

## 暑熱環境におけるWBGTと人体平均皮膚表面温度との関係

著者	浜田 博之, 朝比奈 亮, 松尾 朋浩, 山越 健弘, 窪田 英樹
雑誌名	学術講演梗概集. D-2, 環境工学II, 熱, 湿気, 温熱感, 自然エネルギー, 気流・換気・排煙, 数値流体, 空気清浄, 暖冷房・空調, 熱源設備, 設備応用 = Summaries of technical papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan. D-2, Environmental engineering II, Heat, moisture, thermal comfort, natural energy, air flow, ventilation, smoke exhaustion, computational fluid dynamics, indoor air quality heating, cooling and air-conditioning heat and cold sources, piping systems application of building services
巻	1999
ページ	395-396
発行年	1999-07-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/14354">http://hdl.handle.net/2297/14354</a>

## 暑熱環境における WBGT と人体平均皮膚表面温度との関係

正会員○浜田 博之\*<sup>1</sup> 同 松尾 朋浩\*<sup>2</sup>  
同 朝比奈 亮\*<sup>1</sup> 同 山越 健弘\*<sup>1</sup>  
同 窪田 英樹\*<sup>3</sup>

## 1 はじめに

暑熱環境を測定する指標として WBGT が知られている。本論文は WBGT 指標を人体平均皮膚表面温度 (PMST-Model)<sup>1)</sup> との関係で分析しその問題点を探る。WBGT が暑熱ストレス障害の防御や熱環境の制御や設計のために使用するとすれば、指標が人体の温熱特性をよく表わしているかが最も大切なことであろう。この研究ではまず、自然湿球温度  $t_{nwb}$  [°C] を環境要素の関数で表現する。ついで屋内における WBGT 指標が人体の温熱特性をどのように対応しているかを平均皮膚温 (PMST-Model) の理論予測値と照らし合わせるにより分析する。

## 2 WBGT

WBGT 指標は、乾球温度  $t_a$  [°C]、自然 (強制通風でない) 湿球温度  $t_{nwb}$  [°C]、およびグローブ温度  $t_g$  [°C] を組み合わせた環境の熱ストレス指標であり、室内環境または日射のない屋外では  $t_a$  の項をなくして、 $t_g$  の係数を 0.3 とし簡略化している。<sup>2)</sup>

$$WBGT = 0.7 t_{nwb} + 0.3 t_g \quad (1)$$

WBGT は4つの環境要素すべての関数ではあるが、人間の熱ストレスを適確に反映しているかは明確ではない。

1) 自然湿球温度  $t_{nwb}$  の予測

直径 0.006 [m] の円柱における natural wet bulb temperature であり、以下のような式から求めることができる。日射なし。対流+放射+蒸発=0 より、

$$h_c(t_a - t_{nwb})A + h_r(t_r - t_{nwb})A + L \frac{h_e}{c_a} \{x_s - x_a\}A = 0 \quad (2)$$

$h_c$ : 対流熱伝達率 [kcal/m<sup>2</sup>h°C]、 $h_r$ : 放射熱伝達率 [kcal/m<sup>2</sup>h°C]、 $t_{nwb}$ : 自然湿球温度 [°C]、 $t_a$ : 気温 [°C]、

$A$ : 表面積 [m<sup>2</sup>]、 $L$ : 潜熱=580 [kcal/kg]

$x_s$ : 飽和時の重量絶対湿度 [kg/kg']

$x_a$ : 重量絶対湿度 [kg/kg']  $\phi$ : 相対湿度 [%]

$C_a$ : 空気の比熱=0.24 [kcal/kg°C]

式(2)より、計算の簡略化のため  $t_a = t_r$  とし  $x_s = a t_{nwb} + b$  とおくと、 $t_{nwb}$  [°C] を次式のように与えられる。

$$t_{nwb} = \frac{t_a(h_c + h_r) + L \frac{h_e}{c_a}(b - \phi x_a)}{h_c + h_r + L \frac{h_e}{c_a} a} \quad [°C] \quad (3)$$

