

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

Parameter adjustment and application to an extension area of Okada and Kusaka's formula for the black globe temperature

岡田 牧^{*1} 岡田 益己^{*2} 日下 博幸^{*3}
Maki Okada Masumi Okada Hiroyuki Kusaka

^{*1} 筑波大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba

^{*2} 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University

^{*3} 筑波大学計算科学研究センター Center for Computational Sciences, University of Tsukuba

Corresponding author: Maki Okada, mokada@geoenv.tsukuba.ac.jp

ABSTRACT

Globe temperature is an important element of the Wet-bulb Globe Temperature (WBGT). The formula, derived in our previous study to estimate the globe temperature, was applied to the long-term records observed at four major cities; Tokyo, Nagoya, Osaka and Fukuoka. The ranges of the meteorological variables in the observation were large; solar radiation ranging from 2.8 W/m² to 1083.3 W/m² and wind speed ranging from 0.0m/s to 14.8m/s. The parameters of the equation were newly determined by fitting the equation to those records. The equation thus obtained as a function of solar radiation and wind speed estimated the observed globe temperature with root mean square error (RMSE) of 2.3 °C. The errors in estimates by the equation changed largely neither city to city nor year to year. We thus, concluded that the equation with newly determined parameters was applicable to a wide range of climatic conditions and usable to predict WBGT.

キーワード：WBGT、黒球温度、適用可能性、長期観測データ

Key Words : WBGT, Globe temperature, Applicability, Long-term observation data

1. はじめに

近年、地球温暖化に伴う極端な高温現象が増えている⁽¹⁾。さらに、都市化に伴う人工被覆面の増加や都市構造物の効果により、夏季における都市域の気温は上昇傾向にあり⁽²⁾⁽³⁾、都市住民に対する熱中症に代表される熱ストレスの増大が懸念されている。実際、日最高気温は熱中症による死亡率・搬送率と高い相関関係にある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このような背景から、熱ストレスに関する健康被害の実態把握と予報が重要であると考えられている。

熱ストレスの予報のために、不快指数 DI⁽⁶⁾、新標準有効温度 SET⁽⁷⁾、予測平均温冷感 PMV⁽⁸⁾、湿球黒球温度 WBGT⁽⁹⁾など多くの熱環境指標が作成されてきた。近年、都市ヒートアイランド現象と関係して、様々な熱環境指標を用いて、人間の熱ストレスを評価する試みが増えてきている^{(10)~(14)}。

代表的な熱環境指標の1つである WBGT は、軍隊訓練の熱中症予防が目的で Yaglou and Minard⁽⁹⁾によって提唱された。WBGT は、 $0.7 \times \text{湿球温度} + 0.2 \times \text{黒球温度} + 0.1 \times \text{乾球温度}$ として定義され、熱中症の発生に起因する気象因子をすべて含んだ指標として古くから広く利用されている⁽¹⁵⁾。ISO7243 に認定されており、世界的に公的機関の基準とされている⁽¹⁶⁾。日本においても労働環境の基準とされ、環境省の熱中症予防指数に採用されている⁽¹⁷⁾。

WBGT 算定には黒球温度の計測が必要であるが、その温度を安定的かつ継続的に測定することは困難である。そこで、黒球表面の熱収支を元に黒球温度をその他の気象要素

から計算する試みがされてきた⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。Dimiceli et al.⁽²⁰⁾は、Hunter and Minyard⁽¹⁸⁾による黒球表面の熱収支式から、黒球温度に関する4次の多項式を線形式に変形し、黒球温度の推定式を導出した(付録A参照)。このような物理則から導出された推定式は、黒球温度を高精度に推定できると考えられる。但し、気象庁観測の標準的な気象要素や数値モデルの標準出力変数以外の要素を含んでいたり、複数の式を介する必要があるため、万人が容易に使用しにくい。

物理的に黒球温度を推定する一方、経験的に黒球温度を推定する方法もある⁽²¹⁾⁽²²⁾(付録A参照)。経験的な黒球温度推定式は、気象観測ネットワークから取得できる気象要素を使って、推定式の係数を決定している。従って、推定に必要な要素は気象庁の観測データや数値モデルの標準出力変数で充分であり、誰でも容易に黒球温度を推定できる。高市ら⁽²¹⁾は温室内の作業環境における WBGT 算定をするために、風速を考慮しない黒球温度推定式を作成した。登内・村山⁽²²⁾は全天日射量の違いで推定式を2分化して黒球温度を算定する式を作成した。現在、環境省は WBGT 算定に登内・村山⁽²²⁾の式を採用している。近年、環境省はウェブ上で各都市の WBGT を公表しており、WBGT は一般市民により身近な指標になってきている。このような背景の下、少ない気象要素で容易に黒球温度を推定できる推定式が期待される。

Okada and Kusaka⁽²³⁾は、環境省に採用されている登内・村山⁽²²⁾の推定式に、風速に依存する系統的誤差が含まれていることを指摘した。そこで彼らは、Dimiceli et al.⁽²⁰⁾と同様に黒球表面の熱収支をもとに系統的誤差が現れな

いような推定式の形を提案した。彼らの式は、登内・村山⁽²²⁾の式と同様に気象官署で計測されているデータのみを使って黒球温度を推定でき、且つ登内・村山⁽²²⁾と同程度の精度を示した。しかし、Okada and Kusaka⁽²³⁾では、観測期間が3日と限られており、さらに、推定式の係数決定が1.3m/s以下と限られた風速帯で行われていた。風が弱いほど人間は暑さを感じやすく、熱中症の危険度が増すと考えられるため、弱風に限った使用は有用であろう。一方、近年では暑熱環境評価のために、数値モデルを用いた WBGT 算定が行われるようになった⁽¹⁴⁾⁽²⁴⁾。当然、数値モデルは WBGT を算定する際、幅広い風速帯を取扱い、数値モデルの再現性の把握のために、気象官署データなどの観測値と計算結果を比較することがある。数値モデルによる気候計算の結果や長期観測の結果を用いた WBGT の気候値の推定を利用するために、Okada and Kusaka⁽²³⁾の式の汎用性を高める必要がある。

環境省は2006年から夏季 WBGT モニタリングのために、全国主要都市の気象官署露場内において黒球温度の観測を続けている⁽²⁵⁾。そこで、本研究では、環境省による WBGT モニタリングのデータが比較的長期に残る4都市（東京、名古屋、大阪、福岡）における観測データに Okada and Kusaka⁽²³⁾の式をフィッティングさせ、その汎用性を高めることを目的とする。

