

高活動時の標準有効温度のずれと修正の試み

佐古井智紀¹⁾, 持田徹²⁾, 蔵澄美仁³⁾, 都築和代⁴⁾, 大岡龍三⁵⁾¹⁾信州大学, ²⁾北海道大学, ³⁾椋山女学園大学, ⁴⁾産業技術総合研究所, ⁵⁾東京大学

Error of Standard Effective Temperature Accompanied by High Activity Intensity and Trails for Improvement

Tomonori SAKOI¹⁾, Tohru MOCHIDA²⁾, Yoshihito KURAZUMI³⁾, Kazuyo TSUZUKI⁴⁾, Ryoza OOKA⁵⁾¹⁾Shinshu Univ., ²⁾Hokkaido Univ., ³⁾Sugiyama Jogakuen Univ., ⁴⁾AIST, ⁵⁾The University of Tokyo

Abstract: The original standard effective temperature (SET^*) defines its standard clothing as the clothing resulting in the neutral thermal sensation in the environment with 24 °C and calm air. This paper suggests no clothing except for the clothing with negative thermal insulation can satisfy this definition. When SET^* is applied for occupants in high activity intensity, the erroneous standard clothing along with the too less sweat secretion of the two node model leads underestimation in perceived temperature. In order to eliminate the error, we proposed new standard clothing that gives the neutral thermal sensation in the environment with 20 °C and calm air and an improved two node model. Provisional SET^* was calculated based on these new standard clothing and the improved two node model. The provisional SET^* translated to the original SET^* scale for various activities improved the underestimation in perceived temperature by the original SET^* .

Key words: standard effective temperature, activity, clothing, human thermal model,

要旨: 標準有効温度(SET^*)は、その標準着衣量を 24℃・静穏環境下で中立温感をもたらす着衣量として、活動を変数として与える。本稿では、活動強度が強い時に、24℃、静穏環境下では中立温感をもたらす着衣が存在しない疑問を示し、Two Node Model の発汗が過少であることと相まって活動強度が強い時の SET^* は、薄着・高風速条件で実際の中立環境より高温を中立と評価することを示した。この問題解決のため、24℃より低温の 20℃・静穏環境下で中立温感をもたらす着衣量を仮の標準着衣量とし、活動に応じた発汗特性を組み入れた修正 Two Node Model を作成、 SET^* を計算し直した。修正 SET^* をオリジナルの SET^* 尺度に換算した等価 SET^* により、中立環境より高温を中立と評価する SET^* の問題を改善できた。

キーワード: 標準有効温度, 活動量, 着衣, 人体熱モデル

1. はじめに

人の温熱感覚、温熱生理状態に大きく影響する 6 要因として、気温、湿度、熱放射、風、着衣、活動が知られている(Fanger 1970)。標準有効温度(SET^*)は、これら主 6 要因全ての複合影響を、夏服・静穏環境下での椅座時の体感温度へ換算する指標である(Gagge et al. 1986)。このうち活動量については、換算すべき環境の着衣・気流条件を活動量によって変化させる、すなわち、活動が変わっても同一の環境温度下では同一の体感温度が得られるように換算すべき環境の着衣・気流条件を設定することでその評価を可能にしている。

SET^* の問題点として、 SET^* の標準着衣量が高活動時に負値となり、物理的に有り得ない値をとること、 SET^* 計算に用いられる Two Node Model(以後 TNM と記述)の発汗量が高活動時に過少となり、温熱生理状態を正

しく予測できないこと(Ooka et al. 2010)が分かっている。 SET^* の考え方は温熱生理状態の解析と熱収支に基づくため普遍性、拡張性が高い。本稿では、 SET^* の高活動時の標準着衣量の設定と発汗が少ないという温熱生理状態の誤差が、温熱環境評価に如何に影響を及ぼすかを示し、実用的な活動量として 1~4 met (58.15~232.6 W/m²)を対象として問題の修正を試みる。

2. 標準着衣量の疑問とその修正

SET^* は、その標準着衣量と活動の関係を、PMV(Fanger 1970)がゼロの時に SET^* が 24℃になる、として図 1 の破線の関係で与えている(Gagge et al.1986)。同じく図 1 の実線により、Gagge らの示した SET^* 計算プログラム中の標準環境下での熱伝達係数を用い、24℃・RH50%の均一静穏環境で中立条件での皮膚温と

