

18. 地域レベルにおける気候変動の解析

山城 健太^{1*}・三村 信男²

¹茨城大学大学院理工学研究科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

²茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1）

* E-mail: 11nm823a@hcs.ibaraki.ac.jp

2010年度は記録的な猛暑であり、豪雨・土砂災害も多かった。日本の2010年夏（6～8月）の平均気温は統計を開始した1898年以降の113年間で第一位の高い記録となった。そこで本研究では、水戸を主な解析対象地点とし、2010年の夏の暑さがどの程度異常だったのかを考察するため、長期気候トレンドの検出、2010年の夏の暑さの再現期間の評価を行った。月平均気温偏差の経年変化を調べることで、高温が発生する確率の増加が確認できた。また、極値統計解析の結果、2010年度は真夏日の日数が25年に一度起こるような稀な値を記録していた。夏期平均気温では、正規分布関数を仮定すると、水戸では140年に一度、山形では300年に一度起こるような稀な値を記録していたことが分かった。

Key Words : climate change, global warming, extraordinary weather, statistical distribution, return period, extreme statistics

1. 研究の背景と目的

近年、地球温暖化の影響が様々な形で現れていると懸念される。日本は、季節変化がある上、南北に長くて気象・気候現象にも大きな違いがあり、気候変動も地域的に差があると考えられる。それに対応するためには、影響予測・対応策を国全体から自治体レベルで考える段階へとダウンスケールすることが必要である。その一環として、地域毎の気象・気候現象の解析が必要である。

2010年は猛暑であり、豪雨・土砂災害も多かった。気象庁（2010）¹⁾によると、2010年度の夏期（6～8月）の日本の平均気温は統計を開始した1898年以降の113年間で第一位（これまでの第一位は1994年）の高い記録となった。この時期に、水戸をはじめ特定の地域ではどのような状況だったのか、という疑問から本研究の目的を次のように設定した。

第一の目的は、水戸における気候変動の長期傾向を把握することである。第二の目的は、水戸をはじめいくつかの地点の2010年における夏の暑さを統計的に解析し、何年に一度の異常な暑さなのかを定量的に示すことである。また、2010年度の夏の暑さを表す指標を見いだすこととした。

2. 気象・気候統計解析

(1) 本研究で行った気象・気候変動解析の概要

気象・気候統計とは、大気の状態および雨・風・雷など気象要素について、それぞれの集団現象における個々の要素の分布を調べ、その集団の傾向・性質などを数量的に統一的に明らかにすることである。実際には、気温変化の長期傾向を求めることや、極値統計を用いると、構造物の耐風圧を決める参考となる最大風速、除雪対策の目安となる最深積雪、洪水調節に役立つ最大雨量、100年に一度起こる暑い日の最高気温などが求められる。

本研究の調査対象地点は、気象庁（2010）が日本の平均気温の平年差の算出の際に観測対象地点とする次の17地点の中から選定した¹⁾。

網走、根室、寿都（すつつ）、山形、石巻、伏木（高岡市）、長野、水戸、飯田、鉾子、境、浜田、彦根、宮崎、多度津、名瀬、石垣島

これらの地点は、長期間にわたる気温観測データが存在し、都市化による影響が少ないと考えられている観測地点である。

また、次の表-1に本研究で扱った解析対象データとその解析の結果項目を示す。気象データは、（財）気象

業務支援センター提供の CD-ROM²⁾に収録されているデータと、気象庁ホームページ内電子閲覧室³⁾から入手できるデータを使用した。

表-1 本研究で解析した気象データと解析結果項目

気象データ (解析対象期間)	解析結果項目 (調査地点)
年平均気温 (1961～2010 年)	長期トレンド (水戸)
年最高気温 (1961～2010 年)	長期トレンド (水戸)
年最低気温 (1961～2010 年)	長期トレンド (水戸)
年間真夏日,猛暑日 日数 (1961～2010 年)	長期トレンド (水戸)
1～12 月の各月平均気温 (1897～2010 年)	季節サイクルを除いたトレンド (水戸)
日最高気温 (1961～2010 年)	極値統計による再現期間 (水戸)
8 月の真夏日の日数 (1961～2010 年)	極値統計による再現期間 (水戸)
夏期 (6～8 月) の真夏日 の日数 (1961～2010 年)	極値統計による再現期間, 確率真夏日日数 (水戸)
夏期 (6～8 月) の 平均気温 (1961～2010 年)	正規分布を用いた再現期間 (網走,山形,水戸,長野,彦根, 浜田,多度津,宮崎,石垣島)

