

等価 WBGT 指標の特徴と WBGT の補正係数

佐古井智紀¹⁾, 持田徹²⁾

¹⁾信州大学, ²⁾北海道大学

Characteristics of equivalent WBGT and adjustment factors for WBGT

Tomonori SAKOI¹⁾, Tohru MOCHIDA²⁾

¹⁾Shinshu University, ²⁾Hokkaido University

Abstract: As long as the occupants wear summer work clothing, the upper limit for safe thermal environment given by Wet Bulb Globe Temperature (*WBGT*) is interpreted as an index corresponding to the upper limit of skin temperature within steady thermal equilibrium range. In the same condition, the upper limit for an intermittent work given by *WBGT* is interpreted as an index corresponding to heat storage rate of human body. In the present study, we indicated the concept of Equivalent Wet Bulb Globe Temperature Index (*eWBGT*) that translates heat stress in a given thermal environment into that given in the standard condition of *WBGT*. The *eWBGT* enables to evaluate the effects of various clothing and various wind velocity and to evaluate the effect of the humidity in extremely high or low humid environment.

Key words: Heat stress, Heat balance, Skin temperature, Heat storage, WBGT

要旨: 湿球グローブ温度 *WBGT* の許容上限が示されている夏服条件に限れば、連続 8 時間作業条件での許容上限 *WBGT* は、定常の体温調節の上限皮膚温に応じると解釈できる。また、休憩を取りながらの断続作業時の許容上限に応じる *WBGT* は、人体への蓄熱率に対応していると解釈される。人体への蓄熱率に着目し、様々な条件下での熱ストレスを馴染み深い夏服条件での *WBGT* 値に換算する等価湿球グローブ温度(*eWBGT*)の概念を示した。*eWBGT* の特徴は、着衣や気流の多様性、高・低湿での湿度の影響を評価できることにある。

キーワード: 熱ストレス、熱収支、皮膚温、蓄熱、WBGT

1. はじめに

Wet Bulb Globe Temperature (*WBGT*)は ACGIH(2006) や ISO(1989)の暑熱リスク指標に採用され、国内においても広く使用されている(日本生気象学会、2012)。*WBGT* は経験と実験に基づく指標で、気温、熱放射、湿度、風により値が決まり、被験者の衣服は *WBGT* 値に反映されない。ACGIH や ISO は、居住者が夏服を着ていると想定した上で許容上限の *WBGT* を示し、その上で着衣が異なるまたは風が強い場合などに、*WBGT* の上限値を補正することを提案している。

WBGT などのリスク評価指標を適切に適用できる条件を越えて利用することは、健康と生命の危険へ結びつく。*WBGT* などの経験と実験に基づく指標と標準有効温度など熱収支の理論に基づく指標の大きな差異は、条件の限られた実験および経験から、未知の条件下での感覚やリスクを推定できる点にある。本稿では、*WBGT* 指標を熱収支に基づいて拡張する試みを示す。

2. 方法

2.1 人体熱モデル

夏服を着ている居住者の暑熱上限 *WBGT* に応じる温

熱生理状態を解明する人体熱モデルとして、以下の 2 つの仮定を置いた。

- 1) *WBGT* に対する温・湿度の影響度合いは、体温調節の上限に応じる(Bernard et al. 2005)。そこで、身体から発する汗は、継続的発汗の最大量である定常体温調節域の上限量 SW_{max} と置く。暫定として ISO-7933(2004)に示される SW_{max} を与える。
- 2) ぬれ率 w が 1 未満の場合、有効発汗効率 η は式(1)に従う(ISO, 2004)。 w が 1 の場合、皮膚での蒸発熱量 E_{sk} は最大蒸発量 E_{max} により決まる。

$$\eta = 1 - \theta \cdot w^2 \quad (1)$$

ただし、 η : 有効発汗率 [N.D.]、 θ : $w=1$ の時の有効発汗率(= 0.5 (ISO, 2004)) [N.D.]、 w : ぬれ率 [N.D.] 以上の 2 仮定とぬれ率 w の定義から、 E_{sk} は次式で表わせる。

$$E_{sk} = \frac{E_{max} \left[\sqrt{E_{max}^2 + 4SW_{max}^2 \theta} - E_{max} \right]}{2SW_{max} \theta} \quad (2)$$

ただし、 E_{sk} : 皮膚での蒸発熱量 [W/m^2]、 E_{max} : 最大

蒸発量 [W/m²]、 SW_{max} : 定常体温調節域での最大発汗量 [W/m²]

