

WBGT に基づいた日本の暑熱環境の将来予測

Future projection of thermal environment in Japan using WBGT

鈴木パーカー明日香¹, 日下 博幸²

Asuka Suzuki-Parker¹, Hiroyuki Kusaka²

¹筑波大学・生命環境系 ²筑波大学・計算科学計算センター

¹*Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba*

²*Center for Computational Sciences, University of Tsukuba*

(受付 2014 年 5 月 8 日／受理 2015 年 1 月 6 日)

暑熱指標 WBGT (wet-bulb globe temperature) に基づき、将来の日本の暑熱環境予測を行なった。これに先立ち、全国の官署データを基に 1991–2010 年 8 月を対象とした現状把握を行った所、現在の日本はすでに厳しい暑熱環境にあることが示された。特に関東以西の地域では 8 月の日中平均 WBGT 気候値が 26°C 以上となっているが、これは日本生気象学会等が定める熱中症指針では「警戒レベル」に相当する。比較的冷涼な札幌や仙台などでも、WBGT 値が「危険レベル」に達することもあるという結果が得られた。

将来予測は 21 世紀末の 20 年間をターゲットとし、全球気候モデルによる予測データを領域気候モデルによって高解像度化する力学的ダウンスケール手法を用いて行なった。その結果、将来の暑熱環境は現在よりさらに悪化し、特に中部以西の多くの地点で 8 月中 20 日以上が「危険レベル」(日最高 WBGT ≥ 31°C) になると予測された。予測 WBGT 昇温量は東北地方で大きく、例えば将来の秋田市は現在の大阪市のような気候になる可能性が示唆された。

キーワード：WBGT, 気候, 将来予測, 暑熱環境

A future projection of Japanese thermal environment is conducted using wet-bulb globe temperature (WBGT). As a prelude to the future projection, current climate condition (1991–2000 August) is evaluated based on the Japan Meteorological Association's official station data throughout Japan. Results show that August in Japan is already under a harsh thermal environment. In most of the western parts of Japan, August mean day-time average WBGT exceeds 26°C, which corresponds to “warning level” in the heat stroke risk guidance by the Japanese Society of Biometeorology. On average Eastern Japan is in a milder thermal environment, but WBGT occasionally hikes up to “danger level” of 31°C.

Future projection is conducted by dynamical downscaling approach, whereby outputs of a global climate model (MIROC5) are used as initial and boundary conditions for a high-resolution regional climate model (WRF). Thermal environment in Japan is projected to worsen by the end of 21st century, with an average increase of 2.5°C in national mean day-time WBGT. In the most parts of western Japan, number of “danger level” days for August (days with daily maximum WBGT exceeding 31°C) is projected to increase from barely none in current condition to twenty-days in future climate.

Key words: WBGT, climatology, future projection, thermal environment

1. はじめに

暑熱環境の悪化とそれにとともなう健康被害の増大が社会問題化している。日本では地球温暖化に加えて急速な都市化や高齢化なども相まって、暑熱による死亡者数が急速に増えつつある(星ほか, 2010; 藤部, 2013)。今後さらなる温暖化によって日本の暑熱環境が悪化していくことが予想される中、暑熱による健康影響に対する適応策や回避策などを構築するにあたり、空間詳細で信頼性の高い暑熱環境予測の需要が高まりつつある。

地球温暖化予測は、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)などが主体となって、モンスーンや熱帯低気圧、農作物や生態系への影響など、様々な現象を対象として活発に行われてきた。暑熱に関する将来予測は、真夏日日数や熱帯夜日数など、気温がベースとなっているものがメインである(気象庁, 2013)。また、極端高温現象や熱波などの将来予測も行なわれているが、これらも気温に着目したものである(Meehl and Tabaldi, 2004; Fischer and Schar, 2010; Nakano *et al.*, 2013, ほか)。より総合的な暑熱健康影響評価には、湿度や日射など、気温以外の気象要素を考慮することが重要である。

日本では、総合的な暑熱環境影響の指標として、Yaglou and Minard (1957) が提唱した Wet-bulb globe temperature (WBGT) が広く用いられている。例えば、日本体育協会による運動指針や、日本生気象学

会による日常生活における熱中症予防指針には WBGT が採用されている(表 1)。また環境省の熱中症予防情報でも WBGT が“暑さ指数”として採用されており、夏季には全国各地の WBGT 速報値と予報値、そして実観測値をインターネット上で公開し、暑熱による健康影響リスクの啓蒙活動を行っている(環境省, 2007)。WBGT を用いた将来予測は数少ないながらも先行研究がある。たとえば、Willett and Sherwood (2012) は全球気候モデルを用いて WBGT 値の将来予測を行なっているが、モデルの解像度が粗いため、中国北東部平均など世界 15 地域レベルでの議論に終始している。また、Kusaka *et al.* (2012b) や初鹿 (2013) らは領域気候モデルを用いて空間詳細な WBGT の将来予測を行なっているが、前者は日本の三大都市、後者は富山県を対象としており、予測対象地域が限定されている。

地球温暖化などの気候変動予測には、気候モデルが多用されている。気候モデルとは、地球の大気を 3 次元のメッシュに分け、それぞれのメッシュ毎の大気物理量の移り変わりを連立物理方程式で数値的に表現・計算する数値モデルである。それぞれのメッシュの大気物理量は、そのメッシュ内に含まれる大気の平均的な状態を表している。WBGT 値は屋外や室内、建物や緑地の影響などで値が大きく変動することが知られている(Ohashi *et al.*, 2008; 大橋ほか, 2009) が、これらの効果は一般的な気候モ

Table 1. WBGT warning levels for non-vigorous daily activities (left column) and for physical exercises (right column)

| WBGT | 日常生活における熱中症予防指針 (日本生気象学会2013) | | 熱中症予防のための運動指針 (日本体育協会2012) | |
|--------|----------------------------------|--|----------------------------|--|
| | 基準 | 注意事項 | 基準 | 注意事項 |
| 31℃以上 | 危険 | 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。 | 運動は原則禁止 | WBGT 温度が31℃以上では、皮膚温より気温の方が高くなる。特別の場合以外は運動は中止する。 |
| 28~31℃ | 厳重警戒 | 外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。 | 厳重警戒 | 熱中症の危険が高いので激しい運動や持久走など熱負担の大きい運動は避ける。運動するばあいには積極的に休息をとり水分補給を行う。体力低いもの、暑さに慣れていないものは運動中止。 |
| 25~28℃ | 警戒 | 運動や激しい作業をする際は定期的に充分に休息を取り入れる。 | 警戒 | 熱中症の危険が増すので、積極的に休息をとり、水分を補給する。激しい運動では、30分おきくらいに休息をとる。 |
| 21~25℃ | 注意 | 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。 | 注意 | 熱中症による死亡事後が発生する可能性がある。熱中症の兆候に注意するとともに運動の合間に積極的に水を飲むようにする。 |
| 21℃以下 | | | ほぼ安全 | 通常は熱中症の危険性は小さいが、適宜水分の補給は必要である。市民マラソンなどではこの条件でも熱中症が発生するので注意。 |

デルのメッシュサイズより小さいため、気候モデルでは直接考慮することはできない。しかし、メッシュ内の平均的な値として、WBGT 値を算出することは可能である。これは、例えば、日々の天気予報で、県単位や市町村単位の数値を出すことに相当する。また、低解像度の全球気候モデルから得られた予測データを高解像度領域気候モデルで高解像度化する、力学的ダウンスケール法により、より詳細なスケールの気候予測データを作成することが可能である。

