

# 札幌管区気象台における黒球温度の観測報告および WBGTの各種推定式の特性について

堀江祐圭 (北海道大学大学院情報科学研究科)  
藤原弘章 (札幌管区気象台気候・調査課)

## 【はじめに】

現在、労働や運動時などにおける熱中症予防の警戒基準にはWBGT (Wet-bulb globe temperature; 湿球黒球温度) が用いられている(日本体育協会 2005; 日本生気象学会 2007)。しかしながら、気象庁の通常の観測項目にWBGTのパラメータである黒球温度は含まれない。このため、WBGTを算出する場合の多くは、乾球温度・相対湿度・全天日射量等を用いた推定値を用いざるを得ない。

ここで本研究は、1)2008年6月1日から2008年9月30日において札幌管区気象台で黒球温度を観測する、2)従来の気象台の観測データを用いた推定式によるWBGTと、上記で観測した黒球温度およびYaglou & Minard (1957) の算出式によるWBGTとを比較することで、その特性を明らかにすることを目的とした。

## 【黒球温度とWBGT】

WBGTは、ベトナム戦争時の屋外軍事訓練時における熱中症の発生の危険性を判断する基準として提唱された(Yaglou & Minard 1957)。WBGTは、ISO-7243で指標化され、後に、米国労働健康安全学会・米国スポーツ医学会、国内では、環境省・日本体育協会・日本生気象学会などで、熱中症のリスクを評価する温熱指標として採用された。

ここで、WBGTは、式1から算出される。

$$WBGT = 0.7T_w + 0.2T_g + 0.1T_d \quad (式1)$$

$T_w$ : 湿球温度(°C)、 $T_g$ : 黒球温度(°C)、 $T_d$ : 乾球温度(°C)

黒球温度は、「人の表面積:体積÷黒球の表面積:体積」となる黒体を想定し、その対流および放射による平衡温度となる温度を人の体感温度である。黒球は表面がツヤ消し黒に塗られた直径15cm・厚さ1.2mmの中空銅球で、黒球温度はその中心付近の温度である。この温度が、特に(気温)<(放射温度)となる暑熱空間で、体感温度と良い対応を示す。

人の体感温度や体温調節機能の評価に必要な気象要素は、気温・湿度・放射・気流の4要素である。このうち、黒球温度は気温・放射・気流の3つを、WBGTは4要素全てを含む。

## 【WBGTの推定式】

黒球温度の現地観測の結果および各種気象要素から作成された推定式として、中井ほか(1992)(式2)、高市ほか(2003)(式3)、小野ほか(2006)(式4)、登内・村山(2008)(式5)などが挙げられる(表1)。

$$WBGT = 1.925 + 1.298(0.7T_w + 0.1T_d) \quad (式2)$$

$$T_g = T_d + 0.090S' / (1 + 0.0037S') \quad (式3)$$

$$WBGT = -3.510 + 0.741T_d + 0.035RH + 0.00287RH \cdot T_d + 3.644S' \quad (式4)$$

$$T_g = T_d + 12.1 + 0.0067S' - 2.40U^{1/2} (S' > 400)$$

$$T_g = T_d - 0.3 + 0.0256S' - 0.18U^{1/2} (S' \leq 400) \quad (式5)$$

ただし、RH: 相対湿度(%),  $S'$ : 全天日射量(瞬間値)(W/m<sup>2</sup>),  $U$ : 風速(m/s)とする。また、本研究における全天日射量は10分間積算値S(MJ/m<sup>2</sup>)を用いたため、 $S'$ を以下のように換算した。

$$S' = 1000 / 600S \quad (式6)$$

表1 黒球温度・WBGT・解析に用いた推定式の概要

	気温	湿度	放射	気流	黒球温度の観測場所
黒球温度	○		○	△	
WBGT	○	○	○	△	
中井ほか(1992)	○	○			運動場
高市ほか(2003)	○	○	○		温室
小野ほか(2006)	○	○	○		屋外空間
登内・村山(2008)	○	○	○	○	建物屋上

## 【札幌管区気象台における観測概要】

全天日射量を測定する観測機器は、札幌管区気象台庁舎の屋上(地上からの高さ14.7mと18.4m)に設置されている。黒球温度計(Φ 150mm黒球: (株)安藤計器製工所CK-SET、気温センサおよびデータロガー: T&D(株)TR-52)は、全天日射量の測定を行なっている庁舎の屋上に設置して観測した。



図1 札幌管区気象台庁舎の屋上での黒球温度観測の様子

## 【各推定式によるWBGTの比較】

解析にあたって、黒球温度・WBGT各種推定値とも、全天日射が観測された1時間ごとの値を抽出した。黒球温度の観測値は1分毎に取得したが、観測値の変動が大きいため、毎時00分の値ではなく、毎時51～00分の1分値の平均を1時間ごとの値とした。推定式より黒球温度およびWBGTを算出するために用いた気象データは、札幌管区気象台で観測された乾球温度、相対湿度、全天日射量、風速の10分値を用いた。湿球温度は、乾球温度・相対湿度および現地気圧より計算で求めた。

表2は、2008年6月25日から9月30日の間に観測された黒球温度によるWBGTと、各種推定式から得られたWBGTとの回帰分析を行った結果である。回帰式の傾きは全ての式でほぼ1を示した。しかし、回帰式の切片、 $R^2$ に注目すると、中井ほか(1992)による推定値は、他の指標に対して推定精度が劣る。RMSEに着目すると、登内・村山(2008)による推定値は他の指標に対して推定精度が良いといえる。

