

特集：熱中症対策の最新動向 —異常気象の“New Normal”への適応—

<原著>

熱中症発生確率の回帰モデルによる熱中症発生の地域差に関する評価

下ノ蘭慧¹⁾，竹田飛鳥²⁾，清野薫子²⁾，島崎大³⁾，富尾淳²⁾
¹⁾ 国立保健医療科学院建築・施設管理研究部

²⁾ 国立保健医療科学院健康危機管理研究部

³⁾ 国土技術政策総合研究所上下水道研究部

Evaluation of regional differences in heatstroke occurrence using a regression model of heatstroke occurrence probability

SHIMONOSONO Kei¹⁾, TAKEDA Asuka²⁾, SEINO Kaoruko²⁾, SIMAZAKI Dai³⁾,
TOMIO Jun²⁾
¹⁾ Department of Built Environment for Health, National Institute of Public Health

²⁾ Department of Health Crisis Management, National Institute of Public Health

³⁾ Water Supply and Sewerage Department, National Institute for Land and Infrastructure Management

抄録

【目的】本研究は熱中症救急搬送者数が増加する日最高外気湿球黒球温度（WBGT）を都道府県別に示すことを目的に，より精度の高い熱中症警戒情報の発出基準の策定に資するべく，その指標として熱中症発生確率（ P_x ）を定義して熱中症発生の地域差・時期・年齢差を評価した。

【方法】 P_x は日最高外気WBGTを1℃単位で区分し，当該区分となる全日数に対して人口100万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者が発生した日数の比率と定義した。便宜的に P_x が50%となる時の日最高外気WBGT（ W_x ）が人口100万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者が発生する閾値と考えることができる。2010～2023年における熱中症救急搬送者数と屋外のWBGT等のデータを用い， $x=1, 2, 5, 10$ の4条件で月別・年齢別に P_x を算出した。これらの結果を基に二項ロジスティック回帰分析により，3種類の P_x の回帰モデル（全年齢・全期間モデル，全年齢・月別モデル，年齢別・月別モデル）を作成し，陰性的中率，陽性的中率，AUC（Area of Under the Curve）の指標で回帰モデルの妥当性を検証した。最終的に都道府県別に W_x を算出し，熱中症発生の地域差を評価した。

【結果】東京都を対象として月別・年齢別に P_x を算出し，それぞれ50%以上となる時の日最高外気WBGTを分析すると，9月，6～8月，5月の順，成人，少年，高齢者の順に高くなった。 P_x の回帰モデルについては，月別・年齢別モデルではデータの不均衡により陽性的中率が0%となる場合があったものの，全年齢・全期間モデルと全年齢・月別モデルでは得られる W_x は妥当性があるとされた。都道府県別の W_x については，比較的寒冷な地域ほど W_x が低くなることが明らかとなった。

【結論】 P_x と W_x を用いることで熱中症救急搬送者数が増加するときの日最高外気WBGTについて地域差ならびに時期を考慮できるとともに，高齢者に限れば年齢も考慮可能であることも示された。近年では自治体独自に屋外のWBGTを測定して自動的に警報を発出するシステムを構築している例もあり，本研究の成果はこのような自治体において警報発出基準を定める際に利用できる可能性がある。

連絡先：下ノ蘭慧

〒351-0197 埼玉県和光市南2-3-6

2-3-6, Minami, Wako-shi, Saitama, 351-0197, Japan.

Tel: 048-458-6208 Fax: 048-458-6320

E-mail: shimonosono.k.aa@niph.go.jp

[令和7年4月9日受理]

キーワード: 熱中症, 熱中症発生確率, 地域差, 救急搬送データ, 湿球黒球温度 (WBGT)

Abstract

[Objectives] This study was performed to elucidate the daily maximum WBGT values for each prefecture that correspond to the number of people transported to hospitals for heatstroke and to evaluate regional, seasonal, and age differences in heatstroke occurrence by defining heatstroke occurrence probability (Px).

[Methods] Px was defined as the ratio of the number of days when the number of heatstroke emergency transport patients per million people was x or more to the total number of days in the relevant category, which was divided into categories of 1°C for the daily maximum WBGT. The daily maximum WBGT when Px is 50% (Wx) can be considered as the threshold value for the number of emergency heatstroke transport patients per million people. Px was calculated for each month and age group under the following four conditions: x = 1, 2, 5, and 10. Furthermore, we created three types of regression models for Px using binary logistic regression analysis (an all-ages, all-period model; an all-ages, monthly model; and an age-specific, monthly model) and verified the validity of the regression models using indices of negative predictive value, positive predictive value, and area under the curve. Finally, we evaluated regional differences in heatstroke risk using Wx by prefecture.

