

(2) 富山県における WBGT 指数の将来予測

初鹿宏壮¹ 源将¹ 相部美佐緒¹ 近藤隆之¹ 川瀬宏明² 木村富士男²

¹富山県環境科学センター

²海洋研究開発機構

熱中症指標の一つである湿球黒球温度 (WBGT) 指数について、富山県内の現状を解析し、近未来変化を予測した。再解析データを境界条件とした領域気象 (WRF) モデルによるダウンスケーリング計算を実施し、モデルによる系統的なバイアスを補正して求めた結果と気象庁の観測データから求めた結果とを比較したところ、良好に現状が再現された。これを用いて、厳重警戒が必要な基準として WBGT 指数が 28℃以上を採用し、その期間について現在の状況と近未来の変化を解析した。その結果、現在は 1 か月以上も警戒が必要な日があり、真夏には基準を超過する時間が 1 日に 6 時間であった。また、2030 年代には、基準を超過する日数や時間が大幅に増加し、夜間も含めて注意が必要となる可能性が示唆された。

1 はじめに

気候変動に関する政府間パネルが 2007 年に作成した第 4 次評価報告書 (IPCC-AR4) によると地球の温暖化は既に起こっており、地球全体を平均すると地上気温がこの 100 年で約 0.64℃上昇している¹⁾。また、本県においても、例えば伏木の年平均地上気温は 100 年で約 0.92℃上昇、夏季においても約 0.78℃上昇している²⁾。現在、当所は 2010 年度から文部科学省気候変動適応研究推進プログラム (RECCA) の枠組みで、(独)海洋研究開発機構及び秋田大学との協力のもと、2030 年代を対象とした富山県及びその周辺の気候の将来予測計算を実施中である。同研究においても温暖化が今後しばらく継続すると想定されることから、高齢者や小児などの日常生活や学校等での運動時における熱中症対策について今後の更なる気候の変化を見据えて検討する必要がある。

また、本県は日本海側の海沿いにあり、年間を通じて湿度が高いことから、源ら³⁾

は気温以外に湿度も考慮した不快指数を気象庁の観測データから計算し、その現状と過去からの変化を解析した。その結果、県内全域で不快指数が上昇していること及び深夜 3 時においても不快な日が増加傾向であることを解明した。

そこで本研究では、環境省⁴⁾や厚生労働省⁵⁾において、熱中症対策の指標として活用されている湿球黒球温度 (WBGT⁶⁾) 指数に着目し、本県における現状とその将来変化について調査した。WBGT 指数は、表 1 に示すとおり、その値によって日常生活や運動時の行動に注意を促すもの^{7),8)}であり、WBGT

表 1 WBGT 指数に対する対応指針

WBGT 値	基準	日常生活	運動
31℃以上	危険	高齢者は安静時でも熱中症の可能性あり。	特別の時以外は禁止、子供は厳禁。
28℃以上	厳重警戒	炎天下や室温上昇に注意する。	激しい運動や持久走は禁止。
25℃以上	警戒	定期的な休養や水分補給をする。	定期的に休養、水分、塩分をとる。

指数が 25℃以上を警戒基準とし、日常生活及び運動時には定期的な休養や水分補給等を推奨している。また、28℃以上を嚴重警戒基準とし、日常生活では炎天下の行動や室温の上昇に注意する、運動時は激しい運動や持久走を禁止するなどの対応を促している。さらに 31℃以上となる場合は、日常生活において高齢者等に最大限の注意を促すとともに、特別の時以外は運動を禁止すると定めている。

2 解析方法

本研究では、WBGT 指数の推定にあたり、以下に示す屋外用の式を用いることとした。

$$WBGT = T_w \times 0.7 + T_g \times 0.2 + T_a \times 0.1$$

ここで T_w は湿球温度、 T_g は黒球温度、 T_a は乾球温度である。WBGT 指数を求めるために必要な各気象データの 1 時間値を準備する必要がある。現状については、富山地方気象台による観測データ及び欧州中期予報センターの再解析データ (ERA-interim⁹⁾) の 1 日 4 回の解析値を境界条件として WRF モデル¹⁰⁾を用いた 18km 及び 4.5km メッシュの 2 重ネスティングによるダウンスケーリング計算を実施し、そこから気象庁の観測地点と地域や標高等が最も類似した格子点を判定し、その解析値を利用した。また、近未来については、CMIP3¹¹⁾で公開されている 5 つの温暖化予測計算 (CSIRO-MK3.0, GFDL-CM2.1, MRI-CGCM2.3.2, Miroc3.2-hires 及び medres) の結果に疑似温暖化手法¹²⁾を用いて境界条件を決定し、現状再現計算に則して解析値を利用した。

