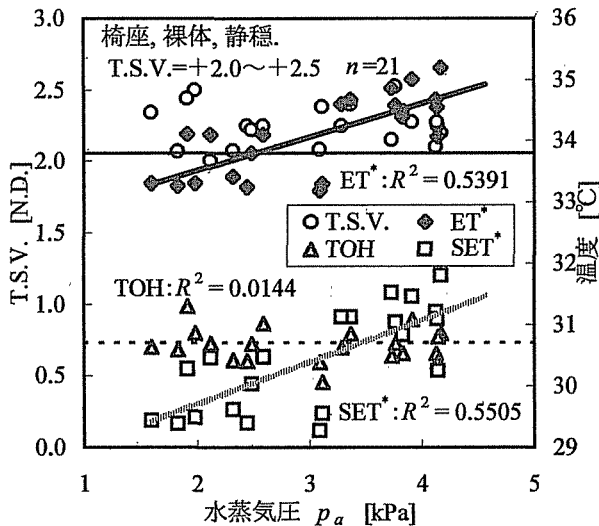


図7 一定温感を申告する環境において算出されたET*とSET*およびTOHの p_a に伴う変動

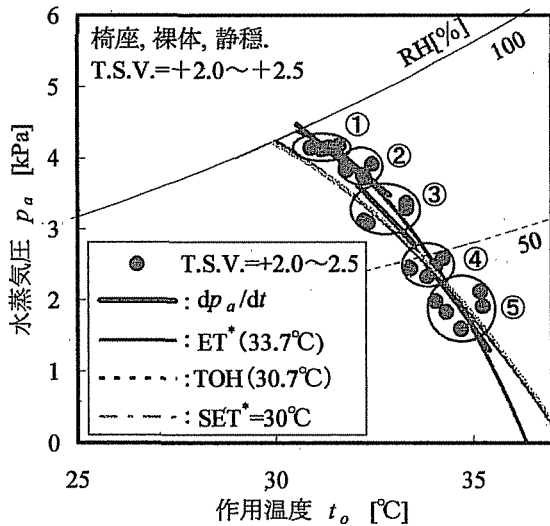


図8 被験者全体の等温感線の微係数と2-node modelより算出された等ET*線、等TOH線、等SET*線

であろう、相対湿度50%における乾球温度を、また、水平の破線は、同じく相対湿度100%における乾球温度を表している。図8に、実験環境を高湿～低湿まで5環境に分けて算出された、被験者全体の等温感線の微係数と、人体モデルとして2-node modelを用いて算出された、等ET*線 (ET*: 33.7°C) および等TOH線 (TOH: 30.7°C)、等SET*線 (SET*: 30.0°C)を示す。

図7より、一定の温感を示す環境において算出されたET*, SET*は、湿度とともに変動するのに対し、TOHは湿度にかかわらず、ほぼ一定値となることを見て取れる。このことは、図6に示されるように、ET*の熱的等価線が高湿度域においてほぼ一点へ集中する傾向を反映したものである。

また、図8より、算出されたTOHとET*, SET*では、

TOHの方が湿度の影響度合いが小さいことが見て取れる。実験結果に対して、等ET*線、等SET*線が湿度の影響を過大に評価する一方で、等TOH線は等温感線の微係数 dp_a/dt 、および実測結果に良い一致を示した。

4. 結論

本稿では、ET*やSET*の人体の生理・心理応答に対する矛盾点が温熱環境評価に及ぼす影響を、椅座・裸体において「暖かい」と申告を受けた被験者実験の結果から検証し、ET*およびSET*の使用に伴う留意点を明らかにした。また、実験結果を用いて等温感線の微係数を算出し、湿り空気線図上において等温感線が上に凸の曲線となることを実験から明らかにした。得られた結論を以下に列挙する。

- [1] 2-node modelなど生理状態値より算出されるET*やSET*は、直線と与えられているET*と同様に湿度を過大評価する。
- [2] ET*は実際にR.H.50%において等しい温感をもたらすであろう乾球温度と比べ、低湿度において低い示値を示し、高湿度で高い示値を示す。
- [3] 「暖かい」の等温感線の微係数はすべて負の値となり、低湿環境に移行するにつれ、その絶対値は大きくなった。このことから、低湿環境に移行するにつれ、湿度の影響度合いが小さくなることを確認された。
- [4] 算出されるET*とTOHでは、TOHの方が、湿度の影響を受けず、等ET*線に比べて、等TOH線は湿り空気線図上で急勾配の曲線となる。
- [5] 椅座・裸体における「暖かい」の等温感線は等TOH線と良い一致を示した。

<参考・引用文献>

- 1) 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. 2) ASHRAE : ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal environmental conditions for human occupancy. 3) Gagge, A. P. & Y. Nishi : Heat Exchange between Human Skin Surface and Thermal Environment, Handbook of Physiology, P. 90, 1976. 4) 持田徹, 嶋倉一貫, 森山敏彦, 伊藤誠, 今城忠宣 : 暑熱環境におけるぬ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. 5) 深井一夫, 後藤滋 : SET*算出プログラム (2節モデル) におけるSET*, ぬれ面積率, 皮膚温の関係について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.975~976, 1992. 6) 持田徹, 堅田兼史, 長野克則, 嶋倉一貫, 佐古井智紀 : 等しい温熱感を申告した時の平均皮膚温とぬれ面積率の関係に関する基礎的研究, 空気調和・衛生工学会論文集 72, pp.107~116, 1999. 7) 伊藤誠 : 暑熱領域を含むぬれ面積率の特性と体感温の評価指標に関する研究, 昭和63年度北海道大学大学院工学研究科衛生工学専攻修士論文, 1989. 8) ASHRAE Handbook of Fundamentals, Physiological Principles and Thermal Comfort, chapter 8, 1993. 9) 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. 10) Gagge, A. P., Fobelets, A. P. & L. G. Berglund : A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment, ASHRAE Transactions, Vol. 92(2B), pp.709-731, 1986.