[Results] When Px for Tokyo was calculated by month or age group, and the daily WBGT maxima were analyzed when they were 50% or higher, the highest maxima were found in the following orders: September>June to August>May; and adults>children>the elderly. When a regression model was created, the positive predictive value of the monthly and age-specific models was sometimes 0% owing to data imbalance; however, the Wx obtained from the all-age, all-period model and the all-age, monthly model was considered valid. Finally, when Wx was evaluated by prefecture, Wx was clearly lower in relatively cold regions.

[Conclusion] Px and Wx values revealed that regional differences and seasonal variations in daily maximum WBGT should be taken into account during heatstroke emergency transport, and age should also be taken into account if analysis is limited to the elderly. In recent years, some local governments have built systems that automatically issue warnings based on WBGT measurements. The results of this study may be useful for local governments when setting warning criteria.

keywords: heat stroke, probability of heatstroke occurrence, regional differences, emergency transport data, wet-bulb globe temperature

(accepted for publication, April 9, 2025)

I. はじめに

近年, 世界各国において気候変動による影響が多数報告されており, WMO (World Meteorological Organization: 世界気象機関) の報告書によると, 2023 年は 174 年間の観測記録の中で最も気温が高く, 海面上昇・南極の海水減少などの記録が更新された[1]. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) の第 6 次報告書によると, 異常な高温現象の増加は食中毒・水系感染症等のさまざまな健康影響にもつながるとしている[2]. また, 高温気候による健康影響の一つとして熱中症が挙げられるが, 近年, カナダや欧州において熱中症による死亡者数が増加しているといった報告がある[3,4]. 日本においても総務省消防庁が公開している熱中症救急搬送者数によると, 2024 年 6 月 1 日から 9 月 30 日の間に 94,779 人が搬送された[5]. これは, 統計が開始された 2008 年以降で最も多い救急搬送者数を記録しており, 同期間の統計が開始された 2010

年と比較しても約 1.7 倍となっている.

高温気候による健康影響対策として多くの国で警戒情報発出システム (HWS: Heat Warning Systems) が導入されている. HWSは観測された気候 (日最高気温・夜間最低気温・湿度等) について予め設定された閾値に基づき, その危険度を表示するものが多い. 1995 年に米国の Philadelphia においてはじめて HWS が導入され, 住民に熱波時の予防措置行動を取るよう警告する仕組みとなっており, 3 年間に 117 人の命が救われたと推定されている[6]. その後, 欧州の各国においても HWS が導入され[7], その有効性について多くのエビデンスが蓄積されてきた[8,9]. 日本の HWS は環境省により 2021 年から運用が開始され, 熱中症予防情報サイトで情報を公開している. 警戒発出基準は日最高外気 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature: 湿球黒球温度) が府県予報区内のいずれかの情報提供地点において 33°C 以上と予測される場合である[10]. また, 2024 年以降は日最高外気 WBGT が都道府県内の全ての情報提供地点において 35°C 以上

と予測される場合に熱中症特別警戒情報が発出されている[11].

国外の警報発出基準は州単位で定められている国がある。例えば、カナダでは、政府がHWSに関するガイドブック[12]を発行しており、それを基に各州において警報発出基準の項目と閾値を定めることとなっている。州によって警報の表示方法が異なる等の欠点があるとされているものの、地域の気候に応じて適切な警報発出基準が定められるという観点では大きな利点である。一方、日本の警報発出基準は時期を問わず全国一律という現状がある。2023年における警報発出回数[13]は北海道（石狩・空知・後志地方）では4回、東京では26回であるが、2023年における人口10万人あたりの熱中症救急搬送者数[14]は北海道では64人、東京では53人であり、北海道の方が人口10万人あたりの熱中症救急搬送者数が多い状況であることから、地域の気候に応じた警報発出基準の策定が重要である。

