地上風向の日変動パターンを用いた 夜間の熱中症危険度指標の考察

玉井 昌宏^{1*}・澤井 健志²

¹大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871吹田市山田丘2-1)

E-mail:tamai@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²岐阜県県土整備部砂防課 (〒500-8570岐阜市藪田南2-1-1)

E-mail:sawai-kenji@pref.gifu.lg.jp

WBGTは最も一般的に用いられている熱中症の危険度指標であり、運動時や日常生活の指針としても活用されている。ところが、この指標値の低下する夜間においても熱中症罹患者は発生することが知られており、WBGTだけで危険性を予測することは難しい。何らかの別の指標の開発し、さらに、それに基づく指針の策定が必要であると考え、本論では、地上風向の日変動パターンがWBGTに代わる指標として利用可能であるかどうかについて、大阪市消防局の熱中症患者の救急搬送データを用いて検討する。このパターンによってWBGT値の変動傾向に差異が生じることを示したうえで、暑熱環境の履歴を考慮できる新しい指標を提案する。この指標の月別パターン別の平均値が夜間熱中症罹患率と強い相関関係にあること、加えて、一日中西風が連吹するパターンWが夜間熱中症に対して最も危険な気象状況であることを示す。これらから、地上風向の日変動パターンが一つの夜間の熱中症危険度指標となり得ることを示す。

Key Words : *heatstroke, disease risk, atmospheric environments, meteorological scenario, land and sea breeze*

1. はじめに

熱中症は暑熱環境下で発生する健康被害である。その発症は古くから炭鉱労働や鉄鋼業など種々の産業において確認されている。¹⁾ 昨今、室内環境や労働環境が劇的に改善されているにもかかわらず、この病気が増加傾向にあるのは、地球温暖化や都市ヒートアイランド現象などが背景にあるとされるが²⁾、空調設備の普及などによる暑熱環境に対する生理学的な適応能力の低下も影響していると考えられる。

最高気温や平均気温など熱中症の危険度を示す指標は色々考えられるが³⁾、WBGT (Wet Bulb Globe Temperature, 湿球黒球温度) 指標が最も一般的である。WBGTと罹患率との間には強い関係性が認められており、気象庁などから発せられる注意情報なども、この指標により決められている。運動時⁴⁾のみならず、日常生活においても熱中症の注意指針として用いられている。

WBGTの指針では、25℃を一つの閾値として、それ未

満では熱中症の危険性は概して小さいとされている。²⁾ しかしながら、夜間等、この基準を下回る時間帯にも罹患者は発生している。南⁵⁾は、地域固有の気候条件やそれに対する順応度などによって、高温に対する許容度が異なること、環境温度だけでなく高温の継続時間なども熱中症の危険性に影響することを指摘している。WBGTの時間値を唯一の指標として、25℃を全国一律の閾値と捉えるのではなく、地域の気候や生活様式など、様々な事情に応じた指標の提案や閾値の設定があつてよいのではないかと考えられる。

筆者ら⁶⁾は、容易に大気環境リスク評価を行うための方法として気象シナリオ日を提案するとともに、種々の問題を引き起こす可能性のある気象シナリオをターゲットシナリオとして捉えることを提唱してきた。筆者らのこれまでの検討^{7, 8)}により、大阪湾沿岸地域において夏季夜間に高温になりやすい、あるいは熱帯夜日となりやすい地上風向変動パターンがあることが明らかになっている。こうしたことは、WBGT指標とは異なる情報が、夜

図-1 風向のグループ化

(数字：北を0度，右回りの角度，矢印：この角度がどちらのグループに入るかを示している。ここでは，昼間の平均単位ベクトルVDが西に，夜間の単位ベクトルVNが東に分類されることを例示している。)

間熱中症危険度の新しい指標となったり，WBGTなど従来の指標と組み合わせることで，精度高い注意情報となる可能性を示していると考えられる。

本論では，まず，既述の地上風向の日変動パターンが熱中症危険度の代表指標である WBGT の変動傾向に及ぼす影響について明らかにする。熱中症危険度指標の変動履歴を評価する簡易な指標を提案し，それと地上風向の日変動パターンや夜間の熱中症罹患者数との関連性について検討する。これらのことを通じて，地上風向日変動パターンが夜間における熱中症の危険度の一つの指標となり得ることを示す。分析対象地域は大阪市域とし，気象データとしてアメダス大阪のデータを，熱中症データとして大阪市消防局の熱中症罹患者の搬送者数データを用いる。分析対象年度は 2008-2012 年の 5 年間とする。