発汗(Fanger 1970)をもたらす着衣量を逆算した結果を示す。活動量が 2.8 met を越すとこの着衣量はマイナスとなり、実現象としてあり得ない値となった。24℃・静穏気流条件ではある活動量以上で中立温感が得られないことを意味し、 SET^* 計算プログラム中に記された標準着衣量の定義に矛盾する。 SET^* の標準着衣が 24℃環境で逆算された中立着衣量より厚着であった事実は、 SET^* が中立より暖かい側の温熱生理状態、温熱環境を中立として参照していることを示唆する。

上述のように 24℃・静穏気流条件では、ある活動量以上ではたとえ着衣を脱いだとしても暑い側の温感を脱せず中立温感を得られない。環境の温度が 24℃より低くなるほど、着衣の着脱により中立温感を得られる活動量は高くなる。日常の実用的活動量である 1~4 met を対象に、4 met の上限においても中立着衣量が正值を取るよう 20℃を対象として、活動量ごとの中立着衣量を逆算した(図 2)。なお、着衣熱抵抗は気流、活動に応じて変化することが報告されている(ISO 2007)。図 2 に示した着衣量は、ISO に基づき気流、活動に応じた熱抵抗の変化を考慮した上で計算された静穏気流下での着衣熱抵抗値である。

図 2 のデータを線形回帰し、修正標準着衣量 I_{cls}^* として式(1)により与える。

$$I_{cls}^* = -0.393(M - W) + 1.84 \quad (1)$$

ここに、 I_{cls}^* : 修正標準着衣量 [clo], M : 活動量 [met], W : 外部仕事量 [met]

修正標準着量 I_{cls}^* は、1~4 met の各活動量にあつて 20℃・RH50%の均一の静穏環境において温感中立が得られる着衣量である。なお、ここでの 1~4 met は、静止立位より活動量が大きい場合の動作として水平歩行を想定している。

3. Two Node Model の疑問とその修正

図 3 に、比較的活動量が高い 3met 水平歩行、そして h^*/h_{es}^* と h_e^*/h_{es}^* がともに 1 より小さくなる裸体(0 clo)を想定したケースでの、オリジナルの SET^* の中立温度線(24℃線)と $PMV=0$ の線を比較する。なお、図 3 では活動、気流が h^* , h_e^* に与える影響を ISO(2007)に基づき組み込んでいる。標準着衣の設定に関する疑問から、 SET^* が中立より実際には暖かい側の温熱生理状態、温熱環境を中立環境 24℃として参照すること、および発汗量が過少であることに伴う $T_{sk, w}$ の誤差が相まって、 SET^* の中立環境(24℃)は 35℃・RH50%付近の高温環境になった。