熱中症による救急搬送や死亡が生じるときの気候には地域差があることは既往研究でも多く報告されている。星らは1975～2007年の人口動態統計死亡票を利用して都道府県別の熱中症死亡率について各都道府県庁所在地の気候特性（各年度の最高気温、真夏日日数、猛暑日日数、熱帯夜日数）との関連性を分析している[15]。松本は東京消防庁が公開している熱中症救急搬送者数のデータを用い、2010～2015年の東京都の各地における高齢者の熱中症発生と日最高外気WBGTが28℃を超過したときの累積度数との関連性を分析している[16]。その他、国外も含めて熱中症発生の地域差に関する既往研究は多くある[17-21]。しかし、星ら[15]は各年度の最高気温、松本[16]は日最高外気WBGTが28℃を超過したときの累積度数を評価指標としており、いずれも事後評価となっているという観点でHWSの警報発出基準としては不向きである。即時性が高いHWSとしては現行の警報発出基準である日最高外気WBGTを利用して評価することが望ましい。また、熱中症の発生は時期や年齢による差もあるとしている研究[22,23]があり、日最高外気WBGTを主な評価指標として、地域差・時期・年齢差を考慮した熱中症発生の評価が求められる。

本研究は熱中症救急搬送者数が増加する日最高外気WBGTを都道府県別に示すことを目的に、より精度の高い熱中症警戒情報の発出基準の策定に資するべく、その指標として熱中症発生確率（ P_x ）を定義して熱中症発生の地域差・時期・年齢差を評価した。

II. 研究方法

1. 熱中症発生確率（ P_x ）の定義

熱中症救急搬送者数が増加する日最高外気WBGTを都道府県別に評価するために、熱中症発生確率（ P_x ）を定義して分析した。 P_x は日最高外気WBGTを1℃単位で区分し、当該区分となる全日数に対して人口100万人あた

り x 人以上の熱中症救急搬送者が発生した日数の比率と定義した。既往研究[15-21]では確率指標で熱中症発生を評価されることはなかったが、便宜的に P_x が50%となる時の日最高外気WBGT（ W_x ）が人口100万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者が発生する閾値と考えることができ、地域の気候に応じた警報発出基準の策定に適していると考えられる。本研究では人口100万人あたり1人以上若しくは人口10万人あたり1人以上の熱中症救急搬送者が発生するときの日最高外気WBGTが評価できるように $x=1$ と $x=10$ を設定するとともに、 $x=2$ と $x=5$ を加えて分析した。

2. 分析方法

(1) 分析に利用した公的データ

P_x の算出に利用した公的データは総務省消防庁が公開している2010～2023年における都道府県別・日別の熱中症救急搬送者数（5～9月）[5]^{注1}、環境省が公開している各都道府県庁所在地の代表点にて観測された特別WBGT[24]、総務省統計局が公開している各年1月1日時点の都道府県別人口[25]である。

(2) 熱中症発生確率（ P_x ）と P_x が50%となる時の日最高外気WBGT（ W_x ）の算出方法

日最高外気WBGTが w [°C]～ $(w+0.9)$ [°C]における熱中症発生確率（ $P_{w,x}$ ）は式(1)から算出され、 P_x は $P_{w,x}$ を線形結合することで得られる。

$$P_{w,x} = \frac{\sum_{k=2010}^{2023} d_{k,w,x}}{\sum_{k=2010}^{2023} d_{k,w}} \quad \cdots(1)$$

ここに、 $d_{k,w,x}$ ： k 年の都道府県庁所在地の代表点にて観測された日最高外気WBGTが w [°C]～ $(w+0.9)$ [°C]となる日の内、人口100万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者が発生した日数

$d_{k,w}$ ： k 年の都道府県庁所在地の代表点にて観測された日最高外気WBGTが w [°C]～ $(w+0.9)$ [°C]となる日数

また、二項ロジスティック回帰分析により P_x の回帰モデルを作成した。回帰モデルでは熱中症発生の時期を考慮できるように、後述の東京都を対象とした分析結果を参考に3群（5月、6～8月、9月）のダミー変数を導入した。二項ロジスティック回帰分析は社会情報サービス社のエクセル統計ver.4.08を用い、式(2)により表される。

$$P_x = \frac{1}{1 + e^{-(ap+bq+cr+C)}} \quad \cdots(2)$$

ここに、 p ：日最高外気WBGT[°C]

q ：ダミー変数1（5月：1，その他：0）

r ：ダミー変数2（9月：1，その他：0）

a, b, c ：係数

C ：定数

なお、 P_x の回帰モデルを作成する際に5月又は9月に

人口 100 万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者数が発生した日数が 0 日の場合は式(2)中の“ bq ”又は“ cr ”の項は無視するものとする。本研究では P_x の回帰モデルが 50% となるときの日最高外気 WBGT を W_x とし, W_x は式(2)において $(ap+bq+cr+C)=0$ となる p を求めることで定まる。

