

<研究ノート>日本における夏季のWBGT(湿球黒球温度)の地理的分布に関する気候学的考察

福井, 健弘 / FUKUI, Takehiro

(出版者 / Publisher)

法政大学地理学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

JOURNAL of THE GEOGRAPHICAL SOCIETY OF HOSEI UNIVERSITY / 法政地理

(巻 / Volume)

50

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

14

(発行年 / Year)

2018-03-20

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00014542>

日本における夏季の WBGT (湿球黒球温度) の 地理的分布に関する気候学的考察

福井 健弘

WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature : 湿球黒球温度) に関する従来の研究は、主に熱中症発生数の統計を用いて熱中症の経年的な増加傾向について調べたものや、定義式自体の特性やその妥当性について評価し、それを改変したものなどが挙げられる。一方で、鈴木・日下 (2015) のような地理的視点で捉えた研究は、事例数としては不十分であると考えられる。本研究は、日本を対象に WBGT 値が高く現れることが想定される 8 月において、WBGT の地理的分布傾向に対する地域性やその時の気圧配置、さらに算出された WBGT 値に対する気象要素の特徴について考察することを目的とした。

本研究で得られた結果は、以下の通りである。WBGT $31.0^{\circ}\text{C} \leq X$ が 3 時間 (12~15 時) 続く地点が複数現れた事例に対する気圧配置は、南高北低型になっていることが多い。WBGT が 31.0°C を超えていた地点は、太平洋高気圧の縁辺部付近に当たっていて、850 hPa 面の相当温位は周辺に比べて高い値を示している。WBGT が 31.0°C を超える値が出現した際、熊本は海沿いから吹く風の頻度が高い。奈良と南大東島は風向頻度に極端な偏りは見られないが、奈良は閉鎖的な地形の影響で風速が小さい事例が多く、南大東島は山などの障害物が存在しない島嶼部ゆえ、風速が 6.0 m/s 以上である事例も僅かながら現れた。

キーワード：湿球黒球温度、地域性、南高北低型、相当温位

Keywords : Wet-Bulb Globe Temperature, locality, southern high and northern low pressure pattern, equivalent potential temperature.

I はじめに

WBGT (Wet-Bulb Globe Temperature : 湿球黒球温度) とは、1957 年に米国の環境学者である Yaglou and Minard (1957) によって考案された、熱中症¹⁾ 発症の可能性の大小を示す指標の 1 つである (以下、WBGT と示す)。1982 年には労働環境や運動環境の指針として有効であると広く認められ、ISO (国際標準化機構) 等で国際基準として位置付けられて以降、日本でもその指標が用いられるようになった。その定義となる式²⁾ が以下の (A) である。なお、ここで T_w は湿球温度、 T_g は黒球温度、 T_a は乾球温度を各々示しており、単位は全て $^{\circ}\text{C}$ である。

$$WBGT = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \cdots (A)$$

この計算式には、人体の熱収支 (人体が外部から受け取る熱と、外部へ放出する熱の差) に与える影響の大きい気温・湿度・日射といった要素が含まれていることを想定した観測 (第 1, 2 図) により行われている。

日本生気象学会では、熱中症を予防するための指標 (第 1 表) として WBGT を採用している。また環境省では平成 18 年度 (2006) より「環境省熱中症予防情報サイト」を開設し、熱中症についての知識や暑熱環境のメカニズムなどについて説明しており、その中に WBGT に関する基礎知識などの情報を取り入れている。

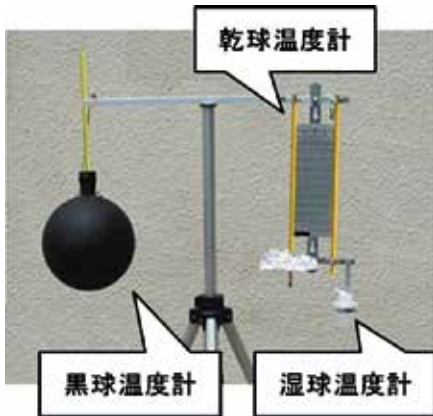
日本において WBGT に関する研究として、中井 (2010) がある。この研究は、1970~2009 年を対象に新聞紙上で報道された運動時における熱中症発生事例 343 件を用いて、熱中症の発生が増加する WBGT の値について調査した研究である。その結果、WBGT が 23°C 以上になると発生数が

目立ち始め、25℃以上で発生数が増加して、28～30℃（厳重警戒域）の範囲が特に発生数が多くなっていることを示している。

しかし、中には（A）の式について疑問を呈する研究者もいる。例えば、佐古井・持田（2009）がその1つとして挙げられる。すなわち、ここでは（A）の式について $T_w \cdot T_g \cdot T_a$ の和を用いた表現方法には、皮膚の温度や代謝量といった人体における熱量、また日常生活における労働量や衣服の影響などが考慮されていないのではないかと指摘している。そのことから、佐古井・持田（2009）では日射量や風速といった環境的要因に人体の熱収支理論を考慮した推定式³⁾を提唱した。この論文のまとめとして、定義式から求めた WBGT は人と環境との熱収支に着目した場合、必ずしも正しい値とは言えない可能性がある⁴⁾と指摘している。しかし、佐古井・持田（2009）で独

自に提唱した推定式は、あくまで熱収支理論から導き出したものに過ぎないため、実験からの吟味も不可欠であることを示唆している。

日本における WBGT に関する研究は、主に熱中症発症数の統計や定義式に対する評価を行なったものが挙げられるが、広いスケールを対象に地理的視点で行なった研究は必ずしも十分とは言えない。その理由は、WBGT を算出するための観測地点が極端に少ない点が挙げられる。WBGT の定義となる式に基づいてその値を算出するためには、（A）にある通り、3種類の気象測定値（湿球温度・黒球温度・乾球温度）が必要である（第1図）。とりわけ黒球温度が WBGT を算定する上で重要となるが、日本では観測地点がわずか9カ所⁴⁾に止まっている。また湿球温度も同様にデータが存在しないため、Yaglou and Minard（1957）が考案した計算式をそのまま適用することが出来



第1図 WBGTの観測に用いる3種類の温度計



第2図 WBGTの観測風景

第1表 日常生活における WBGT（湿球黒球温度）の温度基準と注意事項（日本生気象学会による）

温度基準(WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 ($31.0^{\circ}\text{C} \leq X$)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては 安静状態でも発生する危険性が高い。 外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 ($28.0^{\circ}\text{C} \leq X < 31.0$)		外出時は炎天下を避け、 室内では室温の上昇に注意する。
警戒 ($25.0^{\circ}\text{C} \leq X < 28.0$)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は 定期的に十分に休息を取れ入れる。
注意 ($X < 25.0^{\circ}\text{C}$)	強い生活活動でおこる危険性	一般に危険性は少ないが、 激しい運動や重労働時には発生する危険性がある。