TNM による温熱生理状態の推定精度を改善のため、以下の修正を加えた。

- 活動に応じた発汗特性を組込むに当たり次の 3 つの可能性を想定した。[1] 活動により発汗の感度係数が変化する。[2] 皮膚血流量調節に関する深部のセット

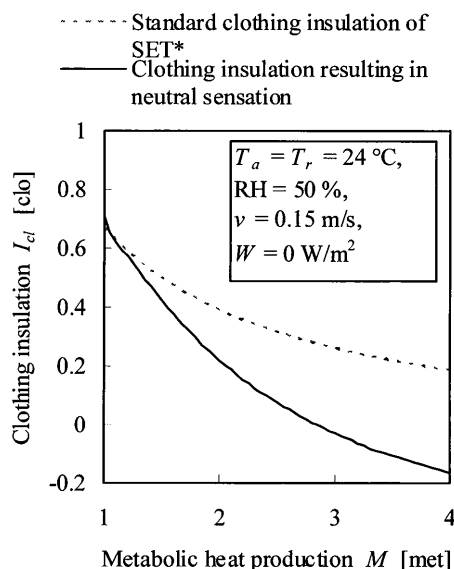


図 1 SET^* の標準着衣量と 24℃・RH50%の均一静穏環境で中立条件の皮膚温と発汗をもたらす着衣量

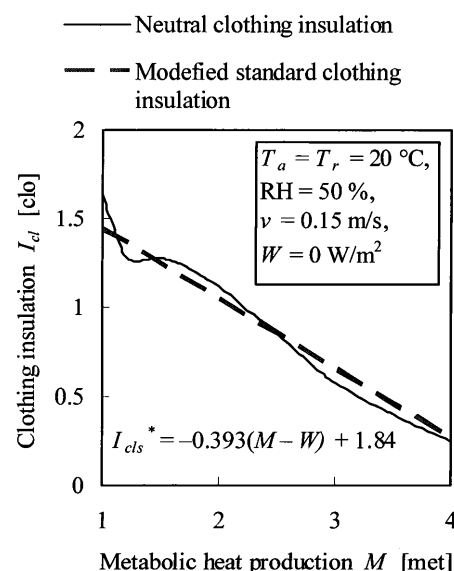


図 2 20℃・RH50%の均一静穏環境で中立条件の皮膚温と発汗をもたらす着衣量と修正標準着衣量

ポイント温度が活動により上昇し、深部温の上昇の結果、発汗が増加する。[3] 発汗に関する皮膚のセットポイント温度が活動に応じて低下する。着衣量 0.6 clo (夏服)の時に温感中立となる静穏気流・RH50%の均一環境温度を計算し、その環境において中立条件での皮膚温と発汗(Fanger 1970)が得られるよう、[1]~[3]の方針に従い 3 つの TNM を得た。[1]の TNM では、中立環境条件での深部・皮膚間の熱流と中立条件の皮膚温から計算される深部温では発汗量がゼロとなった。[2]の TNM では発汗の応答性が遅過ぎた。消去法から、発汗、震えについての皮膚セットポイン

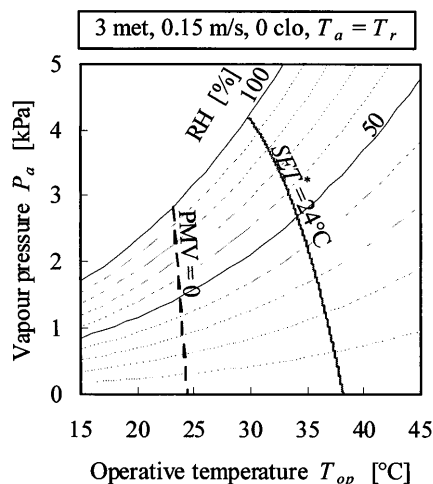


図3 3met水平歩行の裸体条件での $SET^*=24^{\circ}\text{C}$ (中立温感)の線と $PMV=0$ の線

ト温度 $T_{sk,n2}$ が式(8)に従い変化する[3]のモデルを採用した.

$$T_{sk,n2} = 33.7 - \left(\frac{M}{58.15} - 1 \right) \quad (8)$$

ここに, $T_{sk,n2}$: 発汗, 震えについての修正皮膚セットポイント温度 [$^{\circ}\text{C}$]

- 2) 式(9)(ISO 2004) に従い有効発汗率 η を組込んだ.

$$\eta = 1 - \frac{w^2}{2} \quad (9)$$

ここに, η : 有効発汗率 [N.D.]

- 3) 皮膚深部と環境間の透湿抵抗に基づき不感蒸泄を算定(Jones and Ogawa 1992)した.
- 4) 椅座・中立条件下で, 基準皮膚血流量において皮膚温と深部温が共にセットポイント値を維持するよう, 基準皮膚血流量を $12.4 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$ に変更した.
- 5) 皮膚質量比 α が変化しても TNM 全体の保有熱量が保存されるよう, 皮膚温, 深部温, α を連成解析により計算(Jones and Ogawa 1992)した.
- 6) 皮膚質量比 α の増加によって深部が保温されるよう, 深部・皮膚間の熱伝導率 k を式(10)で設定 (Kurazumi et al. 2013)した.

$$k = k_0 \frac{\alpha(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha_0})^2}{\alpha_0(1 - \sqrt[3]{1 - \alpha})^2} \quad (10)$$

ここに, k : 深部・皮膚間の熱伝導率 [W/m^2], k_0 : 深部・皮膚間の基準熱伝導率 [W/m^2], α : 皮膚質量比 [N.D.], α_0 : 基準皮膚質量比 [N.D.].