2. 手法

2.1 黒球温度推定式

式(1)に本研究で使用する Okada and Kusaka⁽²³⁾の式を記す。彼らは黒球表面の熱収支に基づいて式(1)の形の推定式を導出した。導出の際、黒球の材質は熱伝導率が非常に高く、黒球内部で計測した温度と黒球表面の温度は等しいと仮定している。なお、導出過程は付録 B にまとめているので、そちらを参照されたい。

$$T_g = \frac{(S_o + a)}{(bS_o + cU + d)} + T_a \quad (1)$$

ここで、 T_g は黒球温度 (°C)、 T_a は気温 (°C)、 S_o は全天日射量 (W/m^2)、 U は風速 (m/s) を表す。完全な物理式であれば、 $a \sim d$ は気象要素から成る関数で表現されるはずである。但し、Okada and Kusaka⁽²³⁾の式は、気象官署から得られない気象要素を全て経験定数 $a \sim d$ として押し込めることで黒球温度を推定する。

黒球温度は太陽天頂角の影響を受けるため全天日射量に対して非線形的な変化をする（付録 B 参照）。登内・村山⁽²²⁾は推定式を全天日射量 $400W/m^2$ で2分化して、この傾向を表現している。但し、序論でも述べたように、登内・村山⁽²²⁾の式は、推定式を2分化していることで、弱風になるほど日射量 $400W/m^2$ 付近で誤差が大きくなる。一方、高市ら⁽²¹⁾は全天日射量に対する双曲線関数によって、黒球温度と全天日射量の関係が連続的になるよう表現している。Okada and Kusaka⁽²³⁾は黒球温度と全天日射量の関係を高市ら⁽²¹⁾と同様の方法で表現している。

2.2 使用データ

環境省は夏季に限定して2006年より、全国の主要都市気象官署露場内の芝生上高さ1.5mにて黒球温度を1時間毎に計測している⁽²⁶⁾。本研究では、データセットが統一して残されている東京、名古屋、大阪、福岡の4地点

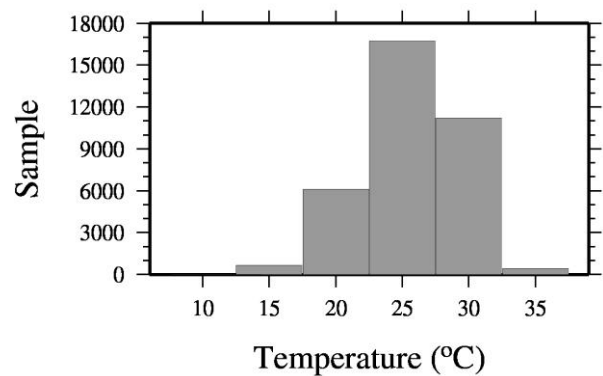


図1 気温のヒストグラム。

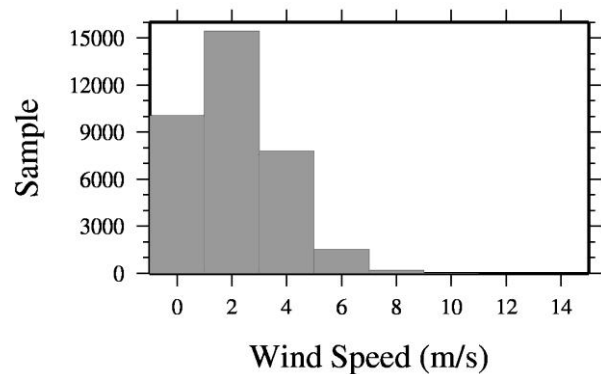


図2 風速のヒストグラム。

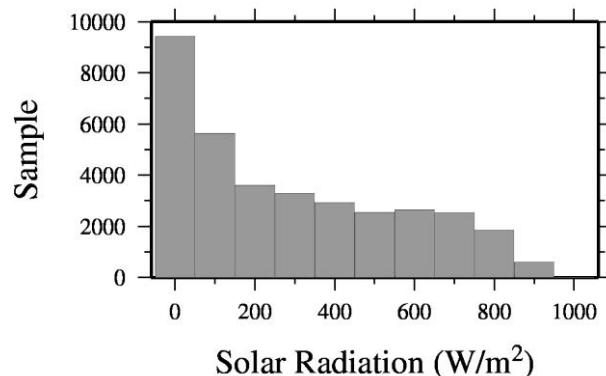


図3 全天日射量のヒストグラム。

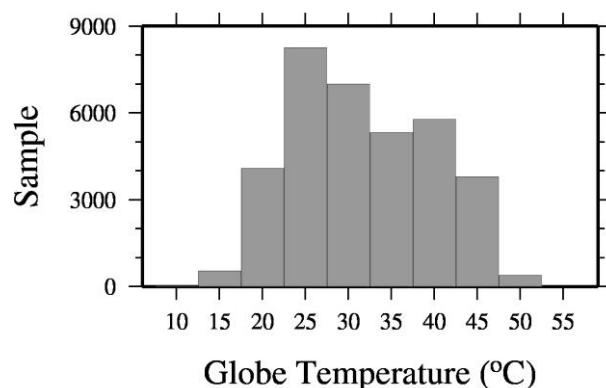


図4 黒球温度のヒストグラム。

の7~9月の計測データを使用した（名古屋の2006年9月だけは欠損）⁽²⁵⁾。気温・日射量・風速は当該気象官署の特別データを使用した。風速計の設置高度は気象官署毎に異なる。各気象官署における風速計の設置高度は、東京で

地上 35.1m、名古屋で地上 17.8m、大阪で地上 22.9m、福岡で地上 34.6m である。このように風速は黒球が設置されている高度（地上 1.5m）の風速ではない。加えて、全天日射量は 1 時間積算日射量（単位：MJ/m²）であるため、本来であれば気温や風速と同じ平均時間の仕事量に換算しなければならない。但し、環境省は、特別な補正をかけずに気象庁の観測データを登内・村山⁽²²⁾の式に与えて黒球温度を推定し、最終的にその温度を Yaglou and Minard⁽⁹⁾の式に与えて WBGT を算定している⁽²⁶⁾。そこで本研究においても、計測データに特別な補正をかけずにそのまま利用した。なお、全天日射量は、1 時間積算日射量（単位：MJ/m²）を単純に 3600 秒で除し、1 時間当たりの仕事率（単位：W/m²）に直した。環境省の黒球温度は夜間にも計測されているが、当然、全天日射量は夜間に記録されていない。そこで本研究では、全天日射量が記録されているのに黒球温度が 0℃を記録していたデータや、気象要素の欠損値・異常値は全て取り除き、合計 35105 データを使用した。本研究では、数値モデルの気候計算にも利用できるような全天候型の推定式を目指しているため、降水時または降水後のデータを使用データから敢えて取り除かなかった。