そこで本研究では、力学的ダウンスケール法を用いて日本国内の地域差が明瞭に分かる高解像度の気候予測データを作成し、日本全国を対象とした WBGT に基づく暑熱環境の将来予測を行なうことを目的とする。また、将来予測を行なうにあたり、まずは現状を把握する必要がある。WBGT の長期観測ネットワークが最近になって構築され始めた（環境省、2007）こともあり、現在の日本の WBGT に基づいた暑熱環境の気候学的な知見はまだ限定的と言ってよいだろう。そのため、本研究では既存の通常観測気象官署データから WBGT 値を算定し、これを用いて現在の日本の暑熱環境の気候学的特徴を把握するとともに、モデルの検証に用いることとする。

2. データと手法

本研究では、日本で最も暑くなる 8 月を対象に解析を行った。また、WBGT の算出に必要な日射量のデータが夜間は得られないことから、解析は日中の 6-18 時に限定した。

2.1. 観測データ

本研究では、WBGT の算出に必要な気温、日射量、風速、そして露点温度または相対湿度が長期にわたって整備されている、全国 53 地点の官署観測 1 時間値を観測データとして用いた。データ収集期間は 1991-2010 年の 20 年間である。

2.2. 将来予測

一般的に、地球温暖化予測は、全球気候モデルを用いた数値シミュレーションの手法によって行われている。気候モデルは、地球大気を 3 次元のメッシュに区切った上で、大気の運動方程式（運動量保

存の式）・連続の式（質量保存の式）・熱力学方程式（熱量保存の式）・水物質の保存式等からなる風・気温・湿度などの時間発展の基礎方程式系を時間積分して各メッシュの気温や湿度といった大気の変数の移り変わりをシミュレートする数値モデルである。気候モデルの基本的な構造は数日スケールの気象の変化を予測する毎日の天気予報モデルと同じであるが、数年から数千年といった大きなスケールの変動をシミュレートするための様々な工夫がなされている。気候モデルは積分期間がより長いいため、日々の天気予報モデルよりも空間解像度が低く設定されている。たとえば、現在の気象庁の天気予報モデルは 20 km メッシュであるが、一般的な温暖化予測モデル（全球気候モデル）は 200 km 程度である。そのため、温暖化の影響評価に必要な高解像度の予測情報の作成をするには、なんらかの方法でさらなる高解像情報を得る必要がある。全球気候モデルのような低解像度の情報からより高解像の情報を得る手法をダウンスケールと言う。ダウンスケールの中でも、ある領域のみに着目して高解像なシミュレーションを行う気候モデル、すなわち領域気候モデルを用いる方法を力学的ダウンスケールという（図 1）（高藪・金光、2010; ほか）。

領域気候モデルは、日々の天気予報等に用いられている数値気象モデルをベースにして開発されてきた。本研究では米国大気研究センター（NCAR）を中心とするグループが開発した Weather Research and Forecasting（WRF）モデルの Advanced WRF

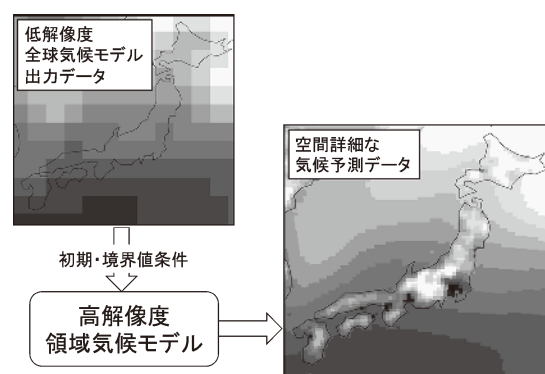


Fig. 1. A schematic illustration of dynamical downscaling.

version 3.1.1 (Skamalock *et al.*, 2008) を用いて日本の将来気候予測を行う。WRF には放射・雲・地表面などの計算を行う様々な物理モデルが搭載されている。本研究で用いた物理モデルは表 2 にまとめた。ダウンスケール対象領域は日本周辺、水平解像度は 20 km である。WRF の入力データ（初期値と境界値）は、全球気候モデルのひとつである MIROC5 (Watanabe *et al.*, 2010) の予測結果から作成されている。将来予測は 2081–2100 年の 20 年間を対象とし、温室効果ガス排出シナリオは IPCC 第 5 次報告書の RCP4.5 シナリオ (IPCC, 2013) を想定する。なお、RCP4.5 シナリオは、大気中の温室効果ガスによる放射強制力が工業化以前と比べて今世紀末までに 4.5 W/m^2 上昇すると仮定するシナリオであり、IPCC 第 5 次報告書の中では比較的穏やかな温暖化シナリオとなっている。

また、モデル検証のために 1991–2000 年を対象とした現在再現実験を行った。図 2 に、観測、モデル現在気候値から算出した、日中 (6–18JST) 平均 WBGT 気候値 (1991–2000 年平均) の水平分布を示す (WBGT 値の算出方法は 2.3 節に記述)。水平分布の相関は $R=0.86$ と高いものの、観測と比べてモデルは 1.79°C の低バイアスがある (図 2c)。力学的ダウンスケールでは、初期・境界条件を提供している全球モデルのバイアスと、領域気候モデル自体から生じるバイアスの、主に 2 つのバイアス源があると考えられる。本研究で用いている領域気候モデル WRF は、観測に基づいて作成された再解析データ (例えば、Onogi *et al.*, 2007 による JRA-25 データなど) を初期・境界条件として与えれば、現在気候を精度よく再現できることが先行研究で示されている (Kusaka *et al.*, 2012a; Kusaka *et al.*, 2012b)。特に、Ishizaki *et al.* (2012a) では、本研究とほぼ同一のモデル設定 (解像度やモデル領域、物理モデルなど) を用い、再解析データを初期・境界条件とし

た現状再現実験を行ったところ、夏季の気温バイアスは 0.3°C 程度であったと報告している。よって、本研究の現状再現実験で出ているバイアスは、初期・境界条件を提供している全球モデル (MIROC5) のバイアスに起因している可能性が高いと考えられる。力学的ダウンスケールにおいて、全球モデルのバイアスが領域気候モデルに引き継がれてしまう問題点はかねてより指摘されている (Liang *et al.*, 2008)。モデルには不確実性があり、現在気候を完全に再現するのは難しい (Flato *et al.*, 2013)。そのため、温暖化予測では、モデルバイアスは現在も将来も変わらないと仮定して将来偏差 (将来—現在) のみを議論したり、モデル値にバイアス補正をかけた上で絶対値を議論したりする手法が一般的となっている (IPCC, 2013)。これは例えば、器差のない測器で計測した値どうしを比べて議論したり、計測値に誤差修正をかけた上で議論したりすることと同様である。

本研究では、WBGT は偏差ではなく値そのものを議論する必要があるため、温暖化研究で標準的に使われている CDF mapping (quantile mapping と呼ばれる) を用いて WRF データにバイアス補正を施すことにする。具体的には、飯泉ほか (2010) による手法を簡略化したものを用いる。CDF mapping 手法とは、モデルデータの累積頻度分布が観測の累積頻度分布に沿うようにバイアス補正する手法である。全ての % 値 (本研究では 0–100% まで 1 % ずつの間隔) において観測値とモデル値の差を算出し、これをそれぞれの % 値におけるバイアス補正值とする。例えば、モデルの 25% 値が観測より 1.5°C 低い場合は、 $+1.5^\circ\text{C}$ を 25% 値における補正值とする、といった具合である (図 3)。

モデル値と観測値の比較検証を行なって補正值を算出する期間をバイアス補正の学習期間という。学習期間は、エルニーニョなどの年々変動や数十年の自然変動などによって気候統計が左右されないよう、十分に長い期間 (30 年程度) を用いるのが望ましいが、本研究では観測と MIROC5 データの制限から学習期間が 1991–2000 年の 10 年間となっている。観測では現在の 8 月気候値 (1981–2010 年の 30 年平均) に比べて 1991–2000 年は 0.1°C 程度低温であった。MIROC5 では 30 年平均と 10 年平均ではほとんど差がない (0.02°C 程度)。そのため、

