

湿球温度・グローブ温度・気温により記した人体熱平衡式とWBGT式の対応

－第1報 屋内条件での各放熱量の記述とぬれ率設定の影響－

佐古井智紀^{*1}, 栗原浩平^{*2}, 持田徹^{*2}

^{*1} 産業技術総合研究所、^{*2} 北海道大学

Heat balance equation of human body by wet bulb-, black globe-, and air-temperatures and its correspondence to WBGT index

- Part 1 Descriptions of heat balance equation of human body for indoor environments and influence of supposed skin wettedness on it -

Tomonori SAKOI^{*1}, Kouhei KUWABARA^{*2}, Tohru MOCHIDA^{*2}

^{*1} National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ^{*2} Hokkaido University

Abstract : The authors described each term in the heat balance equation of human body by wet bulb-, globe-, and air temperatures. Based on the descriptions, we clarified that the rise in air temperature at fixed globe- and wet bulb-temperatures frequently encouraged heat dissipation from the human body, since it closely corresponded to the descend of humidity at a constant operative temperature. In addition, we made numerical analyses under the conditions where metabolic heat production, static clothing insulation, static clothing permeability factor, and air velocity ranged from 1 to 4 met, 0.2 to 1.5 clo, 0.05 to 0.5 N.D., and 0.15 to 3.35 m/s, respectively, and compared the influence of wet bulb temperature (I_w) with the influences of globe temperature (I_g) on the skin temperature. When skin wettedness (w) and static clothing moisture permeability factor ($i_{c.m.s.}$) were supposed to be high ($w = 1.0$ and $i_{c.m.s.} = 0.35$), the magnitude of I_w became relatively large (0.56 – 0.86) and that of I_g became relatively small (0.25 – 0.31). However, when they were supposed to be little ($w = 0.5$ and $i_{c.m.s.} = 0.05$), the magnitude of I_w became relatively small (0.13 – 0.31) and that of I_g became relatively large (0.44 – 0.58), for the same conditions. The supposed w and $i_{c.m.s.}$ had strong impact on the magnitudes of I_w and I_g .

Key Words : Heat stress, Wet bulb globe temperature, heat balance equation, skin wettedness, clothing permeability factor

要旨 : 人体熱平衡式を構成する各放熱項と人体熱平衡式を、湿球温度、グローブ温度、気温により記述した。一定グローブ温度かつ一定湿球温度条件での気温の上昇は、作用温度がほぼ一定の条件での湿度低下に対応する場合があるため、放熱を促進し得ることが分かった。代謝量 1～4 met、静穏気流下での着衣の基礎熱抵抗 0.2～1.5 clo、静穏気流下での着衣の透湿係数($i_{c.m.s.}$)が 0.05～0.5 N.D.、環境の風速が 0.15～3.35m/s の範囲で数値検討を行い、皮膚温に及ぼす湿球温度の影響度合い(I_w)とグローブ温度の影響度合い(I_g)を比較した。同じ条件において、ぬれ率(w)および $i_{c.m.s.}$ に高い値を設定($w = 1.0$, $i_{c.m.s.} = 0.35$)した場合には I_w が大きく(0.56～0.86)、 I_g が小さくなり(0.25～0.31)、逆に w および $i_{c.m.s.}$ に小さい値を設定($w = 0.5$, $i_{c.m.s.} = 0.05$)した場合には I_w が小さく(0.13～0.31)、 I_g が大きくなり(0.44～0.58)、 w , $i_{c.m.s.}$ の設定が I_w と I_g に強く影響することを確認した。

キーワード : 暑熱ストレス、湿球グローブ温度、熱平衡式、ぬれ率、着衣の透湿係数

1. はじめに

WBGT 指標(Wet Bulb Globe Temperature)¹⁾は、自然湿球温度(T_w)とグローブ温度(T_g)、気温(T_a)の加重平均($0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_a$)として計算される。WBGT 指標の標準条件は、夏服、静穏に設定され、それ以外の条件で使用するための補正法が経験的、実験的に提示さ