人体・環境間の熱収支式は次式で表される。

$$M - W - S = h^*(T_{sk} - T_{op}) + E_{sk} + 0.0014M(35 - T_a) + 0.0173M(5.624 - P_a) \quad (3)$$

ただし、 M : 代謝量 [W/m²]、 W : 外部仕事量 [W/m²]、 S : 蓄熱量 [W/m²]、 h^* : 皮膚・環境間の総合熱伝達率 [W/m²°C]、 T_{sk} : 皮膚温 [°C]、 T_{op} : 作用温度 [°C]、 T_a : 気温 [°C]、 P_a : 水蒸気圧 [kPa]。

活動条件が定めれば、式(2)、(3)の未知数は皮膚温 T_{sk} と蓄熱量 S のみとなる。従って、例えば $S=0$ を設定すれば、それに対応する T_{sk} と w が一意的に定まる。

2.2 計算条件

$WBGT$ により許容上限が明確に示されている夏服条件(以後、標準環境と参照)を対象に、連続作業時の限界温熱生理状態を、前項で示した人体熱モデルを用いて解明する。連続作業を対象とする場合には $S=0$ を代入した。静穏気流課の着衣の基礎熱抵抗として 0.68 clo、衣服の透湿係数として 0.32 N.D.、風速 0.3 m/s、均一温熱環境を人体側の境界条件として与え、気温と湿度のみを変化させた。また、気温と湿度が変化するため $WBGT$ 値は変化する。風速 0.3 m/s、均一環境下でのグローブ温度計と湿球温度計の熱収支式を解くことで、 $WBGT$ 値を決定した。

3. 結果

3.1 連続作業時の上限 $WBGT$ に応じる温熱生理状態

図 1 に、中強度の労働条件($M=194$ W/m²)、 $S=0$ における、 T_a と相対湿度 RH、 T_{sk} 、 w 、 $WBGT$ の対応を示す。計算条件として $S=0$ を与えたことから、 T_{sk} と w の関係は、連続作業時にのみ有効である。従って、図上に赤で記した連続作業時の上限 $WBGT(REL_{crit})$ に対する T_{sk} 、 w の対応のみ、有効な結果である。RH20% 以下のごく

低湿環境を除く日常経験する温熱環境下では、連続作業時の上限 $WBGT$ 上で T_{sk} はほぼ一定($\approx 32.5^\circ\text{C}$)となった一方、 w は変動する結果となった。紙面の関係から図は割愛するが、活動量が低い場合、高い場合についても計算を行った。人体に対する相対風速が小さく、結果として E_{max} が小さくなる活動量が低い場合には、連続作業時の上限 $WBGT$ 線上で w は常に 1.0 となり、 T_{sk} が大きく変化した。逆に、人体に対する相対風速が高く E_{max} が大きくなる活動量の高い場合には、図 1 の例と同様に連続作業時の上限 $WBGT$ 線はほぼ一定の T_{sk} に対応した。ただし、 $WBGT$ の適用の主な対象は、軍事訓練および労働環境における熱中症の予防である(Yaglou, 1957, NIOSH, 1986)。これらが対象とする活動量が高い条件では、連続作業時の上限 $WBGT$ は一定の上限皮膚温 $T_{sk,crit}$ に対応すると言える。

3.2 断続作業時の上限 $WBGT$ に応じる温熱生理状態

皮膚温および湿球温度に対するそれぞれの飽和水蒸気圧は 1 次式で近似できる。この時、連続作業時の上限に応じる皮膚温 $T_{sk,crit}$ 、上限の発汗量 SW_{max} にある人への蓄熱量 S は式(4)で表される(Sakoi and Mochida 2012)。

$$S = K(WBGT - REL_{crit}) \quad (4)$$

ただし、 K : 比例定数(=式(5)) [W/m²°C]、 REL_{crit} : 連続作業時の上限 $WBGT$ [°C]。

ここに、

$$K = \left(1 + \frac{0.7LR \cdot h_c' \cdot \alpha_w}{h_c' + h_r' + 0.3LR \cdot h_c' \cdot \alpha_w} \right) (h^* + 0.0014M) \quad (5)$$

ただし、 LR : Lewis の係数 [°C/kPa]、 h_c' 、 h_r' : 湿球温度計感温部の対流熱伝達率と放射熱伝達率 [W/m²°C]、 α_w : 湿球温度 T_w における飽和水蒸気圧の T_w に対する線形近似の傾き [kPa/°C]。

