

## WBGT 水平分布の推定と提供に関する研究

研究分担者 登内 道彦 一般財団法人気象業務支援センター 国際事業部部長

### 研究要旨：

日本における熱中症搬送者はWBGTと関連が深く、環境省「熱中症予防情報サイト」の約840か所のWBGTがよく利用されている。本研究は同情報のベースとなる5kmメッシュの気象情報を、熱中症搬送者が急増した2010年以降について5～10月の期間整備し、緯度・経度・期間を指定することにより、疫学的な研究を行う際の参考として利用可能な情報を提供することを目的に、初年度として2010～2022年度メッシュ情報の整備を行った。2年度目は、メッシュ情報からWBGTをとりだすための利用者インターフェースの作成、2023年度データの追加、メッシュデータの精度評価を予定している。

### A. はじめに

環境省では「熱中症予防情報サイト」(2006年～)において11都市のWBGT実況値、約830地点の実況推定値や3日間のWBGT予報を提供している。

実況推定値は、気象庁の大気毎時解析および数値予報の初期値・予測値を第一推定値として、気象庁の地方气象台やアメダスの観測値を用いて変分法により、再解析を行い、気温、湿度(または混合比)、日射量、風速の水平分布を求めることをベースにしており、この方法によりWBGTの平面的な分布を推定することができる。

日本救急医学会の熱中症特別委員会では、各施設に搬送された患者の分析・統計を行っており、これらの基礎データで活用可能なWBGTの二次元分布を推定し、活用を資することを目的に、計算システムを試作した。

このデータは、クラウド上に構築し、クローズドな研究者での利用を想定し、その試作とした。

### B. WBGT 水平分布の推定方法

WBGTは、以下の式で定義され、  
WBGT(°C) =

$$T_w \times 0.7 + T_g \times 0.2 + T_a \times 0.1 \quad (\text{式1})$$

ここで、 $T_w$ : 湿球温度(°C)

$T_g$ : 黒球温度(°C)

$T_a$ : 乾球温度(°C)

$T_w$ は、気温・湿度・気圧から求めることができ、 $T_g$ は、気温・日射量・風速から推定することができる(推定方法はC項に記載)ので、WBGTの水平分布を求めるには、気温・風速・湿度・気圧・日射量の水平分布を求めればよい。

気温・風速については、気象庁から「毎時大気解析」(気象庁数値予報データをアメダスなどの観測

値を用いて再解析を行ったもの)が解像度1kmで提供されており、これを用いる。

湿度と日射量については、気象庁メソ数値予報モデル(MSM)で、解析値、1時間毎の予測値が提供されており(解像度5km)、この値を一時推定値とし、毎時大気解析の作成方法と同様に、アメダスなどでの湿度・日照時間の観測値を用いて変分法により再解析を行うことで湿度の水平分布を求める(気象庁からはさらに解像度の細かいLFMが提供されているが、過去10年程度遡ることができるよう、長期間のデータがあるMSMを第一推定値としている)。

気圧については、湿度の計算の際に必要なが、1hPa程度違って計算結果にほとんど影響を与えないことから、解析値または予測値をそのまま用いる。

### C. 湿度の推定

湿度の推定は、最適内挿法と呼ばれる客観解析手法で求める。解析値は推定値(MSMの格子値を使う)を近くの観測値で修正して求められる。推定値 $Z^P$ を、近くの観測点 $i$ での観測値 $Z_i^O$ とその点での推定値 $Z_i^P$ との差(予報誤差)で修正し、格子点上にある物理量 $Z^A$ の解析値を求めるのが最適内挿法であり、これは $N$ 個の観測点に対して下式のようなものである。

$$Z^A = Z^P + \sum_{i=1}^N w_i (Z_i^O - Z_i^P) \quad (\text{式2})$$

$w_i$ は重みで、近傍の信頼できる観測値の場合には1に近い値をとり、信頼性の低い観測値ならば0に近い値をとる。上の添え字のAは解析値(Analysis)を、Pは推定値(予報値: Prediction)、Oは観測値(Observation)を表す。下の添え字のiは観測点の番号を、下に添え字のないのは格子点上の値を示す。(  $\sum w_i = 1$ とは限らないので、重み