Table 2. WRF configuration

| モデル | ARW-WRF Version 3.0.1.1 |
|---------|-------------------------|
| 放射 | RRTMg |
| 雲微物理 | WSM6 |
| 境界層 | Mellor-Yamada 2.5 |
| 地表面 | Noah LSM |
| 都市キャノピー | Kusaka et al. 2001 |

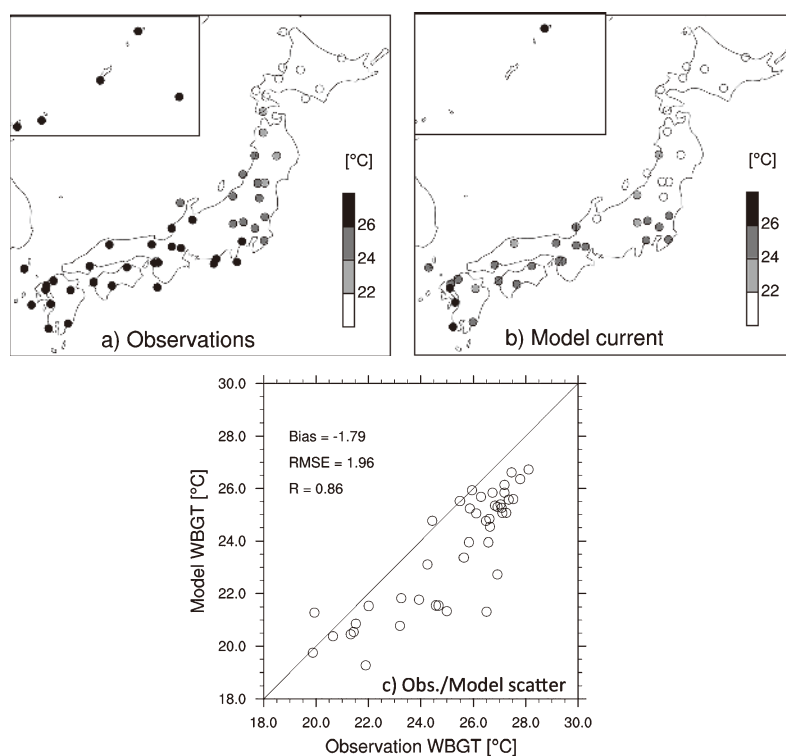


Fig. 2. 1991-2000 August mean of day-time WBGT from a) observations, b) model current simulation (without bias correction), and c) scatter diagram between observed and modeled WBGT using day-time average WBGT (1991-2000 August mean) at each of the observation station.

学習期間を 30 年取った場合と比べて平均で 0.1°C 程度バイアス補正に誤差が生じていると考えられる。しかし、本研究で議論する WBGT 変動のオーダーはおよそ 1°C 以上であることから、学習期間が 10 年であることによるバイアス補正誤差は許容範囲内と考えることができるであろう。

学習期間から算出された補正值を用いて将来気候シミュレーションから得られたモデル値をバイアス補正する。この時、10 年の学習期間から得られたバイアス補正值を 20 年のモデルデータに適用すると 20 年間でトレンドがあった場合にバイアス補正誤差が生じるため、前半と後半の 10 年ずつにモデルデータを分け、各々に対してバイアス補正を行なう。また、バイアス補正は WBGT の説明変数である気温、湿球温度、乾球温度の 1 時間値に対して行う。観測値には官署観測データを用い、それぞれの官署地点に対応するモデルデータ(官署地点から 20 km 以内かつ最も近いモデル格子点のデータ)を抽出して、この両者から毎正時ごとに補正值を算出する。官署地点によっては、近隣に陸面モデル格子点が存在しない地点がある(複雑な海岸線沿いや

小さな島など)。これらの地点では官署観測値とモデル値の比較が不可能であるため、検証から除外する。

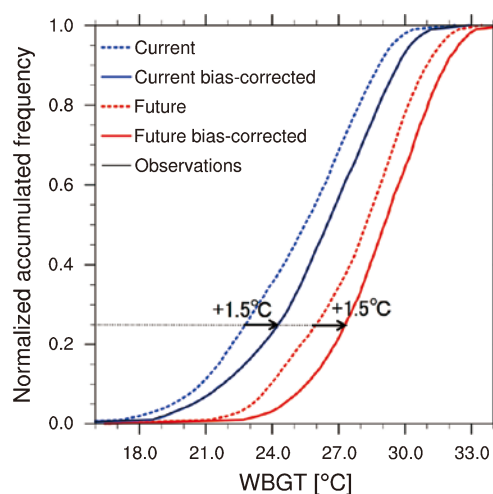


Fig. 3. A schematic illustration of bias-correction method (observation line in solid black is overlaid on top of current bias-corrected line in blue).

2.3. WBGT 算出方法

WBGT は式 (1) のように定義される (Yaglou and Minard, 1957).

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

ここで, Tw , Tg , Ta はそれぞれ湿球温度, 黒球温度, 乾球温度 (ともに単位は $^{\circ}\text{C}$) である. Ta には, 官署データでは気温値をそのまま用いる. 将来予測データも官署観測にあわせて地表 1.5 m データを用いるのが望ましいが, データの制約上難しい. しかしモデルの地表 2 m 気温値は取得可能なため, これをモデル地表データとして用いることにする.

Tg は, 登内・村山 (2008) に従い, 以下の近似式を用いて算出する.

$$Tg = Ta + 12.1 + 0.0067S - 2.4\sqrt{u} \quad (S > 400) \quad (2)$$

$$Tg = Ta - 0.3 + 0.0256S - 0.18\sqrt{u} \quad (S \leq 400)$$

ここで, S は日射量 (W/m^2), u は風速 (m/s) である.

Tw はティーテンス (式 3) とスプリングの式 (式 4) を用いて, 二分法 (たとえば, 川崎, 1993) によって算定する.

$$e_{sat}(T) = 6.1078 \times 10^{7.5T/237.3+T} \quad (3)$$

$$e = e_{sat}(Tw) - 0.000662P(Ta - Tw) \quad (4)$$

ここで, P は大気圧 (hPa), e は水蒸気圧 (hPa), e_{sat} は飽和水蒸気圧 (hPa) である.

3. 結 果

本節では, 観測と将来予測から WBGT 気候値の空間分布や平均の日変化といった統計を示し, それぞれの統計において現在と将来を対比させる形で記述する. また, 統計値だけでは直感的に暑熱の度合いが分かりにくいいため, 日常生活と運動時の熱中症指針 (表 1) と統計値を適宜照らし合わせながら結果の記述を進める.

3.1. 日平均気候値の空間分布

はじめに, 観測から得られた日中平均 (6–18 時平均) WBGT の 8 月気候値 (1991–2010 年平均) の空間分布を図 4a に示す. WBGT 気候値は稚内の 19.9°C から石垣島の 28.6°C までほぼ緯度に従って南方ほど高くなっており, 日本国内で大きな地域差