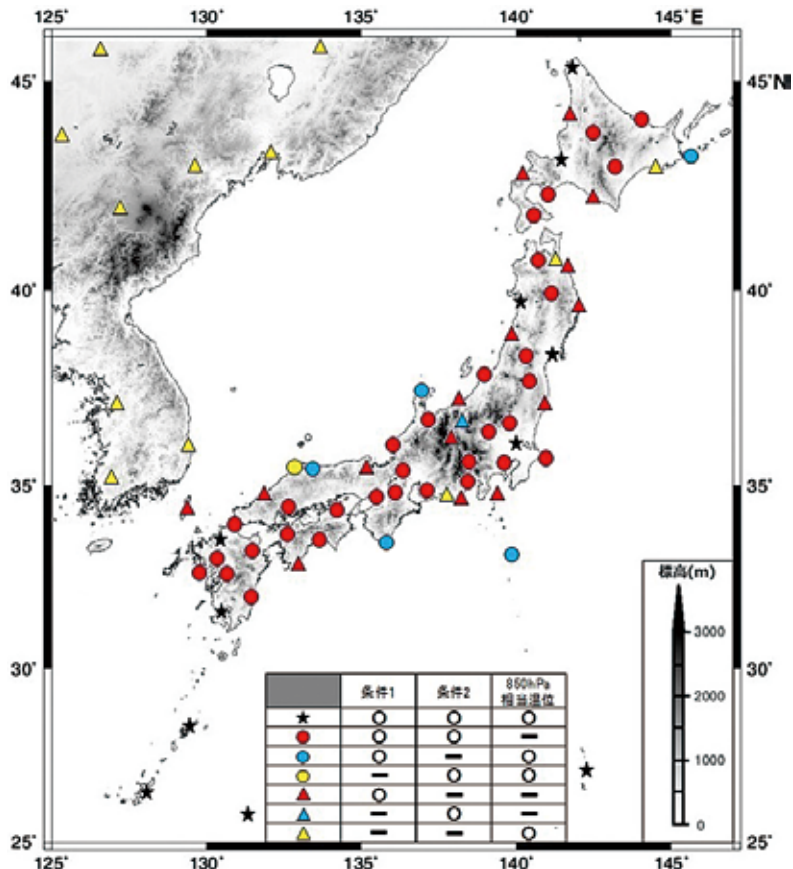
※稲葉・朝山（2012）：‘日常生活における熱中症予防指針’（日本生気象学会）の概要より作成

ないという問題がある。小野・登内 (2014) では、その点を考慮して複数の気象要素を用いた WBGT の代替式⁵⁾を提唱した。しかし、この先行研究でも定義式の改変に止まっており、地理学的視点に立脚した内容とは言えない。そのような状況の中で、鈴木・日下 (2015) は (A) の式を用いて研究を行なっている。それは 12~18 時を日中と定義して、日本を対象に現代 (1991~2010 年) から将来 (2081~2100 年) にかけて WBGT (20 年平均) の分布傾向の変化やその値の上昇量の地域差についてシミュレーションを行なった研究である。結果として、現代における WBGT の平均値は、将来的には約 2~4℃ 上昇する予想となり、上昇量については西日本側よりも北日本側の方が著しくなると予測している。その計算方法については第 2 章の第 3 節第 1 項で改めて説明するが、まず登内・村山 (2008) によって T_g (黒球温度)

を求め、Tetens (1930) および Sprung (1888) の式から T_w (湿球温度) を算出して、それらを (A) の式に代入して WBGT を算出するという手順である。

しかしながら、前述したように 12~18 時を日中と定義し、20 年平均した WBGT を用いている。そのため地域性に関する考察は可能であるものの、その値が高くなる際の大気の状態や他の気象要素との関係について追究を試みるとなると、平均した値である限り、それには無理があると思われる。

そこで本研究は、日本列島を対象に WBGT が高く現れることが想定される 8 月において、WBGT の分布傾向に対する地域性やその時の気圧配置、さらに地点を限定して、WBGT の値が 31.0℃ を超えた際の風向・風速の特徴について考察することを目的とした。



第 3 図 対象地点図 (条件 1, 2 は本文参照)

第2表 研究対象地点一覧 (条件1, 2は本文参照)

地域名	地方名	都道府県名	観測所名	WBGT 地域区分②		850hPa 相当温位	地域名	地方名	都道府県名	観測所名	WBGT 地域区分②		850hPa 相当温位			
				条件1	条件2						条件1	条件2				
北日本	北海道	北海道	稚内	○	○	○	東日本	北陸	新潟	新潟	○	○	○			
			留萌	○	○	○				高田	○	○	○			
			札幌	○	○	○				富山	○	○	○			
			寿都	○	○	○				石川	○	○	○			
			旭川	○	○	○				福井	○	○	○			
			網走	○	○	○				大塚	○	○	○			
			根室	○	○	○		沼賀	○	○	○					
			釧路	○	○	○		彦根	○	○	○					
			帯広	○	○	○		奈良	○	○	○					
			室蘭	○	○	○		和歌山	○	○	○					
			滝川	○	○	○		京都	○	○	○					
			函館	○	○	○		広島	○	○	○					
			青森	○	○	○		鳥取	○	○	○					
	東北	青森	三沢(飛行場)	○	○	○	島根	○	○	○						
			八戸	○	○	○	浜田	○	○	○						
			秋田	○	○	○	香川	○	○	○						
			盛岡	○	○	○	愛媛	○	○	○						
			岩手	○	○	○	高知	○	○	○						
			宮城	○	○	○	高知	○	○	○						
			山形	○	○	○	高知	○	○	○						
東日本	関東甲信	東京	東京	○	○	○	西日本	四国	香川	高松	○	○	○			
			大島	○	○	○				愛媛	○	○	○			
			八丈島	○	○	○				高知	○	○	○			
			父島	○	○	○				高知	○	○	○			
			千歳	○	○	○				高知	○	○	○			
			群馬	○	○	○				高知	○	○	○			
			栃木	○	○	○		高知	○	○	○					
			茨城	○	○	○		山口	○	○	○					
			山梨	○	○	○		福岡	○	○	○					
			長野	○	○	○		佐賀	○	○	○					
			東海	静岡	静岡	○		○	○	九州北部	福岡	福岡	○	○	○	
					浜松(飛行場)	○		○	○			佐賀	○	○	○	
					御前崎	○		○	○			長崎	○	○	○	
豊知	○	○			○	鹿屋	○	○	○							
名古屋	○	○			○	大分	○	○	○							
名古屋	○	○			○	熊本	○	○	○							
東日本	関東甲信	東京	東京	○	○	○	九州南部・奄美	鹿児島	鹿児島	○	○	○				
			大島	○	○	○			宮崎	○	○	○				
			八丈島	○	○	○			鹿児島	○	○	○				
			父島	○	○	○			鹿児島	○	○	○				
			千歳	○	○	○			鹿児島	○	○	○				
			群馬	○	○	○			鹿児島	○	○	○				
			栃木	○	○	○		鹿児島	○	○	○					
			茨城	○	○	○		鹿児島	○	○	○					
			山梨	○	○	○		鹿児島	○	○	○					
			長野	○	○	○		鹿児島	○	○	○					
			東海	静岡	静岡	○		○	○	沖縄	沖縄	沖縄	○	○	○	
					浜松(飛行場)	○		○	○			南大東島	○	○	○	
					御前崎	○		○	○							
豊知	○	○			○											
名古屋	○	○			○											
名古屋	○	○			○											
東日本	関東甲信	東京	東京	○	○	○	ロシア	ロシア	Dalnerechensk	○	○	○				
			大島	○	○	○			Vladivostok	○	○	○				
			八丈島	○	○	○			RKSO Osan	○	○	○				
			父島	○	○	○			Pohang	○	○	○				
			千歳	○	○	○			RKJJ Kwangju	○	○	○				
			群馬	○	○	○			Harbin	○	○	○				
			栃木	○	○	○			ZVCC Changchun	○	○	○				
			茨城	○	○	○			Yanji	○	○	○				
			山梨	○	○	○			Linjiang	○	○	○				
			長野	○	○	○										
			東海	静岡	静岡	○			○	○	大韓民国	大韓民国	RKSO Osan	○	○	○
					浜松(飛行場)	○			○	○			Pohang	○	○	○
					御前崎	○			○	○			RKJJ Kwangju	○	○	○
豊知	○	○			○	Harbin	○	○	○							
名古屋	○	○			○	ZVCC Changchun	○	○	○							
名古屋	○	○			○	Yanji	○	○	○							