(3)分析手順

はじめに, P_x の基本的な特徴を示すとともに, 回帰モデルの妥当性を検証するために東京都を対象として分析した。全年齢・全期間における P_1 , P_2 , P_5 , P_{10} を算出するとともに, 月別 (5~9月)・年齢別 (少年: 7~17歳, 成人: 18~64歳, 高齢者: 65歳~) の P_x を算出した^{注2}。また, P_x の回帰モデルについて式(2)中の“ bq ”と“ cr ”の項を無視した全年齢・全期間における P_x の回帰モデル (以降, 全年齢・全期間モデル) および時期のみを考慮する回帰モデル (以降, 全年齢・月別モデル) と年齢と時期を考慮する回帰モデル (以降, 年齢別・月別モデル) の 3 種類の回帰モデルを作成し, 変数のオッズ比, 陰性的中率, 陽性的中率, AUC (Area of Under the Curve) により, 回帰モデルの妥当性を検証した。

次に, 建築物のエネルギー消費性能の向上等に関する法律に規定される 8 つの地域区分[26]のすべてが含まれるように選定した 8 道府県 (北海道, 岩手県, 長野県, 新潟県, 愛知県, 大阪府, 福岡県, 沖縄県) を対象として全年齢・全期間モデルから得られる W_x の地域差の傾向を示すとともに, 3 種類の回帰モデルから得られる W_x の相関を分析した。

最後に, 熱中症発生の地域差を示すために, 47 都道府県を対象として W_x を求めた。気象データシステム社の EA Map から白地図を作成し, 都道府県別に色分けして W_x として示した。また, 各地の 2010~2023 年の日最高外気 WBGT (5~9月)^{注1} の平均値と W_x の相関から, 地域の気候と W_x の関係性について分析した。

3. 倫理的配慮

分析に利用したデータはすべて公的データであるとともに, 個人を特定できるようなデータではないため, 研究倫理審査委員会の承認を得る必要はなかった。

III. 研究結果

1. 東京都における熱中症発生確率 (P_x) の分析

はじめに, 東京都を対象とした全年齢・全期間における P_1 , P_2 , P_5 , P_{10} の結果を図 1 に示す。年度により P_x が増加するときの日最高外気 WBGT に差はあるものの, 2010~2023 年を統合した P_x では日最高外気 WBGT の増加に伴い, P_1 , P_2 , P_5 , P_{10} のいずれも漸増している。日最高外気 WBGT が 27.0~27.9°C の日は P_1 が 46% であり, 約 2 日に 1 日は人口 100 万人あたり 1 人以上の熱中症救急搬送者が発生していることを示している。 P_{10} , P_5 , P_2 , P_1 の順に P_x が上昇する日最高外気 WBGT は高くなり, それぞれ 50% 以上となるときの日最高外気 WBGT は 33°C, 31°C, 29°C, 28°C であった。