(2) 長期トレンドの検出方法

気温の年変動の長期的傾向を調べるために、移動平均 (15 年間移動平均) を用いた。

(3) 季節サイクルを除いたトレンド検出方法

月別の気温データの時系列から、月別の平均を取り除き、月別の偏差データを新たに作成した。この偏差データを取り扱うことにより、季節サイクルを取り除いた年変動成分の特性を取り扱うことができる。平均値に対し偏差がどのようにばらついているかについては、正規分布に従うと仮定して調べた。

(4) 極値統計解析を用いた再現期間計算

極値統計解析の手法について、合田 (1990)⁴⁾を参考にした。極値統計では、まず極値データがどのような確率分布で表されるかを推定することが問題である。本研究では、次に示す 3 種類の確率分布関数を極値データの分布に対する当てはめに用いた。

(i) Gumbel 分布

$$F(x) = \exp \left[- \exp \left(- \frac{x - B}{A} \right) \right] \quad (-\infty < x < \infty) \quad (1)$$

(ii) 極値 II 型分布 ($k = 2.5, 3.33, 5.0, 10.0$)

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \frac{x - B}{kA} \right)^{-k} \right] \quad (B - kA \leq x < \infty) \quad (2)$$

(iii) Weibull 分布 ($k = 0.75, 1.0, 1.4, 2.0$)

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{B - x}{A} \right)^k \right] \quad (B \leq x < \infty) \quad (3)$$

x は極値を表す確率変数で、 $F(x)$ は非超過確率を表す関数、 k, A, B はそれぞれ形状母数、尺度母数、位置母数である。極値 II 型分布と Weibull 分布における k の値は合田 (1990) を参考にし、あらかじめ設定した値を使用した。したがって、尺度母数 A 、位置母数 B を推定する必要がある。

これら二つの母数の推定には、最小二乗法を用いた。最小二乗法では、極値資料を大きいものから降順に並べた順序統計量と次に示す式(4)で表わされる極値資料の非超過確率との関係がグラフ上で直線状に表示されるように、分布関数を変換した基準化変量と呼ばれる変量を導入し、順序統計量と基準化変量とに対して直線回帰式を当てはめて尺度母数 A 、位置母数 B を推定した。²⁾そして、順序統計量と基準化変量の間の相関係数を用いて、標本に適合する分布関数を決定した。

極値資料の非超過確率は、次のプロットイング・ポジション公式で表され、これによって各極値データにどのような確率を割り当てるかを決定できる。

$$\hat{F}_m = 1 - \frac{m - \alpha'}{N_T + \beta} \quad : \quad m = 1, 2, \dots, N_T \quad (4)$$

$\hat{F}_m$ は極値データを大きいものから降順に並べたときの m 番目のデータに対する非超過確率であり、 N_T はデータの総数、 α', β は以下の表-2 のように分布関数ごとに異なる値を使用した。

表-2 プロットイング公式の係数⁴⁾

分布関数名	α'	β
(i) Gumbel 分布	0.44	0.12
(ii) 極値 II 型分布	$0.44 + 0.52 / k$	$0.12 - 0.11 / k$
(iii) Weibull 分布	$0.20 + 0.27 / \sqrt{k}$	$0.20 + 0.23 \sqrt{k}$

非超過確率を表す確率分布関数 $F(x)$ が決定されると以下の式から再現期間 (Return Period) R が求められる。再現期間とは、ある値 x_R を超える事象が平均して 1 回起きる時間間隔のことである。

$$R = \frac{1}{1 - F(x_R)} \quad , \quad F(x_R) = 1 - \frac{1}{R} \quad (5)$$

逆に再現期間 R を指定した時の極値 x_R を推定する場合、次の式で計算される。ただし F^{-1} は非超過確率を表す関数の逆関数である。

$$x_R = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{R}\right) \tag{6}$$

(5) 正規分布関数を用いた再現期間計算

夏期（6～8月）平均気温に関しては、その観測値の分布を調べると正規分布に近いことが確認できた。そこで、本研究では国内の9つの地点の2010年度の夏期平均気温の再現期間 R を求めるため、非超過確率を表す関数 $F(x)$ を正規分布関数とし、式(5)の x_R に2010年度の調査地点の夏期平均気温を代入し再現期間 R を求めた。