2. 方法

(1) 地上風向の日変動パターン

ここでは，大阪市域を分析対象地域とし，地上風向の日変動パターンの分類には，アメダス大阪（北緯：34 度 40.9 分，東経：135 度 31.1 分，標高：23m，設置位置：大阪市中心部）における地上風向データを用いた。詳細な方法は筆者らの方法⁹⁾と同様である。9 時～21 時を昼間，21 時から翌 9 時までを夜間とし，昼夜の平均風向の組み合わせで気象パターンの分類を行った。平均風向は，各時間の風向の単位ベクトルを昼間あるいは夜間にわたって単純に加算することにより求めた。この平均風向を東西南北 4 つの風向に分類した。例えば，図-1 は昼の平均風向VDと夜の平均風向VNがそれぞれ西風と東風に分類されることを示している。表-1 は昼夜の平均風向の組み合わせとパターンとの関係を示している。

表-1 気象パターン分類

パターン	昼間	夜間	気象状況
A	西風	東風 or 北風	海陸風交替
W	西風	西風 or 南風	西風連吹
N	北風	-	北風連吹
E	東風	-	東風連吹
S	南風	-	南風連吹

筆者らのこれまでの検討⁷⁾により，いずれの地上風向変動パターンが発生するかは，地衡風ベクトルと日積算全天日射量によって説明できることがわかっている。但し，昼夜の平均風向の組み合わせは，このふたつ以外の要因によって発生することもある。そこで，このように偶然発生した日を取り除くために，地上風向の日変動パターンを目的変数，9 時と 21 時の地衡風ベクトルと日積算全天日射量を説明変数として判別分析を行った。これらの説明変数で予想されるパターンとアメダスの風向データにより決定される実際のパターンとが一致しない誤判別の日を除いて検討を進めることにした。説明変数の日積算全天日射量は大阪管区気象台の観測データを用いた。地衡風ベクトルは，輪島，潮岬，米子または松江地点の高層気象観測データから算出した。なお，2009 年までは米子のデータを，2010 年以降は松江のデータを用いた。

(2) WBGT と熱中症データ

次式を用いて，WBGTを算出した。^{9,10)}

$$WBGT = 0.7T_w + (0.3 - \alpha)T_g + \alpha T_a$$

ここに， $T_w(^{\circ}\text{C})$ ：湿球温度， $T_g(^{\circ}\text{C})$ ：黒球温度， $T_a(^{\circ}\text{C})$ ：乾球温度， α ：日射の影響を示すパラメータである。日射が無い場合は黒球温度と乾球温度が等しくなるため $\alpha = 0.0$ ，日射がある場合は $\alpha = 0.1$ とする。各パラメータに関して，乾球温度については大阪管区気象台の気温の観測値をそのまま用い，黒球温度は以下の式から算出した。^{9,11)}

$$T_g = \begin{cases} T_a + 12.1 + 0.0067S - 2.40U^{1/2} & (S \geq 400\text{W/m}^2) \\ T_a - 0.3 + 0.0256S - 0.18U^{1/2} & (S < 400\text{W/m}^2) \end{cases}$$

ここに， $S(\text{W/m}^2)$ ：全天日射量， $U(\text{m/s})$ ：風速である。湿球温度は，以下の式を用いて算出した。

$$e_s - e = \frac{C_p p}{\epsilon L} (T_a - T_w)$$

ここに， $e_s(\text{hPa})$ ：飽和水蒸気圧， $e(\text{hPa})$ ：水蒸気圧， $C_p (= 1004\text{J/kgK})$ ：定圧比熱， $p(\text{hPa})$ ：大気圧， $\epsilon (= 0.622)$ ：定数， $L (= 2.5\text{E}6\text{J/kg})$ ：潜熱である。飽和水蒸気圧は，乾球温度と Tetens の蒸気圧算定式から算出した。なお，気温，湿度，水蒸気圧，風速，全天日射