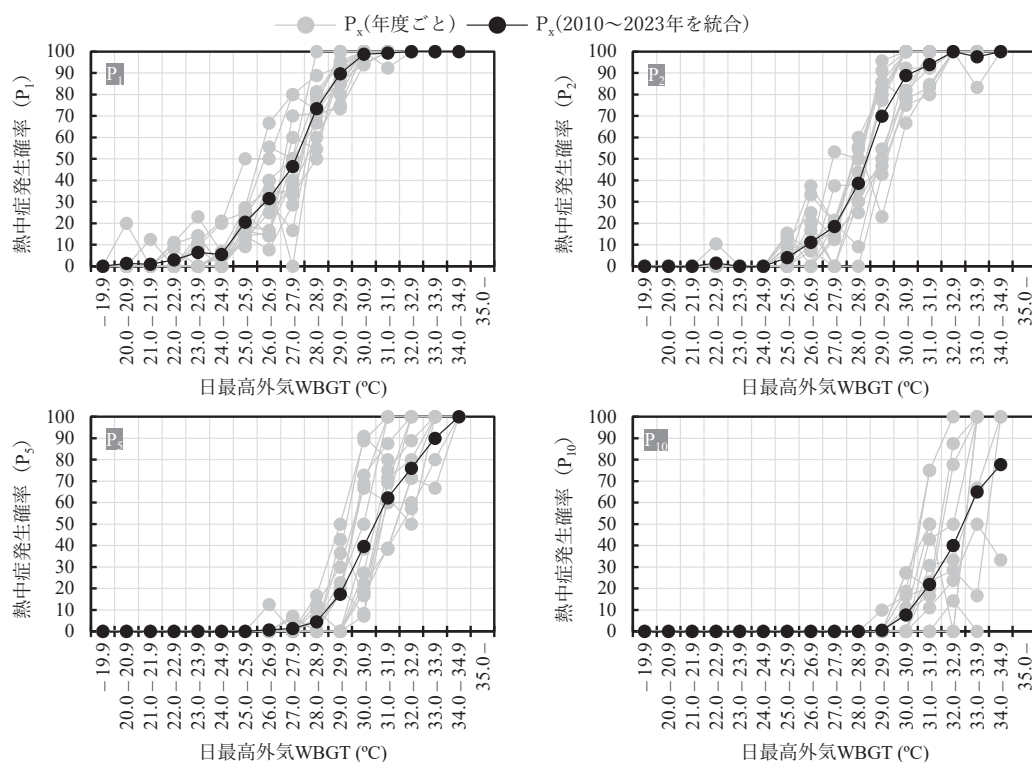


図1 東京都における熱中症発生確率 (P_1 , P_2 , P_5 , P_{10})