WBGT 指数を求めるために必要な湿球温度については、観測データ、モデルによる現状再現結果及び将来予測結果に含まれてい

ないため、個別に計算する必要がある。また、湿球温度は、乾球温度、露点温度及び現地気圧から求めることができる¹³⁾が、モデル計算においては露点温度を出力していない。このため、Clausius Clapeyron の関係式により、水蒸気圧 E_w から露点温度を

$$T_d = [R^* / (m_v \times L_v) \times \ln(6.106951/E_w) + 1/273.15]^{-1} - 273.15$$

により求める。式中の定数はそれぞれ

$$R^* = 1.98583, m_v = 18.016, L_v = 597.3$$

である。さらに、ここで求めた T_d と現地気圧 p を用いると、

$$T_w = (T_a \times f \times p + T_d \times s) / (f \times p + s)$$

で求めることができる。ここで、

$$s = (e_s - e_d) / (T_a - T_d)$$

とすると、 e_s と e_d はそれぞれ

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

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

であり、式中の定数は、それぞれ

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

$$C_2 = 6106.396, f = 0.0006355, C_p = 1004,$$

$$L = 2.54 \times 10^6, \epsilon = 0.622$$

である。なお、水蒸気圧 E_w は比湿 q と現地気圧 p から、

$$E_w = q \times p / 0.622$$

で求めている。

また、黒球温度については、乾球温度、全天日射量 S (W/m^2) 及び風速 U (m/s) からなる経験式から求める¹⁴⁾。黒球温度は全天日射量の閾値により係数を変えており、 $S > 400 W/m^2$ の場合は、

$$T_g = T_a + 12.1 + 0.0067 \times S - 2.40 \times U^{1/2}$$

また、 $S \leq 400 W/m^2$ の場合は、

$$T_g = T_a - 0.3 + 0.0256 \times S - 0.18 \times U^{1/2}$$

でそれぞれ求めることができる。

なお、WBGT 指数の解析期間については、熱

中症の変化を解析する観点から4月から10月とし、現状は2001年～2009年、将来は2031年～2039年を対象とした。また、嚴重警戒の基準であるWBGT \geq 28 $^{\circ}$ C（以後、単に28 $^{\circ}$ C以上と記す。）を中心にWBGT \geq 25 $^{\circ}$ C（同25 $^{\circ}$ C以上）及びWBGT \geq 31 $^{\circ}$ C（同31 $^{\circ}$ C以上）も解析することとし、基準を超える時間数、日数、連続時間数について結果を報告する。

なお、年ごとのばらつきを考慮するため、各9年間の解析結果を平均したものを「平均年」、平均年から上下に1標準偏差分ずつずらしたものをそれぞれ「高温年」と「低温年」とした。

3 結果

図1は富山地方気象台における気温、気圧、露点温度の観測値とモデル計算の対応する格子点における解析（現状再現）値の各月で平均した年ごと及び9年間の平均した日サイクルの差である。気温、気圧、露点温度の観測値の変動幅と比べてそれぞれの差は小さい。このことから現状再現値はおおよその観測値の変動パターンを再現していると推定できるが、例えば気温において日サイクルする負のバイアスが見られるなど、WRFモデルが再現する各気象要素において、月ごとに異なるサイクルのバイアスが含まれていることが分かった。これは、モデル自身が抱える放射や雲などの物理過程の不確実性であり、WBGT指数の解析にあたっては、現状再現及び将来予測計算についてモデル解析値から月ごとに日サイクルするバイアスを取り除いて計算したものをを用いることとした。

表2は観測値及びモデルによる現状再現計算値から求めた25 $^{\circ}$ C以上、28 $^{\circ}$ C以上及び

31 $^{\circ}$ C以上の日数である。25 $^{\circ}$ C以上については、平均年で約80日、高温年で約90日及び低温年で約70日となりほぼ夏中、基準を超過していることが分かる。28 $^{\circ}$ C以上については、平均年で約40日、高温年で約50日及び低温年で約30日であり、低温年でも