また、対流熱伝達率  $h_c$  [kcal/m<sup>2</sup>h°C] は、Zukauskas による円柱の特性を適用して与えられる。<sup>3)</sup>

$$h_c = \frac{\lambda}{d} \left\{ C \left( \frac{ud}{\nu} \right)^n \text{Pr}^{0.37} \right\} \quad (4)$$

ここで  $Re$ : レイノルズ数、 $Nu$ : ヌセルト数、 $C, n$ : レイノルズ数による定数と指数 ( $C=0.51, n=0.50$ )、 $Pr$ : プラントル数 (0.71)、 $v_{wb}$ : 気流 [m/s]、 $Pr_w$ : プラントル数 (壁温における物性値)、 $d$ : 管直径 (=0.006 [m])、 $\nu$ : 空気の動粘性係数 (=1.5×10<sup>-5</sup> [m<sup>2</sup>/s])、 $\lambda$ : 熱伝達率 (=0.023 [kcal/mh°C])

よって、次式のように与えられる。

$$h_c = 34.45 v_{wb}^{1/2} \text{ [kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}] \quad (5)$$

2) グローブ温度  $t_g$  について

日射なしの時、放射=対流により、

$$t_g = \frac{h_c t_a + h_r t_r}{h_c + h_r} \quad [°C] \quad (6)$$

## 3 PMST (Predicted Mean Skin Temperature 予測平均皮膚温)-Model について

平均皮膚温モデルは、環境4要素 ( $t_a, RH, t_r, v_p$ )、着衣[clo]、代謝[Met]の入力に対して平均皮膚温  $t_{sk}$  [°C] を理論的に予測するもので、発汗特性「発汗量は発汗開始平均皮膚温からの偏差  $\Delta t_{sk}$  [°C] に一次比例する」を熱平衡式に適用して、平均皮膚温  $t_{sk}$  [°C] を温熱環境の4要素と代謝、着衣の関数で表現したものである。適用範囲は  $t_{sk}=36^\circ\text{C}$

Relationship between WBGT Index and Predicted Mean Skin Temperature in Hot Environment.

HAMADA Hiroyuki, MATUO Tomohiro, ASAHINA Ryo, YAMAKOSI Takehiro, KUBOTA Hideki

程度（ほぼ「非常に暑い」に対応する）であるが、目安値として36℃を越える値も示す。

#### 4 WBGT と予測平均皮膚温( $t_{sk}$ ) の比較

##### ①湿度の影響 (図1)

図1は、1Met、着衣量0.5clo、最大濡れ率 $w_{max}=0.8$ 、さらに、WBGTへ流速 $v_{wb}$ と人体への相対流速 $v_p$ を等しいものとして、湿度(30, 60, 90%)の影響を調べたものである。湿度が上がると $t_{sk}$ も上がり、ISO基準値WBGT=33℃は $t_{sk}=36\sim 37$ ℃にそれぞれ対応して「非常に暑い」がそれ以上の状態であり高湿度域では要注意であることがわかる。

##### ②気流の影響 (図2)

図2は、2Met、着衣0.5clo、最大発汗濡れ率を $w_{max}=0.5$ とし、風速WBGT: $v_{wb}=0.2$ m/s、人体への相対気流( $v_p=0.2$ , 1 m/s)の変化について調べたものである。ISO基準値WBGT=30℃における皮膚温は37℃を越えており、危険といえる状態にあることが予想される。

##### ③着衣の影響 (図3)

図3は、2 Met、RH=50%、 $w_{max}=0.5$ 、 $v_{wb}=v_p=0.5$ m/sにおいて、着衣量(0, 0.5, 1 clo)の影響を調べたものである。ISO基準値WBGT=30℃は1 cloで $t_{sk}=40$ ℃を超えておりcore温度もかなり増加する状態であることが推測される。

代謝量 [Met]	全身温感		
	中立 [°C]	暑い [°C]	非常に暑い [°C]
1	34	35.5	36
2	32.4	35	36
3	30.8	34	35.5
4	29.2	33	35