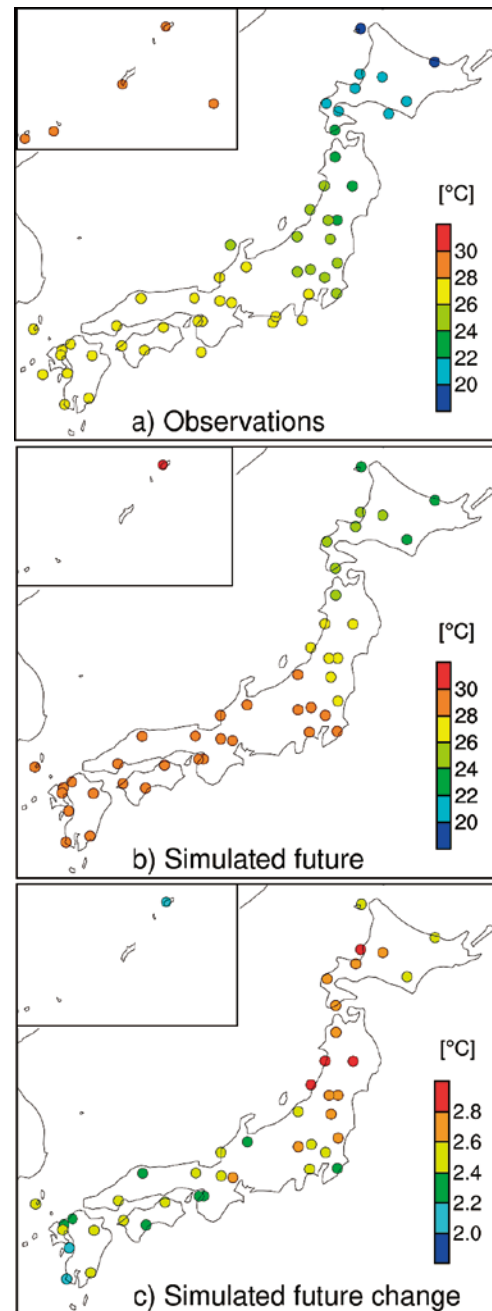


Fig. 4. Average day-time WBGT for August from a) observations (1991-2010 mean), b) simulated future climate (2081-201000 mean), and c) simulate future change.

がある。日常生活と運動時の熱中症指針と照らし合わせると、日本の広い範囲ですでに厳しい暑熱環境にあることが分かる。例えば、東海地方以西の地点では 26°C 以上になっており、「警戒レベル」が 8 月の“気候値”となっている。運動時の指針で「ほぼ安全レベル」とされる 21°C 以下の地点は北海道に限られている。また、日平均 WBGT の全国平均は「注意レベル」の 24.5°C であった。

21 世紀末には、現在よりさらに暑熱環境が悪化することが予測されている（図 4b）。関東以西の地域では日平均 WBGT が 28°C を超え、現在では沖縄諸島に限定されている「厳重警戒レベル」の地域が関東まで拡大すると予測されている。運動時の指針で「ほぼ安全」とされる 21°C 以下の地域はなくなり、東北地方や北海道でも $22\sim 26^{\circ}\text{C}$ と「警戒レベル」の気候になると予測されている。WBGT 平均値は最低でも 2.0°C 上昇し、全国平均の予測上昇量は 2.5°C と予測された。予測上昇量は全体的に北に行

くほど高くなっており、特に東北地方での昇温が著しい（図 4c）。

3.2. 代表地点における 1 時間値の頻度分布

図 5a に、現在の代表地点における WBGT1 時間値の頻度分布を示す。中央値で見ると、最低は札幌で 21.8°C 、最高は名瀬で 28.4°C となっており、南方ほど高くなっている。各地点の最低値も全体的に南方ほど高くなっているが、最高値は各地とも 32°C 前後で大差ない。これは北方ほど WBGT 値の変動が大きい事を意味するが、とりわけ普段は比較的冷涼な地点（札幌、秋田、仙台）においても突発的に厳しい暑熱環境になることがあるという実態が見てとれる。これらの地点と比較して、東京以西の地点では WBGT 中央値が「警戒レベル」以上となっていることから恒常的に厳しい暑熱環境にあることが分かる。

将来気候では、各地点の中央値が $25\sim 30^{\circ}\text{C}$ と

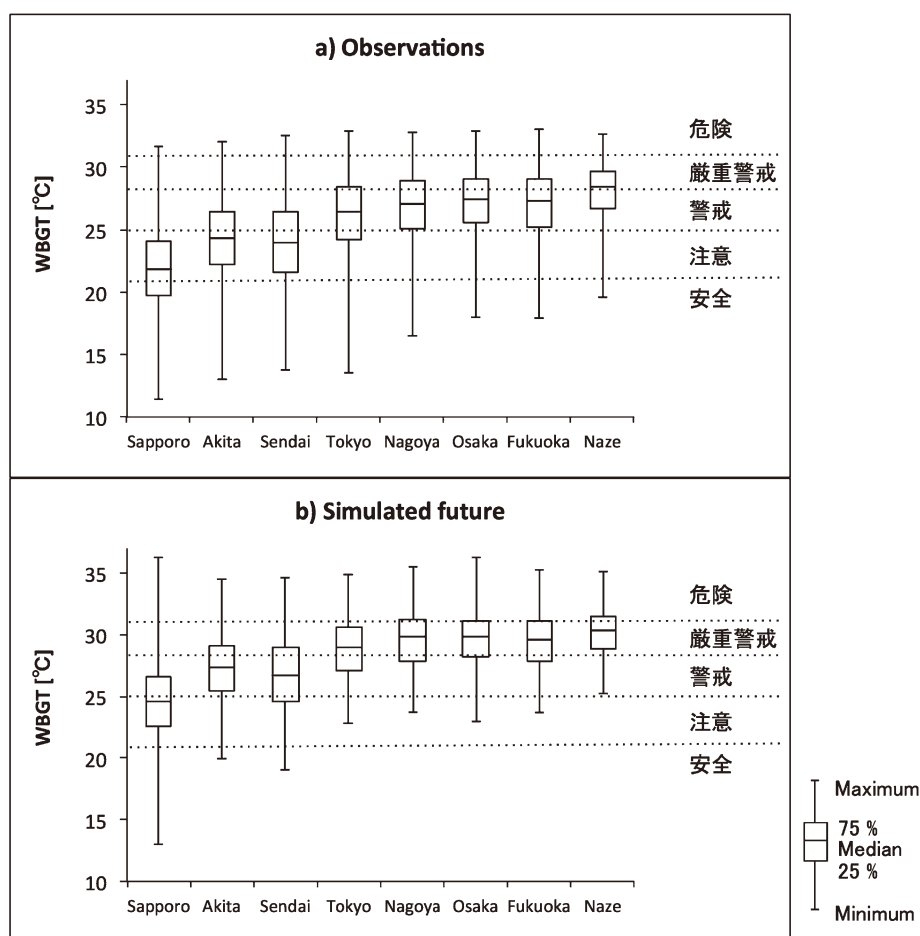


Fig. 5. Boxplots of day-time hourly WBGT for August from a) observations (1981-2010 mean), and b) simulated future climate (2081-2100 mean).

軒並み「警戒レベル」以上となることが予測されている(図 5b)。特に東京以西の地点では「安全レベル」の WBGT21℃以下の発生頻度がゼロとなり、8月の日中の半分以上の時間が「厳重警戒」または「危険レベル」になると予測されている。各地点の WBGT 最高値は 35℃前後となり、札幌と大阪では 36℃を超える可能性も示唆されている。また、現在気候に比べると、全体的に変動幅が小さくなる傾向がある。これは主に各地点の WBGT 最低値の予測される上昇量が最大値よりも大きいためである。つまり、将来気候は「WBGT 値が下がりにくい」気候となり、持続的な暑熱ストレスが増大する可能性が示唆されている。

3.3. 警戒レベル日数

ここでは、日最高 WBGT が各警戒レベルを超える日数を、警戒レベル日数と定義する。各年 8 月の

31 日中何日がそれぞれの警戒レベルに相当するか算出し、現在(1991-2010 年)と将来(2081-2100 年)それぞれ 20 年間の平均を取った(図 6)。

まずは観測値(現在気候)を見てみる(図 6a)。名瀬では 8 月のほとんどの日が「厳重警戒レベル」であり、「危険」または「原則運動禁止」とされる日最高 WBGT が 31℃を超える日も平均で約 5 日あった。名古屋、大阪、福岡では「厳重警戒」または「危険レベル」の日がおおよそ 23 日以上であり、「安全レベル」日数がゼロであった。西日本に比べ、仙台、秋田、札幌では相対的に警戒～危険レベルの日数は少ないものの、「危険レベル」の日は少なからず存在している。代表地点の中で最も冷涼な札幌においても「安全レベル」日数が 5 日以下であることを鑑みると、現在の日本の 8 月には「安全レベル」の日がほぼない状態になっていると言えよう。

