

WBGT の連続観測と地表面・高さによる違い

村山 貢司・*登内 道彦（気象業務支援センター）・丸山 博（京都電子工業株）

1. はじめに

夏季の都市部を中心に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。

屋外における 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、高温環境下での業務従事者の健康管理のため、各国で広く利用されており、表-1 のような行動指針も提示されている。

$$WBGT=0.7 \times Tw + 0.2 \times Tg + 0.1 \times Td \quad (1)$$

Where, Tw : The wet-bulb temperature (degree Celsius)

Tg : The globe temperature (degree Celsius)

Ta : The dry-bulb temperature (degree Celsius)

Table-1. A guideline to prevent heat strokes for athletes (Japan Athletic Association, 1994)

WBGT (°C)	T _a (°C)	T _w (°C)		
31<=	27<=	35<=	Dangerous	Cancel physical exercise
28<=	24<=	31<=	Warning	Stop active physical exercise
25<=	21<=	28<=	Caution	needs to take a rest
21<=	18<=	24<=	Note	needs immediate supply of water
<21	<18	<24	Safe	needs occasional supply of water

T_a : Dry bulb temperature

T_w : Wet bulb Temperature

ただ、WBGT は一般での認知度が低く、感覚的に想像できない数値であり、また、地表面の違いなどによる WBGT 値の違いなどは、まだ明らかにされていない。

本研究では、まず、夏季の都市において、wbgt 値がどのような値をとるかを評価するため、5inch 黒球温度計（京都電子工業株 標準黒球温度計）を用いて、黒球温度等の連続観測を、東京都千代田区（気象業務支援センター屋上:2005.66-7.30）で実施した。なお、周囲の環境条件を表す気温・湿度・日射量・風速などの資料は、隣接する気象庁の観測値（芝面上・強制通風型）を用いた。

また、携帯型の観測機により観測される気温が、気象庁で観測される気温と比較して、どのような差があるかを、携帯型の WBGT 計（京都電子工業株WBGT-101）を用いて、地表面温度などの条件を比較のために観測した（機器の緒元は表-2のとおり、気温などは自然通風式）。

Table-2. Portable WBGT instrument WBGT-101

Factor	Range	Accuracy	Resolution
WBGT	0-50 deg. C	< 1.0 deg. C	0.1 deg. C
Dry bulb Temp.	0-50 deg. C	< 1.0 deg. C	0.1 deg. C
Wet bulb Temp.	0-50 deg. C		
Humidity	10-90%	< 3%	0.1 %
Globe Temp.	0-50 deg. C	< 1.0 deg. C	0.1 deg. C

さらに、WBGT 値などの地表面・高さなどによる違いを観測することを目的として、6月および7月下旬に、全国7箇所で WBGT の同時観測を行った（計測は、すべて京都電子工業株WBGT-101による）。



Photo-1. 5inch globe temperature



Photo-2. Portable WBGT-101

2. 夏季における WBGT・黒球温度の日変化

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(写真-1)において黒球温度を連続計測した。晴天日の観測値によると、WBGT 値は、午前9時から午後4時まで、25度を超え、朝早い段階から熱中症の危険が高い。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。

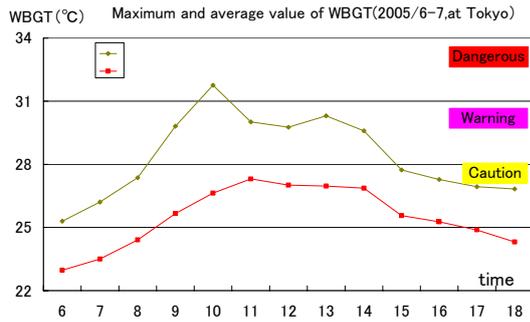


Fig.1 Maximum and average of WBGT in clear days (2005/7-8, at Tokyo)

なお、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ため、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。

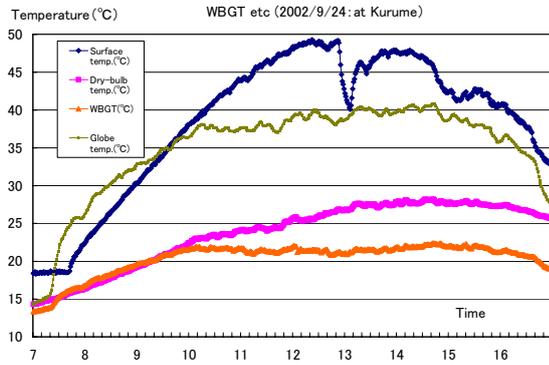


Fig.2 A change of WBGT and so on(2002/09/24, at Kurume)

また、晴天日に観測された、黒球温度 (T_g) と乾球温度 (T_a) の差の日変化によると、地表面が充分温まらず、また、風の弱い午前中は、日射量の増加よりも早く黒球温度が高くなり、地表面が十分に暖かくなった午後は、日射量が減少しても黒球温度は下がりにくい。