量のデータには、大阪管区气象台で観測されたものを用いた。全日射量データから日射の有無を判定し、その結果に応じた WBGT 値を用いた。

熱中症罹患患者数については、大阪市消防局管内の熱中症による救急搬送者数データを用いた。記載されたデータ項目のうち、救急搬送された日時データのみを用いた。同管内の気象状況は、大阪管区气象台におけるものと同一であると仮定して、分析を進めた。なお、2008～2012 年の 6～9 月の 20 か月間で、救急搬送されて熱中症と診断された人数は 3183 人にのぼる。

3. 結果と考察

(1) 地上風向の日変動パターンの頻度

図-2 は、6～9 月の各風向変動パターンの生起日数であり、2008 より 2012 年の 5 年間の平均値と標準偏差を示している。パターン S は、月に問わず生起日数は 3 日程度である。説明変数の数による制約条件によって、このパターンは、判別分析から除外されることが多くなっている。パターン A については、月による変動は小さく 8～10 日程度である。パターン W の生起日数は、7 月に極大となり、他のパターンより明確に多くなっている。パターン N と E は、7 月に極小となっており、W と逆位相になっている。8 月は、A と W とともに 9 日程度で、次いで N が多い。N は 9 月に最も多くなっているが、これは大阪湾の海面水温と地上気温の関係が、昼夜を問わず陸風が吹きやすくなる条件になるからである。図-3 は、一例として 2010 年一年間の神戸港の海面で計測された水温、アメダス大阪の日最低気温と日平均気温、日最高気温の変動を示している。これらの気温については 7 日間の移動平均をとっている。ここでは、神戸港の観測値を大阪湾の海面水温を代表値と考えている。同図のよう

図-2 風向変動パターンの生起日数

に、大阪湾の水温は 5～8 月までは陸域部の平均気温と最低気温との間にある。9 月に入ると、この水温は平均気温を上回るようになる。7 月に W が形成されやすいのは海面水温が最低気温付近を変動するからであり、9 月以降に陸風が吹きやすいのは、海面水温が相対的に高くなるからであると推測される。なお、地衡風など他の気象要素との関係については別途検討したい。図-2 のように、特に熱中症危険度の高まると予想される 7 月や 8 月において、パターン W や A の生起頻度が高いことがわかる。

(2) 各風向変動パターンと WBGT

図-4 は、2010 年 6～9 月の各風向変動パターンの WBGT の時間変動特性を示している。月別各パターンの各時間の WBGT の平均値と標準偏差を求めて時系列で示している。

(a) の 6 月では、いずれのパターンも 6 時ごろまで平均値は 20℃程度である。日中の平均値が 25℃を超過する

図-3 アメダス大阪の日平均気温、日最高気温、日最低気温と大阪湾の海面水温（2010 年）

のはパターン W のみであり、特に昼間の熱中症の危険度はこのパターンにおいて大きくなると考えられる。夜間についても平均値そのものはパターン W が大きくなっているが、パターン間で有意な差はなかった。海陸風交替の発生するパターン A が最も気温が高くなると考えがちである。そのようなにならないのは、図-3 の気温の時系列で示したように、この時期の大阪湾の海面水温

が大阪の気温に比較して低いことに関係している。海陸風交替が発生するためには、夜間にこの水温より陸域の気温が低くなることが必要になり、日中に日射量の少ない日、あるいは夜間に強い放射冷却が生じる日に、パターン A が発生しやすくなる。(b)の 7 月においては、パターン内の標準偏差は小さくなり、各時間のパターン間の差異が顕著になる。S を除くパターンにおいて、昼間

図-4 各風向変動パターン毎の WBGT の時間変動特性

の平均値は 25℃を上回るようになり危険度が高くなる。パターン W は、A や N より大きくなっていることがわかる。この大小関係は、夜間においても継続しており、W の平均値は夜間にも 25℃を越えている。