れてきた^{2), 3), 4), 5)}。暑熱ストレスによる体温の上昇は、産熱と放熱とバランスの結果引き起こされる。従って、人体の熱収支、着衣、風に伴う体の放熱特性の変化を踏まえることにより、既往の経験的、実験的補正法を、より一般性の高い、多様な条件に対応できる手法に発展できると予期される。著者らは、人体・環境間の熱収

支に着目して WBGT 指標の特徴, 補正法を検討してきた^{6), 7), 8), 9)}. 人体の熱平衡式を T_w , T_g , T_a により記述し, 皮膚飽和度が 1 となる高湿条件下で皮膚温(T_{sk})が WBGT 指標の式以上に T_w の影響を強く受けていることを屋内⁶⁾, 日射のある屋外⁷⁾を対象に示した. ぬれ率 w と発汗の蒸発効率の対応¹⁰⁾に基づき, 皮膚飽和度が 1 未満となる低湿～中湿条件を対象に, 定常作業時の限界 WBGT の補正法を示し⁸⁾, また, 非定常条件での補正量が定常を対象として得た補正量に一致しないことを示した⁹⁾. 本稿では, 人体の熱平衡式を構成する熱交換のそれぞれを T_w , T_g , T_a により記述し, T_w , T_g , T_a が人体の熱交換に及ぼす影響を明らかにする. また, 日射の無い屋内, 高湿条件を対象に, 皮膚飽和度を 1 で与えた設定⁶⁾を見直し, 人体の熱交換に対する T_w , T_g , T_a の影響に, w の最大値 w_{max} , 静穏気流下での衣服の透湿係数 $i_{cm, st}$ の設定が如何に作用するかを検討する.

2. 人体熱平衡式とその各熱交換の表現式

日射がなく, グローブ温度計と人体の平均放射温度 T_r が等しい条件を想定して, 人体の熱平衡式を構成する各熱交換を T_w , T_g , T_a により記述する.

2.1 対流および放射による熱交換

人体の対流と放射による放熱の和($C_v + R$)は式(1)で記述される.

$$C_v + R = h_c \cdot F_{cl} \cdot (T_{sk} - T_a) \cdot f_{cl} + h_r \cdot F_{cl} \cdot (T_{sk} - T_r) \cdot f_{cl} \quad (1)$$

グローブ温度計の定常熱収支は式(2)で表される.

$$0 = h_c (T_g - T_a) + h_r (T_g - T_r) \quad (2)$$

式(2)を式(1)に代入, T_r を消去して整理すると式(3)が得られる.

$$C_v + R = (h_c + h_r) F_{cl} (T_{sk} - T_g) f_{cl} + h_r F_{cl} (T_g - T_a) \left(\frac{h_c}{h_r} - \frac{h_c}{h_r} \right) f_{cl} \quad (3)$$

T_g と T_a により ($C_v + R$) を記述した式(3)において, 右辺第1項は人体の作用温度が T_g により代用された場合の対流と放射による放熱量である. 右辺第2項は代用された作用温度 T_g と人体の作用温度のそれぞれに及ぼす, 対流熱伝達率と放射熱伝達率の比の差による影響を補正する項である.

2.2 蒸発による熱交換

皮膚からの蒸発放熱量 E_{sk} は, 皮膚と環境との水蒸気圧差($P_{sk} - P_a$)を用いて式(4)で表される.

$$E_{sk} = LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} (P_{sk} - P_a) f_{cl} \quad (4)$$

湿球温度計の定常熱平衡そして湿球温度計の感温部の径が小さいことを考慮すると, 式(5)が成り立つ⁷⁾.

また, T_w の範囲を限定することにより, T_w における飽和水蒸気圧(P_w^*)は十分な精度で T_w によって線形近似出来るので($P_w^* = \alpha_w \cdot T_w + \beta_w$), 環境の水蒸気圧 P_a は T_w と T_a を用いて式(6)で表される.

$$LR(P_w^* - P_a) + (T_w - T_a) = 0 \quad (5)$$

$$P_a = P_w^* + \frac{T_w - T_a}{LR} = \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right) T_w - \frac{1}{LR} T_a + \beta_w \quad (6)$$