式(4)において、活動量が定めれば REL_{crit} は一意的に定まる。従って、断続作業時の $WBGT$ は定常体温調節

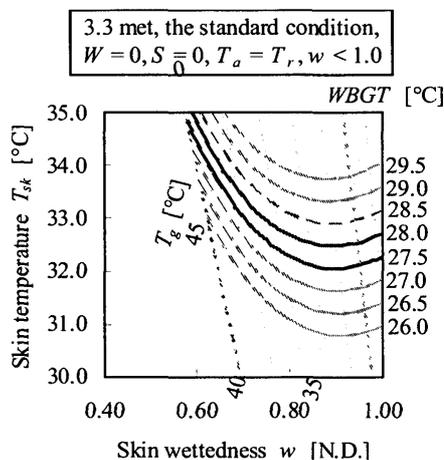


Fig 1a. T_{sk} and w around REL_{crit} when $w < 1.0$ and $M=3.3$ met

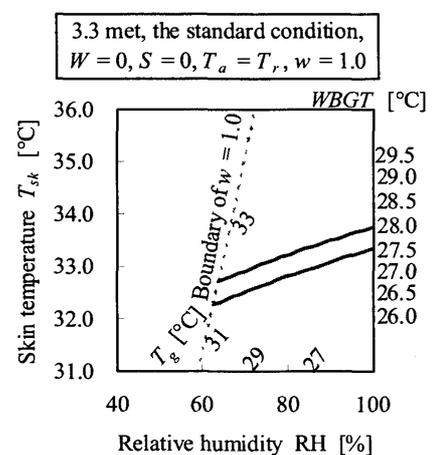


Fig 1b. T_{sk} around REL_{crit} when $w = 1.0$ and $M=3.3$ met

域の上限皮膚温、上限発汗量にある人体に対する蓄熱率 S を表す非定常状態の指標と位置付けられる。

4. 考察

3章において、 $WBGT$ により許容上限が明確に示されている標準環境下での、 $WBGT$ の温熱生理的意味合いを解明した。熱ストレス指標である $WBGT$ は、 $WBGT$ による上限が明示されている標準環境下において、熱ストレインである蓄熱率 S と式(4)の関係にある。ここでは、式(4)を用いることで、多様な環境下で算出される熱ストレイン、蓄熱率 S を標準環境下での $WBGT$ で現される熱ストレスに換算する手法を示す。

人体・環境間の熱収支式から、多様な条件下での S は式(6)または式(7)により決定される。

1) $w < 1$ の場合

$$S = M - W - h^*(T_{sk,crit} - T_{op}) - 0.0014M(35 - T_a) - 0.0173M(5.624 - P_a) + \frac{h_e^*(P_{sk,crit}^* - P_a) \left[\frac{h_e^*(P_{sk,crit}^* - P_a)}{\sqrt{h_e^{*2}(P_{sk,crit}^* - P_a)^2 + 4SW_{max}^2\theta}} \right]}{2SW_{max}\theta} \quad (6)$$

ここに、 $P_{sk,crit}^*$: $T_{sk,crit}$ における飽和水蒸気圧[kPa]

2) $w = 1$ の場合

$$S = M - W - h^*(T_{sk,crit} - T_{op}) - h_e^*(P_{sk,crit}^* - P_a) - 0.0014M(35 - T_a) - 0.0173M(5.624 - P_a) \quad (7)$$

式(4)を変形して得られる式(8)に、式(6)、(7)より得られた S を代入することで、多様な環境下の熱ストレスを標準環境下での $WBGT$ 値に換算できる。換算値を等価 $WBGT(eWBGT)$ と定義する。

$$eWBGT = \frac{S}{K} + eREL_{crit} \quad (8)$$

ここに、 $eWBGT$: 等価 $WBGT$ [°C]、 $eREL_{crit}$: $eWBGT$ の連続作業時の上限値($\approx REL_{crit}$) [°C]。

以後、 $eWBGT$ の例を示すため、 SW_{max} 、 $T_{sk,crit}$ の暫定値として M の関数である図-2の関係を参照する。これらの関係は、 $WBGT$ が REL_{crit} の環境下で $S \approx 0$ を満たす。