次に、使用データの特徴を示す。図 1～4 はそれぞれ、使用した全データに関する気温・風速・全天日射量・黒球温度のヒストグラムである。横軸の数値は数値帯の最小値を表している。例えば、図 1 において 20℃は 20℃≤気温<25℃を意味している。平均気温は 28.1℃で、気温のサンプル数は 25℃帯と 30℃帯が最も多い（図 1）。風速のサンプル数は 2～4m/s 帯が最も多く、平均風速は 3.1m/s であった（図 2）。この値は Okada and Kusaka⁽²³⁾で扱われた最大風速 1.3m/s よりも大きな値である。全天日射量は 0W/m²よりも大きな値が記録されているデータを全て抽出したため、100W/m²未満のサンプル数が最も多くなった（図 3）。最後に、黒球温度のサンプル数は 25℃帯が最も多いが、平均黒球温度は 34.1℃であった（図 4）。

3. 結果

3.1 長期データより得られた黒球温度推定式

環境省による黒球温度の観測データと気象官署における気温、全天日射量、風速の観測データを用いて、式(1)の経験係数 a～d の値を統計的に決定した。係数決定には Okada and Kusaka⁽²³⁾と同様、非線形関数の最小値を探索する最適化手法の 1 つである滑降シンプレックス法を使用した。式(2)は、本研究で改めて係数決定した Okada and Kusaka⁽²³⁾の黒球温度推定式である。初期シンプレックスの位置を 0.1 から 20、刻み幅を 1000 から 0.1 まで変更して収束点が同じになることが確認されている。

$$T_g = \frac{(S_0 - 38.5)}{(0.0217S_0 + 4.35U + 23.5)} + T_a \quad (2)$$

図 5 は計測された黒球温度と式(2)から推定された黒球温度の散布図である。回帰直線は $y=x$ の直線にほぼ一致しており、平均二乗誤差（RMSE）は 2.39℃を示した。黒球温度と気温の差（以下、温度差）は全天日射量に対して、 \cos 則に従い非線形に増大する傾向を示す⁽²³⁾。図 6a は日射量と温度差の観測値および推定値の散布図である。両者の温度差を算出する際の気温は同じ観測値を用いた。観測における温度差と日射量の関係のばらつき

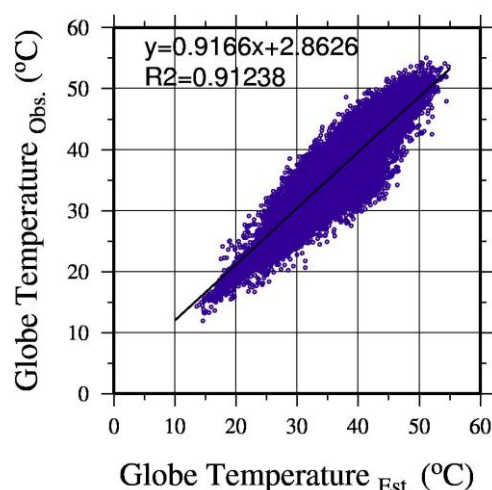


図 5 計測された黒球温度と式(2)から推定された黒球温度の散布図。

は大きく、特に日射量 200W/m²～800W/m²の領域で大きい。風速の違いも明瞭に見られないことから、温度差を変化させる要因が、全天日射量や風速以外にあることが伺える。この時、観測データの中には降水時や降水後のデータも含まれていることに留意されたい。それでも日射量に対して温度差が非線形に増大している傾向は示されている。一方、推定値のプロットは、同じ全天日射量における大きなばらつきを説明することは出来ないものの、温度差の非線形的な変化の傾向を再現している。また、風速帯毎に分けると、風速が大きくなるほど気温差の推定値が小さくなる様子を描いている。これは、風速が大きくなるほど黒球表面の対流熱交換が盛んになり、黒球温度と気温の差が小さくなることを表している。図 7 は全天日射量に対する推定誤差（黒球温度について推定値から観測値を引いた値）の箱ひげ図である。ばらつきはみられるものの推定誤差の中央値は 0℃付近に集中している。第 1 四分点と第 3 四分点も ±5℃以下であり、式(2)が高い推定精度を有していることが分かる。推定誤差のばらつきが大きい要因は、パラメータ a～d を定数とみなしているためと考えられる。例えば、直達日射の太陽高度への依存や、晴天と曇天での大気放射量の違いなど、a と b を定数として使う限り考慮できない。

続いて、温度差の風速依存性について調べた。図 8 は温度差と風速の関係を全天日射量毎に分けて描いた散布図である。観測値・推定値ともに大きくばらついており、弱風ほどそのばらつきは大きくなっていることが分かる。全天日射量が大きいほど温度差が大きくなっている様子が確認でき、同じ風速でも、日射量の変動によって黒球温度と気温の差が大きく変化している。図 6 と図 8 から、黒球温度は風速よりも全天日射量の影響を受けやすいことが推測される。但し、推定式から風速の項を除外すると、野外における黒球温度を過大に評価する恐れがある⁽²³⁾。従って、安易に風速項の重要性を過小評価してはならない。図 9 は風速に対する推定誤差の箱ひげ図である。風速に対する推定誤差のばらつきも全天日射量同様に大きい。Dimiceli et al.⁽²⁰⁾によると黒球表面の対流熱伝達係数は天頂角や日射量に依存している。式(1)において c と d を定数していることで、このような要素まで考慮できなかったためと考えられる。各風速における推定誤差の中央値は 0℃付近に集中しており、式(2)が風速による系統誤差を有さないことが示された。