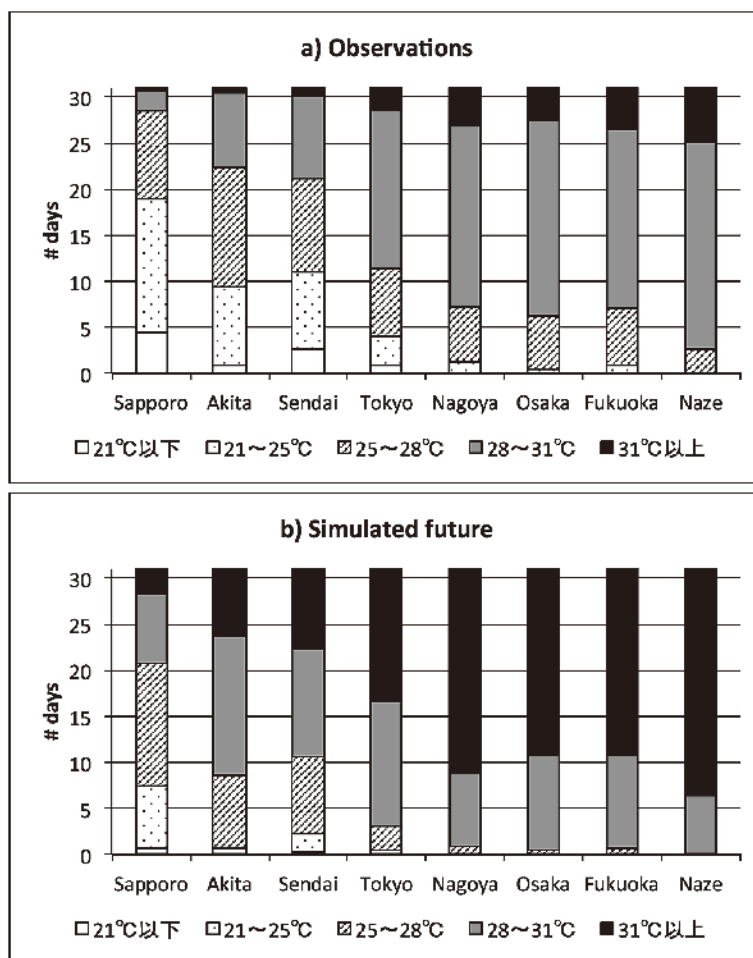


Fig. 6. Average number of warning level days for August from a) observations (1981-2010 mean), and b) simulated future climate (2081-2100 mean).

将来気候においては、「安全レベル」の日はもとより、「注意レベル」日数も札幌を除いてほぼなくなると予想されている（図 6b）．逆に「危険レベル」の日数が大幅に増加し、東京では平均 13 日、名古屋以西の代表地点では 20 日を超えると予測されている．現在、「危険レベル」日数は沖縄や九州の一部を除いて平均 5 日以下であるが、将来は東海以西の多くの地点で 20 日以上、東北地方でも 5 日以上になると予測されている（図 7）．日本体育協会の定める運動指針では、日最高 WBGT が 31℃ 以上の場合“特別の場合以外は運動は中止する”としている．図 6-7 に示す結果から社会的影響の一例をあげると、たとえば、西日本の夏休み中、WBGT 値が日中最高となる正午から 15 時頃にかけては、子ども達が外へ出て遊ぶのを極力控えなくてはならない気候になる可能性を示している．またこの統計は 21 世紀末 20 年の平均であるから、年によっては 8 月中全ての日が「原則運動禁止」となる可能性もある．

3.4. 日変化

前節では日最高 WBGT に基づいて警戒レベル日数の検証を行なったが、朝から夕方にかけての日変化はどうなっているのだろうか．ここでは、各代表地点における WBGT の日変化の平均と、その将来変化を見てみる．

現在の札幌では、代表地点では唯一、早朝と夕方に平均 WBGT が 21℃ を下回る時間帯がある（図 8a）．この時間帯を除いて、日中の平均 WBGT はほとんど「注意レベル」の 21～24℃ 帯に収まっている．しかし将来では朝から暑く、午前 8 時までには現在の日最高 WBGT に匹敵する 24℃ を超えるようになる．午前 9 時以降 16 時までは、「警戒レベル」の 24～28℃ になると予測されている．

現在の秋田と仙台では、日中の平均 WBGT は「注意レベル」の 21～25℃ にほぼ収まっている．日最高 WBGT は両地点とも 25℃ を超えるが、仙台より秋田の方がやや高い傾向にある．将来では両地点とも午前 7 時には 25℃ 前後に達するようになると予測されているが、これは現在の正午前後の暑さが、将来では朝から押し寄せるようになるということの意味している．日中はさらに暑くなって日最高 WBGT が 28℃ を超えるようになり、図 5 に示す「厳

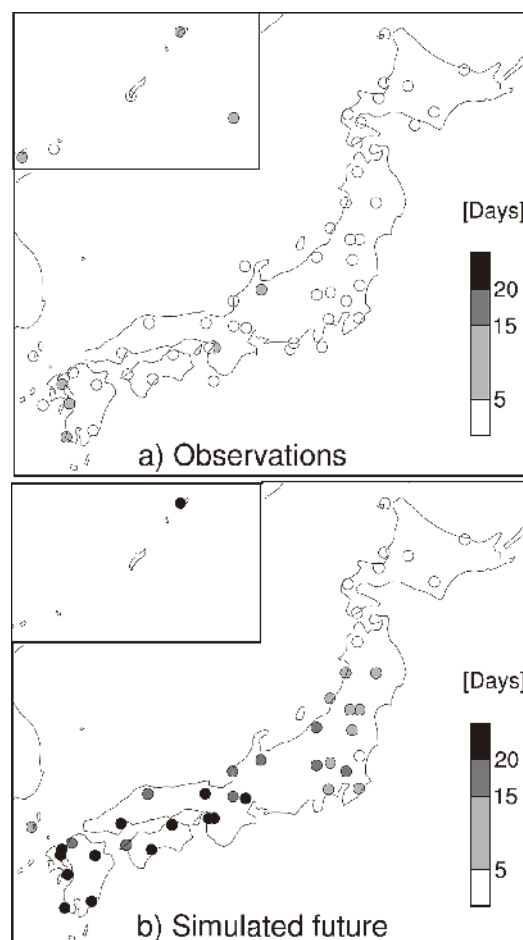


Fig. 7. Average number of “danger level” days (day-time maximum WBGT exceeding 31℃) for August from a) observations (1991-2010 mean), and b) simulated future climate (2081-2100 mean).