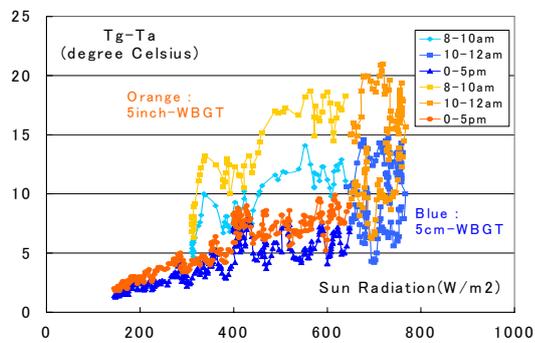


Fig.3 A change of T_g-T_a(2005/06/24, at Tokyo)

3. WBGT の簡易な推定方法

次に、地表面の状態の違いによる黒球温度の観測値の違いを比較するため、2005年8月から10月の期間、茨城県つくば市において、隣接する芝面上とアスファルト路面上で、黒球温度ほかの連続観測を行った(写真-3)



Photo.3(a) Observation at Tsukuba(on the grass field)



Photo.3(b) Observation at Tsukuba(on the concrete road)

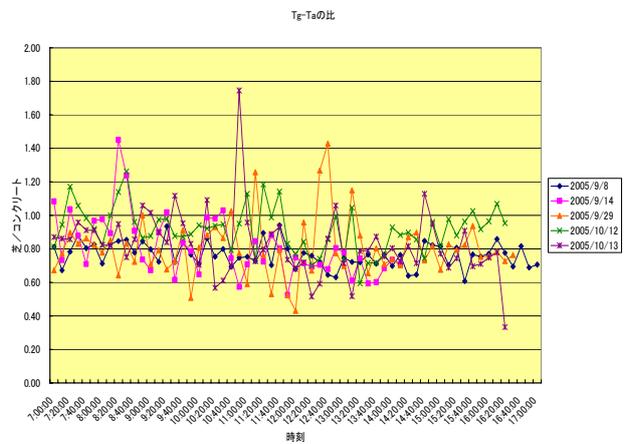


Fig.4 A proportion of T_g-T_a above grass and asphalt

JP.2.8

1日を通して晴天で、かつ、2地点の観測データが連続して得られた5日間について、日変化を図-4に示したが、アスファルト面上におけるT_g-T_aの芝面上におけるT_g-T_aに対する比は、0.75~0.8であった。

また、滋賀県草津市における芝面上の黒球温度の観測値と近傍の気象庁彦根の日射量(2005.9.1-9.10)、および、東京大手町におけるアスファルト上の黒球温度と日射量(2002.9)の関係を、最小二乗法により求めた回帰式は、式(2)のとおりであり、

$$T_g - T_a = 0.0163 * S \quad (\text{アスファルト、久留米})$$

$$T_g - T_a = 0.011 * S \quad (\text{グラウンド上、草津}) \quad (2)$$

係数で比較すると、T_g-T_aの芝面の値のコンクリート上における値に対する比は、0.67であった。

式(1)は、 $\Delta T_g = T_g - T_a$ とおくと、

$$WBGT = 0.7 * T_w + 0.2 * \Delta T_g + 0.3 * T_a \quad (3)$$

と変形できるので、夏季晴天時の全天日射量が、900(W/m²)程度であることから、晴天時において、T_g-T_aはコンクリートやアスファルト上では、芝面に比べ3~7°C高くなる。

また、2005年7月の晴天日(7/21,27,29)に、東京都大手町で観測した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、T_w, T_g, T_aの各値は、芝面(気象庁の露場での観測値)に比べて、コンクリート面上(屋上での観測値)の方が、気温は2.5度、湿球温度は1.3度高い。晴天時のコンクリート上では、芝面上で観測されるWBGTの推定値より、WBGT値は約2.5~3度高いと推定される。

Table.3 The difference of each factor above concrete and grass

	Dry-bulb temperature	Humidity	Wet-bulb temperature
Difference	+2.5	-5.8	+1.3
Concrete	31.8	46.8	23.9
Grass	29.3	52.6	22.6

気象庁の観測する気温や予報に使われる気温は、地面輻射の小さな芝面上の通常風通しの良い場所と想定しており、気象庁の予想する温度などの資料を用いた予測値に比べ、都市のアスファルトやコンクリート上では、WBGT値は更に2.5~3°C高く、表-1の行動指針上は、1ランク危険側に考えた行動が必要である。