3. 気候変動の検出結果

(1) 長期トレンドの検出

図-1 に水戸の年平均気温の経年変化を示す。線形回帰では、気温上昇が始まった時期が分からないので、15年の移動平均を用いた。その結果、水戸では、年平均気温の上昇が 1980 年頃から始まったことが分かった。1980 年から 2003 年までで 15 年移動平均値は、約 1℃上昇した。また、図-2 に水戸の年最高気温と最低気温の経年変化を示した。1980 年頃から 15 年移動平均値で約 2℃の上昇が見られた。そして、最高気温と最低気温の上昇の仕方では、最低気温の上昇の仕方が大きい。

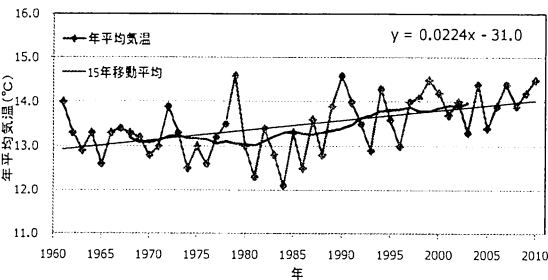


図-1 水戸の年平均気温の経年変化

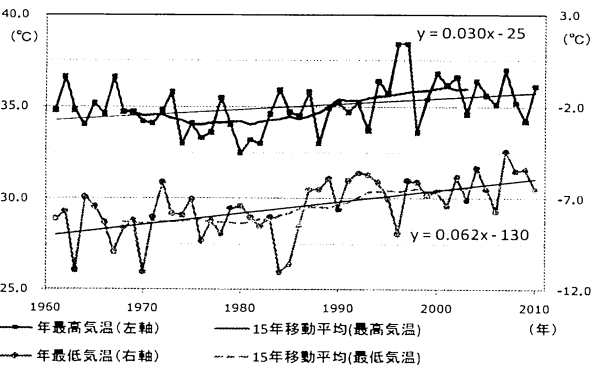


図-2 水戸の年最高気温と最低気温の経年変化

図-3 では、真夏日、猛暑日の日数、真夏日の 15 年移動平均の経年変化を示した。真夏日は、移動平均値において 1980 年代から 2000 年代初めにかけて約 7 日の増加を示した。また猛暑日の日数が 3 日以上の一観測機会が 1994 年頃から生じている。

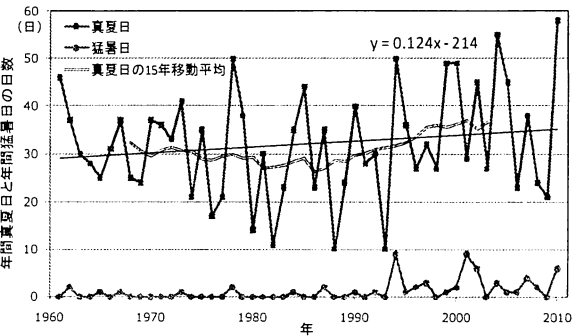


図-3 年間真夏日、猛暑日の経年変化

(2) 季節サイクルを除いたトレンド検出

1897 年から 2010 年まで（114 年間）の年毎の月別の平均気温を用意し、月別でその 114 年間の平均値をとる。次に、各年の各月平均気温から月別の 114 年間の平均値をそれぞれ引いた値である気温偏差を求め、1897～1946 年（50 年間）と 1961～2010 年（50 年間）の二つの期間に分けた。その頻度分布を図-4 に棒グラフで示した。