付平均とは異なる)。

ここで、重み $w_i$ は格子点での真の値を $Z^T$ とすると、解析値と真の値との平均二乗誤差 $I$ は(式3)で表される。

$$I = \langle (\varepsilon^A)^2 \rangle = \langle (Z^A - Z^T)^2 \rangle \quad (式3)$$

この $I$ を最小にするため、最小二乗法を用いて重み $w_i$ を決定する。ここで $\langle \rangle$ はアンサンブル平均である。平均的誤差(バイアス)はないと仮定すると、次のような $N$ 元連立一次方程式が得られる。

$$\sum_{j=1}^N (\sigma_{ij}^P + \sigma_{ij}^O) w_j = \sigma_i^P \quad i = 1 \sim N \quad (式4)$$

$\sigma_{ij}^P$ : 観測点 $i$ と $j$ での予報誤差の共分散

$$\sigma_{ij}^P = \langle e_i^P e_j^P \rangle \quad e^P = Z^P - Z^T$$

$\sigma_{ij}^O$ : 観測点 $i$ と $j$ での観測誤差の共分散

$$\sigma_{ij}^O = \langle e_i^O e_j^O \rangle \quad e^O = Z^O - Z^T$$

$\sigma_i^P$ : 観測点 $i$ と格子点での予報誤差の共分散

ここで、点 $i$ と点 $j$ との間の相関係数

$$\mu_{ij} \text{ は分散、共分散を使って } \mu_{ij} = \sigma_{ij} / \sqrt{\sigma_{ii} \sigma_{jj}} \text{ のように書き表せる。最終的には}$$

$\sigma_{ij}^P$ 、 $\sigma_{ij}^O$ 、 $\sigma_i^P$ などの共分散(まとめて $\sigma$ と書く)を求め、 $\sigma$ がわかれば $w_i$ が求まり、解析値を求めることができる。ここで $Z^T$ は未知であるが、 $\sigma$ を統計的に求めることができる。

予報誤差の相関を表現する $\sigma_{ij}^P$ 、 $\sigma_i^P$ などの量は、実際の観測点の組について求めた統計量を用い、2点間の距離の関数でモデル化される。 $\sigma_{ij}^O$ はデータ間の観測誤差の相関を表現する。一般に観測はお互いを参照することなく独立に行われるので、異なる観測データ間の観測誤差には相関がない。

$\sigma$ により、観測点と格子点の距離、観測誤差、観測点の不均質な分布等が重みの決定に関係してくる。即ち、格子点から遠い地点のデータの重み、信頼性の少ない観測データの重み、観測点がお互いに近い場合の重みはいずれも小さくなる。重み $w_i$ が小さくなると $i$ の観測による修正量は小さくなる。

観測点と格子点の距離は $\sigma_i^P$ によって重みに反映される。例えばただ一つだけの観測 $i$ があった場合、重みを求めるための方程式は次のようになる。

$$(\sigma_{ii}^P + \sigma_{ii}^O) w_i = \sigma_i^P \quad (式5)$$

格子点と遠くの地点 $i$ の間では予報誤差の相関が小さいので $\sigma_i^P$ が小さく重み $w_i$ は小さい。格子点の周囲に観測データがまったくなければ、推定値がそのまま解析値になる。

#### D. 湿球温度の推定

湿球温度 $T_w$ は、Iribarne J. V. and W. L. Godson (1981年)による気温( $T_a$ )、露点温度( $T_d$ )、気圧( $p$ )を用いた以下の方法により求める。

まず、 $T_w$ の一次推定値 $T_{w(1)}$ を、以下の式により求める。

$$T_{w(1)} = (T_a \times f \times p + T_d \times s) / (f \times p + s) \quad (式6)$$