II 研究方法

1. 研究対象地域と対象地点

本研究では、日本列島（島嶼部を含む）を対象に高い WBGT 値の地点が多数現れた日の地理的な分布（地域性）や大気の状態との関係などを考察するために、北緯 25°~46°，東経 125°~147° を研究対象範囲とした。WBGT の地理的分布傾向の考察については、本研究で定めた条件に合致する気象官署（最大 65 地点・第 3 図・第 2 表）を対象に行なう⁶⁾。さらにまた 850 hPa 高層天気図とワイオミング大学の高層気象データ（研究対象範囲内に存在する 29 地点）を使用した⁶⁾（第 2 表）。

2. 使用資料と研究対象期間

本研究の解析に使用したデータは、気象官署で観測されている気温（℃），相対湿度（%），全天日射量（MJ/m²），風速（m/s）の 1 時間値デー

タ（12~15 時），アジア地上解析天気図，高層天気図（850 hPa），ワイオミング大学の高層気象データである。前述した 4 種類の気象要素を選出したのは、本研究で扱う WBGT の計算に必要なからであると共に、気温、湿度、日射、輻射熱⁷⁾が高く、そして風が弱いほど熱中症になるリスクが大きくなるためである。

研究対象期間は 1990~2016 年の各 8 月とした。また、研究対象期間が 1990 年以降としたのは、使用する気象要素の 1 つである全天日射量データの有無に参与している。加えて、全天日射量を観測している気象官署に限られていることから、前節の通りとなる⁶⁾。なお、アジア地上解析天気図・高層天気図・ワイオミング大学の高層気象データは、すべて 0900JST を使用した。

3. 研究解析方法

(1) WBGT の算出方法

本研究の解析において、まず WBGT の値を算出する必要がある。第 1 章で述べた通り、WBGT

の算出に必要とされる3種類の温度のうち、湿球温度と黒球温度は気象庁で観測が行われていない。一方、鈴木・日下（2015）ではWBGTの定義式を用いて地理的研究を行なっている。そこでこの計算方法によると、気象庁で観測された気温、Tetens (B₁)・Sprung (B₂) の計算式から求めた湿球温度⁸⁾、そして登内・村山（2008）から求めた黒球温度⁹⁾ (C₁ または C₂) を、定義式 (A) に代入して算出するというやり方である。Ta は乾球温度 (°C)、Tg は黒球温度 (°C)、Tw は湿球温度 (°C)、S は全天日射量 (W/m²)、U は平均風速 (m/s)、e は水蒸気圧 (hPa)、esat は飽和水蒸気圧 (hPa)、P は気圧 (hPa) を示す。

◆WBGT の定義となる式

(A : Yaglou and Minard, 1957)

$$WBGT = 0.7 Tw + 0.2 Tg + 0.1 Ta$$

◆湿球温度の推定式⁸⁾

(B₁ : Tetens の式, 1930)

$$esat(Ta) = 6.1078 \times 10^4 \cdot (7.5Ta / (Ta + 237.3))$$

(B₂ : Sprung の式, 1888)

$$e = esat(Tw) - 0.000662P(Ta - Tw)$$

◆黒球温度の推定式⁹⁾

(登内・村山, 2008)

$$Tg = Ta + 12.1 + 0.0067S - 2.4U^{1/2} \quad (1/2)$$

(C₁ : S > 400)

$$Tg = Ta - 0.3 + 0.0256S - 0.18U^{1/2} \quad (1/2)$$

(C₂ : S ≤ 400)









本研究では上記に記載した計算方法で WBGT

を1時間ごとに求めて解析に使用する。本研究における WBGT の評価として、温度基準を4段階（危険：31.0°C ≤ X，嚴重警戒：28.0°C ≤ X < 31.0°C，警戒：25.0°C ≤ X < 28.0°C，注意：X < 25.0°C）に分けた¹⁰⁾。しかし1つの基準に対する温度幅が3°C近くあるため、各温度基準をさらに2分割して計8段階で評価を行う（第3表）。













(2) 研究対象日と対象地点の抽出について

算出された WBGT を基にその地域性や大気の状態、および気象要素との関係を考察するために、対象日の抽出条件を定めた。地域性の考察には2種類の条件を設定して、いずれかの条件に当てはまる日を研究対象日として抽出した。その1つ目の条件として、12~15時まで3時間継続して WBGT 31.0°C（危険）を超えている地点が、全対象地点数の10%¹¹⁾を超えている日であること。2つ目の条件として、近年で日最高気温が40.0°Cを超えた地点が現れた日であること。その理由は、最高気温が40.0°Cを超える地点が現れるような暑熱環境となっている時における、WBGT の分布傾向を把握するためである。なお、注記6に記載した通り、WBGT を算出するための気象要素の1つである全天日射量は2008年から欠測する地点が現れている。そのため、1つ目の条件は1990~2007年までを解析対象とした。2つ目の条件は、気象庁の歴代全国ランキングから8月の最高気温を選択し、40.0°Cを超えた日を抽出した。なお、条件2について、既に条件1で抽出済である日や研究対象外の年は除外する。

第3表 本研究における WBGT の温度基準

温度基準	表記	記号	WBGT(°C)
危険	Danger		32.5 ≤ X
			31.0 ≤ X < 32.5
嚴重警戒	Strict		29.5 ≤ X < 31.0
			28.0 ≤ X < 29.5
警戒	Warning		26.5 ≤ X < 28.0
			25.0 ≤ X < 26.5
注意	Attention		23.5 ≤ X < 25.0
			X < 23.5
		✳	欠測

第4表 850 hPa 面の相当温位における風向風速の基準 (1 kt = 0.514 m/s)

	Kt		Kt
	50 ~		20 ~ 24
	45 ~ 49		15 ~ 19
	40 ~ 44		10 ~ 14
	35 ~ 39		5 ~ 9
	30 ~ 34		1 ~ 4
	25 ~ 29		0
		✳	欠測

次に、WBGTと風向・風速との関係については、1990～2007年（注記6を参照）の12～15時を対象に、時間単位別に算出されたWBGTの中で、その値が31.0℃を超えたものを取り上げる。各地点でWBGT 31.0℃ ≤ Xの事例を、「出現回数」として積算¹²⁾し、ヒストグラム（第8図）を作成する。そのグラフから、WBGT 31.0℃ ≤ Xの出現回数の上位10地点を選出し、その10地点を「沿岸部型」、「内陸部型」、「島嶼部型」に分類する。タイプ別にその出現回数が最も多かった地点を、1事例ずつ取り上げて考察を行なう（第6表）。以上のような条件を設定した結果、抽出された研究対象日と対象地点は第5表の通りとなる。