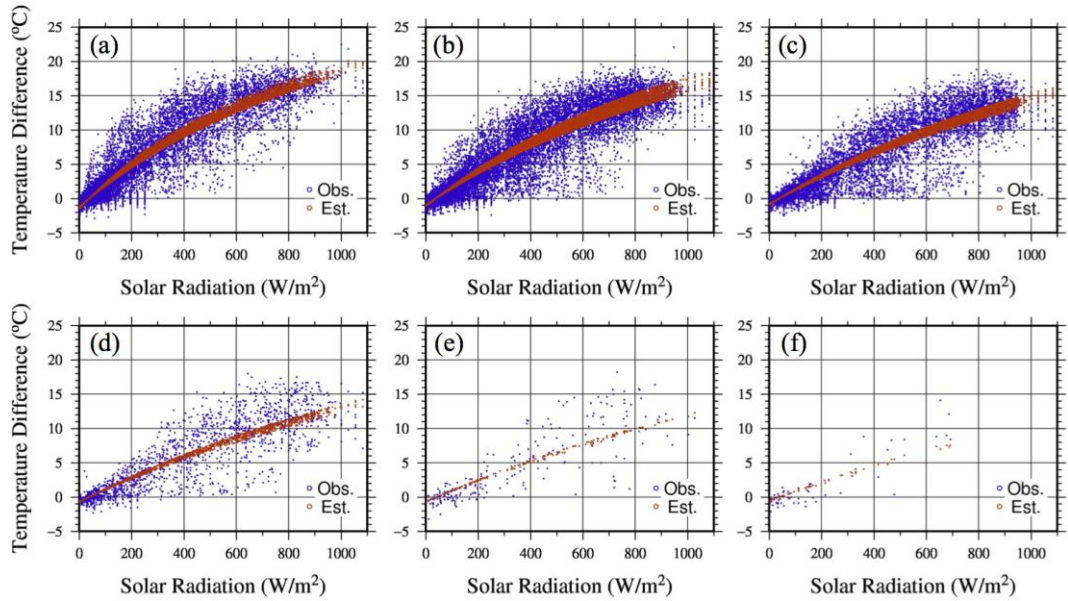


図6 全天日射量に対する温度差の散布図．青丸は観測値、赤丸は推定値を表す．(a)風速 2m/s 未満、(b)風速 2m/s 以上 4m/s 未満、(c)風速 4m/s 以上 6m/s 未満、(d)風速 6m/s 以上 8m/s 未満、(e)風速 8m/s 以上 10m/s 未満、(f)風速 10m/s 以上．

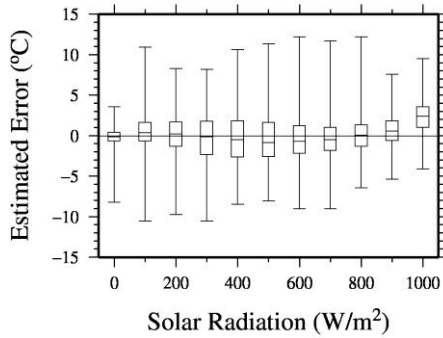


図7 各日射量帯の推定誤差の箱ひげ図．上から順に最大値、第1四分点、中央値、第3四分点、最小値を示す．

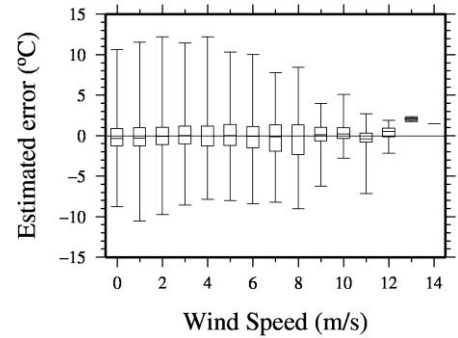


図9 各風速帯の推定誤差の箱ひげ図．上から順に最大値、第1四分点、中央値、第3四分点、最小値を示す．

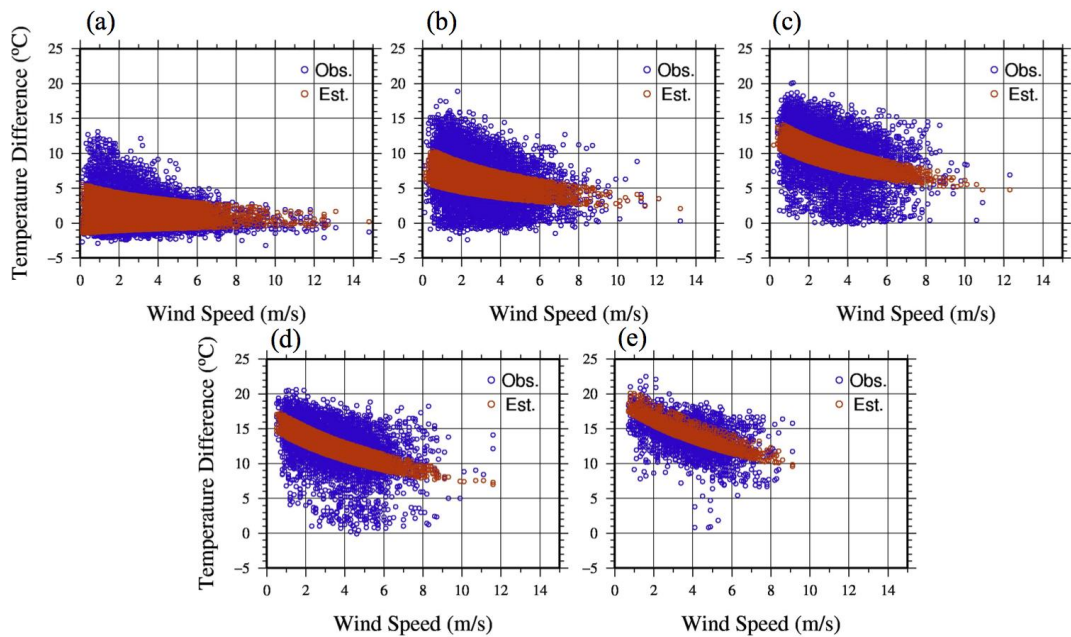


図8 風速に対する温度差の散布図．青丸は観測値、赤丸は推定値を表す．(a)全天日射量 200W/m² 未満、(b)全天日射量 200W/m² 以上 400W/m² 未満、(c)全天日射量 400W/m² 以上 600W/m² 未満、(d)全天日射量 600W/m² 以上 800W/m² 未満、(e)風速 800W/m² 以上．

3.2 都市別・年別の傾向と推定精度

Okada and Kusaka⁽²³⁾では、風速帯が限られておりサンプル数も豊富とは言えなかった。これと比べると、式(2)は4大都市における2006～2012年の7～9月のデータを使って係数決定された式であり、汎用性が高くなったと言えるだろう。

黒球温度は気温・全天日射量・風速によって変化するため、都市または年による気温・全天日射量・風速の差異によって黒球温度の傾向が異なることが否めない。そこで都市別・年別に黒球温度の傾向を把握したうえで、式(2)の推定精度の都市や年による差異を調査した。