ここで、 $s = (e_s - e_d) / (T_a - T_d)$

$$e_s = \exp(C_0 - C_1 \times T_a - C_2 / T_a)$$

$$e_d = \exp(C_0 - C_1 \times T_d - C_2 / T_d)$$

$$C_0 = 26.66082, C_1 = 0.0091379024,$$

$$C_2 = 6106.396,$$

$$f = 0.0006355(K^{-1}) = C_p / (L \times \varepsilon), \quad \varepsilon = 0.622$$

$$C_p = 1004 (JK^{-1}Kg^{-1}), L = 2.54 \times 10^6 (JKg^{-1})$$

次に、補正式により二次推定値 $T_{w(2)}$ を、以下の式により求める。

$$T_{w(2)} = T_{w(1)} - d_e / d_{er} \quad (式7)$$

ここで、

$$d_e = f \times p \times (T_a - T_{w(1)}) - (e_w - e_d)$$

$$d_{er} = e_w \times (C_1 - C_2 / T_{w(1)}) - f \times p$$

$$e_w = \exp(C_0 - C_1 \times T_{w(1)} - C_2 / T_{w(1)})$$

この補正を三次補正值まで繰り返すことで、 $0.1^\circ C$ 以内に $T_w$ の推定値が収束するので、この収束した $T_w$ を計算値として用いる。

なお、露点温度 $T_d(^\circ C)$ が求められていない場合については、乾球温度を $T_a(^\circ C)$ 、相対湿度を $H(\%)$ としたときの水蒸気圧 $e$ の関係式、

$$H(\%) = e / e_s \times 100 \quad (式8)$$

$$\text{ここで、} e = 6.1078 \times 10^{((T_d \times A) / (T_d + B))}$$

$$e_s = 6.1078 \times 10^{((T_a \times A) / (T_a + B))}$$

$$A = 7.5, B = 237.3 \quad (\text{水})$$

$$A = 9.5, B = 265.5 \quad (\text{氷})$$

を $T_d$ について解いた次式により求める。

$$T_d = (-C_2 - C_3) / C_4 \quad (式9)$$

ここで、 $C_1 = \log_{10}(H/100)$ 、

$$C_2 = (T_a \times A \times B) / (B + T_a)$$

$$C_3 = C_1 \times B, C_4 = C_1 - A \times B / (B + T_a)$$

E. 日射量・黒球温度の推定

日射量については、対象地点における晴天日の全天日射量を  $S_0(W/m^2)$  としたとき、日照時間(分)から全天日射量  $S_1(W/m^2)$  を、以下の式で推定する(別調査による)。

$$S_1 = S_0 / c \quad (\text{sun}=0 \text{ のとき})$$

$$S_0 / \{1 + a \times \exp(-c \times \text{sun})\} \quad (\text{sun}=1 \sim 10 \text{ のとき}) \quad (\text{式 10})$$

係数、a、b、c は地点によって異なるが、2009 年の東京における値  $a=1.3$ 、 $b=0.19$ 、 $c=4.0$  を用いる。

MSM では日射量の解析値および予測値が提供されており、(式 10)によるアメダス地点における日射量推定値を用いて、湿度と同様に、最適内挿法により、日射量の推定値を求める。

次に、6 観測点(東京・新潟・名古屋・大阪・広島・福岡)の 2010 年の観測データから求めた回帰式(11)で、気温・日射量・風速から、黒球温度を推定する。

$$T_g = T_a - 0.17 + 0.029 \times SR - 0.48 \times WS^{1/2} - 1.27 \times 10^{-5} \times SR^2 \quad (\text{式 11})$$

ここで、 $T_g$ :黒球温度(°C)、 $T_a$ :乾球温度(°C)、SR:全天日射量( $W/m^2$ )、WS:風速(m/s)

F. システムの構築

2021 年度の調査で、消防庁発表の 7~8 月の熱中症搬送者総数(速報)と、6 都市(東京・新潟・名古屋・大阪・広島・福岡)の WBGT 日最高値期間平均で、2010 年以降、熱中症搬送者は、7~8 月の期間、毎年 30,000 人を超えており、それ以前とは搬送者数が異なる。