第5表 研究対象日および対象地点の一覧

①	WBGT 31.0℃ ≤ Xが3時間連続で出現した日 (1990～2007年, 20事例)
1994年8月	1日 (11%)・2日 (24%)・3日 (11%) 4日 (11%)・5日 (14%)・6日 (22%) 7日 (30%)・8日 (17%)
1995年8月	19日 (17%)・20日 (13%)
1998年8月	3日 (13%)・4日 (13%)・7日 (13%) 11日 (13%)・12日 (13%)
2001年8月	1日 (11%)・3日 (13%)
2007年8月	15日 (11%)・16日 (14%)・17日 (11%)
②	日最高気温で40.0℃を超えた地点が出現した日 (2008～2016年, 2事例)
2013年8月	10日 (甲府 (40.7℃)・勝沼 (40.5℃)) 12日 (江川崎 (41.0℃))
③	WBGT 31.0℃ ≤ X (危険)出現時における 風向・風速の特徴について (1990～2007年, 計3地点)
沿岸部型	熊本 (374回)
内陸部型	奈良 (264回)
島嶼部型	南大東島 (265回)

III 結果と考察

1. WBGT (危険) が3時間連続で出現した日 (全対象地点数の10%を超えた日を対象)

3時間(12～15時)連続してWBGT値が31.0℃を超えている地点数が全対象地点数の10%以上出現した20事例に対し、WBGT地域区分図と850 hPa面の相当温位図(0900JST)を作成し、アジア地上解析天気図(0900JST)を加えて考察した。作成した図から時間帯別の分布傾向を始め、その日の気圧配置や気象要素(気温や風向な

ど)、850 hPa面の相当温位に対する大気の状態といった内容を読み取り、WBGT分布と対応させながら地域性を調べた。WBGT地域区分図には温度基準が異なる場所に境界線を入れ、各温度基準を示す英語表記の頭文字を境界線付近に表す。850 hPa面の相当温位は3Kごとの値を線で結び、各地点に風向風速を示す(第4表)。本節では、WBGT 31.0℃ ≤ Xが、3時間連続で出現した地点数が最も多かった1994年8月7日を代表事例とした。WBGT地域区分図は13時と14時の図を取り上げる。

◆ 1994年8月7日(第4図, 第5図)

WBGT 31.0℃を超える値が3時間継続した地点は、19カ所(福島・東京・前橋・宇都宮・館野・甲府・高田・御前崎・名古屋・大阪・彦根・奈良・潮岬・広島・米子・高松・佐賀・熊本・宮崎)現れた。さらにWBGTが32.5℃を超えた地点は9カ所(前橋・宇都宮・館野・高田・名古屋・彦根・奈良・米子・下関)である。この事例は、全体的にWBGTが「危険」を示す範囲が広く、東北南部以南に広範に分布している。

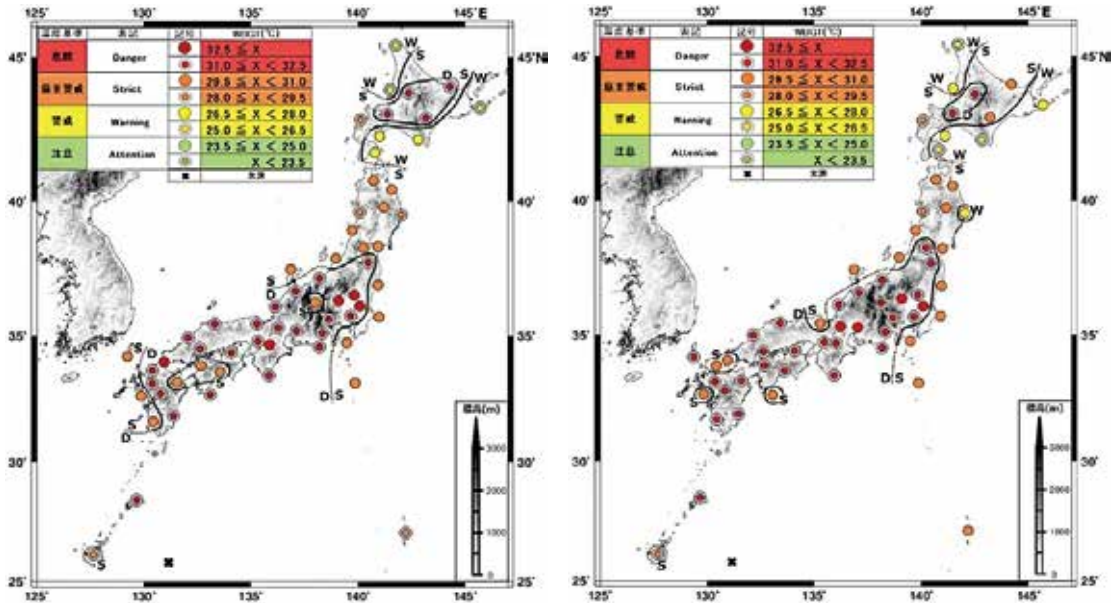
日本列島の南岸上に高気圧の中心がある。その一方で、太平洋上には熱帯低気圧があり、フィリピン海には最大風速が64 kt (32.7 m/s)以上を示す台風が位置している。また、樺太付近には前線を伴う低気圧があることから南高北低型の気圧配置といえる。南西諸島は太平洋高気圧と台風の影響により南東の風向となっている。東日本～近畿では高気圧の縁辺部にあたることから北西の風向を示している。

850 hPa面の相当温位(第5図の右)を参照すると、日本列島の西から東にかけて相当温位の値が高くなり、つくば(館野)では348 Kを超えている。東日本側は高気圧の縁辺部に当たるために、相当温位が高くなっていると考えられる。

2. 日最高気温で40.0℃を超えた地点が出現した日

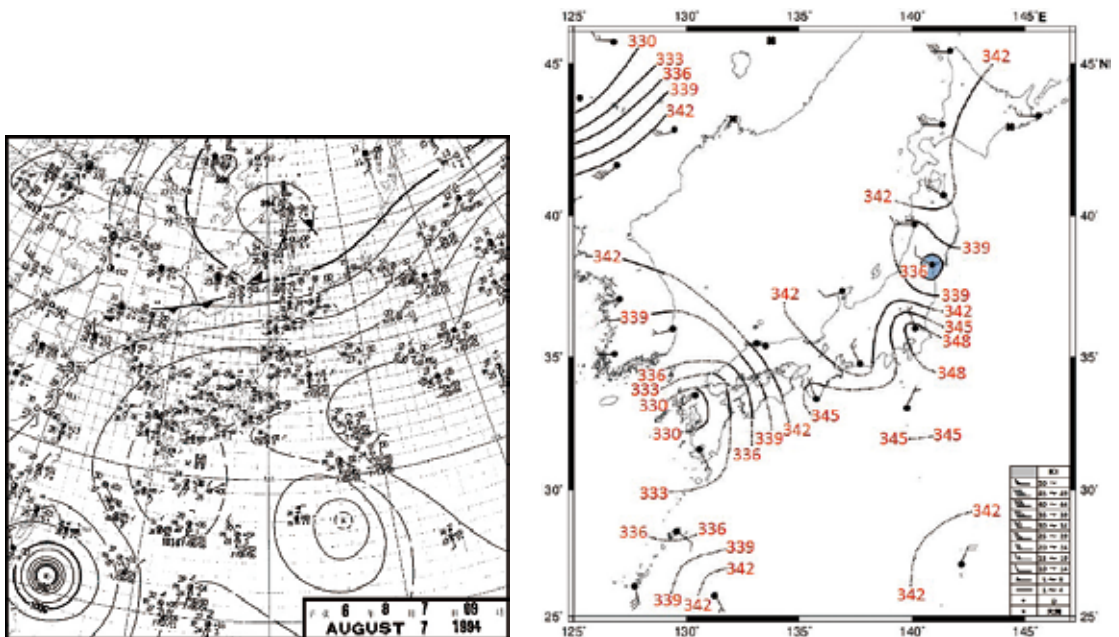
気象庁の歴代全国ランキングにおける8月の日最高気温から40.0℃を超えた日を対象に、WBGT分布の地域性や大気の状態を考察した。8月に