(c) の 8 月においては、いずれのパターンにおいても平均値は一日中 25℃を越えている。夜間においてパターン N が最も高くなっているが、これはフェーン現象が発生すると、大阪平野の地上風は淀川に沿って北東より吹くことが多いからである。(c) の 8 月のパターン N の日は 4 日間あったが、いずれもフェーン現象による高温が観測された日である。但し、この現象の発生は年によってまちまちであり、必ずしも N が高温になるわけでない。8 月において、このパターンは移動性の高気圧や低気圧、台風の通過により発生することが多い。(d) の 9 月のパターン内の変動は大きくなっているが、パターン W の平均値は早朝より深夜まで概ね 25℃を超過しており、他のパターンと比較して、熱中症危険度は高い。これらの結果より、18hr 以降の夜間において熱中症危険度が高いのは、7、9 月のパターン W、8 月の全てのパターンであることがわかる。

(3) 履歴を考慮した熱中症危険指数

既述の通り、WBGT が 25℃を越える時間が短い場合より、長時間継続するほうが熱ストレスは大きくなるだろう。ここでは、このストレスの履歴を考慮するために、以下の指標について検討する。

$$Y(T) = \sum_{t=7}^T [WBGT(t) - 25]$$

ここに、Y(T)(℃)：各日の時刻 T における履歴を考慮した指標、WBGT(t)：各日の時刻 t における WBGT 値である。この指標は、WBGT が 25℃以上になると熱中症の危険度が高くなるとの従来の知見に基づいて、25℃からの偏差を単純に加算したものである。各日の熱ストレスは起床時にキャンセルされて、それ以降に蓄積されると仮定している。また、平均的な起床時刻が 6～7 時の間であること、通常日最低気温は夜明け前ごろ生じることなどを勘案して、加算の開始時刻を 7 時としている。

図-5 は 6～9 月の各パターンの Y(T) の平均値と標準偏差の時間変化を示している。ここでは、2008～2012 年の 5 年分のデータを用いて算出している。Y(T) のグラフは、6 月では全般的に減少傾向にあるものの、その他の月では昼間に増加、夜間に減少するもの、昼間に上昇し夜間にそれほど減少しないものなど様々なタイプがある。(a) の 6 月は、いずれのパターンも Y(T) の平均値は 0℃を超過していない。W と S は比較的大きく、15-18hr 頃の平均値は概ね 0℃となっている、それ以降の時間帯の平均

値の時間勾配にパターン間の大きな差異はなく、昼間にできた差異が、夜間にまで継続する形となっている。有意差については後述するが、各パターンの標準偏差は比較的大きいものの、6 月においては W と S の熱中症危険度が大きいことが予想される。(b) の 7 月では、パターン S を除いて、18hr ごろまでは増加傾向にある。その後、A と S は減少傾向を示すが、W のみあまり減少せずに翌朝まで 30℃程度で推移している。また、標準偏差については W が最も小さくなり、このパターンの気象状況が、図-2 で示したように他のパターンより日数が多いにも関わらず、変動が小さく安定していることがわかる。(c) の 8 月になると、A や S における 18hr 以降の顕著な減少傾向は認められなくなり、Y(T) = 40(℃)程度となっている。パターン N は、図-4(c)の傾向と異なり、平均値は比較的小さくなっている。これは、既述の通り 2010 年 8 月のパターン N は全てフェーン現象が関係していたが、通常の N は気圧配置などの影響により北方からの冷たい空気が流入することにより発生するからである。パターン W の平均値は、日没後も増加傾向にあり、60℃程度にまで達している。平均的にみれば、このパターンでは WBGT が一日中 27℃を上回るような状況が継続していることになる。(d) の 9 月の特徴は、パターン間の差異が大きくなっていることである。18hr までに増加傾向を示すのは W と A であり、A については、それ以降減少する。パターン W については、18 時以降あまり減少せず、概ね Y(T) = 30(℃)程度となっている。

表-2 は、各月における風向変動パターン間の Y(T) の平均値の差の有意性の検証結果である。18 時以降の時間帯で、一時間ごとの平均値の差を検定した。表中の矢印はその方向に示すパターンのほうが大きいことを、◎は 18 時以降全ての時間帯で 1%有意の差があることを、○は 5%有意の差があったことを示す。また、-(横棒)は、当該月において少なくともいずれか一方のパターンが存在しなかったことを示す。7 月はパターン E が、8、9 月はパターン S が発生しなかった。