重警戒レベル」日数の大幅な増加に繋がっている．

現在の東京以西の地点では、早朝でのみ 25℃ 以下となっている以外は、すでに日中のほとんどが「警戒レベル」以上の WBGT 値になっている．名古屋、大阪、福岡の 3 地点では正午前後の時間帯で WBGT が 28℃ を超えており、「厳重警戒レベル」以上の日数が現在でも 8 月中 20 日以上になる原因となっている（図 6）．名瀬では WBGT が 28℃ を超える時間帯はより長く、9-17 時と日中のほとんどの時間帯を占めている．将来は、東京以西の地点全てにおいて朝 8 時以降は「厳重警戒レベル」の 28℃ 以上になると予測されている．東京と福岡では正午前後の平均 WBGT が「危険レベル」である 31℃ を超えるのを間逃れているが、名古屋と大阪では 12-14 時、名瀬では 11-15 時の時間帯で 31℃ を超えるようになると予測されている．

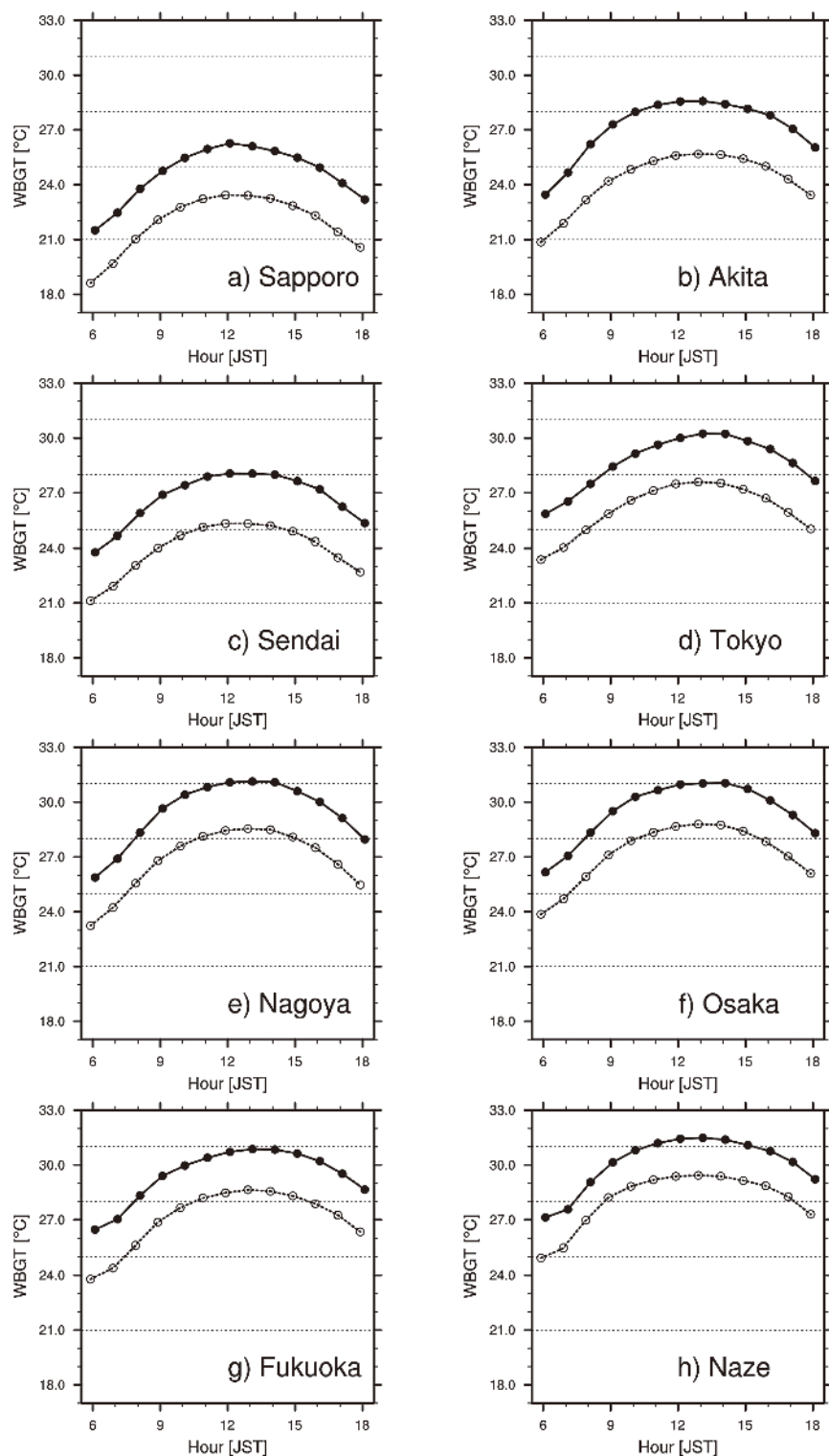


Fig. 8. Average diurnal cycle of WBGT from observations (dotted lines, 1991-2100 mean) and simulated future climate (solid lines, 2081-2100 mean).

地点間の現在と将来の日変化を比べることにより, ある特定地点の将来気候が現在のどの地点のよ

うになるのかを見る事ができる (Ishizaki *et al.*, 2012b). 例えば, 将来の秋田の WBGT 日変化を現在の大阪と比べてみると, 双方の地点での日最低・

最低 WBGT 値がそれぞれ 24℃前後、29℃前後となっているなど、よく似ていることが分かる(図 8b, f). 両者間の相関を取ってみると、両者がほぼ一致していることが分かる(図 9). このことは、将来、秋田市の平均的な WBGT 日変化が現在の大阪のようになることを意味している. 同様に、将来の札幌は現在の仙台、将来の仙台は現在の名古屋のような気候になる可能性が示唆されている(図 8).

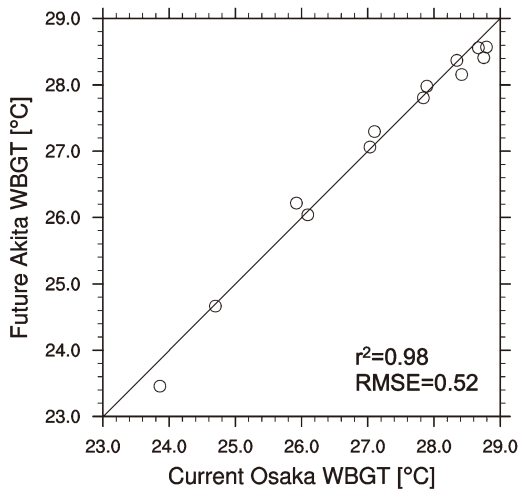


Fig. 9. Scatter diagram of mean hourly WBGT (climatological mean WBGT for each hour of 6-18 JST) between current Osaka and future Akita.

4. 考 察

4.1. 現在の WBGT 時空間変動について

3.2 節では、現在の WBGT の変動が北方ほど大きく、南に行くほど小さくなっていることを述べた. このことは、太平洋高気圧の挙動などが関連していると考えられる. 西日本と沖縄諸島は、恒常的に太平洋高気圧に覆われているため気温の変動が小さい. 一方で北海道や東北は太平洋高気圧の一時的な張り出しや、ヤマセやフェーン現象などの局地現象などにより気温の変動が大きくなっていると思われる. WBGT の変動と大規模場・局地現象の変動の関係については今後精査する必要がある.

また、東北や北陸の日本海側の都道府県では暑熱による死亡率が高いことが知られている(星ほか, 2010; 藤部, 2013). 本研究でも示した通り、これらの地域は平均的には比較的穏やかな暑熱環境下

にあるが、思いがけず急に劣悪な暑熱条件になることがある. 普段から暑さに慣れていない人が急に厳しい暑熱環境下に置かれることで熱中症を発症しやすくなるというのは想像に難くない. 気候学的な視点に基づく気象条件の変動と熱中症死亡率の関連については今後の研究に期待したい.