日本における夏季の WBGT (湿球黒球温度) の地理的分布に関する気候学的考察



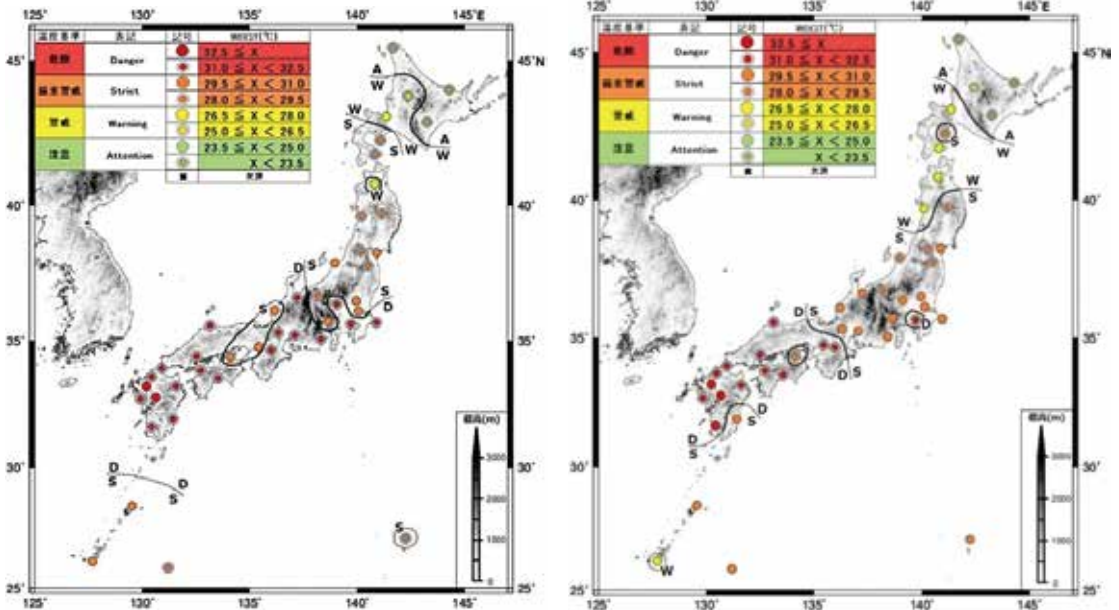
第4図 1994年8月7日におけるWBGT地域区分図. 13時(左図) 14時(右図)

※ WBGT の凡例は第3表に記載.



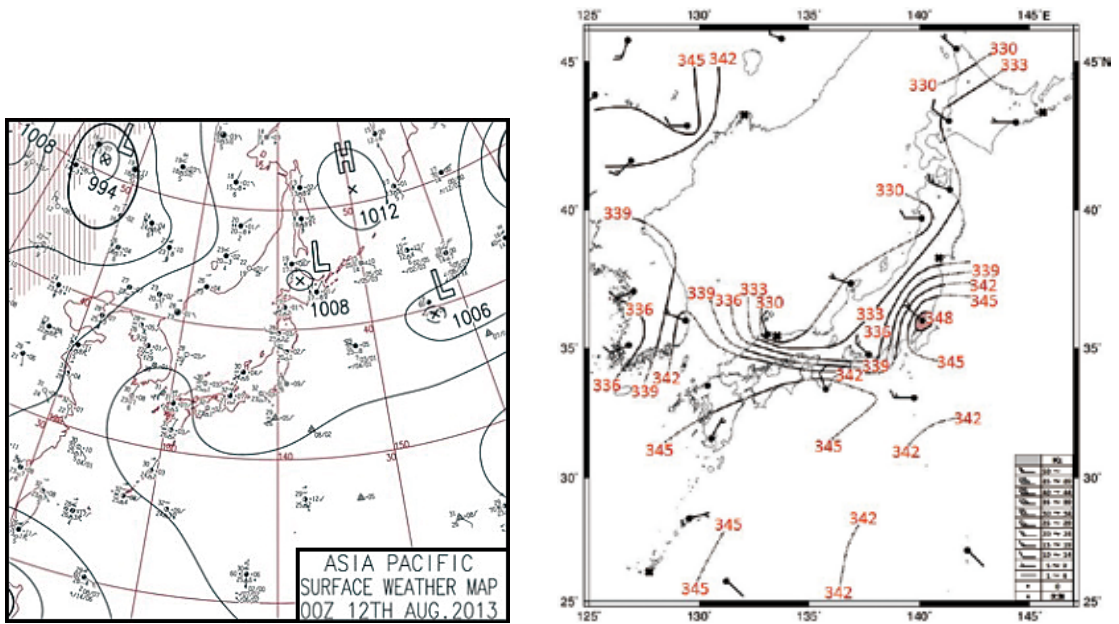
第5図 1994年8月7日におけるアジア地上解析天気図(左図)と850hPa面の相当温位図(右図)

※共に0900JSTを使用. 相当温位図における風向の凡例は第4表に記載.



第6図 2013年8月12日におけるWBGT地域区分図. 13時(左図) 14時(右図)

※ WBGTの凡例は第3表に記載.



第7図 2013年8月12日におけるアジア地上解析天気図(左図)と850hPa面の相当温位図(右図)

※共に0900JSTを使用. 相当温位図における風向の凡例は第4表に記載.

40.0℃を超える日の中で、既に条件1で選出されている日や研究対象外の年を除外した結果が、第5表の②に示した2事例となる。本節では、高知県四万十市江川崎で41.0℃を観測した2013年8月12日を代表事例とした。WBGT地域区分図は13時と14時の図を取り上げる。

◆ 2013年8月12日（第6図、第7図）

この年の8月10日に高知県四万十市江川崎で最高気温40.7℃が観測されたが、8月12日はそれを上回り、国内の観測史上第1位の記録である41.0℃を更新した（ただし、観測地点である高知市では33.0℃程度だった）。この日も各地で猛暑が継続した日とされたものの、WBGT 31.0℃の範囲は、第6図において関東から西に存在する結果となった。特に佐賀・熊本・鹿児島ではWBGTが32.5℃を超えている。また第6図では、関東地方でもWBGTが31.0℃を超え、東京は3時間連続して「危険」の基準となっている。

日本の南方海上は太平洋高気圧に覆われ、その西端は朝鮮半島まで伸びていて、北海道に低気圧の中心が存在することから、南高北低型の気圧配置と言える。特にこの事例は九州付近に小さい高気圧が生じており、朝鮮半島付近では鯨の尻尾のような等圧線が描かれている。この気圧配置は「鯨の尾型」と表現されており、蒸し暑い日となりやすい。