熱中症発生確率の回帰モデルによる熱中症発生の地域差に関する評価

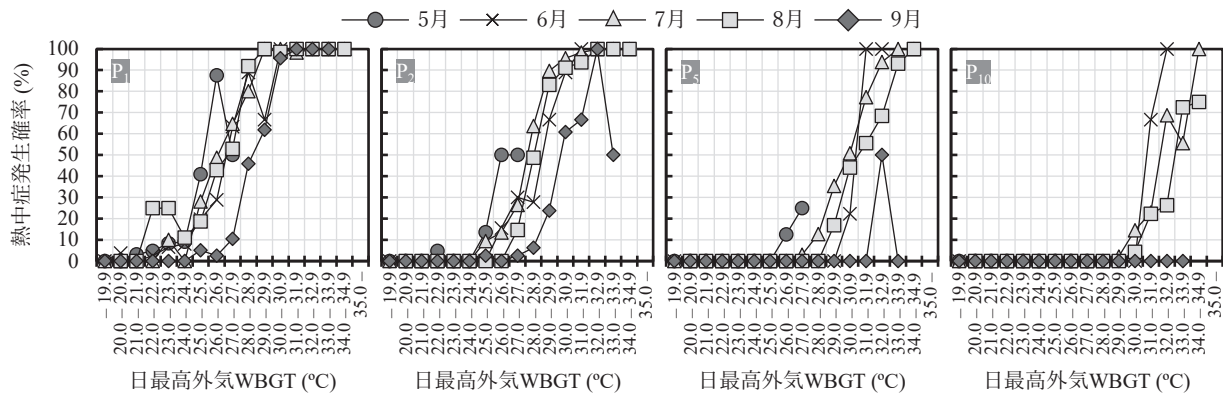


図2 月別の熱中症発生確率（東京都・P₁, P₂, P₅, P₁₀）

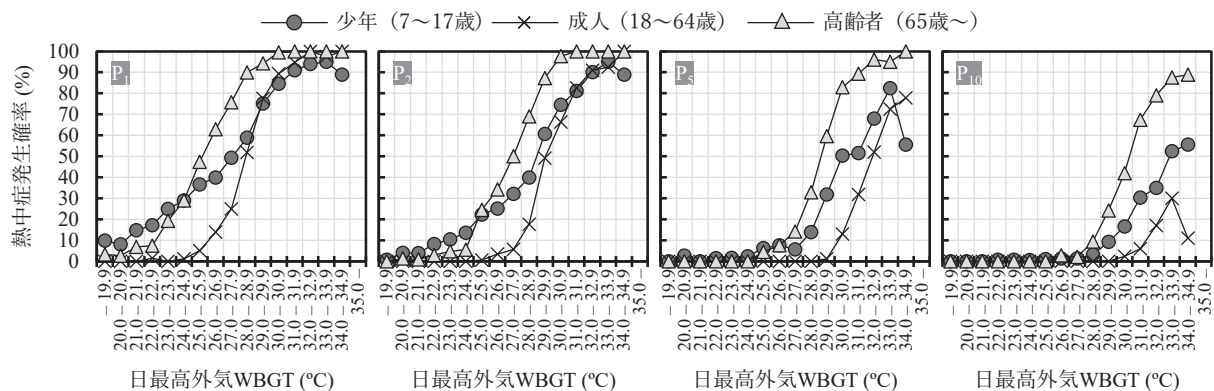


図3 年齢別の熱中症発生確率（東京都・P₁, P₂, P₅, P₁₀）

表1 全年齢・全期間の二項ロジスティック回帰分析の結果（東京都）

	係数	標準誤差	p値	オッズ比	95% 信頼区間	陰性的中率 (%)	陽性的中率 (%)	AUC	P _x が50%となるときの日最高外気WBGT (W _x) (= -C/a)
x=1	a	0.91	0.04	<0.001	2.49 2.30-2.70	88	87	0.95	27.2
	C	-24.84	1.12	<0.001	-				
x=2	a	1.07	0.05	<0.001	2.93 2.64-3.25	92	86	0.96	28.7
	C	-30.83	1.53	<0.001	-				
x=5	a	1.08	0.07	<0.001	2.95 2.59-3.35	96	63	0.95	31.0
	C	-33.53	2.01	<0.001	-				
x=10	a	1.23	0.11	<0.001	3.43 2.79-4.22	99	40	0.96	32.7
	C	-40.31	3.34	<0.001	-				

【表1 注記】

回帰モデルの種類：二項ロジスティック回帰 $P_x = \frac{1}{1+e^{-(ap+C)}}$

ここで、p：日最高外気WBGT[°C] a：係数 C：定数

次に、月別のP₁, P₂, P₅, P₁₀の結果を図2に示す。全体的な傾向としてP_xが増加するときの日最高外気WBGTは9月、6～8月、5月の順に高いことが挙げられる。P_xが50%以上となるときの日最高外気WBGTはP₁では5月が26°C、6～8月が27°C、9月が29°C、P₂では5月が26°C、7月が28°C、6月と8月が29°C、9月が30°Cであった。

最後に、年齢別のP₁, P₂, P₅, P₁₀の結果を図3に示す。全体的な傾向としてP_xが増加するときの日最高外気WBGTは成人、少年、高齢者の順に高いことが挙げられ

る。P_xが50%以上となるときの日最高外気WBGTはP₂では成人が30°C、少年が29°C、高齢者が27°C、P₅では成人が32°C、少年が30°C、高齢者が29°Cであった。

これらの結果を基に、P_xの回帰モデルを作成した結果を表1と表2に示す。表1は全年齢・全期間モデルの結果、表2は全年齢・月別モデルと年齢別・月別モデルの結果を示す。表1によると、係数aはオッズ比の95%信頼区間が1を含んでおらず、有意な変数となっている。W_xは27.2°C (x=1), 28.7°C (x=2), 31.0°C (x=5), 32.7°C (x=10)であった。表2によると、x=1, 2, 10・

表2 年齢別・月別の二項ロジスティック回帰分析の結果(東京都)