式(6)から, T_w が高いほど P_a が高くなり, T_a が高いほど P_a が低くなると言える. T_a の上昇は乾性放熱を抑制するが, P_a を T_w と T_a によって表した場合には, T_a の上昇は P_a の低下にも対応するので, 湿性放熱を促進する要因となる. E_{sk} は式(6)を式(4)に代入して式(7)で記述される.

$$E_{sk} = LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \left(P_{sk} - \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right) T_w + \frac{1}{LR} T_a - \beta_w \right) f_{cl} \quad (7)$$

2.3 呼吸による熱交換

式(6)の関係を代入して呼吸による熱交換 R_{es} (式(8))を T_a , T_w で記述すると式(9)が得られる.

$$R_{es} = 0.0014M(35 - T_a) + 0.0173M(5.87 - P_a) \quad (8)$$

$$R_{res} = 0.0014M \cdot 35 + 0.0173M(5.87 - \beta_w) - 0.0173M \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right) T_w + \left(\frac{0.0173M}{LR} - 0.0014M \right) T_a \quad (9)$$

2.4 人体の熱平衡式

人体の熱平衡式(式(10))を T_w , T_g , T_a により記述すると, 式(3), (7), (9)より式(11)となる⁷⁾.

$$M - W - S = C_v + R + E_{sk} + R_{es} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & [(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl}] T_{sk} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot P_{sk} \\ & + [0.0014 \cdot 35 + 0.0173 \cdot (5.87 - \beta_w) - 1] M \\ & - LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot \beta_w \\ & + W + S \\ & = \left[(LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} + 0.0173M) \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right) \right] T_w \\ & + \left[(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + \left(\frac{h_c}{h_r} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl} \right] T_g \\ & + \left[\frac{0.0014M}{LR} - \frac{0.0173M}{LR} - h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \right. \\ & \left. + \left(\frac{h_c}{h_r} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl} \right] T_a \end{aligned} \quad (11)$$

式(6)を用いて熱平衡式中的変数 P_a は T_w に置き換えられ, それに伴い T_a の係数に呼吸に関係する湿性放熱,

および皮膚での蒸発放熱量に関係する係数が加えられた。人体の作用温度が T_g に置き換えられたことに伴い、 T_g , T_a の係数に人体の作用温度を計算する上での人体とグローブ温度計間での対流熱伝達率と放射熱伝達率の比の差を補正する係数が加減された。 T_w と T_g は、 P_a と人体の作用温度の代用値とも位置付け出来、 T_w と T_g の上昇は人体からの放熱を抑制するものの、 T_a に限っては上昇が湿度低下にも対応するため、放熱を一概に抑制するとは言えない。式(11)はぬれ率 w を用いて表すと式(12)に変形される。

$$\begin{aligned} & \left[(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot \alpha_{sk} \right] T_{sk} \\ & + [0.0014 \cdot 35 + 0.0173 \cdot (5.87 - \beta_w) - 1] M \\ & - LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot (\beta_w - \beta_{sk}) + W + S \\ & = \left[(LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w + 0.0173 M) \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right) \right] T_w \\ & + \left[(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + \left(\frac{h_c''}{h_r''} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl} \right] T_g \\ & + \left[\frac{0.0014 M - \frac{0.0173 M}{LR} - h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w}{LR} - \left(\frac{h_c''}{h_r''} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl} \right] T_a \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)の T_w , T_g , T_a にかかる係数のお互いの比は、 w および着衣自体の透湿性によって変化する。

3. T_{sk} と T_w , T_g , T_a の関係に及ぼす w の影響

式(12)を、体の温度である T_{sk} を基準に表した場合(式(13))に、 T_w , T_g , T_a の係数 I_w , I_g , I_a および定数 C が w によってどのように変化するかを、 $w (= w_{\max})$ が0.5~1.0(0.5, 0.65, 0.8, 1.0)、静穏気流下の着衣の基礎熱抵抗 $I_{cl, st}$ が0.2clo~1.5clo、静穏気流下の着衣自体の透湿係数 $i_{cm, st}$ が0.05~0.5、環境の風速 v が0.15m/s~3.35m/s、代謝量 M が1.0~4.0metの条件で検討した。なお、 w が一定($= w_{\max}$)と見なせる高湿条件を対象とした。仕事率 W は0、定常暴露を想定して蓄熱率 S は0とした。活動に伴う風速はISO-9920¹¹⁾に従い与え、活動と風速を伴う条件下での着衣の基礎熱抵抗と透湿係数は、ISO-9920¹¹⁾に従い全熱抵抗、全透湿抵抗を得、その後に着衣外表面の熱抵抗、透湿抵抗を差し引き設定した。