図-3に $WBGT$ の標準環境における $WBGT$ と $eWBGT$ の対応例を示す。極度の高湿、および、低湿環境を除くと、両者はよく一致した。

図-4に非透湿性衣服着用時(基礎熱抵抗 1.13 clo、衣服の透湿係数 0.09 N.D.)の $WBGT$ と $eWBGT$ の対応を示す。図-4の $eWBGT$ は図-3のそれと比べて低温側に移動した。さらに図-4の $eWBGT$ の傾きは、図-3のそれと比較して急になった。非透湿性衣服を着たことで、発汗が蒸発し難くなり、湿度の影響を受け難くなった結果である。他方、図-3、図-4の等 $WBGT$ 線は、着衣にかかわらず同一であり、着衣の影響は読み取れない。

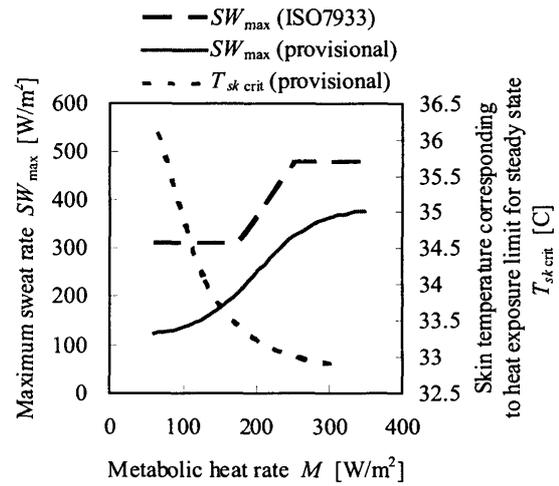


Fig. 2 Provisional relationships between $T_{sk,crit}$ and M and between SW_{max} and M

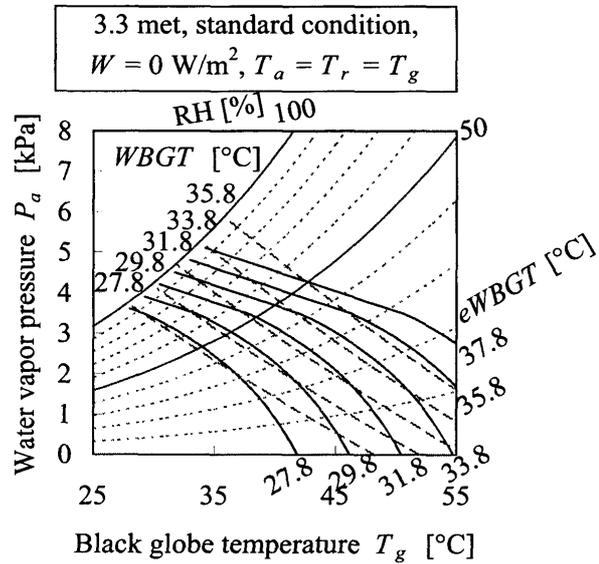


Fig. 3 Constant $WBGT$ and constant $eWBGT$ in the standard condition

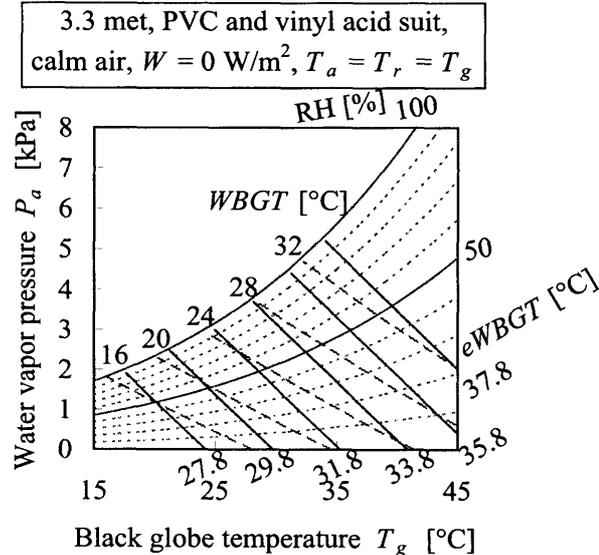


Fig. 4 Constant $WBGT$ and constant $eWBGT$ lines for occupants wearing vapor impermeable clothing