表2 観測によるWBGTと各種推定式との回帰分析結果

	回帰式の傾き	回帰式の切片	$R^2$	RMSE
中井ほか(1992)	1.04	-1.08	0.85	1.45
高市ほか(2003)	0.98	-0.31	0.95	1.58
小野ほか(2006)	0.99	0.16	0.95	1.41
登内・村山(2008)	1.02	-0.05	0.96	0.81

次に、黒球温度によるWBGTと各種推定式から得られたWBGTとの時系列変化を示した(図2)。問題点として、観測されたWBGTがこの熱中症警戒基準の25°Cを上回っているが、中井ほか(1992)では25°C以下と推定されてしまう点があげられる。これは、熱中症予防指針(日本生気象学会2007)によると、1)注意(WBGT25°C未満)、2)警戒(WBGT25-28°C)、3)嚴重警戒(WBGT28-31°C)、4)危険(WBGT31°C以上)のうち嚴重警戒レベルに達しているにも関わらず、警戒レベルと評価してしまうことを示している。

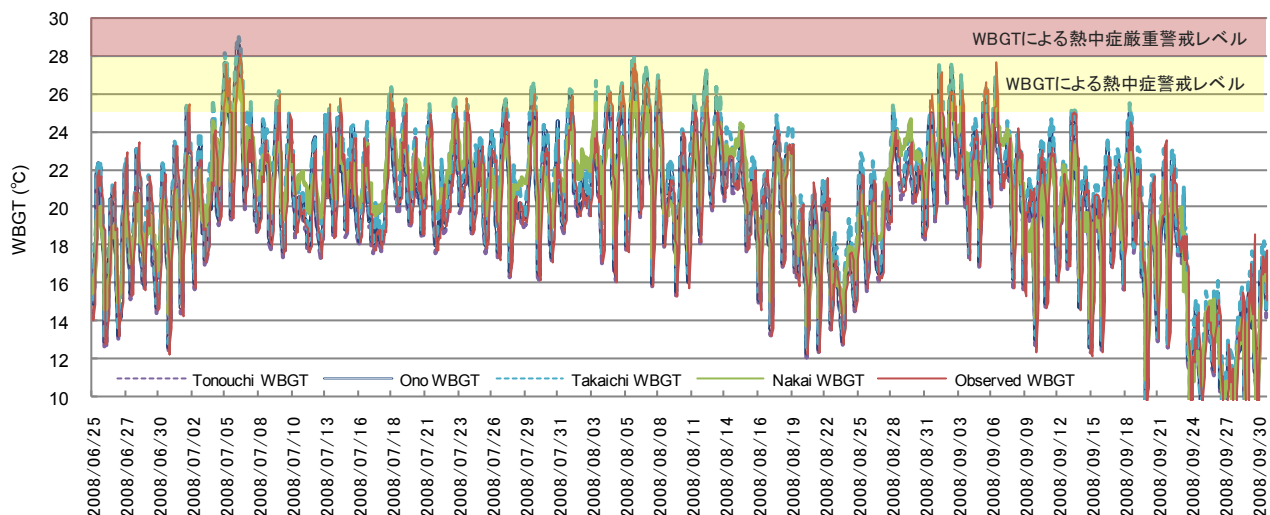


図2 観測した黒球温度によるWBGTと各種推定式を用いたWBGTの時系列変化(2008年6月25日-9月30日)

## 【考察とまとめ】

本研究で得られた結果を評価するにあたって、パラメータとして用いた気象要素に着目した。日最高WBGTを過小評価する傾向が強かった中井ほか(1992)は、他の3推定式と異なり放射を含まず、気温・湿度の2要素のみをパラメータとしている。一方、WBGTに含まれる4要素をパラメータとした登内・村山(2008)が最もよさそうであった。

人の体温調節などの生理現象を評価する上では、気温・湿度・放射・気流の4要素が揃っている指標が望ましいとされる。しかしながら、今回の解析においては実際の熱中症の発生状況と推定式に用いた気象要素との対応関係については調べておらず、今後の研究が必要である。

## 【謝辞】

本研究を行うにあたり、札幌管区気象台職員の皆様には、同気象台屋上における黒球温度計の設置および維持管理をはじめ、多大なるご協力をいただきました。厚く御礼申し上げます。

## 【参考文献】

- 中井誠一・寄本 明・森本武利(1992) 環境温度と運動時熱中症事故発生との関係. 体力科学(41): 540-547.
- 日本体育協会(2005)スポーツ活動中の熱中症ガイドブック <http://www.japan-sports.or.jp/medicine/guidebook1.html>
- 日本生気象学会(2008)日常生活における熱中症予防指針Ver.1 <http://www.med.shimane-u.ac.jp/assoc-jpnbiomet/pdf/nettyushouVer1.html>
- 小野雅司・清水 明・津田憲次(2006) 連続観測結果に基づくWBGT温度推定. 日本生気象学会雑誌(43): S27.
- 高市益行・細野達夫・黒崎秀仁・渡辺慎一・川嶋浩樹・中野有加(2003)高軒高温室におけるWBGT値を用いた快適作業領域の解析 <http://naro.affrc.go.jp/top/seika/2003/vegetea/ve03023.html>
- 登内道彦・村上貢司(2008)熱中症危険度の地域特性とHWDI. 日本生気象学会雑誌(45): S62.
- C.P.Yaglou and D.Minard(1957) Control of Heat Casualties at Military Training Centers. American Medical Association Archives of Industrial Health(16): 302-316.