$$T_{sk} = I_w \cdot T_w + I_g \cdot T_g + I_a \cdot T_a + C \quad (13)$$

ただし、

$$I_w = \frac{(LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w + 0.0173 M) \left(\alpha_w + \frac{1}{LR} \right)}{(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot \alpha_{sk}} \quad (14)$$

$$I_g = \frac{(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + \left(\frac{h_c''}{h_r''} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl}}{(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot \alpha_{sk}} \quad (15)$$

$$I_a = \frac{\left[\frac{0.0014 M - \frac{0.0173 M}{LR} - h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w}{LR} - \left(\frac{h_c''}{h_r''} - \frac{h_c}{h_r} \right) \cdot h_r \cdot F_{cl} \cdot f_{cl} \right]}{(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot \alpha_{sk}} \quad (16)$$

$$C = \frac{[LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot (\beta_w - \beta_{sk}) - W - S - [0.0014 \cdot 35 + 0.0173 \cdot (5.87 - \beta_w) - 1] M]}{(h_c + h_r) F_{cl} \cdot f_{cl} + LR \cdot h_c \cdot F_{pcl} \cdot f_{cl} \cdot w \cdot \alpha_{sk}} \quad (17)$$

検討条件下での I_w , I_g , I_a , C の範囲を w ごとにTable 1に示す。全体的な傾向として w が大きくなるにつれて I_w が大きくなり、 w が小さくなるにつれて I_g , I_a が大きくなった。一例として、 M を3.25met、 v を0.35m/s、 $i_{cm, st}$ を0.35(通常の着衣の通気性に相当)、 w を0.5また1.0に設定した条件下で、 $I_{cl, st}$ のみを変化させた時の I_w , I_g , I_a , C をFig.1a, 1bに示す。また、Fig.1の条件に対して $i_{cm, st}$ のみを0.05(非透湿性の着衣に相当)で与えた場合の I_w , I_g , I_a , C をFig.2a, bに示す。

Fig.1, 2 では、 w が大きいくほど、また、 $i_{cm, st}$ が大きいく着衣の透湿性が良いほど、 I_w が大きいく、 I_g , I_a が小さくなった。この傾向は、非透湿性の衣服を着た場合に定常の暑熱限界に対する $T_g + T_a$ の影響が0.85と大きくなって、逆に T_w の影響が0.15と小さくなった報告⁵⁾と定性的には一致する。ただし、 $(I_g + I_a) / I_w$ が0.18(=0.85/0.15)となる条件を試算したところ、 $i_{cm, st}$ を0.05、 $w_{\max}$ を0.35程度で与えた場合であった。他方、透湿性着衣($i_{cm, st} = 0.35$)・高湿度条件の定常限界に及ぼす P_a , T_g の影響に関する報告⁴⁾に応じる $w_{\max}$ は1.0以上(=1.25)と試算され、既往研究に応じる $w_{\max}$ には大きな違いが見られた。

Table 1 Ranges of I_w , I_g , I_a , and C of for each w under the checked conditions

$w_{\max}$ [N.D.]	I_w [N.D.]	I_g [N.D.]	I_a [N.D.]	C [°C]
0.5	0.12~0.75	0.20~0.81	-0.08~0.32	3.3~38.1
0.65	0.13~0.81	0.16~0.78	-0.10~0.29	3.4~37.1
0.8	0.14~0.96	0.14~0.75	-0.12~0.27	-1.7~36.1
1.0	0.17~1.03	0.12~0.71	-0.13~0.24	-2.0~35.1

4. おわりに

人体の熱平衡式を構成する熱交換のそれぞれを湿球温度 T_w 、グローブ温度 T_g 、気温 T_a により記述し、その記述における T_a の増加は、乾性放熱を抑制するものの水蒸気圧低下に伴う湿性放熱を増やすこと、その結果、 T_a の増加が放熱を促進に繋がるとは限らないことを報告した。また、 T_w , T_g , T_a の各変数の変動が人体の熱交換に及ぼす影響は、ぬれ率の設定値と静穏気流下