表2 PMST-Modelの全身温感基準値<sup>1)</sup>

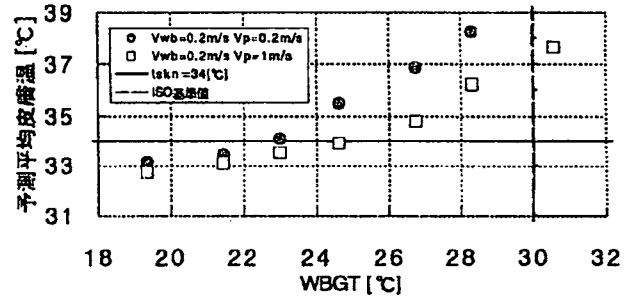


図2 WBGTと予測平均皮膚温との関係(気流の影響)  
(2Met, 0.5clo, RH=50%,  $w_{max}=0.5$ での気流変化)

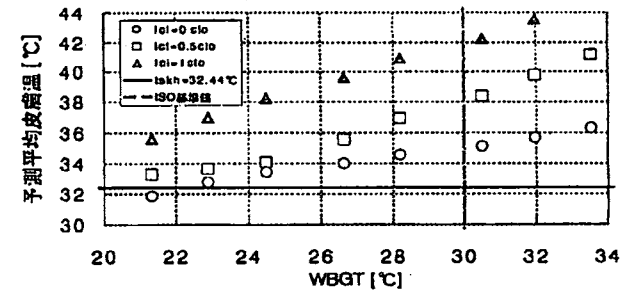


図3 WBGTと予測平均皮膚温との関係(着衣の影響)  
(2Met,  $v_{wb}=v_p=0.5$ m/s, RH=50%,  $w_{max}=0.5$ での着衣量変化)

代謝量	代謝量 M		WBGTの基準値			
	皮膚表面積あたりの関連 [W/m <sup>2</sup> ]	全体皮膚表面積 =1.8[m <sup>2</sup> ] [W]	暑い環境に慣れた人 [°C]		暑い環境に慣れていない人 [°C]	
0	M≤65	M≤117	33		32	
1	65<M≤130	117<M≤234	30		29	
2	130<M≤200	234<M≤360	28		26	
3	200<M≤260	360<M≤468	風を感じない	風を感じる	風を感じない	風を感じる
			25	26	22	23
4	M>260	M>468	23	25	18	20

表1 WBGT指標のISO基準値<sup>4)</sup>

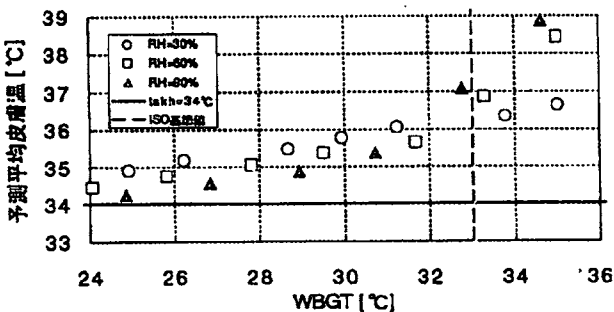


図1 WBGTと予測平均皮膚温との関係(湿度の影響)  
(1Met, 0.5clo,  $v_{wb}=v_p=0.1$ m/s,  $w_{max}=0.8$ での湿度変化)

#### 5 考察

WBGTのISO基準値において、予測される平均皮膚表面温度が「非常に暑い」に対応する36℃を大きく越える例があることを示した。したがって、WBGTの有効温度範囲を低く設定して直すなど、慎重に利用すべきであろう。

##### 【参考文献】

- 窪田英樹：平均皮膚温に着目した体温調節モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集(1995)
- Azer, N.Z, Hsu, S: OSHA HEAT Stress Standards and the WBGT Index: ASHRAE Trans. Vol.83(2), pp.30-40
- 伝熱工学資料 社団法人日本機械学会
- Hot environments-Estimation on the heat stress on working man, based on the WBGT-Index (wet bulb globe temperature); ISO 7243:1989

\*1室蘭工業大学大学院修士課程  
\*2室蘭工業大学大学院博士課程  
\*3室蘭工業大学工学部建設システム工学科 教授・工博

Graduate Student, Muroran Inst. of Tech.  
Graduate Student, Muroran Inst. of Tech.  
Prof., Dept. of Civil Eng. & Architecture, Muroran Inst. of Tech., Dr. Eng