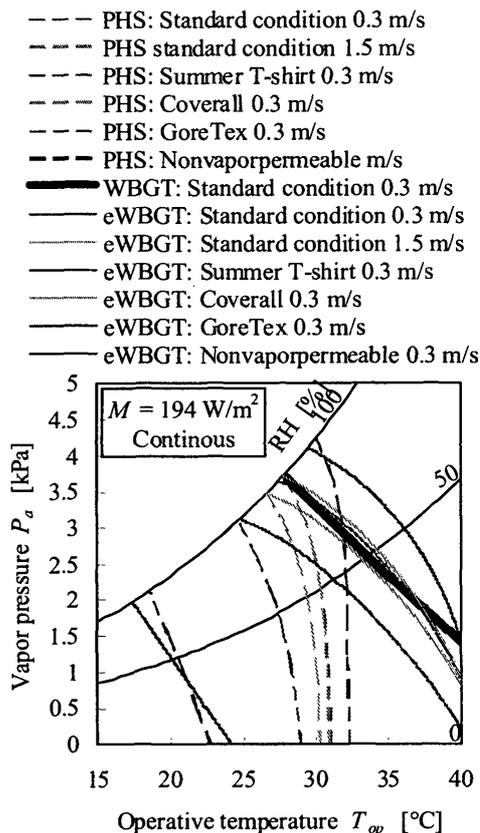


Fig. 5 Constant WBGT, eWBGT, and PHS lines for various conditions as continuous work limits

eWBGTは熱ストレスを標準環境下でのWBGT値で表示するので、eWBGTとWBGTの差(eWBGT - WBGT)は、着衣や気流の多様性に対応するための補正係数と位置付けられる。

最後に、eWBGTと Predicted Heat Strain Model (PHS)、WBGTを図-5に比較する。異なる着衣、気流条件における、定常(または8時間作業時)の上限値を載せている。いずれの条件ともPHSモデルによる上限値は直腸温の上昇ではなく水分損失量により規定された。eWBGTは水分損失ではなく、体への蓄熱、換言するならば体温上昇により規定される。結果として、非透湿性衣服を除くと、eWBGTはPHSより大きな値となった。標準環境での連続作業の上限WBGTの軌跡はPHSよりeWBGTに近くなった。これは、WBGTは水分損失ではなく、体温上昇と密接に関連した指標であることに応じる。

5. まとめ

熱収支理論に基づき、実験・経験的に開発されたWBGT指標の温熱生理的意味合いを検討した。WBGTの許容上限が示されている夏服条件に限れば、連続8時間作業条件での許容上限WBGTは、定常の体温調節の上限皮膚温に応じると解釈できる。また、休憩を取りながらの断続作業時の許容上限に応じるWBGTは、

人体への蓄熱率に対応していると解釈される。人体への蓄熱率に着目し、様々な条件下での熱ストレスを馴染み深い夏服条件でのWBGT値に換算する等価WBGT(eWBGT)の概念を示した。eWBGTの特徴は、着衣や気流の多様性、高・低湿での湿度の影響を評価できることにある。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省の平成18年度採択、科学技術振興調整費による「若手研究者の自立的研究環境整備促進」の一環として行ったことを付記します。

6. 文献

ACGIH. 2006. Heat stress and strain TLV: Information for 2006

ISO. 1989. ISO 7243. Hot environments – Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature)

日本生気象学会、2012. 日常生活における熱中症予防指針 Ver. 2、<http://www.med.shimane-u.ac.jp/assoc-jpnbiomet/pdf/shishinVer2.pdf>、accessed on October 1st, 2012.

Bernard TE, Luecke CL, Schwartz SW, Kirkland KS, Ashley CD. 2005. WBGT clothing adjustments for four clothing ensembles under three relative humidity levels. J Occup Environ Hyg., pp. 2251–2256

ISO. 2004. ISO 7933, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of heat stress using calculation of the predicted heat strain

NIOSH. NIOSH Criteria for a recommended standard – Occupational exposure to hot environments, revised criteria. U.S. Dept. of Health and Human Services, USDHHS (NIOSH) Publications; 1986, No. 86–113

Yaglou CP, Minard D. 1957. Control of heat casualties at military training centers. Am Med Assoc Arch Ind Health 16, pp.302–16.

Sakoi T. Mochida T. 2012. Concept and advantages of equivalent wet bulb globe temperature index, Proceeding of 9th International Meeting of Thermal Manikin and Modelling, ref_44.pdf

<連絡先>

連絡先氏名 佐古井 智紀
 住所 長野県上田市常田 3-15-1
 所属 信州大学ファイバーナノテク国際若手研究者育成拠点
 E-mail アドレス t-sakoi@shinshu-u.ac.jp