図10は黒球温度のヒストグラムを都市別に表したものである。東京では25～30℃温度帯のサンプル数が最も多い。大阪と福岡ではヒストグラムの形が似ており、25～30℃温度帯に次いで40～45℃温度帯のサンプル数が他の都市に比べて多い。一方、名古屋は他の3地点とやや傾向が異なり、40～45℃温度帯のサンプル数が最も多かった。表1は、観測された黒球温度と、推定式から得られた黒球温度との回帰分析を都市別に行った結果である。東京の回帰直線の傾きが1に最も近く、その他の地点における回帰直線が $y=x$ からやや外れている。しかし、RMSEの点では、大阪と福岡の値が最も小さく、東京の値が最も大きくなった。この要因は、各都市における全天日射量と温度差の関係から推察される(図11)。東京以外の都市は、温度差が全天的に増大する様子が見られる。一方、東京では、全

天日射量400～800W/m²において、0～5℃程度の温度差の小さい事例が数多くみられる。このような事例は、全天日射量と温度差の間の非線形関係から外れた事例であり、東京における推定値と観測値のRMSEが大きくなった一因と考えられる。

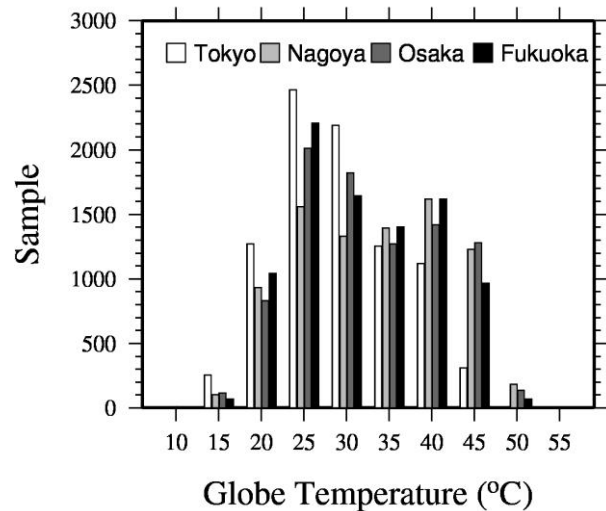


図10 各都市における黒球温度のヒストグラム。

表1 各都市における黒球温度に関する観測値と推定値の回帰分析結果。

都市名	回帰直線の傾き	回帰直線の切片 (°C)	決定係数	RMSE (°C)
東京	1.02	0.66	0.89	2.76
名古屋	0.91	2.27	0.93	2.39
大阪	0.92	3.01	0.93	2.15
福岡	0.89	3.22	0.93	2.23