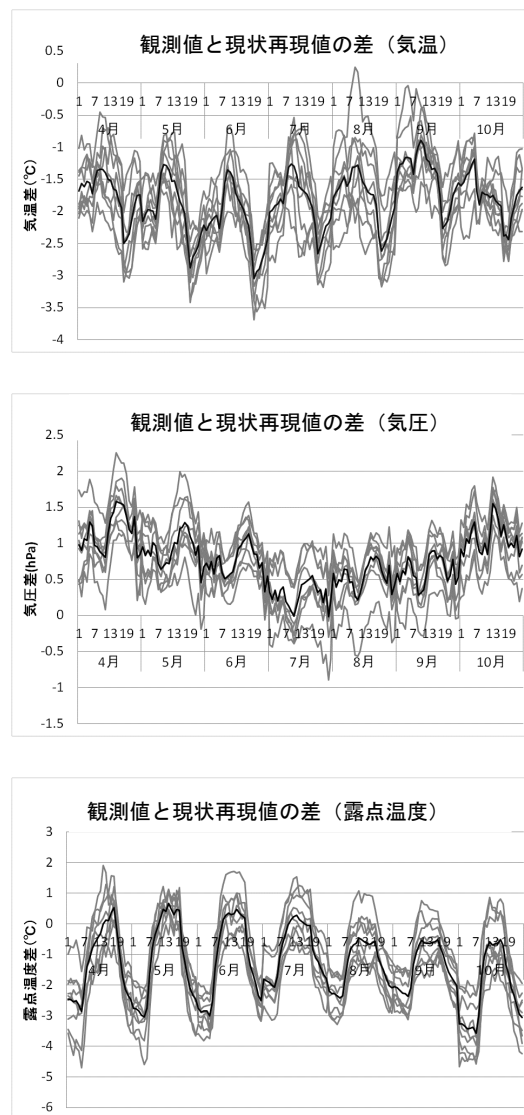


図1 観測値とシミュレーションモデルの現状再現値の差（上図：気温、中図：気圧、下図：露点温度）。横軸は時間。細線は2001年～2009年の各年各月で平均した日サイクルであり、太線は9年間の平均値

表2 観測と現状再現による WBGT 指数の超過日数(日)

WBGT	平均年		高温年		低温年	
	観測	現状再現	観測	現状再現	観測	現状再現
≥25℃	79	81	86	90	71	71
≥28℃	40	43	52	52	29	33
≥31℃	8	6	15	11	2	1

丸1か月、高温年では2か月弱も基準を超過する。31℃以上については、平均年で約1週間、高温年では約2週間、低温年では2日あるかないかとなっており、年によっては危険な日が半月ほどもあることが分かった。また、観測と現状再現計算の解析結果はほぼ等しいことから日数の変動については現状再現が成功していることが分かる。

次に、表3で各基準による超過時間数を表2同様に比較している。表2の超過日数と同様にほぼ全ての基準で再現性が高いものの、25℃以上については現状再現による超過時間数がやや大きく、31℃以上については現状再現による超過時間数がやや小さくなっている。なお、28℃以上については他の2つの基準と比較して再現性が高い。

これ以後は、将来予測を含めて解析する

表3 観測と現状再現による WBGT 指数の超過時間数(時間)

WBGT	平均年		高温年		低温年	
	観測	現状再現	観測	現状再現	観測	現状再現
≥25℃	711	759	865	912	558	605
≥28℃	216	223	289	295	142	152
≥31℃	21	13	39	26	3	1

ために、28℃以上に絞って述べることにする。また、経年変動を見ると、低温年が140～150時間程度であるのに対して、高温年は290～300時間となっており、年により2倍ほどの差があることが分かる。