4.2. 将来変化量の空間変動と予測の不確実性について

3.1 節で示した通り、本研究の将来予測では WBGT 昇温量は全体的に北方ほど大きく、特に東北地方での昇温が著しくなっている(図 4c, 表 3). この要因について、表 3 に示す代表地点の WBGT と各気象要素の将来変化量を用いて考察する(なお、本節で着目するのは日本全体を通した南北方向の空間パターンであり、代表地点のみでこの南北パターンが十分に捉えられている事を付記しておく). 表 3 から、WBGT の将来変化量の空間変動は ΔT_g のそれに付随している様子が伺える. 式 (2) の通り、 T_g は T_a 、日射量 (S)、と風速 (u) の 3 要素に依存する. Δu には明瞭な空間パターンが見受けられないが、 ΔT_a と ΔS は ΔT_g 同様に東北で高い傾向を示している. このうち S については T_g の推定式により日射量が 400 W/m^2 を超える頻度 (fS) によって T_g 気候値が大きく変動する. fS の将来変化は秋田で突出して大きくなっており、 T_g の昇温に貢献している. 仙台についても同様の傾向が伺える. 名古屋でも ΔfS が大きい、 ΔT_a が秋田と仙台ほど高くないことから ΔT_g が抑えられている. 他の地点では ΔT_g は主に ΔT_a に従っている. これらのことから、 ΔT_g の空間パターンは全体的に ΔT_a に従うが、黒球温度算定式の特性により日射量が 400 W/m^2 を超える頻度が大きく変わる所は ΔS の寄与が相対的に大きくなっていると考えられる. 同様に ΔT_w について考察する. T_w は湿度 (ここでは気温への依存を回避するため水蒸気圧 e を用いる)、気圧 (P)、そして T_a に依存している. Δe は 4 hPa 前後で規則的な空間分布が見受けられない. また P は T_w への寄与が小さい (T_a と湿度を現在の気候値に固定し、 P の値を表 3 に示す範囲内で変化させても T_w の値は 0.01°C 程度しか変わらない). そのため、 ΔT_w の空間変動は ΔT_a に起因していることが分かる. まとめると、本研究での WBGT 将来予測は、全体的

Table 3. Simulated future change of August mean WBGT and its components, as well as their dependent meteorological variables at select locations. Here, u is wind speed, S is insolation, fS is frequency of S exceeding 400W/m^2 , e is vapor pressure, and P is atmospheric pressure

| | ΔWBGT [$^{\circ}\text{C}$] | ΔT_w [$^{\circ}\text{C}$] | ΔT_g [$^{\circ}\text{C}$] | ΔT_a [$^{\circ}\text{C}$] | Δu [m/s] | ΔS [W/m ²] | Δe [hPa] | ΔP [Pa] |
|-----|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|-----------------|
| 札幌 | 3.17 | 3.00 | 3.77 | 3.18 | 0.34 | 19.11 | 3.86 | 55.66 |
| 仙台 | 3.04 | 2.85 | 3.70 | 3.08 | 0.37 | 17.18 | 4.61 | 99.51 |
| 秋田 | 3.12 | 2.93 | 3.75 | 3.18 | 0.46 | 18.48 | 4.03 | 42.77 |
| 東京 | 2.75 | 2.56 | 3.36 | 2.87 | 0.41 | 14.73 | 3.99 | 85.09 |
| 名古屋 | 2.68 | 2.46 | 3.34 | 2.89 | 0.31 | 11.21 | 3.33 | 101.13 |
| 大阪 | 2.38 | 2.30 | 2.64 | 2.45 | 0.40 | 5.72 | 3.88 | 108.84 |
| 福岡 | 2.42 | 2.26 | 2.92 | 2.50 | 0.40 | 17.80 | 4.07 | 133.95 |
| 名瀬 | 1.90 | 1.79 | 2.22 | 2.07 | -0.11 | 5.92 | 4.02 | 153.52 |

には T_a の変化によって決まるが、東北地方では日射量の変化の貢献が大きいと考えられる。

力学的ダウンスケールを用いた将来予測においては、初期・境界条件を提供する全球気候モデルが季節平均 ΔT_a を大きく左右しているとの報告がある (Deque *et al.*, 2007; Kusaka *et al.*, 2012b)。気温の予測もさることながら、雲量の気候予測には大きな不確実性があることが知られている (IPCC, 2013)。このことは、本研究で示された WBGT 将来予測の結果もまた全球気候モデル同様に不確実性があることを意味している。影響評価を行う際には、このような点に留意した上で、力学的ダウンスケールの結果を利用するのが望ましい。

4.3. 通風条件について

本来であれば、WBGT の算出には自然通風条件下で観測された T_a と T_w を用いものとされている (Yaglou and Minard, 1957; ISO-7243)。しかし、本研究で用いた気象官署での観測データは強制通風条件下の観測によるものである。小野・登内 (2014) の報告によると、自然通風式 T_w は強制通風式 T_w より高く、両者の差は夏季の平均で 0.5°C 程度になるとしている。 T_a については両者の差は十分に小さい (0.1°C 未満) としているが、8月の最高気温では温度差が $0.1\sim 1.4^{\circ}\text{C}$ になるとの報告もある (Aoshima *et al.*, 2010)。しかしながら本研究で議論している WBGT 統計値の時空間変動幅は数 $^{\circ}\text{C}$ のオーダー (例えば、熱中症警戒レベルは WBGT3 \sim 4 $^{\circ}\text{C}$ で変動し、また WBGT 気候値の将来変化量は平均で 2°C 程度である) であるため、通風条件による誤差の影響は十分に小さいものとする。

4.4. 都市効果について

本研究では、現在気候の解析と WRF データの補正に官署観測データを用いた。気象官署データは WBGT 算出に必要な日射量のデータが長期にわたって整備されているという利点がある一方、官署所在地が大都市に限られているという欠点がある。大都市にあっては、観測値に都市効果が反映されるのは避けられない。このため本研究で示した現在の WBGT 気候値には都市効果が含まれており、日本全体の統計ではなく主として日本の都市部における統計となることに留意されたい。しかしながら、日本の人口は都市部に集中している事を鑑みると、本研究で示した WBGT 統計値は「日本人の多くが経験している暑熱環境」を定量的かつ気候学的に把握するにあたって一定の有用性があるものと考えられる。

本研究で使用した WRF モデルには都市キャノピースキームが導入されているため、将来予測値にも都市効果が反映されている。しかし、本研究では将来都市構造や人口がどのように変化するかは考慮していない。また、モデル解像度が 20 km であるため、街区レベルでの都市マイクロ気候までは考慮できていない。超高解像度 (1 km 以下) で街区レベルの都市効果を考慮すると、東京 23 区内でも WBGT モデル値に顕著な空間変動が現れるとの報告がある (Ohashi *et al.*, 2014)。街区ないし建物レベルの都市効果を厳密に考慮し、将来の都市シナリオを設定した都市におけるよりよい将来予測が今後の課題としてあげられる。

5. まとめ

本研究では、日本で最も暑くなる 8 月を対象とし、WBGT を暑熱指標として用いて日本の将来の暑熱環境予測を行なった。地域詳細な予測情報の創生のために、全球気候モデルの出力値を領域気候モデルの初期・境界条件として使用する力学的ダウンスケール手法により、高解像度の気候予測データを作成した。

将来予測を行なう前に、まずは現状を把握する必要がある。そのため気象官署観測から WBGT を算出し、現在の WBGT 気候値を調査した。その結果、現在の日本はすでに厳しい暑熱環境下にあることが分かった。西日本では日中平均 WBGT 値が 26℃以上であり、「警戒レベル」が 8 月の“気候値”となっている。また、日最高 WBGT が 21℃以下の「安全レベル」の日は札幌でも 5 日以下しかなく、現在の日本の 8 月には「安全レベル」の日がほぼない状態となっている。北海道と東北地方の地点は平均的には比較的冷涼であるが、突発的に WBGT 値が 32℃前後となることがあり、普段穏やかでも急に暑熱環境が悪化することもあるため注意が必要である。

将来 (RCP4.5 シナリオ下の 2081–2100 年) はさらに暑熱環境が悪化すると予測された。日中平均 WBGT は全国平均で 2.5℃上昇すると予測され、その昇温量は東北地方で大きく、例えば将来の秋田市は現在の大阪市のような気候になる可能性が示唆された。WBGT の将来変化は主に気温の上昇によるものだが、東北地方では日射量の変化も重要であることが分かった。各地点での WBGT 最低値の上昇が著しく、東京以西では 8 月の日中「安全レベル」に相当する WBGT 値 21℃以下の出現頻度がゼロとなるなど、「WBGT 値が下がりにくい」気候となる可能性が示唆された。また、運動時の指針で「原則運動禁止」となる日最高 WBGT 値が 31℃以上となる日数が、西日本では 8 月中 20 日を超えるようになると予測された。