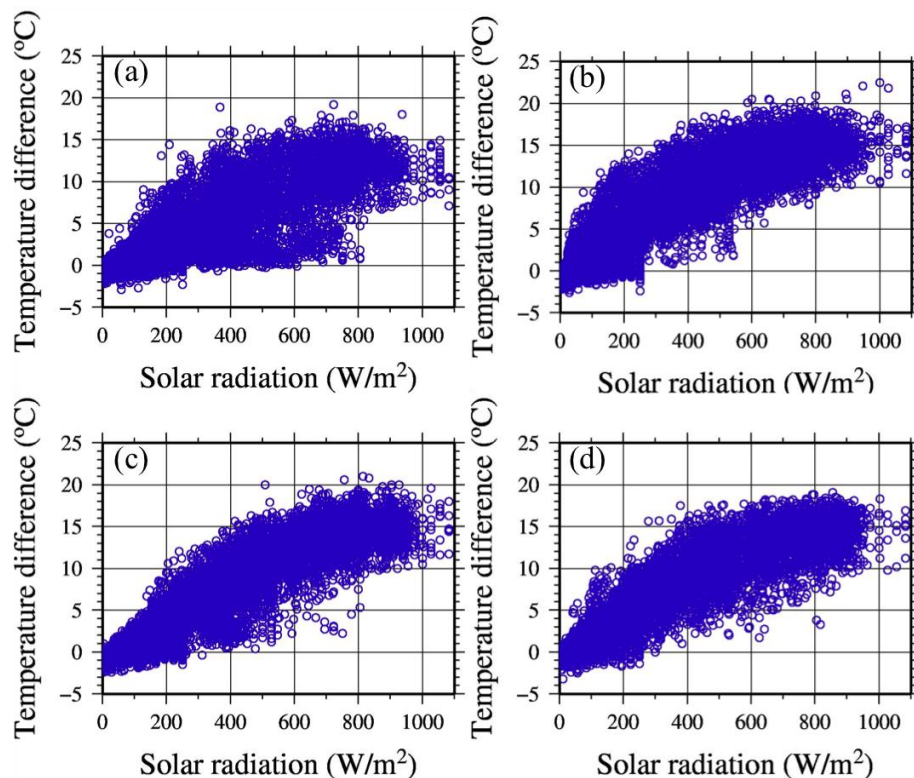


図11 各都市における全天日射量と温度差の散布図。(a)東京、(b)名古屋、(c)大阪、(d)福岡

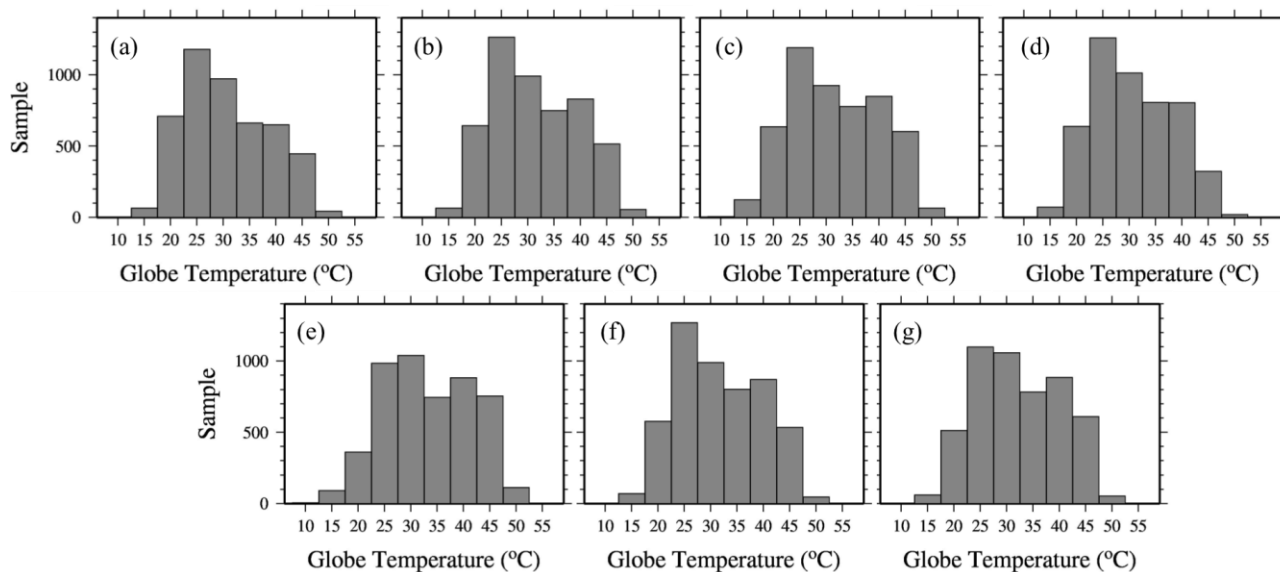


図 12 各年における黒球温度のヒストグラム．(a)2006 年、(b)2007 年、(c)2008 年、(d)2009 年、(e)2010 年、(f)2011 年、(g)2012 年

表 2 各年における黒球温度に関する観測値と推定値の回帰分析結果．

西暦年	回帰直線の傾き	回帰直線の切片 (°C)	決定係数	RMSE (°C)
2006 年	0.97	+0.98	0.93	2.16
2007 年	0.98	+0.82	0.93	2.07
2008 年	0.99	+0.54	0.93	2.15
2009 年	1.00	+0.34	0.92	2.13
2010 年	1.02	-0.89	0.91	2.55
2011 年	1.02	-1.04	0.90	2.59
2012 年	1.01	-0.63	0.87	2.95

次に黒球温度のヒストグラムの年々変動を調べた (図 12)．2010 年・2012 年を除いた他の年のヒストグラムにおいて 25～30°C のサンプル数が最も多いことが分かる (図 12a、b、c、d、f)．2010 年の夏季の平均気温の年差は +1.64°C と、1988 年の気象庁の統計開始以来、最高値を示した．2010 年は 30～35°C のサンプル数が最も多く、45～50°C のサンプル数も 755 事例と他の年と比べて多い (図 10e)．一方、2012 年では、25～30°C のサンプル数が 1098 事例、30～35°C のサンプル数が 1058 事であった．2010 年を除く他の年と比べると、30～35°C のサンプル数が 35～40°C のサンプル数と大きく変わらない (図 10g)．表 2 は、観測された黒球温度と、推定式から得られた黒球温度との回帰分析を年別に行った結果である．回帰直線の切片は 2010 年から負の値に転じているものの、±1°C 以内に収まっている．また RMSE は 2010 年以降に大きな値を示している．この要因を考えるために、年毎に気温・日射量・風速・黒球温度の観測値の平均を算出した (表 3)．2010 年の平均気温と平均黒球温度はそれぞれ 29.2°C、35.7°C と最も高く、2010 年は気温だけでなく放射による熱環境の観点からも近年最も暑かったことが分かる．2010 年より以前とそれ以後の違いとして、全天日射量に注目される．2010 年以降の全天日射量の平均値は 2010 年より前のそれと比べると高い値を示している．各年の全天日射量 1000W/m² 以上のサンプル数を数えたところ、2006 年は 55、2007 年は 76、2008 年は 93、2009 年は 59、2010 年は 142、2011 年は 128、2012 年は 156 であった．この結果からも明らかなように、2010 年以降は全天日射量の高い事例が多かったことが分かる．全天日射量が 1000W/m² 以上の領

域において、式(2)の推定誤差の中央値は +2.41°C であり、式(2)は全天日射量の高い領域で観測値より大きな値を示してしまう傾向がある (図 7)．従って、2010 年以降の RMSE が比較的大きくなった要因として、2010 年以降の全天日射量の高さが考えられる．

表 3 各年における気温・日射量・風速・黒球温度の平均値

西暦年	気温	日射量	風速	黒球温度
2006 年	27.6	303.8	3.00	33.2
2007 年	28.1	318.3	3.10	33.8
2008 年	28.0	326.7	2.81	34.1
2009 年	27.2	320.8	3.00	33.2
2010 年	29.2	368.7	3.08	35.7
2011 年	28.1	345.2	3.36	34.1
2012 年	28.5	364.3	3.16	34.7

4. まとめ

熱中症危険度指数として使われる WBGT を算定する際、黒球温度はその他の気象要素を使って推定されることが多い．黒球表面の熱収支から導出した推定式は高い推定精度が期待されるものの、観測ネットワークで計測されない要素を含んでおり、容易に推定式を使用することが難しい．一方、気象官署で計測されているデータのみで利用できる容易な推定式が作られてきた⁽²¹⁾⁽²²⁾．環境省で採用されている登内・村山⁽²²⁾の式は、重回帰によって経験的に作られた式であり、風速に依存する系統的誤差を含んでいる．

そこで、Okada and Kusaka⁽²³⁾は黒球表面の熱収支から推定式の形を考えることで系統的誤差が現れないようにした。彼らは自身の観測結果から推定式の係数決定を行ったが、観測値の風速範囲が 1.3m/s 以下と限られていた。近年、一般的な気象観測要素や数値モデルの標準出力要素のみから WBGT を算定することが増えており、この推定式の汎用化が期待されている。そこで、環境省の黒球温度の長期観測データを利用して、Okada and Kusaka⁽²³⁾の式を調整し、その挙動を調べた。

本研究で新たに係数決定された式(2)により推定される黒球温度は、観測値に対する回帰直線の傾きが 1 に極めて近く、RMSE も 2.39℃に留まった。環境省の報告⁽²⁶⁾によると、現在使用されている黒球温度推定式の誤差は数℃程度であり、本研究で示された式(2)の精度は同程度であることが伺える。黒球温度と気温の差は全天日射量に対して曲線的に変化し、この傾向も再現された。全天日射量や風速の変化に対する推定誤差の中央値は 0℃付近に近く、本式は全天日射量や風速の幅広い変化にも対応し得る。都市や年毎に推定精度を算出したところ、RMSE の最大値は、東京で 2.76℃（都市比較）、2012 年で 2.95℃（年比較）を示し、都市や年によって推定精度が大きく変わらないことが分かった。