4. 修正 SET^* による計算結果

2章, 3章の修正標準着衣量 I_{cls}^* , 修正 TNM により計算される SET^* を以後, 仮に修正 SET^* と記す.

PMV の作成過程(Fanger 1970)で, 大学の制服・静穏

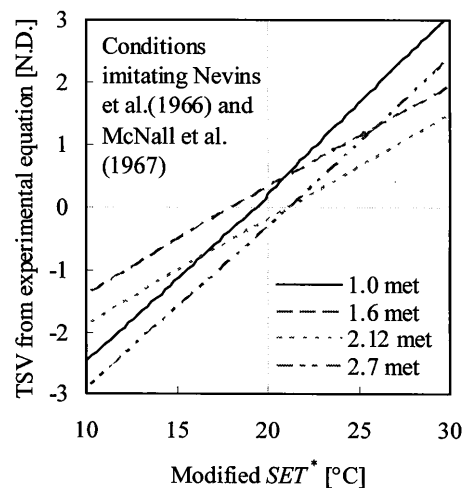


図4 修正 SET^* と温冷感の対応

気流・均一・RH50%環境下での気温と温冷感の実験式が, 複数の活動量に対して示されている. そこで, 静穏気流下での着衣量 0.6clo , 報告された相対風速およびRH50%, 等温環境において, 気温を変化させ各気温での修正 SET^* を算出した. また, 同時に各気温での温冷感を実験式により推定した. 気温を介することで得られた修正 SET^* と温冷感の関係を図4に示す. なお, 修正 SET^* の計算では, 静穏気流下(0.15m/s)で相対風速が報告値と一致するよう人体の平均速度を求め, その値を用いて気流・活動に伴う着衣の熱・湿気輸送特性を計算, また, 衣服外表面での対流および放射熱伝達の計算は Fanger の示した式を用いた.

図4では $1 \sim 2.7 \text{ met}$ の活動量において中立温感 $TSV=0$ が修正 SET^* $18 \sim 21.5^{\circ}\text{C}$ で対応している. 修正標準着衣量 I_{cls}^* を参照して計算される修正 SET^* が 20°C ・RH50%の均一静穏環境で中立温感となることに矛盾しない.

オリジナルの SET^* の問題が顕著になるのは活動量が大きいときで, 1 met の時には活動量に伴う問題はない. そこで 1 met 条件に限定して, 修正 SET^* とオリジナルの SET^* の対応を検討する. オリジナルの SET^* の標準着衣を着用, 静穏気流・RH50%の等温環境では, 気温とオリジナルの SET^* は一致する. この条件下で気温を変化させ, それぞれに対応する修正 SET^* を計算, 修正 SET^* と気温(=オリジナルの SET^*)の対応の回帰式として式(11)を得た. 式(11)を用いることで, 修正 SET^* の温度スケールを馴染み深いオリジナルの SET^* の温度スケールに換算できる.

$$SET^* = 0.847 \text{ 修正 } SET^* + 8.91 \quad (11)$$

修正 $SET^* 20^{\circ}\text{C}$ にオリジナルの $SET^* 25.9^{\circ}\text{C}$ が対応する. オリジナルの SET^* は 24°C が中立であるので, 約 2°C の誤差がある.

図5に定常状態におけるオリジナルの等 SET^* 線と等

$eSET^*$ 線を比較する。活動量が小さく T_{sk} の差も小さい 1 met 条件では、 SET^* と $eSET^*$ に大きな違いはない。他方、3 met 条件では、発汗量の差、および標準着衣量の定義の違いから両者には大きな差がある。同じ環境では $eSET^*$ の方が SET^* より高く $eSET^*$ の方が体感温度を高く見積っている。高活動時の SET^* による中立環境が高温に過ぎる疑問を、 $eSET^*$ では改善できている。

5. まとめ

本稿では、活動強度が強い時に SET^* が中立として参照する 24℃ 均一・静穏環境において、中立温感をもたらす着衣が存在しない疑問を示した。温熱生理状態解析に用いる Two Node Model (TNM) の発汗が過少であることと相まって、活動強度が強い時に、薄着・高風速条件で実際の中立環境より高温の環境を SET^* が中立とする不具合を示した。