同図にそれぞれの期間の平均値と標準偏差を用いて計算される正規分布関数を曲線で示すが、各月の平均気温偏差が正規分布でほぼ表せることが分かった。2 つの時期を比べると、正規分布の中心（平均値）が約 0.8℃上昇するように移動している。累積頻度分布で比較しても、50%確率では約 0.8℃の差があった。気温偏差が 0.5℃以上の範囲で曲線と x 軸で囲まれる面積が増えているので、1961 年以降では 1946 年以前に比べ 0.5℃以上の値を記録する確率が増加している。

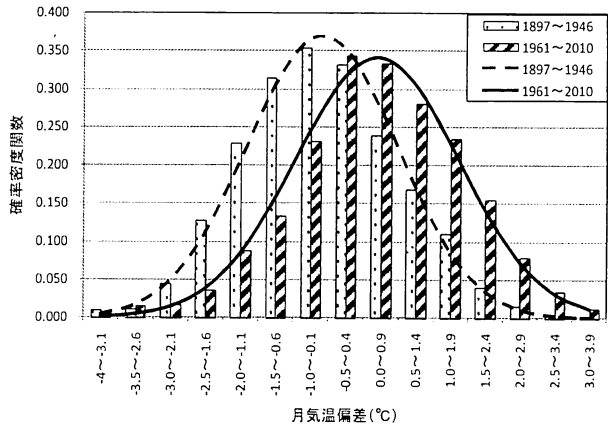


図-4 気温偏差の頻度変化

(3) 極値統計を用いた再現期間の計算結果

表-3 は、極値統計関数のあてはめを行い最適と判断された関数を使って計算した、水戸の 2010 年猛暑の再現期間の推定値である。2010 年は最高気温値よりも真夏日の日数の方が、再現期間が長く稀な記録であったと分かった。そして、再現期間毎の夏期の真夏日日数（本研究では、確率真夏日日数と呼ぶ）の計算結果を図-5 に示した。図-5 から 100 年に一度、夏期の真夏日の合計日数が 55 日に達することが推定された。

表-3 極値統計を用いた計算結果

2010年暑さの指標	値	再現期間(yr)
年間最高気温	36.1℃	4.9
8月の日最高気温	35.7℃	5.2
8月の合計真夏日	27日	21.6
6～8月の真夏日の合計日数	47日	25.6

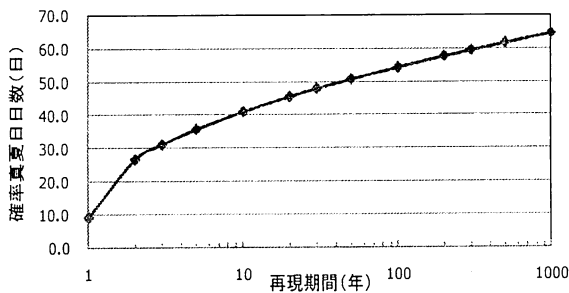


図-5 再現期間と確率真夏日日数

(4) 正規分布関数を用いた再現期間計算結果

図-6 には、1961～2010 年（50 年間）の山形と水戸の夏期平均気温の分布と、その 50 年間の記録値の平均値と標準偏差から求まる正規分布関数を示した。2010 年と記した y 軸に平行な直線は 2010 年度の記録値である。この図-6 から山形、水戸の夏期の平均気温がほぼ正規分布で表せることが分かった。また、2010 年度の記録値は正規分布の右の裾に当たる部分に位置し、その値より右の曲線部分と x 軸で囲まれる面積が非常に小さいため、2010 年の記録値以上の生起確率が非常に低いことが分かる。

表-4 には、図-6 のように夏期平均気温の分布が正規分布になることを確かめることができた 9 地点の気象観測地点を示した。これらの観測地点は都市化の影響が少ないと考えることができる地点である。同じ表に 2010 年夏期平均気温について再現期間を計算した結果を示す。この計算結果から、山形と水戸の 2010 年の記録値は 300 年、140 年に一度起こるという非常に稀な値であったことが分かった。