表-2 から、全ての月において、パターン W の Y(T) は、パターン A と N、E に対して有意に大きい。パターン S に対しては、6 月では有意差はないが、7 月では 5%有意で大きい。総じて、パターン W の Y(T) は他のパターンより有意に大きいと言える。海陸風交替のパターン A は総じて N や E に対しては大きい。

図-6 は、各月、各パターンの Y(T) の平均値の 18 時以降明け方までの時間帯の平均値 Ȳ(℃) と同じ時間帯における一時間当たりの熱中症罹患による救急搬送者数 Np との比較である。図中の 1 点が各月の一つの地上風向変動パターンを示している。

(a)6月

(b)7月

(c)8月

(d)9月

図-5 $Y(T)$ の時間変化

表-2 夜間における Y(T)の平均値の差の有意性

	A	N	E	S
N	↑◎(※1) ↑× ↑◎ ↑◎			
E	↑◎ — ↑○(※2) ↑◎	↑○(※3) — ←× ←×		
S	←× ↑○(※4) — —	←◎ ↑× — —	←× — — —	
W	←○ ←◎ ←◎(※5) ←◎(※6)	←◎ ←◎ ←◎ ←◎	←○ — ←◎ ←◎	←× ←○ — —

各セル内第1~4段：6~9月

↑：列パターンが大きい、←：行パターンが大きい、—：いずれかのパターンがない、

◎：1%有意、○：5%有意、×有意性なし

※1：21時以前×，以降◎，※2：22時以前○，以降◎

※3：20時以前◎，以降○，※4：22時以前○，以降×

※5：24時以前○，以降◎，※6：23時以前×，以降◎

同図より，月ごとに風向変動パターンによってまとめると，夜間のY(T)の平均値と1時間当たりの搬送者数との間には強い相関関係があることがわかる．図中の実線は，全てのデータを考慮した回帰直線であり，次式のように表わされる．

$$N_p = 0.0015\bar{Y} + 0.0910 \quad (R^2 = 0.77)$$

$\bar{Y} = 0$ の夜間の1時間当たりの救急搬送者数は0.091人/hrである．例えば，WBGTが1日中1℃増加すれば，12時間後の18hrにはY(T)は12℃増加し，24時間後に24℃増加することになるので， $\bar{Y}$ はこの時間内で平均的に18℃増加し，1時間当たりの搬送者数は0.027人/hr増加することになる．また， $\bar{Y} = -20 \sim 0$ 付近で，搬送者数が0.03から0.09あたりへ急増しており，このあたりに罹患者の増加の閾値があると考えられることもできる．

図中8月のパターンWのW8が突出して危険度が高く，1時間当たり0.23人/hr，18hrより翌朝5hrまでの12時間を考えると，平均的に2.7人の搬送者が発生する計算になる．次いでA8，S8，W7などの $\bar{Y}$ が大きくなっている．それらのなかでも7月のパターンWの搬送者数が多いことがわかる．7月のパターン間の比較においても，W7が非常に大きくなっている．6月のパターンWについても，同月の他のパターンと比較して，搬送者数が極めて多くなっており，相対的にパターンWが危険度の高いパターンであることがわかる．この6~8月のWは，図中の回帰直線より上方にプロットされており，

図-6 $\bar{Y}$ と夜間の1時間当たりの熱中症罹患による救急搬送者数 N_p との関係

図-7 W_a と救急搬送者数 N_n との関係

この直線から予想されるより危険度は高いと考えられる．また，9月のパターンWは，同月の他のパターンより $\bar{Y}$ が突出して大きことがわかる．

比較のために，図-7に2012年6~9月の各日の夜間のWBGTの平均値 W_a と熱中症による救急搬送者数 N_n との関係を示している．図中の実線は次式で示す回帰直線である．

$$N_n = 0.297W_a + 5.767 \quad (R^2 = 0.28)$$

有意水準1%で有意な中程度の相関関係が得られ， W_a が増加することにより N_n が増加することは確認される．しかしながら，夜間のWBGTの平均値に対する熱中症による救急搬送者数の変動は大きく，相関係数も相対的に低いことがわかる．

以上の結果より，地上風向変動パターンが熱中症危険度の一つの指標となり得ることが確認できる．

4. 結論

本論では、WBGT の低下した夜間においても熱中症罹患者が発生することや、日最低気温が夜間の地上風向に強く影響されるとのこれまでの筆者らの検討結果を念頭において、地上風向の日変動パターンが熱中症危険度の指標になり得るかどうかを検討した。主要な結果を以下に示す。