図2は、富山における旬ごとの WBGT 指数が28℃以上の時間数である。平均年では8

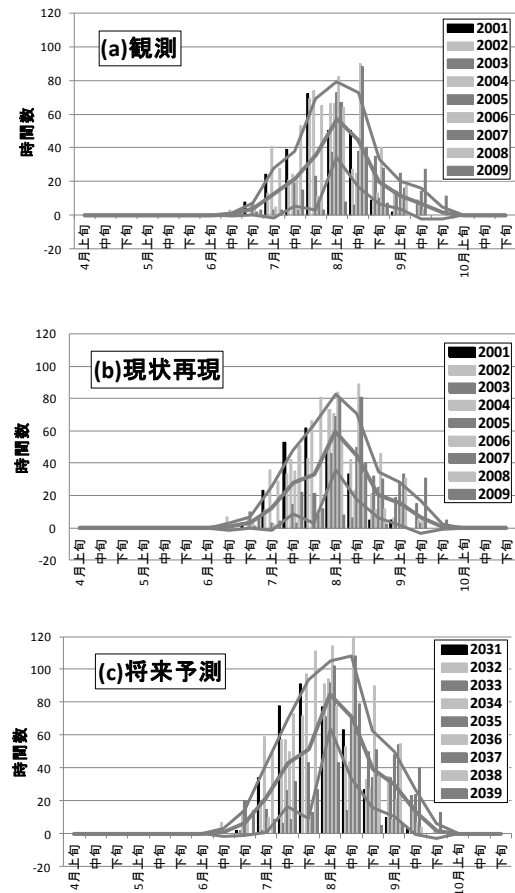


図2 富山における旬ごとの WBGT 指数が28℃以上の時間数(時間)。(a) 地方気象台の観測値から算出(棒グラフ: 2001年～2009年の各年、折れ線グラフ: 平年値(太線)及び±1σで定義した高温年と低温年(細線))。(b) シミュレーションモデルによる現状再現値から算出((a)と同期間)、(c) シミュレーションモデルによる将来予測値から算出(2031年～2039年)

月上旬をピークとして約 57 時間、1 日に換算すると平均して約 6 時間の超過であった。高温年及び低温年のピークは同様に 8 月上旬にあり、それぞれ約 79 時間及び約 35 時間であった。また、現状再現値では、同じく 8 月上旬にピークを持ち、平均年で 59 時間、高温年及び低温年で 83 時間及び 36 時間となり、観測値を良く再現している。このことから現在は 8 月上旬に 28℃以上となる時間数が、平均年で 1 日に約 6 時間、高温年で約 8 時間、低温年で 3~4 時間あることが分かった。さらに、将来予測計算についても同様に調査したところ、ピークの時期は 8 月中旬で大きく変わらないが、平均年で 84 時間、高温年で 105 時間、低温年で 64 時間となり、8 月上旬における平均年の 28℃以上となる時間数は、現在の高温年とほぼ一致し、低温年でも現在の平均年程度、高温年に至っては 1 日に 10 時間以上も基準を超える可能性があることが明らかになった。

また、図 3 時間別の 28℃以上の日数であり、観測値は 12~13 時にピークを持ち、平均年では 34 日、高温年では 44 日及び低温年では 24 日となり、現状再現値でも 12~13 時にピークを持ち平均年では 35 日、高温年では 45 日及び低温年では 26 日となっており、現状再現にほぼ成功している。また、超過日数が 30 日を超える時間帯は暑い年にはおおよそ 10 時から 15 時、平年では 12 時から 14 時の間であった。

さらに、将来予測計算についても同様に調査したところ、12~13 時にピークを持ち平均年では 49 日、高温年では 60 日及び低温年では 38 日となった。また、30 日以上基準を超える時間帯は、暑い年で 9 時~

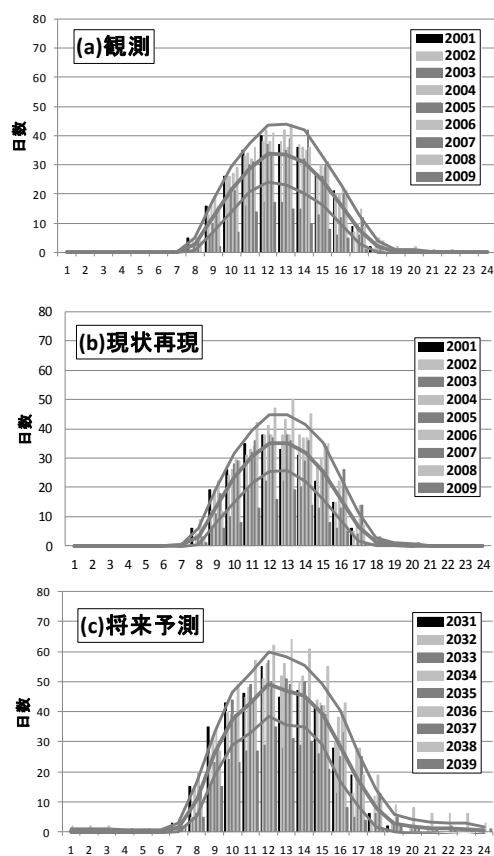


図3 図2と同じ。ただし、月平均した日サイクル

16 時、涼しい年で 11 時~14 時、平年で 10 時~15 時の間であった。さらに特に暑い年には、熱中症の危険性が夜中まで継続する日が出てくることが推測された。

