

暑熱環境指標 WBGT の連続観測と黒球温度の推定

村山 貢司・*登内 道彦 (気象業務支援センター)

1. はじめに

近年の都市域におけるヒートアイランド現象の進行により、夏季を中心とした熱中症が注目を集めており、環境省による熱中症保健指導マニュアルの刊行 (http://www.env.go.jp/chemi/heat_stroke/manual.html)、国立環境研究所による熱中症予防情報の試験提供 (<http://www.nies.go.jp/wbgt/>)などの取り組みがなされている。

一般に、日最高気温が 32℃を超えると、急激に熱中症患者が増える傾向があるが、湿度が高い場合は、より低い気温でも熱中症が発生することが知られている。このため、湿度・日射 (輻射) などの寄与も数量化できる WBGT 値が労働現場・スポーツ関係者を中心に広く使われている。

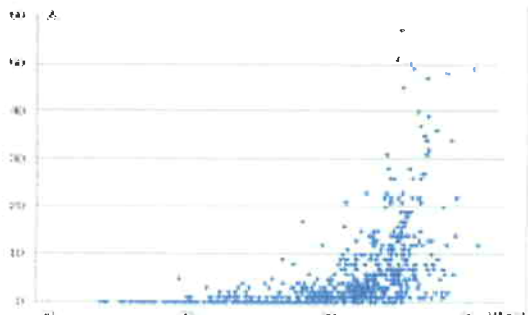


図1 東京都市における熱中症による救急搬送者数と WBGT 値 (1995~2004年、7~8月)

WBGT(Wet-bulb Globe Temperature) は、Yaglou と Minard¹⁾が提唱(1957)し、暑熱環境下での兵士の体調管理を目的に開発された指標で、以下の式で計算される。

WBGT(屋外)=

$$0.7 \times \text{湿球温度}(T_w) + 0.2 \times \text{黒球温度}(T_g) + 0.1 \times \text{乾球温度}(T_d)$$

$$\text{WBGT(屋内)} = 0.7 \times \text{湿球温度}(T_w) + 0.3 \times \text{黒球温度}(T_g)$$

..... (1)

WBGT (および黒球温度) が、夏季の都市において、どのような値をとり、また、これらが、広く一般に用いられている気温と比べて、どのような特性があるかを評価するため、黒球温度等の連続観測を、東京都千代田区(2005.6.6日・7.30)、および、茨城県つくば市 (2005.8.10-9.30)で実施した。



写真1 WBGT の連続観測

また、地表面状態の違いによる観測値を評価するため、気象庁の観測資料のほか、福岡県久留米市における観測資料 (2002.8-9、九州工事事務所)、滋賀県彦根市における観測資料 (2005.7-8、滋賀県立大

学)、東京都千代田区における観測資料(2004.8-9、気象業務支援センター)他を、収集した。

表1 WBGT 連続観測の観測項目と使用機器

乾球温度	横河電子機器㈱ Pt 温度計 E-734
露点温度	横河電子機器㈱ 露点温度計 E-771
黒球温度	京都電子工業㈱ 標準黒球温度計 WBGT-101
風向風速	横河電子機器㈱ 風向風速モジュール WM-8841
日射	英弘精機㈱ 全日射計 MS-402
データロガー	横河電子機器㈱ 処理モジュール WM8801-S3

2. 夏季における黒球温度と WBGT

2005年6月6日から7月30日まで、気象業務支援センター屋上において黒球温度を連続計測し、近隣の気象庁観測データを収集し、式(1)により WBGT 値を計算した。

晴天日の観測結果によると、WBGT 値は、午前9時から午後4時まで、25度 (積極的に水分補給する必要がある) を超え、朝早い段階から熱中症の危険が高いことがわかる。また、最高値で見ると、午前9時から午後2時までの時間帯で30度を超えており、気温が午後2時頃にピークになるのに対して、午前中から値が高くなるのが特徴である。

WBGT(°C) WBGTの晴天日の時刻別平均と最大値(2005/6-7:東京)