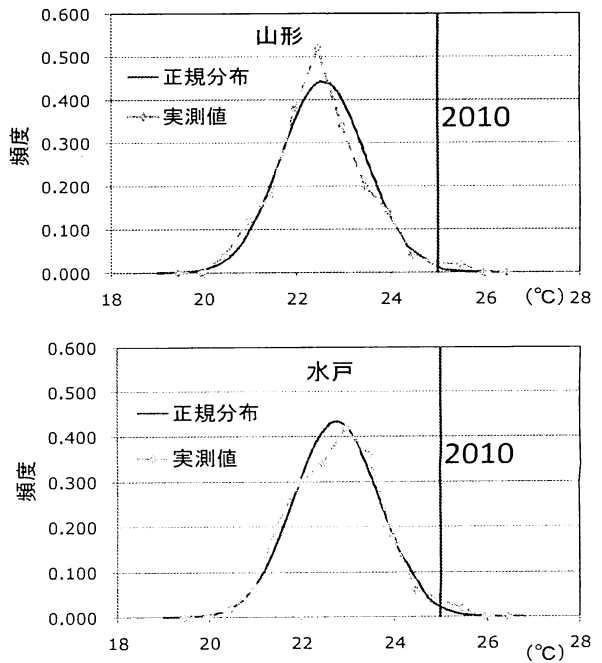


図-6 山形（上図）と水戸（下図）の夏期平均気温と正規分布

表-4 夏期平均気温の再現期間計算結果

	平均気温(℃)	再現期間(yr)
①網走	19.1	68.6
②山形	25.0	300.6
③水戸	25.0	140.6
④長野	24.4	47.6
⑤彦根	26.1	43.2
⑥浜田	25.7	35.6
⑦多度津	26.5	13.0
⑧宮崎	25.9	2.1
⑨石垣島	29.0	3.8

4. 結論と今後の課題

(1) 水戸の調査結果

年平均、年最高、年最低気温の経年変化において、1980 年頃から移動平均値において、それぞれ約 1℃、2℃、2℃の上昇があった。最高気温の上昇率より、最低気温の上昇率の方が大きいことが分かった。

また、1961 年以降、各月の平均気温偏差が大きい値の出現頻度が、1946 年以前に比べ増加していた。水戸の 2010 年度の夏は、平均気温と夏期（6～8 月）の真夏日日数とがそれぞれ 140 年、25 年に一度起こるような稀な記録値であり、例年に比べ暑い夏だったと言える。

再現期間の推定値において、平均気温で見ると 140 年、最高気温や真夏日で見ると数年～25 年という違いがなぜ生じたのかは、分布関数のあてはめの方法や再現期間の計算に用いた分布関数が異なったことが要因として挙げられる。また予想ではあるが、平均気温と最高気温な

どの極値のうち、2010 年における気候変動の影響を顕著に受けたのは平均気温の方であり、そのために再現期間の推定値に違いが生じたのかもしれない。

(2) 水戸と他の地域との比較結果

地域ごとに夏期平均気温を解析すると、稀な値を記録したのは水戸だけではなく、山形も 300 年に一度起きるような稀な値を記録していたことが分かった。

(3) 今後の課題

本研究の結果から、水戸で今後予想される猛暑被害予測を行い、猛暑に対する適応策を提案することや、猛暑と降水量や豪雨災害との関係性を明らかにし、気候変動を考慮した降水量や豪雨災害の予測を行うことが今後の課題である。

謝辞：本研究において、簡易的な極値統計の計算方法を構築するにあたりご指導いただいた、茨城大学 ICAS 特任教授である John Edward Hay 教授に御礼申し上げます。

す。また、気象データを提供して下さった（財）気象業務支援センターの皆様には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁：報道発表資料 平成 22 年夏の日本の平均気温について (<http://www.jma.go.jp/jma/press/1009/01a/temp10jsum.html>) ,2010
- 2) 気象庁：都道府県気象資料 地上 1961～2002 年 アメダス 1976～2002 年, (財) 気象業務センター,CD-ROM,2003
気象庁：地上気象観測時日別編集データ (CSV 版) 1961～2008 年, (財) 気象業務センター,CD-ROM,2009
気象庁：気象庁月報 2009 年 1 月～2009 年 12 月, (財) 気象業務センター,CD-ROM,2010
気象庁：気象観測月報 2010 年 1 月～2010 年 7 月, (財) 気象業務センター,CD-ROM,2010
- 3) 気象庁ホームページ内電子閲覧室：気象庁 HP,過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) ,2010
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計 波浪工学への序説, 鹿島出版社,1990