着衣量に関する疑問解決のため、24℃ より低温の 20℃・静穏環境下で中立温感をもたらす着衣量を仮の修正標準着衣量とした。また、活動に応じた発汗特性を組み入れた修正 TNM を示した。修正標準着衣量と修正 TNM に基づく修正 SET^* を提案した。修正 SET^* は 20℃・RH50% の静穏環境を温感中立とし、オリジナルの SET^* とはスケールが異なる。そこで、修正 SET^* を 1 met 条件下でのオリジナルの SET^* の温度スケールへ換算する等価 SET^* ($eSET^*$) を示した。高活動時の SET^* による中立環境が高温に過ぎる疑問を $eSET^*$ により改善できた。

謝辞 この研究の一部は、科学研究費(基盤研究(A) No.2426098, 代表: 久野寛)の助成を受けて行ったことを付記します。

6. 文献

- Fanger P.O. 1970. Thermal comfort, Danish Technical Press.
 Gagge A.P., Fobelets A.P., Berglund L.G. 1986. A standard predictive index of human response to the thermal environment. ASHRAE Trans. 92(2B): 709/31.
 ISO 2004. ISO 7933, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain.
 ISO 2007. ISO 9920, Ergonomics of the thermal environment – Estimation of thermal insulation and water vapor resistance of a clothing ensemble.
 Jones B., Ogawa Y. 1992. Transient interaction between the human body and the thermal environment, ASHRAE

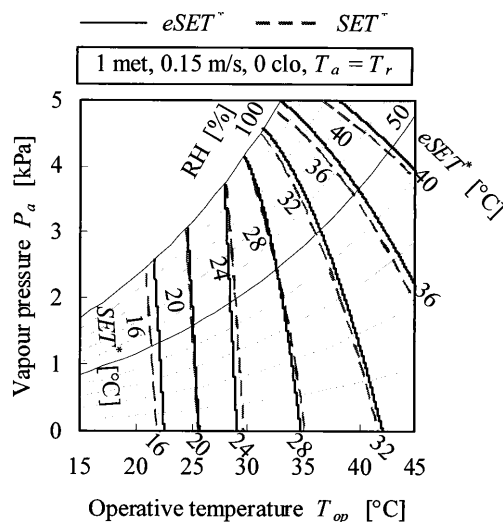


図 5a 1 met での等 SET^* 線と等 $eSET^*$ 線の例

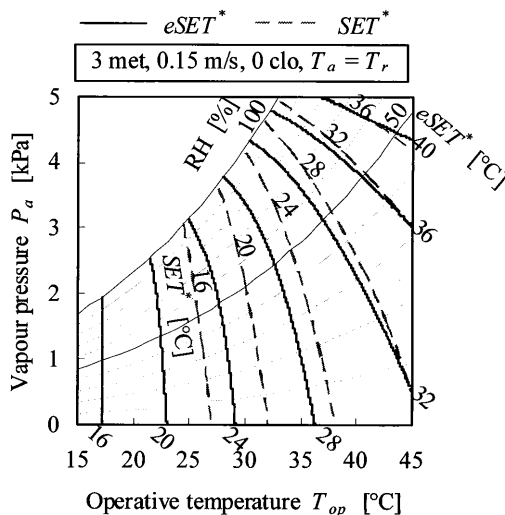


図 5b 3 met での等 SET^* 線と等 $eSET^*$ 線の例

Trans 98(1): 189/95.

- Kurazumi Y. Sakoi T., Tsuchikawa T. Fukagawa K. Bolashikov Z.D., Horikoshi T. 2013. Behavioral thermoregulation model for evaluation of outdoor thermal environment, under submission to Journal of Environmental and Public Health.
 Ooka R. Minami Y. Sakoi T. Tsuzuki K. Rijal H.B. 2010. Improvement of sweating model in 2-Node Model and its application to thermal safety for hot environments. Building and Environment 45(7): 1565/73.

<連絡先>

佐古井智紀
 〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1
 信州大学繊維学部
 t-sakoi@shinshu-u.ac.jp