将来予測には大きな不確実性があるため、今後はさまざまな手法やモデルを用いて予測を行い、確率情報の形で暑熱環境の予測を得ると同時に、予測不確実性を減少させる道すべを見いだすことが望ましい。しかしながら、現在すでに日本の

広い範囲が厳しい暑熱環境にあること、温暖化が進んでいくに従って暑熱による健康リスクがさらに増大することは明白である。本研究の結果は、政府や民間の暑熱対策の判断材料となることが期待される。

謝 辞

本研究は、文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム テーマ C 気候変動リスク情報の基盤技術開発」の支援により実施された。本研究成果は筑波大学計算科学研究センターの一般共同利用プロジェクト (T2K) を利用して得られたものである。本研究の推進にあたり、気象業務支援センターの登内道彦氏より貴重なご助言を頂いた。ここに示し感謝の意を表します。

引 用 文 献

- AOSHIMA, T., NAKASHIMA, K., KAWAMURA, H., KUMAMOTO, M., SASAI, T., KAWANA, S., and JOKO, M. (2010): Comparison of thermometer screen/shields in 2009–2001, WMO Technical Conference TECO-2010, Session 3 P(1).
- DEQUE, M., ROWELL, D.P., LUETHI, D., GIORGI, F., CHRISTENSEN, J.H., ROCKEL, B., JACOB, D., KJELLSTROEM, E., de CASTRO, M. and van den HURK, B.J.J.M. (2007): An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, **81**: 53–70.
- FISCHER, E.M. and SCHÄR, C. (2010): Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geosci.*, **3**: 398–403.
- FLATO, G., MAROTZKE, J. and Coauthors (2013): Evaluation of Climate Models. In: STOCKER, T.F., QIN, D., PLATTNER, G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. and MIDGLEY, P.M. (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, (USA).
- 藤部文昭 (2013): 暑熱 (熱中症) による国内死者数と夏季気温の長期変動. *天気*, **60**: 371–381.
- 初鹿宏壮, 近藤隆之, 川瀬宏明, 木村富士男 (2013): 富山における WBGT 指数の将来予測. *日本気象学会 2013 年度秋季大会講演予稿集*, **104**: 59.
- 星秋夫, 中井誠一, 金田英子, 山本享, 稲葉裕 (2010): わが国における熱中症死亡の地域差. *日生気誌*, **47**: 75–184.
- 飯泉仁之直, 西森基貴, 石郷岡康史, 横沢正幸 (2010):

- 統計的ダウンスケーリングによる気候変化シナリオ作成入門. 農業気象, **66**: 131–143.
- International Organization for Standardization. ISO-7243.
- IPCC, 2013: Summary for Policymakers. In: STOCKER, T.F., QIN, D., PLATTNER, G.-K., TIGNOR, M., ALLEN, S.K., BOSCHUNG, J., NAUELS, A., XIA, Y., BEX, V. and MIDGLEY, P.M. (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, (USA).
- ISHIZAKI, N., TAKAYABU, I., OH'IZUMI, M., SASAKI, H., DAIRAKU, K. and IIZUKA, S. (2012a): Improved Performance of Simulated Japanese Climate with a Multi-Model Ensemble. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**: 235–254. doi:10.2151/jmsj.2012-206.
- ISHIZAKI, N., SHIOGAMA, H., TAKAHASHI, K., EMORI, S., DAIRAKU, K., KUSAKA, H., NAKAEGAWA, T. and TAKAYABU, I. (2012b): An attempt to estimate of probabilistic regional climate analogue in a warmer Japan. *Meteor. Soc. Japan*, **90B**: 65–74.
- 環境省 (2007): WBGT 観測による熱中症予防情報の提供業務報告書. <http://www.env.go.jp/air/report/h22-04/index.html>.
- 川崎晴久 (1993): C & FORTRAN による数値解析の基礎. 共立出版株式会社 (東京), pp. 42–47.
- 気象庁 (2013): 地球温暖化予測情報第 8 巻.
- KUSAKA, H., CHEN, F., TEWARI, M., DUDHIA, J., GILL, D., DUDA, M., WANG, W. and MIYA, Y. (2012a): Numerical Simulation of Urban Heat Island Effect by the WRF Model with 4-km Grid Increment: An Inter-Comparison Study between the Urban Canopy Model and Slab Model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90B**: 33–35.
- KUSAKA, H., HARA, M. and TAKANE, Y. (2012b): Urban climate projection by the WRF model at 3-km horizontal grid increment: Dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolies. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90B**: 47–63.
- LIANG, X.-Z., KUNKEL, K.E., MEEHL, G.A., JONES, R.G. and WANG, J.X.L. (2008): Regional climate models downscaling analysis of general circulation models present climate biases propagation into future change projections. *Geophys. Res. Lett.*, **35**: L08709. doi:10.1029/2007GL032849.
- MEEHL, G.A. (2004): More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st Century. *Science*, **305**: 994–997.
- NAKANO, M., MATSUEDA, M. and SUGI, M. (2013): Future projections of heat waves around Japan simulated by CMIP3 and high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric climate models. *J. Geophys. Res. Atm.*, **118**: 1–13.
- 日本生気象学会 (2013): 日常生活における熱中症予防指針 Ver. 3. 日生気誌, **50**: 49–59.
- 日本体育協会 (2012): スポーツ活動中の熱中症ガイドブック. <http://www.japan-sports.or.jp/medicine/tabid/523/Default.aspx>.
- OHASHI, Y., KAWABE, T., SHIGETA, Y., HIRANO, Y., KUSAKA, H., FUDEYASU, H. and FUKAO, K. (2008): Evaluation of urban thermal environments in commercial and residential spaces in Okayama City, Japan, using the wet-bulb globe temperature index. *Theor. Appl. Climatol.* **95**: 279–289.
- 大橋唯太, 竜門洋, 重田祥範 (2009): 都市域のさまざまな活動空間での WBGT の比較. 日生気誌, **46**: 59–68.
- OHASHI, Y., KIKEGAWA, Y., IHARA, T. and SUGIYAMA, N. (2014): Numerical simulations of outdoor heat stress index and heat disorder risk in the 23 wards of Tokyo. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**: 583–597.
- 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. 日生気誌, **50**: 147–157.
- ONOGI, K., TSUTSUI, J., KOIDE, H., SAKAMOTO, M., KOBAYASHI, S., HATSUSHIKA, H., MATSUMOTO, T., YAMAZAKI, N., KAMAHORI, H., TAKAHASHI, K., KADOKURA, S., WADA, K., KATO, K., OYAMA, R., OSE, T., MANNOJI, N. and TAIRA, R. (2007): The JRA-25 reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**: 369–432.
- SKAMALOCK, W., KLEMP, J.B., DUDHIA, J., GILL, D.O., BARKER, D., DUDA, M.G., HUANG, X.-Y. and WANG, W. (2008): A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note, NCAR/TN-475+STR.
- 高藪出, 金光正郎 (2010): 力学的ダウンスケーリングのレビュー. 天気, **57**: 435–447.
- 登内道彦, 村山貢司 (2008): 熱中症危険度の地域特性と HWDI. 日生気誌, **45**: S62.
- WATANABE, M., SUZUKI, T., O'ISHI, R. and KOMURO, Y. (2010): Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*. **23**: 6312–6335.
- WILLETT, K.M. and SHERWOOD, S. (2012): Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature. *Int. J. Climatol.*, **32**: 161–177.
- YAGLOU, C.P. and MINARD, C.D. (1957): Control of heat casualties at military training centers. *Arch. Ind. Health*, **16**: 302–316.

Corresponding Author Address: Asuka Suzuki-Parker,
Graduate School of Life and Environmental Sciences
University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai Tsukuba, Ibaraki
305-8572 Japan.
E-mail: suzuki.asuka.fp@u.tsukuba.ac.jp
別刷請求先: 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学生命環境系
鈴木パーカー明日香