850 hPa面の相当温位（第7図の右）を参照すると、やはり朝鮮半島付近では鯨の尻尾のような等圧線が描かれている。その影響で、南西諸島や西日本の太平洋沿岸部では、暖湿な空気が流れ込んだことが相当温位に表れている。この事例は、相当温位の高い場所とWBGTが「危険」の基準に達している地域がほぼ一致している。日本海沿岸部における相当温位の低さは、北西寄りの風向であることから、北方から乾燥した大気が流入したことによるものと考えられる。

3. WBGT 31.0℃ ≤ X 出現時における風向・風速の特徴について

地理学的視座から、第1節と第2節では

WBGTの分布における地域性について、アジア地上解析天気図や相当温位図と照らし合わせながら考察を行った。本節では、WBGT 31.0℃ ≤ X 出現時における風向・風速の特徴について考察する。前述した条件を基にヒストグラム（第8図）を作成し、タイプ別にWBGT 31.0℃ ≤ X の出現回数が多かった地点（沿岸部型：熊本、内陸部型：奈良、島嶼部型：南大東島）をその考察の対象とする（第6表）。選出した3地点を対象に、風配図¹³⁾と風速階級別出現頻度のヒストグラムを作成し、考察を行う。

(1) 熊本：（第9図）

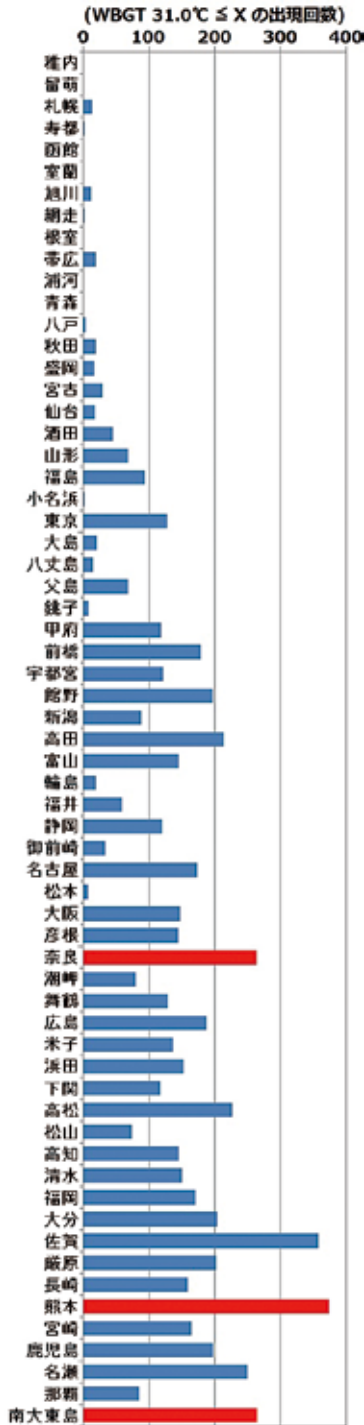
熊本は西側に島原湾があり、東には阿蘇山などの標高の高い山地がある。また北や南東側にも同じように1,000 mを超える山々が存在する。この地点でWBGTが31.0℃を超えた際の風向は、南西～西南西の割合が高く、風向頻度は共に20%を超えている。それに対し、内陸側からの風向はごく僅かである。つまり、内陸側から吹く風によってWBGTが31.0℃を超える事例は極端に少ないと言える。

風速が0.6 m/s～6.0 m/sまでの数値を観測した際に、WBGTが31.0℃を超える事例が現れた。特に、風速が2.1 m/s～3.0 m/sである時にWBGTが31.0℃を超える事例が多く、その出現頻度は30%を超えている。風速が3.1 m/s～4.0 m/s時の出現頻度も30%程度であり、4.0 m/s以上になるとWBGTが31.0℃を超えた事例数は大きく減少した。

(2) 奈良：（第9図）

WBGT 31.0℃ ≤ X 出現時の風向頻度は、南西寄りの割合が若干大きい、その割合は10%～15%程度で極端な偏りではない。東～南東の風による事例は1つも現れなかった。この地点は山に囲まれた盆地に位置していることから、内陸の閉鎖的地形で大気が滞留する影響で気温が高くなり、WBGT 31.0℃ ≤ X の事例が現れると考えられる。

風速が0.5 m/s以下、および3.0 m/s以上の際



第8図 WBGT 31.0°C ≤ X の地点別出現回数
ヒストグラム
(1990~2007年8月, 12~15時を対象)
※対象地点は赤色で示す。

第6表 WBGT 31.0°C ≤ X 出現回数の上位10地点
(橙色で示した地点を研究対象とする)

沿岸部型	内陸部型	島嶼部型
熊本 (374回)	奈良 (264回)	南大東島 (265回)
佐賀 (358回)		名瀬 (251回)
高松 (227回)		厳原 (202回)
高田 (215回)		
大分 (203回)		
鹿児島 (198回)		

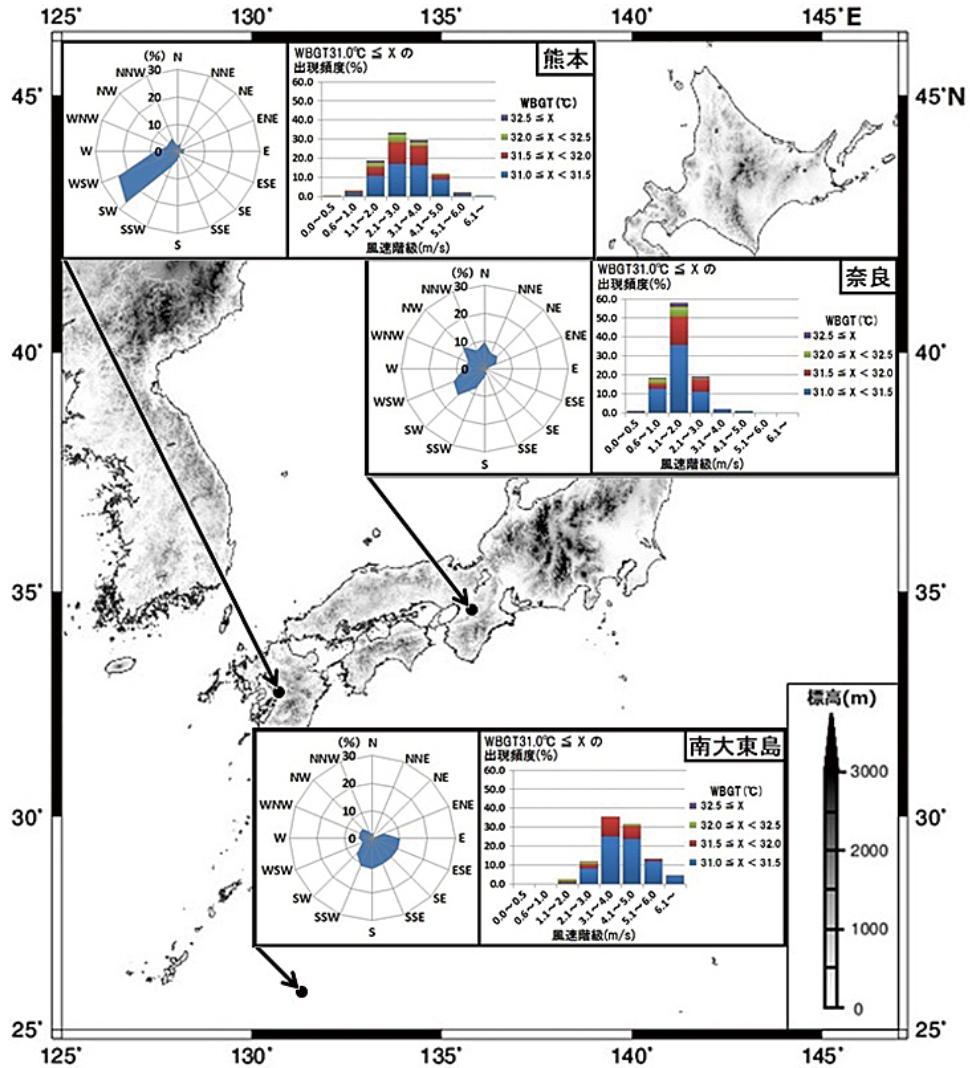
に WBGT が 31.0°C を超えた事例は極端に少ないことが明瞭である。やはり内陸部の閉鎖的な地形の影響で、WBGT 31.0°C ≤ X 出現時の風速は小さい事例が多い。WBGT 31.0°C ≤ X の出現頻度は、風速が 1.1 m/s ~ 2.0 m/s の際が最も高く、50% 以上を占める結果である。また WBGT が 32.5°C を超えた際の風速も、同じく 1.1 m/s ~ 2.0 m/s の時に出現した事例が見られる。