このことから、まず、日最高の WBGT 指数が 28℃を連続して超過する日数について調査し、その期間の上位 10 位までを各期間中で平均した WBGT 指数との関係を示す (図 4)。観測と現状再現は同様の分布をしているが、これらと比較して将来予測では基準を連続して超過する日数が増加し、その期間中の平均超過時間数も増加している。このことは、図 2 及び図 3 から解析した結果とも整合的である。

また、図 5 では同様の調査で縦軸を連続

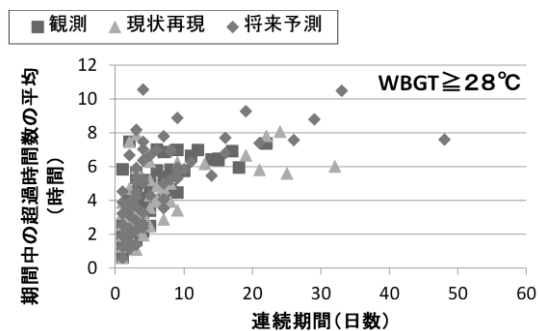


図4 連続して1日の最高値が 28℃以上となる期間の各年のトップ10における日数と期間中の平均的な超過時間数の散布図

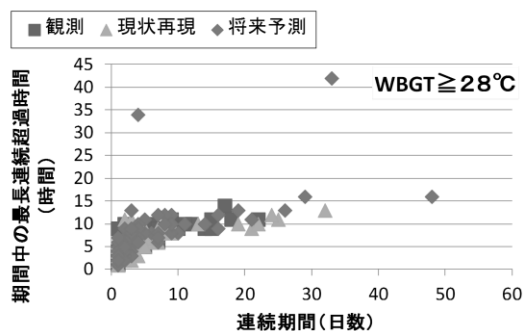


図5 連続して1日の最高値が 28℃以上となる期間の各年のトップ10における日数と期間中の最長超過時間の散布図

時間数としたところ、連続時間が一昼夜を超えている事例も確認できた。このことは、夜間においても継続して厳重警戒をする必要性が高まることを示しており、今後の温暖化社会を見据えた上での熱中症対策が必要であることが分かった。

4 まとめ

WBGT 指数を用いて、富山の現状把握と将来予測を行ったところ、現状でも熱中症対策をしなければならない期間が1か月以上あり、ピーク時には平均しても6時間程度も厳重警戒の基準を上回っていること、2030年代にはさらに期間も時間帯も広がる

ことが分かった。このことから、今後の更なる温暖化社会を見据えた上で、熱中症対策を進めることの重要性が明らかになった。

5 成果の活用

本研究成果をソフト面及びハード面における適応策の検討に活用してもらえよう、情報提供を進めていく。

謝辞

本研究は、文部科学省気候変動適応研究推進プログラム (RECCA) の支援により実施したものである。

参考文献

- 1) IPCC : The fourth technical report on intergovernmental panel on climate change, Cambridge press, 2007.
- 2) Hatsushika et al. : Changes in surface air temperature, humidity, and precipitation over Toyama Prefecture due to Global Warming, Journal of Eco-technology Research, 14, 189-194, 2009.
- 3) 源ら: 富山県における地球温暖化に関する調査研究-富山県内における不快指数の変化-, 富山県環境科学センター年報, 40, 67-71, 2012.
- 4) 環境省: 環境省熱中症予防情報 <http://www.wbgt.env.go.jp/>
- 5) 厚生労働省: 熱中症の予防対策における WBGT の活用について, <http://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei05/>
- 6) Yaglou, Minard: Control of casualties at military training centers, AM. Med.

- Ass. Archs, Ind. Health 16, 302-306,
1957.
- 7) 日本生気象学会, 日常生活における熱中
症予防指針 Ver. 3, 2013.
 - 8) 日本体育協会, 熱中症予防運動指針,
2013.
 - 9) Dee et al.: The ERA-Interim reanalysis:
configuration and performance of the
data assimilation system. Q. J. R.
Meteorol. Soc. 137: 553-597, 2011.
 - 10) The Weather Research and Forecast
model,
<http://wrf-model.org/index.php>
 - 11) Meehl et al.: The WCRP CMIP3 multimodel
dataset, BAMS, 88, 1383-1394, 2007.
 - 12) 佐藤友徳: 疑似温暖化手法, 天気, 57,
111-112, 2010.
 - 13) Iribarne Godson: Atmospheric
Thermodynamics. 3rd ed. D. Reidel,
259 pp, 1981.
 - 14) 登内, 村上: 熱中症危険度の地域特性と
HWDI, 日本生気象学会雑誌(45), 2008.