式(2)は Okada and Kusaka⁽²³⁾の式の係数を国内 4ヶ所の長期観測データに基づいて統計的に決定してつくられた。推定式に系統的誤差が生じにくく、幅広い全天日射量や風速の変化にも対応することができると期待される。本研究は、曇天日や降水日を含めて係数決定を行った。これは観測や数値モデルにおいて WBGT を算定する場合、晴天時に限定して WBGT を算定するとは限らず、多様な気象において使用可能とすることを目指したからである。本式は WBGT の気候値の推定にも有用であろう。

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」、および文部科学省「気候変動適応推進プログラム（RECCA）」の支援により実施された。

付録 A. 既存の黒球温度推定式

以下に主な既存の黒球温度推定式で、物理則に従った推定式として Dimiceli et al.⁽²⁰⁾、経験的な推定式として高市ら⁽²¹⁾、登内・村山⁽²²⁾を記す。

(1) Dimiceli et al.⁽²⁰⁾の推定式

式 (A-1) に Dimiceli et al.⁽²⁰⁾の推定式を示す。

$$T_g = \frac{B + CT_a + 7680000}{C + 256000} \quad (\text{A-1})$$

式 (A-1) の中の B、C はそれぞれ式 (A-2)、(A-3) から計算される。

$$B = S_0 \left(\frac{f_{db}}{4\sigma \cos \theta} + \frac{1.2f_{dir}}{\sigma} \right) + \varepsilon_a T_a^4 \quad (\text{A-2})$$

$$C = \frac{hu^{0.58}}{5.3865 \times 10^{-8}} \quad (\text{A-3})$$

この時、 S_0 は日射量 (W/m^2)、 f_{db} は直達日射量の分配率、 f_{dir} は散乱日射量の分配率、 σ はステファンボルツマン定数、

θ は太陽の天頂角、 ε_a は大気放射率、 h は対流熱伝達率を表す。Dimiceli et al.⁽²⁰⁾の推定式では、大気放射率は大気中の水蒸気圧 e_a の関数で計算され、また対流熱伝達率は日射量から推定される。

$$\varepsilon_a = 0.575e_a^{1/7} \quad (\text{A-4})$$

$$e_a = \exp\left(\frac{17.67(T_d - T_a)}{T_d + 243.5}\right) \times (1.0007 + 3.46 \times 10^{-6} P \times 6.112 \exp 17.502 T_a / 240.97 + T_a) \quad (\text{A-5})$$

$$h = a S_0^b (\cos \theta)^c \quad (\text{A-6})$$

ここで、 P は大気圧 (hPa)、 T_d は露点温度 (℃) である。式 (A-6) 内の $a \sim c$ は観測値から回帰的に決定される。

(2) 高市ら⁽²¹⁾の推定式

式 (A-7) に高市ら⁽²¹⁾の推定式を記す。

$$T_g = \frac{0.090 S_0}{0.037 S_0 + 1} + T_a \quad (\text{A-7})$$

(3) 登内・村山⁽²²⁾の推定式

式 (A-8) と (A-9) に登内・村山⁽²²⁾の推定式を示す。なお、式 (A-8) は全天日射量 400W/m^2 以下の場合、式 (A-9) は全天日射量 400W/m^2 より大きい場合の式である。

$$T_g = 0.0256 S_0 - 0.18 U^{1/2} - 0.3 + T_a \quad (\text{A-8})$$

$$T_g = 0.0067 S_0 - 2.40 U^{1/2} + 12.1 + T_a \quad (\text{A-9})$$

付録 B. Okada and Kusaka⁽²³⁾の黒球温度推定式の導出

以下に Okada and Kusaka⁽²³⁾の式(1)の導出を記す。なお、詳細な導出過程は Okada and Kusaka⁽²³⁾にも記載されているため、そちらも参照されたい。

黒球表面の熱収支を考える上で、次の仮定をおく。

1. 黒球は熱伝導性が高く、黒球表面の温度と黒球内部で計測される温度は等しい。
2. 黒球は開けた平らな地表面上にあり、黒球の放射収支には天空と地表面、黒球自体が関与する。

黒球単位表面積当たりの短波放射収支量 S は、直達日射吸収量・散乱日射吸収量・反射日射吸収量の合計から成る (式 B-1)。

$$S = a_g \left(\frac{S_0 - S_{dif}}{4 \cos \theta} + \frac{S_{dif}}{2} + \frac{\alpha_{gr} S_0}{2} \right) \quad (\text{B-1})$$

ここで、 a_g は黒球表面の短波放射量吸収率、 S_0 は全天日射量、 S_{dif} は散乱日射量、 α_{gr} は地表面アルベド、 θ は太陽の天頂角を表す。右辺第 1 項において分母に掛かる定数 4 は、黒球表面積 $4\pi r^2$ の黒球断面積 πr^2 に対する割合であり、法線面直達日射量に対する黒球表面の形態係数を意味する。また、黒球上面には散乱日射量、黒球下面には地表面からの反射日射量が入射する。右辺第 2 項および第 3 項の分母に掛かる 2 は、球表面から見た天空および地表面の形態係数である。

黒球表面における長波放射量 L は式 (B-2) のように表

す。式 (B-2) における右辺第 1 項から第 3 項までのそれぞれの分母に掛かる 2 は球表面から見た天空および地表面の形態係数である。式 (B-2) の右辺第 2 項に示す地表面で反射される大気放射は他の項と比べると小さいため、Okada and Kusaka⁽²³⁾では省略して記述されている。

$$L = \varepsilon_g \left(\frac{L_{sky}}{2} + \frac{(1 - \varepsilon_{gr})L_{sky}}{2} + \frac{\varepsilon_{gr}T_{gr}^4}{2} - \sigma T_g^4 \right) \quad (B-2)$$

ここで、 ε_g は黒球表面からの射出率、 L_{sky} は天空放射量、 ε_{gr} は地表面からの射出率、 T_{gr} は地表面温度、 σ はステファンボルツマン定数、 T_g は黒球表面温度を表す。

黒球表面の顕熱輸送量 H を対流熱伝達係数 h_c を用いて $h_c(T_a - T_g)$ とし、 $L_a = \varepsilon_g (2L_{sky} + \varepsilon_{gr}(\sigma T_g^4 - L_{sky})) / 2$ とおくと、黒球表面の熱収支は式 (B-3) のようにかくことができる。

$$S + L_a - \varepsilon_g \sigma T_g^4 + h_c(T_a - T_g) = 0 \quad (B-3)$$

式 (B-3) の T_g^4 を T_a の周りにテイラー展開による線形化を施し、 T_g の式として整理をすると式 (B-4) が得られる。

$$T_g = \frac{(S + L_a - \varepsilon_g \sigma T_a^4)}{(h_c + h_r)} + T_a \quad (B-4)$$