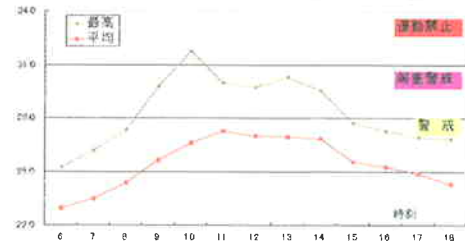


図2 WBGT の時刻別変化

2002年9月の九州技術事務所での観測データによると、夏の晴天日には、日射により、まず黒球温度が上昇し、続いて路面 (地表面) 温度、最後に気温が上昇する。それぞれの温度のピークは、黒球温度が昼頃、路面温度が13時頃、気温は14時頃となる。

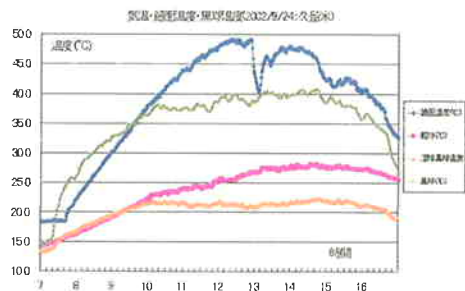


図3 気温・路面温度等の変化

次に、2005年7月の晴天日に、高さによる WBGT 値の違いを、京都電子株式会社 WBGT-101 により比較観測した。成人の顔の高さにあたる 1.5m と、乳幼児の顔の高さにあたる高さ 1m、50cm、および、地表付近高さ 5cm での差を観測した。

高さによる WBGT 値の差は、表 2 に示すとおりであり、高さ 1m では高さ 1.5m に比べて 0.4 度、50cm では 1.1 度、5cm では 2.1 度、それぞれ、WBGT が高かった。

なお、同期間の観測データを隣接する気象庁（芝面）の観測データと比較すると、芝面に比べて、コンクリート面上の方が、気温は 2.5 度、湿球温度は 1.3 度高く、黒球温度は 5 度程度高い。晴天時のコンクリート上では、通常発表される気象庁の観測値を用いた WBGT の推定値より、WBGT 値は約 2 度高いと推定される。

表 2 高さによる WBGT の違い

高さによる違い	WBGT		Ta		RH		Tw		Tg	
	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	1.5mとの差	
100cm	28.5	0.4	34.5	0.6	37.8	-1.8	23.9	0.4	41.0	0.4
50cm	26.9	1.1	30.4	1.9	50.8	-4.5	23.6	0.9	36.3	1.3
5cm	28.8	2.1	32.4	4.0	51.7	-11.5	25.6	1.2	38.4	4.1
気象庁観測値との差										
			Ta	RH	Tw					
1.5m			屋上 差	屋上 差	屋上 差					
			31.8	25	46.8		-5.8	23.9	1.3	

Ta: 乾球温度(°C)、RH: 相対湿度(%), Tw: 湿球温度(°C)、Tg: 黒球温度

3. 黒球温度の推定

次に、簡単化のために黒球を水平な平板に置き換えて、黒球温度計の熱収支を考える。

平板の上には全天日射量 S と大気放射量 L が入り、下には日射の地表面からの反射量 (ref × S) と地表面からの長波放射量 σT_{sfc}^4 が入る。一方、両面からは平板の温度に応じた長波放射量 $2\sigma T_g^4$ と、顕熱 $2H_g$ が放出される。

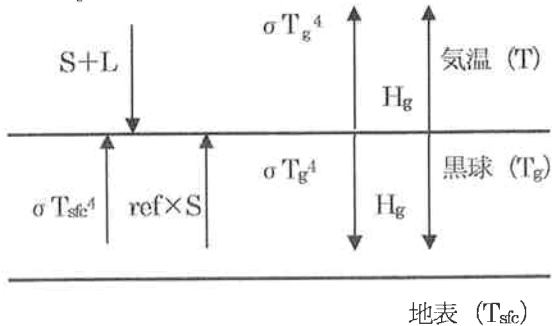


図 4 黒球温度計表面における熱収支

黒球温度計については、表面が乾燥していることから潜熱輸送量を 0 とし、入ってくるエネルギーを左辺、出て行くエネルギーを右辺に記述すると、

$$S + L + \sigma T_{sfc}^4 \text{ (地表面からの放射熱)} + \text{ref} \times S = 2\sigma T_g^4 \text{ (黒球からの放射)} + 2H_g \quad \dots (2)$$

$$H_g = c_p \rho C_h U (T_g - T) \quad \dots (3)$$

S: 全天日射量、L: 大気からの長波放射、T_{sfc}: 地表面温度

ref × S: 日射の地表面からの反射、ref: アルベド

T_g: 黒球温度、T: 気温

H_g: 黒球 (平板で近似) から大気への顕熱輸送量

c_p ρ: 空気の体積熱容量 (1 気圧, 20°C で 1.21 × 10³ JK⁻³m⁻³)