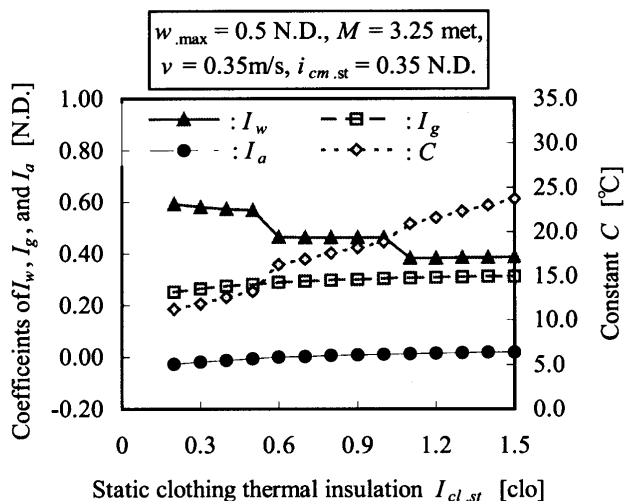


Fig. 1a I_w , I_g , and I_a for each $I_{cl.st}$ in moisture permeable clothing (at $w_{max} = 0.5$)

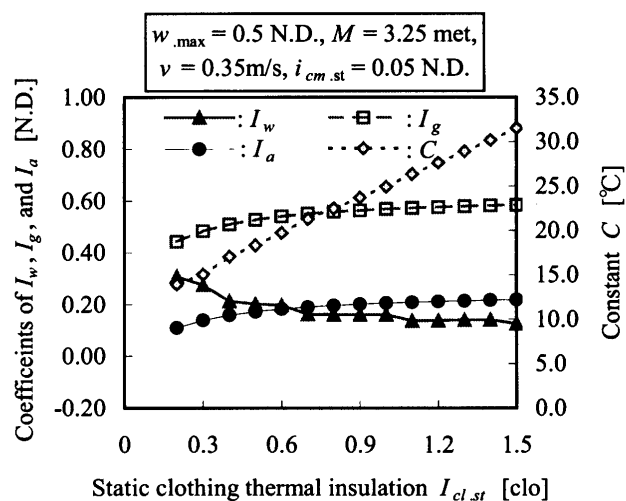


Fig. 2a I_w , I_g , and I_a for each $I_{cl.st}$ in moisture non-permeable clothing (at $w_{max} = 0.5$)

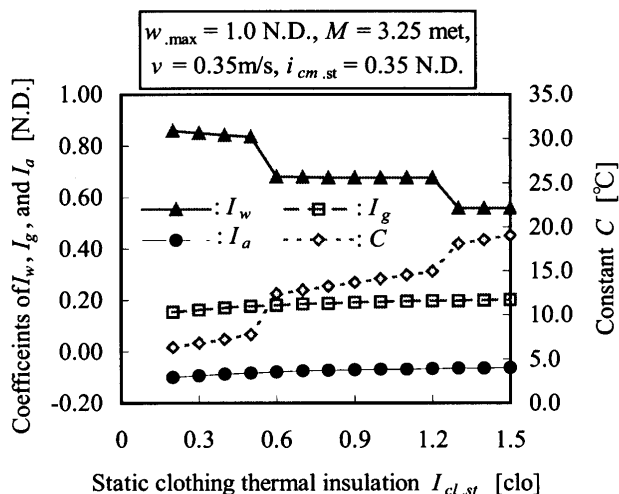


Fig. 1b I_w , I_g , and I_a for each $I_{cl.st}$ in moisture permeable clothing (at $w_{max} = 1.0$)