図-1 熱中症搬送者数と最高 WBGT 平均

疫学的な調査などに用いる平面的な WBGT 分布は 2010 年以降が必要となることから、2010~2022 年 5~10 月について、1 時間毎の気温・湿度・日射量・風速・気圧の水平分布値を作成した。

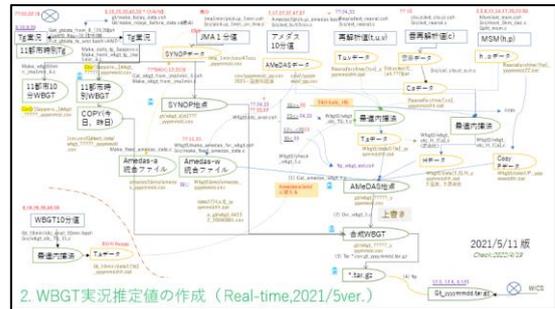


図 2 WBGT 水平分布図作成フロー

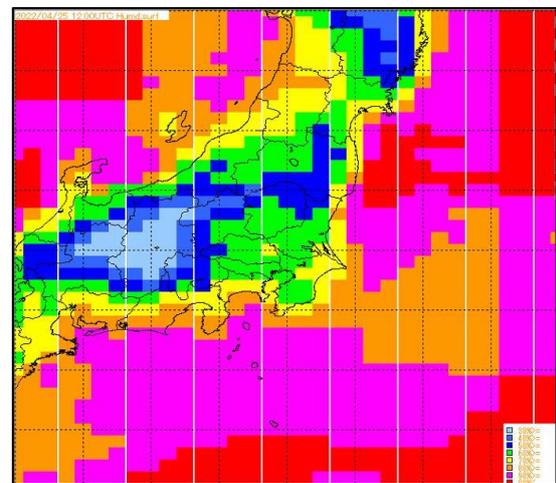


図 3 湿度再解析結果の例

緯度	経度	更新日時	気象	気温	湿度	日射量	風速	気圧	WBGT
35.68	139.76	2022/12/16 16:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 14:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 12:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 10:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 08:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 06:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 04:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 02:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0
35.68	139.76	2022/12/16 00:00	晴	14.0	65.0	0.0	0.0	1013.0	26.0

図 4 クラウド上のデータ

これらのデータは、随時照会されることを想定し、クラウド上にシステムを構築し、2022 年夏季に連続して計算を行った。なお、元となる気象庁データは、気象業務支援センター配信事業部より振興事業部が購入しているデータを用いた。

2022 年度は、2010~2022 年の 5~10 月の期間の解析値をクラウド上に作成したが、2023 年度は、利用者が WBGT を必要とする地点の緯度・経度・日時データとファイルなどを用いて照会することで、必要となる WBGT 値を提供できるシステムとすることを計画している。

#### G. 参考文献

- 1) Yaglou CP, Minard CD: Control of casualties at military training centers. *Am Med Ass Archs Ind Health*. 1957;16:302-16.
- 2) 近藤純正: 水環境の気象学—地表面の水収支・熱収支, 1994.
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構・日本気象協会: 太陽光発電利用システム・周辺技術の研究開発, 1996.
- 4) Huschke RE: Glossary of Meteorology. American Meteorological Society, 1959, p638.
- 5) Iribarne JV, Godson WL: Atmospheric Thermodynamics. 3rd ed. Reidel D, 1981, p259.
- 6) 気象庁: 配信資料に関する技術情報第 196, 205, 247 号.
- 7) 小野雅司、登内道彦: 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*.2014;50(4):147-57.
- 8) Tonouchi M, Ono M, Maruyama K: Heat Stroke Information in Japan. 12th. International Congress of Biometeorology, 2014.  
<https://ams.confex.com/ams/ICB2014/webprogram/Paper252939.html>  
(accessed 2023.3.11.)