(3) 南大東島：(第9図)

WBGT 31.0°C ≤ X 出現時の風向・風速における考察対象の熊本や奈良と異なる点は、周辺に山などの障害物が存在しない島嶼部に存在することである。人間の体は汗をかくことで体温を下げようとし、乾燥している環境ほどその効果が働く。

しかし、湿度が高い環境ではその効果が抑制されて体内に熱を溜めることになる。すなわち、この地点は海洋に囲まれているため、気温がやや低くても湿度が高い環境であることから、WBGT が 31.0°C を超える可能性が高いと考えられる。風向が東~南南西である際に、WBGT が 31.0°C を超えた事例があるが、その頻度は 10% 程度である。島嶼部ゆえ風向頻度に目立った偏りは見られない。

WBGT 31.0°C ≤ X 出現時における風速は 3.1 m/s ~ 5.0 m/s の際に多く出現しており、その



第9図 WBGT 31.0°C ≤ X の風向別出現頻度と風速階級別ヒストグラム
(1990~2007年の12~15時を対象。対象地点の選定方法は本文参照)

出現頻度は、2つの風速階級を合わせて約60%を占めている。周辺に障害物が存在しないため、風速が6.0 m/s以上である事例も僅かながら現れた。その一方で、風速が1.0 m/s以下の際にWBGTが31.0°Cを超えた事例は現れなかった。

IV おわりに

本研究は日本列島でWBGTが高く現れることが想定される8月を対象に、WBGTの地理的分布

に対する地域性や気圧配置、および地点を限定してWBGTが31.0°Cを超えた際の風向・風速の特徴について考察することを目的とした。WBGTの計算には鈴木・日下(2015)の算出方法を引用し、独自に設定した条件を基に考察を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) WBGT 31.0°C ≤ X が3時間(12~15時)継続する地点が複数現れた事例の気圧配置の多くは、日本の南東海上に太平洋高気圧があり、北方

に低気圧が存在する南高北低型になっている。特に WBGT が 31.0°C を超えていた地点は、太平洋高気圧の縁辺部付近に当たっていて、 850 hPa 面の相当温位は周辺に比べて高い値を示している。

(2) WBGT $31.0^{\circ}\text{C} \leq X$ の出現回数が最も多い熊本は、南西～西南西の風が吹く際に WBGT が 31.0°C を超える可能性が高い。熊本の西側には島原湾がある。海側から吹く風は水分を含んでいるため、総じて相対湿度が高くなる。その多湿による影響で熱中症が発症する可能性が高くなると考えられる。奈良は山に囲まれた盆地に位置していることから、WBGT $31.0^{\circ}\text{C} \leq X$ 出現時の風向頻度は南西寄りの割合が若干大きい。極端な偏りではない。閉鎖的な地形の影響で、WBGT $31.0^{\circ}\text{C} \leq X$ 出現時の風速は $1.1\text{ m/s} \sim 2.0\text{ m/s}$ が 50% 以上を占める結果となった。南大東島において、WBGT $31.0^{\circ}\text{C} \leq X$ 出現時における風速は、 $3.1\text{ m/s} \sim 5.0\text{ m/s}$ の範囲であることが多く、その出現頻度は 2 つの風速階級を合わせて約 60% を占めている。山などの障害物が存在しないため、風速が 6.0 m/s 以上である事例も僅かながら現れた。島嶼部ゆえ風向頻度に目立った偏りは見られない。

WBGT と風向・風速の関係について、本研究で取り上げた地点は 3 か所のみだが、沿岸部の地点は海側から吹く水分を含む風、内陸部の地点は閉鎖的な地形により、大気が滞留する影響で WBGT の値が高くなるといった考察を行うことができた。本研究は、WBGT の地理的分布から地域性を追究すべく日本列島を対象としたが、今後は地点別に焦点を当てて、WBGT の値が高くなる要因を追究していく必要があると考えられる。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、終始ご指導をいただきました法政大学の佐藤典人名誉教授、ならびに日頃よりお世話になっている法政大学文学部地理学教室の諸先生方に深く御礼申し上げます。また法政大学文学部地理学科気候学ゼミナールの学生にも、多くの意見をいただきました。重ねて御礼申し上げます。

注 記

- 「熱中症」の定義については、2008 年に日本気象学会が「日常生活における熱中症予防指針」において、「皮膚の障害などを除外した暑熱障害」としてまとめており、中井 (2011) では、暑熱環境において発生する障害で、熱失神・熱疲労・熱けいれん・熱射病などを総称したものを「熱中症」と表現している。
- この指標は、アメリカ・サウスカロライナ州のパリスアイランドの海兵隊新兵訓練所で、熱中症のリスクを判別するために開発された。パリスアイランドは湿度が高く、海兵隊の訓練が厳しいのに加え、訓練中の服装や装備に厳しい制約があったため、熱中症が発生しやすい環境にあったことが提案につながったと言われている。
- 「WBGT = $0.84T_w + 0.3T_g - 0.08T_a$ 」で算出する推定式となる。同じ風速に対して人体と黒球温度計における対流熱の伝達率を比較したとき、黒球温度計の方が熱の伝達率が大きいと示している。それぞれ熱を受ける物体として考えた場合、黒球温度計の直径が人体よりも小さいことから熱が伝わりやすく、2 つの物体の熱伝導率に差が生じることになる。それを補正する意味で乾球温度が負号で表現されていることを述べている。
- 札幌・仙台・東京・名古屋・新潟・大阪・広島・福岡・鹿児島に黒球温度の計測器を設置している。環境省熱中症予防情報サイト開設時で黒球温度計が設置されたのはこのうち 5 地点 (東京・名古屋・新潟・大阪・福岡) であり、広島は 2007 年に、札幌・仙台・鹿児島は 2014 年に設置され、現在の 9 地点となっている。これらの計測器は全て気象官署に設置されているが、管轄は気象庁ではなく環境省である。
- 「WBGT = $0.735 \times T_a + 0.0374 \times RH + 0.00292 \times T_a \times RH + 7.619 \times SR - 4.557 \times SR^2 - 0.0572 \times WS - 4.064$ 」で算出する。なお、ここで T_a は気温 ($^{\circ}\text{C}$)、 RH は相対湿度 (%), SR は全天日射量 (kW/m^2)、 WS は平均風速 (m/s) を各々示している。小野・登内 (2014) によると、この推定式は 2007～2009 年を対象に比較的高台に位置しており、建築物による太陽の遮蔽の影響が最も小さいとされる名古屋地方気象台の 2008 年データを基に、他地点・他年度のデータと比較しながら解析を進めて提唱されたものである。そしてこの式は、解析に用いた気温の範囲を超えたとしても推定誤差が突然変化する、つまり推定式が適用不可能になるとは考えにくく、日本において代替的に WBGT を評価する上で適用が可能であると結論づけている。
- WBGT の算出に使用する全天日射量のデータは