C_h: 顕熱の輸送係数、U: 風速(m/s)

となる。

アルベドを 0.3 としたときの、各要素のエネルギー量を表 3 に示した。

表 3 黒球温度に寄与する成分(2002.9.24: 久留米) 単位: W/m²

月	日	時	分	日射	大気放射	地面放射	反射	放射	顕熱
				S	L	σ T _{sfc} ⁴	S × ref	-σ T _g ⁴	-H
9	24	8	0	326.9	299.9	429.2	98.1	453.2	123.8
9	24	10	0	641.3	314.3	528.2	192.4	520.5	317.6
9	24	12	0	857.4	303.9	601.5	257.2	536.5	473.5
9	24	14	0	706.9	297.0	601.0	212.1	542.3	366.1
9	24	16	0	389.6	300.9	549.7	116.9	518.3	160.2

黒球温度の加熱に、寄与する割合は、正午頃を例にとると、日射 42%、大気からの長波放射 15%、地面からの放射 13%、地表面からの放射熱 30% となる。

例えば、地表面が芝である場合とコンクリートである場合は、アルベドは 0.1 程度替わるため、反射のエネルギーは 80W 程度増加し、地表面温度がコンクリートでは芝より 10 度高いと仮定した場合、地表面からの放射エネルギーは 60W 程度増加する。

なお、2002 年の久留米における観測結果から、C_hU と U の関係を求めると図 5 の結果が得られた。C_h と U の一次回帰式は、

$$C_h \cdot U = 0.0028 \cdot U + 0.021 \quad \dots (4)$$

であった。

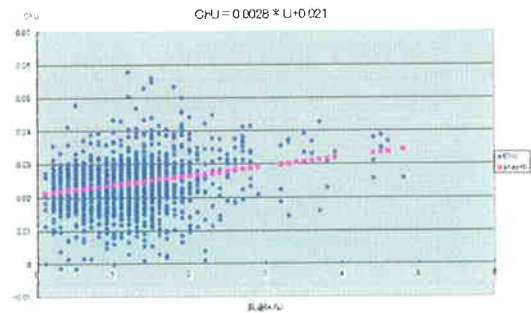


図 5 C_hU と U (2002.9: 久留米)

図 6 は、久留米市における、晴天日(2002 年 9 月 24 日)の乾球温度・黒球温度・地表面温度、および、全天日射量と顕熱輸送の日変化であるが、気温は 14~15 時の間になだらかなピークがあるのに対して、黒球温度は、日射量のピークがある 12 時頃に最高を記録する。

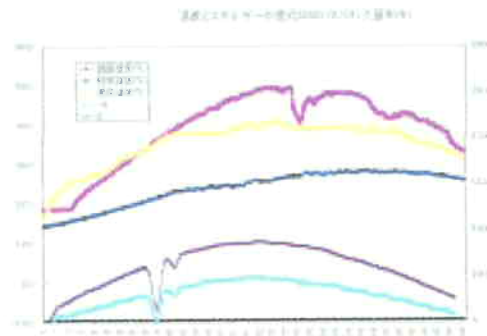


図 6 気温・黒球温度・地表面温度 (左側の目盛) と日射量・顕熱輸送量 (右側の目盛)、(2002/9/24: 久留米市)

また、地表面温度（アスファルト）は地中伝導熱の影響により、黒球温度よりやや遅れるが、12~13 時にピークを示している。一方、顕熱輸送は日射量とほぼ同様の变化傾向を示しており、日射が黒球温度の平衡温度を決める重要な要素であることが推察される。

つぎに、 $T_g - T$ を推定する方法を考える。式 (2) は以下のとおりであるが、

$$S + L + \sigma T_{gc}^4 \text{ (地表面からの輻射熱)} + \text{ref} \times S = 2 \sigma T_g^4 \text{ (黒球からの放射)} + 2 Hg$$

$$Hg = c_p \rho C_u U (T_g - T)$$

σT_g^4 と σT_{sc}^4 は、次の式により近似できる。

$$\sigma T_g^4 \approx \sigma T^4 + 4 \sigma T^3 (T_g - T) \quad \dots\dots (4)$$

$$\sigma T_{sc}^4 \approx \sigma T^4 + 4 \sigma T^3 (T_{sc} - T) \quad \dots\dots (5)$$