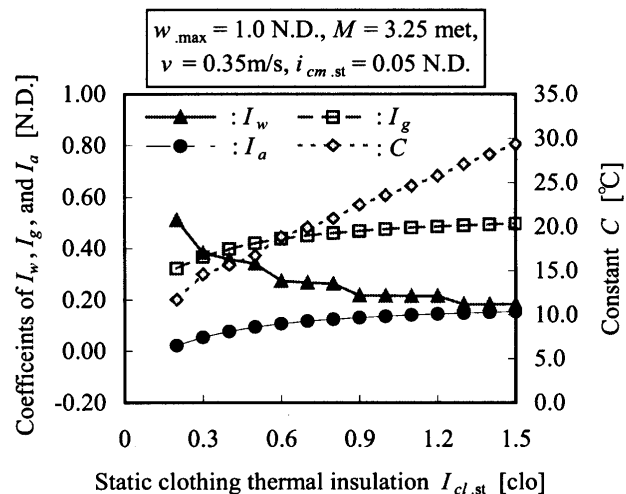


Fig. 2b I_w , I_g , and I_a for each $I_{cl.st}$ in moisture non-permeable clothing (at $w_{max} = 1.0$)

での衣服の透湿係数の設定値に大きく依存し、両者が大きくなるほど T_{w_s} の影響が強くなり、 T_g の影響が小さくなることを示した。

記号 ($C_v + R$): 対流および放射による放熱量 [W/m^2], I_a , I_g , I_w , C : T_{sk} を T_a , T_g , T_w で記述する式の各重み係数 [N.D.] と切片 [$^{\circ}C$], E_{sk} : 皮膚からの蒸発放熱量 [W/m^2], f_{cl} : 衣服面積率 [N.D.], F_{cl} : 着衣の伝熱効率 [N.D.], F_{pcl} : 衣服の透湿効率 [N.D.], h_c , h_c'' : 人体またはグローブ温度計の対流熱伝達率 [$W/m^2^{\circ}C$], h_r , h_r'' : 人体またはグローブ温度計の放射熱伝達率 [$W/m^2^{\circ}C$], $I_{cl.st}$, $i_{cm.st}$: 静穏気流下の着衣の熱抵抗 [clo] と着衣自体の透湿係数 [N.D.], LR : Lewis の係数 [$^{\circ}C/kPa$], M : 代謝量 [W/m^2] または [met], P_{sk} : 皮膚表面の水蒸気圧 [kPa], P_{sk}^* , P_w^* : T_{sk} , T_w における飽和水蒸気圧 [kPa], R_{ex} : 呼吸による放熱量 [W/m^2], S : 蓄熱率 [W/m^2], T_a : 気温 [$^{\circ}C$], T_g : グローブ温度 [$^{\circ}C$], T_{sk} : 皮膚温度 [$^{\circ}C$], T_w : 自然湿球温度 [$^{\circ}C$], v : 環境の風速 [m/s], W : 外部仕事量 [W/m^2], w : ぬれ率 [N.D.], w_{max} : 最大ぬれ率 [N.D.], α_w , α_{sk} , β_w , β_{sk} : P_w^* , P_{sk}^* の T_w , T_{sk} による 1 次近似式の傾き [N.D.] と切片 [$^{\circ}C$]

謝辞 産業技術総合研究所の都築和代博士から、研究を進める当たり貴重な示唆を頂きました。厚く御礼申し上げます。

参考文献 1) ISO: ISO-7243(1989), 2) NIOSH: Occupational exposure to hot environments, revised criteria, P.21, 3) Reneau PD, Bishop PA: AIHA Journal (57), pp.58-61 (1996), 4) Kenney WL et al.: Am. Ind. Hyg. Assoc. J. (54), pp.397-402 (1993), 5) Bernard TE et al.: J. of Occupational and Environmental Hygiene, pp.251-256 (2005), 6) 持田他: 空気調和・衛生工学会論文集 No.108, pp.21-28 (2006), 7) 持田他: 空気調和・衛生工学会論文集 No.128 (2007) (掲載決定), 8) Sakoi T. et al.: Proceedings of SB07(Asia), pp.429-434(2007), 9) 佐古井他: 第46回日本生気象学会大会抄録, 日本生気象学会雑誌(2007) (投稿中), 10) ISO: ISO-7933(2004), 11) ISO: ISO-9920 (2007)

<連絡先>

著者名 佐古井智紀

住所 〒305-8566 つくば市東 1-1-1 つくば中央第 6

所属 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門

E-mail t-sakoi@aist.go.jp