- 2008年以降から欠測地点が現れ始めるため、WBGTの地域区分図には全ての地点を使用することができない。第3章の第1節は63地点(第2表, 条件1), 第2節では45地点(第2表, 条件2)の分布図を表示することになる。850 hPa相当温位図でも同様に、各節で扱う地点は多少変わっている。
- 7) 直接、電磁波で伝わることを輻射、その熱を輻射熱と言ひ、遠赤外線による熱線によって伝わる熱の事を表す。例えば、外にいるとき暖かい、もしくは暑いと感じる。それは太陽が、遠赤外線による熱線を発しているからである。
 - 8) 環境省熱中症予防情報サイトによると、水で湿らせたガーゼを温度計の球部に巻いて観測が行なわれている。温度計の表面にある水分が蒸発したことにより冷却した熱と等しい状態になった時の温度で、乾燥した空気であるほど乾球温度(気温)との差が大きくなり、これは皮膚の汗が蒸発する時に体感する涼しさの度合いを表したものと記述している。計算についてはまず Tetens の式で、ある乾球温度(T_a)の飽和水蒸気量(esat)を求め、 $(\text{esat}) \times (\text{相対湿度}/100)$ で水蒸気量を求める。また湿球温度(T_w)も同様に飽和水蒸気量を求め、Sprungの式で、右辺に乾球温度(T_a)・湿球温度(T_w)とその飽和水蒸気量・気圧を代入して T_w の水蒸気量を求める。その値が T_a の水蒸気量の値と等しくなった時に湿球温度(T_w)の値が決定する。
 - 9) 環境省熱中症予防情報サイトによると、黒色に塗装された薄い銅板の球の中心に温度計を入れて観測が行なわれている(球体の中は空洞になっている)。黒球の表面は、ほとんど反射しない塗料が塗られているため日射の影響をまともに受ける。直射日光にさらされた状態で球の中の温度を観測しており、日射量が多くて風が弱い状態における体感温度とよい相関があると記述している。黒球温度を求めるために全天日射量のデータを使用するが、気象庁では単位が MJ/m^2 であるのに対し、登内・村山(2008)では W/m^2 となっている。そのため、 MJ/m^2 の値を3600(秒:1時間値を秒数に変換)で割って、 W/m^2 に換算する。その値が400以上になる場合は C_1 の式、それ以下は C_2 の式に代入して求める。
 - 10) 本研究で扱う WBGT 値は、鈴木・日下(2015)で用いられている計算方法を引用して、気象庁の観測データを基に筆者が独自に計算した値となる。しかし、実際には算出された値よりも厳しい暑熱環境になっている可能性は十分にあるといえる。また WBGT が控えめに示された場合でも、無理な労働や体が熱に順応していなかったことで熱中症になることも考えられる。このことから、観測データに基づいて算出した WBGT を基に作成した分布図など

は、熱中症に備えるための1つの参考資料として考慮していただきたい。

- 11) 研究対象日の抽出における条件1では、研究対象地点の最大数が63なので、(条件にあてはまる地点数 \div 63) \times 100で求める。10%以上とは、63地点中7地点以上が条件に該当する場合である。
- 12) 1990~2007年の12~15時が対象期間である。最大数は31日 \times 4時間 \times 18年=2232回である。
- 13) WBGT 値が 31.0°C を超えた事例に対する風向を16方位別に積算し、百分率で表す。(ある風向/WBGT 31.0°C 発生回数) \times 100で算出した結果をレーダーチャートで示す。

参考文献

- 稲葉 裕・朝山正己 2012. '日常生活における熱中症予防指針'(日本生気象学会)の概要. 日本臨床 70-6. 1033-1038.
- 小野雅司 2012. 気象条件・暑さ指数 WBGT と熱中症. 日本医師会雑誌 141-2. 305-309.
- 小野雅司・登内道彦 2014. 通常観測気象要素を用いた WBGT (湿球黒球温度) の推定. 日本生気象学会雑誌 50-4. 147-157.
- 佐古井智紀・持田 徹 2009. 熱収支理論より導入された WBGT 式の特長-Yaglou 式との違いが人体に及ぼす影響. 日本生気象学会雑誌 46-4. 139-148.
- 佐古井智紀・持田 徹・栗原浩平 2010. 日射を考慮した WBGT 熱平衡理論式の導出-WBGT 熱平衡理論式への灰色グローブ温度の組み込み-. 日本生気象学会雑誌 47-2. 107-118.
- 鈴木パーカー明日香・日下博幸 2015. WBGT に基づいた日本の暑熱環境の将来予測. 日本生気象学会雑誌 52-1. 59-72.
- 登内道彦・村山貢司 2008. 熱中症危険度の地域特性と HWDI. 日本生気象学会雑誌 45-3. 62.
- 登内道彦 2012. 日本の夏の気象と熱中症. 日本臨床 70-6. 981-985.
- 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.
- 中井誠一 2010. 運動時の熱中症と予防のポイント. 安全と健康 11-5. 447-450.
- 中井誠一 2011. 熱中症の定義と発生の実態. ウォーキング研究 15. 13-17.
- 本間政人 2012. 熱中症に対する政府および環境省の取り組みについて. 日本臨床 70-6. 1047-1051.
- 持田 徹・佐古井智紀 2010. 人体の熱平衡式から導かれる WBGT とその特長-Yaglou ら WBGT 式の温熱生理的意味と特徴-. 日本生気象学会雑誌 47-4. 139-148.
- 持田 徹・佐古井智紀 2011. WBGT 指標の科学. 日

本生気象学会雑誌 48-4. 103-110.

Sprung, A. 1888. Über die Bestimmung der Luftfeuchtigkeit mit Hilfe des Assmamschen Aspirationsmeters, Z. angew. Met. Das Wetter 5. 105-108.

Tetens, O. 1930. Über Einige Meteorologische Begriffe, Z. Geophys 6. 297-309.

Yaglou, C. P. and Minard, C. D. 1957. Control of Casualties at Military Training Centers American. Medical Association Archives of Industrial Health 16. 302-316.

参照ウェブサイト

気象庁 歴代全国ランキング

http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rankran07.php?prec_no=&block_no= (最終閲覧日: 2018年1月12日)

環境省 熱中症予防情報サイト

<http://www.wbgt.env.go.jp/> (最終閲覧日: 2018年1月14日)

日本生気象学会

<http://seikishou.jp/> (最終閲覧日: 2018年1月19日)

ワイオミング大学大気科学教室

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (最終閲覧日: 2017年12月27日)