したがって、

T_g (黒球温度) - T (気温) は、次の近似式で与えられる。

$$(1 + \text{ref}) S + L + 4 \sigma T^3 (T_{sc} - 5/4 \times T)$$

$$T_g - T \approx \frac{2 (c_p \rho C_u U + 4 \sigma T^3) \dots\dots (6)}$$

分子各項は第1項が大きく、第2、3項は日変化が小さい。黒球温度と気温の差 ($T_g - T$) は、日射への依存性が大きく、大気からの赤外放射および周囲の気温への依存性もある。

また、風速 U が大きいほど温度差は小さくなるが、分母第1項が第2項に比べて大きいので、風速依存性は大きくない。

式 (2)・(3) を用いて、いくつかの日射量 (W/m^2) および風速 (m/s) について、 T_g の平衡温度を推定し、その結果を、表4および図7に示した。

表4 黒球の平衡温度($T_g - T$)の推定例

風速	$Ch=0.021+0.0023 \times U$				$T=30^\circ C$ のとき			
	1050	1000	950	900	850	800	750	700
1	20.6	19.5	18.5	17.5	16.5	15.4	14.4	13.4
2	18.8	17.9	16.9	16	15	14.1	13.2	12.2
3	17.3	16.5	15.6	14.7	13.9	13	12.1	11.2
4	16.1	15.3	14.5	13.6	12.8	12	11.2	10.4
9	11.8	11.2	10.6	10	9.4	8.8	8.2	7.6
16	8.3	8.1	7.7	7.2	6.8	6.4	5.9	5.5

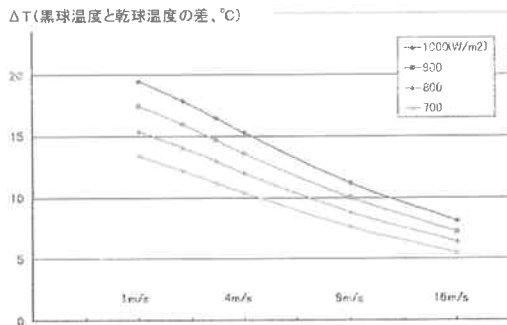


図7 黒球の平衡温度 ($T_g - T$) の推定例

芝とコンクリートでは、150W 程度黒球温度計に入るエネルギーが増加することから、夏季の正午前後で $900w/m^2$ の日射があるとすると (風速は $2m/s$ 程度)、黒球温度と気温の差 ($T_g - T_a$) は $3^\circ C$ 程度、芝面上よりコンクリート上が高くなると推定される。

一方、コンクリートと芝面上での実際の観測例の比較 (彦根

2005.06) では、コンクリート上と芝面上における黒球温度の差は $6.8^\circ C$ 、(乾球) 気温の差は $4.2^\circ C$ であり、黒球温度と気温の差 ($T_g - T$) は $2.6^\circ C$ であった。ある程度理論的にも、黒球温度を推定できると考えられる。

4. おわりに

今回の観測・解析により、夏季の都市における WBGT の代表的な値と基本的な性質を観測・推定することができた。ただ、異なる地表面上で連続観測データが不十分であることから、地表面状態の違いによる WBGT の違い、黒球温度の平衡温度・顕熱による黒球の冷却効果の検証は、十分とは言えず、次年度以降、複数の地表面上における連続観測を通して、WBGT の推定方法を、より、精度の高いものとしていきたい。

最後に、観測データをご提供頂いた国土交通省九州技術事務所の恵藤英明氏、滋賀県立大学の寄本明氏、観測機器をご提供頂いた京都電子工業㈱、横河電子機器㈱、㈱英弘精機、観測にご協力頂いた国立環境研究所の小野雅司氏、および、放射平衡式の推定のための技術指導を頂いた近藤純正氏に、深く感謝いたします。

- (1) Yaglou, C.P. and Minard, C.D.: Control of casualties at military training centers, AM.Med.Ass.Archs.Ind,Health 16, 302-306, 1957.
- (2) 中井誠一, 寄本明, 森本武利: 夏季運動時温熱環境の実態と温熱指標の比較, 体力科学 39(2), 120-125, 1990.
- (3) 近藤 純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支—, 1994