地上風向の日変動パターンによって WBGT の変動傾向に差異があることを確認した。WBGT $\geq 25^{\circ}\text{C}$ を基準とした場合、18hr 以降の夜間において熱中症危険度が高くなるのは、7、9月のパターン W、8月の全てのパターンであることがわかった。

WBGT 値を時間積分して暑熱環境の履歴を考慮できる新しい指標を提案した。地上風向変動パターン別にこの指標の夜間平均値を計算し、昼夜を通して海からの風が連吹するパターン W の平均値が、他のパターンに比較して有意に大きいことを示した。月別パターン別の夜間の平均値と熱中症罹患者数との間には強い相関関係が認められ、パターンから夜間熱中症罹患による搬送者数の予測が可能であることが示された。6 から 8 月のパターン W については、予測値を上回る搬送者数が発生しており、熱中症危険度が高いことがわかった。

これらのことから、地上風向の日変動パターンが夜間の熱中症危険度を表示する一つの指標となり得ることがわかった。

謝辞

大阪市消防局より熱中症罹患者数のデータの提供を受けた。関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 中井誠一：熱中症対策の歴史，日本生気象学会誌雑誌，48(1)，pp.9-14，2011.
- 2) 日本生気象学会，「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3 確定版，2013.
- 3) 田村憲治，小野雅司，安藤満，村上正孝：救急搬送データによる熱中症の発生と気温，日本生気象学会誌，Vol.32，pp.111-114，1995.
- 4) 日本体育協会：スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック，Part 3，熱中症予防のための運動指針，pp.16-22，2013.
- 5) 南利幸：地球の温暖化と熱中症の予報について，日本生気象学会誌，Vol.41(1)，pp.41-44，2004.
- 6) 玉井昌宏，川原大典，有光剛：大気環境リスク評価のための気象シナリオ日の選定方法，環境工学研究論文集，Vol.47，pp.515-525，2010.
- 7) 玉井昌宏，日比俊輔：大気環境リスク評価のための気象シナリオ日の適用性とターゲットシナリオとしての利用法，土木学会論文集 G（環境），vol.67，No.7，III_761-III_772，2011.
- 8) 玉井昌宏，有光剛：大阪湾沿岸域の夏季夜間気温と海陸風の関係，環境システム研究論文集，Vol.36，pp.397-405，2008.
- 9) 環境省：平成 21 年度 WBGT 観測による熱中症予防情報の提供業務報告書，3.2WBGT 推定方法の制度検証，2009.
- 10) 空調調和・衛生工学会編：ヒートアイランド対策 都市平熱化計画の考え方，進め方，第 2 章 ヒートアイランドの基礎物理，pp.25-39.
- 11) 岡田孜，岡田益己，日下博幸：岡田・日下の黒球温度推定式の広域適用とパラメータ調整，日本ヒートアイランド学会論文集，Vol.8，pp.13-21，2013.

(2014.5.23 受付)

Study on Heatstroke Risk Indexes Using Daily Fluctuation Patterns of Surface Wind Directions

Masahiro TAMAI and Kenji SAWAI

Dept. of Civil Engineering, Osaka University
Land Development Dept., Gifu Prefectural Government

The WBGT index is commonly used to indicate heatstroke disease risk but the index does not always expect the risk in night time correctly. The purpose of the present study is to examine whether daily fluctuation patterns of surface wind directions can be an indicator which appropriately expresses the night time risk. It is shown that fluctuation characteristics of the WBGT vary by the daily fluctuation patterns. A new index Y(T) which is calculated by time integrations of the WBGT and can take past records of sultry environments into consideration is proposed and it is also shown that fluctuation characteristics of Y(T) differ by the patterns. It is indicated that night time averages of Y(T) for each pattern correlate closely with nocturnal heatstroke disease risks and the pattern W which means that west wind blows all day long has the highest risk for nocturnal heatstrokes. From the above results, we concluded the daily fluctuation patterns of surface wind directions can be utilized as an indicator to expect heatstroke disease risks in the night time.