4. 共同観測の結果と高さによるWBGT値の違い

6月および7月下旬に、全国7箇所WBGTの同時観測を行った(計測は、すべて京都電子工業株式会社WBGT-101による)。

Table 4. The result of simultaneous observation (2005)

surface	date	Δt	S	ws	N	a1
Otaru concrete	6/20,21,22,23,24	4.5	520.7	2.3	50	0.0099
grass	7/25,26,28	1.9	435.5	2.6	30	0.0079
Yamagata grass	6/24,7/28,29	2.3	615.2	2.3	30	0.0072
Tokyo concrete	6/24,7/27,28	2.8	628.0	4.1	1400	0.0078
Gifu concrete	7/28,29,8/1,2,3	4.1	598.9	2.5	40	0.0094
Shiga concrete	6/24,7/28,29,8/4	5.5	607.9	2.3	27	0.0111
grass		2.3	534.3	2.4	40	0.0092
Kyoto grass	6/24,7/25,28,29	2.7	509.9	2.6	40	0.0098
Kokura ground	6/23,24	2.9	609.2	2.2	20	0.0082
con/grass	6/23,24	3.0	617.0	2.2	19	0.0090
con/grass	7/25,26,27,28	2.4	610.5	3.3	26	0.0074

Δt(°C): The difference of dry-bulb temperature on site compared to the nearest JMA observatory's dat
 S(W/m²): Average sun radiation at the nearest JMA observatory
 ws(m/s): Average wind speed at the nearest JMA observatory
 N: The number of observed data
 a: The proportion coefficient calculated statistically (when T_g-T_a = a * S)
 T_g: The globe temperature (°C)
 T_a: The dry-bulb temperature (°C)
 S: Sun Radiation (W/m²)

表-4は、各地の観測値と最寄りの気象観測点との乾球温度の差、T_g-T_aを日射量の一時間回帰式で説明できると仮定したときに、最小二乗法により求められる係数a、および、観測期間中の日射量および風速の平均値(いずれも最寄りの気象庁気象観測点)である。WBGT-101では、乾球温度が自然通風式であり、日射や輻射に対するシェルターの遮蔽効果が小さいことから、気象庁観測点の観測値に比べ、乾球温度で2.5°C程度高く観測されていると考えられ、WBGT値に換算したときに、0.7°C程度の上昇をもたらすと考えられる。表-5には、観測期間中の各地点における、各温度の最大値を示した。

Table 5. The maximum value of each factor (2005)

	surface	date	WBGT(max)	Ta(max)	Tg(max)	Tw(max)	Ta at JMA
Otaru		6/20,21,22,23,24	27.2	33.4	40.5	23.4	31.2
		7/25,26,28	28.6	32.2	38.4	25.3	27.3
Yamagata	grass	6/24,7/28,29	29.8	37.5	43.0	26.2	34.0
Tokyo	concrete	6/24,7/27,28	31.0	40.5	48.3	26.8	35.5
Gifu	concrete	7/28,29,8/1,2,3	33.7	40.1	49.9	29.3	35.1
Shiga	concrete	6/24,7/28,29,8/4	32.6	37.0	47.1	28.8	32.5
	grass		31.9	35.6	44.2	27.8	32.5
Kyoto	grass	6/24,7/25,28,29	31.5	38.5	47.0	27.5	34.8
Kokura	ground	6/23,24	30.2	36.5	40.9	27.0	30.7
	con/grass	6/23,24	29.5	33.9	40.5	26.2	30.7
	con/grass	7/25,26,27,28	31.5	34.6	41.6	28.1	32.2

(Note) Every data was observed in 10 minutes interval
 [Ta at JMA] is the maximum temperature at the nearest JMA observatory

次に、身長の違いは、大人よりも暑く熱せられた地表面に近く位置することから、高さによるWBGTなどの違いを、東京都大手町のコンクリート上において、WBGT-101により比較観測を行なった。

Table.6 The difference of value depends on observation height.

	WBGT	Ta	H	Tw	Tg					
	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ					
100m	28.5	04	34.5	06	37.8	-1.8	23.9	04	41	04
50cm	26.9	1.1	30.4	1.9	30.8	-4.5	23.6	0.9	36.3	1.3
5cm	28.8	2.1	32.4	4	51.7	-11.5	25.6	1.2	38.4	4.1

WBGT: Wet-bulb globe temperature(°C)
 Ta: The dry-bulb temperature(°C)
 H: The relative humidity(%)
 Tw: The wet-bulb temperature(°C)
 Tg: The globe temperature(°C)
 Δ: The difference compared to the same value at 100m

高さによるWBGT値の差は、表6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が高く、乳幼児はさらに、高温にさらされていることがわかる。

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することができた。ただ、異なる地表面上での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討は、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、小樽商科大学の花輪啓一氏、山形大学の大貫義人氏、岐阜大学の井奈波良一氏、滋賀県立大学の寄本明氏、京都女子大学の中井

JP.2.8

誠一氏、産業医科大学の堀江正知氏、観測機器をご提供頂いた、京都電子工業㈱、横河電子機器㈱、(株)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.