ここで、 $h_r \approx 4\varepsilon_g \sigma T_a^3$ とし、放射熱伝達係数を表す。対流熱伝達係数を McAdams⁽²⁷⁾を参考に風速の 1 次関数 ($h_c = k_1 U + k_2$) として考え、式 (B-4) を全天日射量、風速、気温から成る式としてまとめる。

$$T_g = \frac{(S + j_1)}{(k_1 U + j_2)} + T_a \quad (B-5)$$

ここで $j_1 = L_a - \varepsilon_g \sigma T_a^4$ 、 $j_2 = k_2 + h_r$ とおく。気象官署等から得られる日射量関連の変数は全天日射量であるため、 S を S_0 に置き換える必要がある。さらに全天日射量に対する黒球温度と気温の温度差の非線形関係を表現する必要がある。そこで高市ら⁽²¹⁾の式を参考に全天日射量に関する双曲線関数を採用することで、Okada and Kusaka⁽²³⁾の式の形が導出される (式 B-6)。

$$T_g = \frac{(S_0 + a)}{(bS_0 + cU + d)} + T_a \quad (B-6)$$

参考文献

- (1) IPCC, Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, (2007), 996 pp.
- (2) F.Fujibe, Detection of Urban Warming in Recent Temperature Trends in Japan, Int. J. Climatol., 29-12(2009), pp.1811-1822.
- (3) F.Fujibe, Urban Warming in Japanese Cities and its Relation to Climate Change Monitoring, Int. J. Climatol., 31-2(2011), pp.62-173.
- (4) 星秋夫・中井誠一・金田英子・山本亨・稲葉裕, 地域別に見た熱中症死亡について-人口動態統計死亡

- 票による検討-, 日本生気象学会雑誌, 46-3(2009), S50.
- (5) 鳴海大典・下田吉之・水野稔, 気温変化が大阪府域における人間の健康面に及ぼす影響, 日本建築学会近畿支部研究報告集環境系, 47(2007), pp.301-304.
- (6) E.C.Thom, The Discomfort Index, Weatherwise, 12-2 (1959), pp.57-61.
- (7) A.P.Gagge, J.A.Stolwijk and Y.Nishi, An Effective Temperature Scale based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response, ASHRAE Trans., 71-1(1971), pp.247-262.
- (8) A.Matzarakis, H.Mayer and M.G.Iziomon, Applications of a Universal Thermal Index: Physiological Equivalent Temperature, Int. J. Biometeorol., 43-2(1999), pp.76-84.
- (9) C.P.Yaglou and C.D.Minard, Control of Casualties at Military Training Centers, Amer. Med. Assoc. Arch. Ind. Health, 16(1957), pp.304-314.
- (10) Y.Ohashi, T.Kawabe, Y.Shigeta, Y.Hirano, H.Kusaka, H.Fudeyasu and K.Fukao, 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(2009), pp.279-289.
- (11) 大橋唯太・竜門洋・重田祥範, 都市域のさまざまな活動空間での WBGT の比較, 日本生気象学会雑誌, 46-2(2009), pp.59-68.
- (12) T.P.Lin, R.de Dear and R.L.Hwang, Effect of thermal adaptation on seasonal outdoor thermal comfort, Int. J. Climatol., 31-2(2011), pp.302-312.
- (13) A.H.A.Mahmoud, Analysis of the microclimatic and human comfort conditions in an urban park in hot and arid regions, Build. Environmen., 46-12(2011), pp.2641-2656.
- (14) 高根雄也・日下博幸・高木美彩・岡田牧・阿部紫織・永井徹・富士友紀乃・飯塚悟, 岐阜県多治見市における夏季晴天日の暑熱環境の実態調査と領域気象モデル WRF を用いた予測実験-物理モデルと水平解像度に伴う不確実性の検討-, 地理学評論, 86-1(2013), pp.14-37.
- (15) M.Budd, Wet-bulb globe temperature (WBGT) -its history and its limitations, J. Sci. Med. Sport, 11(2008), pp.20-32.
- (16) ISO 7243, Hot environments-Estimations of the heat stress on working man, based on the WBGT Index (Wet Bulb Globe Temperature), International Standard (1st ed.), International Organization for Standardization (ISO)(1989).
- (17) JIS Z 8504, WBGT(湿球黒球温度) に基づく作業者の熱ストレスの評価-暑熱環境-, 日本工業標準調査会 (1989).
- (18) C.H.Hunter and C.O.Minyard, Estimating wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements, 2nd Conference on Environmental Applications, (1999-11), Report No. WSRC-MS-99-007 57, Long Beach, USA.
- (19) A.R.Gaspar and D.A.Quintela, Physical modelling of globe and natural wet bulb temperatures to predict WBGT heat stress index in outdoor environments. Int. J. Biometeorol., 53-3(2009), pp.221-230.
- (20) V.E.Dimiceli, S.F.Piltz and S.A.Amburn, Estimation of black globe temperature for calculation of the wet bulb globe temperature index, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, 2(2011-10), pp.591-599, San Francisco, USA.
- (21) 高市益行・細野達夫・黒崎秀仁・渡辺慎一・川嶋浩

樹・中野有加, 高軒高温室における WBGT 値を用いた快適作業領域の解析, (2003), <http://www.naro.affrc.go.jp/project/results/laboratory/vegetea/2003/vegetea03-24.html>

- (22) 登内道彦・村上貢司, 熱中症危険度の地域特性と HWDI, 日本生気象学会雑誌, 45-3(2008), S62.
- (23) M.Okada and H.Kusaka, Proposal of a new equation to estimate globe temperature in an urban park environment, J. Agric. Meteorol., 69-1(2013), pp.23-32.
- (24) 大橋唯太・亀卦川幸浩・山口和貴・井原智彦・岡和孝, 数値気象モデルを利用した屋外活動空間の暑熱評価, 日本生気象学会雑誌, 47(2010), pp.91-106.
- (25) 環境省, 環境省熱中症予防情報サイト, <http://www.wbgt.env.go.jp/>
- (26) 環境省, WBGT 観測による熱中症予防情報の提供業務報告書, (2010), <http://www.env.go.jp/air/report/h22-04/index.html>
- (27) W.H.McAdams, Heat transmission (3rd ed.)(1954), McGraw Hill, New York.

(Received Mar.07,2013, Accepted Nov.14,2013)