						陰性	陽性	P _x が50%となるときの日最高外気WBGT(W _q)					
						的中率	的中率	AUC	5月	6～8月	9月		
						(%)	(%)		(= -(b+C)/a)	(= -C/a)	(= -(c+C)/a)		
x=1	少年	a	0.43	0.02	<0.001	1.53	1.47-1.60	79	74	0.85	24.3	26.3	29.3
		b	0.89	0.19	<0.001	2.44	1.68-3.53						
		c	-1.27	0.15	<0.001	0.28	0.21-0.37						
		C	-11.25	0.57	<0.001	-	-						
	成人	a	1.14	0.06	<0.001	3.14	2.79-3.52	94	87	0.97	26.9	28.0	29.8
		b	1.20	0.41	0.003	3.33	1.51-7.37						
		c	-2.11	0.23	<0.001	0.12	0.08-0.19						
		C	-32.00	1.67	<0.001	-	-						
	高齢者	a	0.81	0.04	<0.001	2.25	2.09-2.43	83	89	0.94	24.8	25.1	27.2
		b	0.26	0.23	0.241	1.30	0.84-2.03						
		c	-1.74	0.19	<0.001	0.18	0.12-0.25						
		C	-20.35	0.99	<0.001	-	-						
全年齢	a	1.08	0.05	<0.001	2.93	2.64-3.26	91	88	0.97	25.8	26.7	28.8	
	b	1.01	0.30	<0.001	2.73	1.52-4.92							
	c	-2.24	0.22	<0.001	0.11	0.07-0.16							
	C	-28.76	1.45	<0.001	-	-							
x=2	少年	a	0.52	0.03	<0.001	1.69	1.60-1.77	88	72	0.88	25.8	28.1	31.0
		b	1.21	0.23	<0.001	3.35	2.14-5.24						
		c	-1.51	0.18	<0.001	0.22	0.16-0.31						
		C	-14.66	0.73	<0.001	-	-						
	成人	a	1.06	0.06	<0.001	2.89	2.58-3.25	94	80	0.96	28.2	29.5	31.5
		b	1.37	0.59	0.020	3.95	1.25-12.53						
		c	-2.06	0.28	<0.001	0.13	0.07-0.22						
		C	-31.37	1.76	<0.001	-	-						
	高齢者	a	1.02	0.05	<0.001	2.77	2.51-3.07	91	87	0.96	26.2	26.6	29.1
		b	0.39	0.31	0.204	1.48	0.81-2.69						
		c	-2.53	0.22	<0.001	0.08	0.05-0.12						
		C	-27.13	1.37	<0.001	-	-						
全年齢	a	1.23	0.07	<0.001	3.41	3.00-3.88	94	87	0.97	26.8	28.3	30.4	
	b	1.83	0.43	<0.001	6.21	2.69-14.31							
	c	-2.55	0.26	<0.001	0.08	0.05-0.13							
	C	-34.77	1.87	<0.001	-	-							
x=5	少年	a	0.56	0.03	<0.001	1.75	1.64-1.87	93	49	0.89	28.9	30.8	33.2
		b	1.04	0.38	0.006	2.83	1.35-5.90						
		c	-1.35	0.25	<0.001	0.26	0.16-0.42						
		C	-17.15	1.00	<0.001	-	-						
	成人	a	1.19	0.10	<0.001	3.27	2.72-3.94	98	48	0.96	-	32.2	33.8
		b	-	-	-	-	-						
		c	-1.92	0.63	0.002	0.15	0.04-0.50						
		C	-38.15	3.00	<0.001	-	-						
	高齢者	a	1.07	0.06	<0.001	2.92	2.61-3.27	93	85	0.97	27.8	28.7	31.0
		b	0.99	0.49	0.046	2.69	1.02-7.09						
		c	-2.49	0.26	<0.001	0.08	0.05-0.14						
		C	-30.75	1.65	<0.001	-	-						
全年齢	a	1.11	0.07	<0.001	3.04	2.64-3.51	96	70	0.96	28.8	30.8	33.7	
	b	2.17	0.81	0.007	8.80	1.79-43.23							
	c	-3.22	0.55	<0.001	0.04	0.01-0.12							
	C	-34.24	2.22	<0.001	-	-							
x=10	少年	a	0.61	0.05	<0.001	1.84	1.67-2.04	99	13	0.90	30.3	33.0	36.5
		b	1.64	0.61	0.007	5.15	1.56-17.03						
		c	-2.13	0.60	<0.001	0.12	0.04-0.38						
		C	-20.20	1.60	<0.001	-	-						
	成人	a	1.00	0.13	<0.001	2.71	2.11-3.49	100	0	0.95	-	34.3	-
		b	-	-	-	-	-						
		c	-	-	-	-	-						
		C	-34.25	4.13	<0.001	-	-						
	高齢者	a	0.95	0.06	<0.001	2.59	2.31-2.91	95	67	0.95	29.3	30.5	33.1
		b	1.18	0.78	0.131	3.25	0.70-15.04						
		c	-2.42	0.38	<0.001	0.09	0.04-0.19						
		C	-29.12	1.78	<0.001	-	-						
全年齢	a	1.23	0.11	<0.001	3.43	2.79-4.22	99	40	0.96	-	32.7	-	
	b	-	-	-	-	-							
	c	-	-	-	-	-							
	C	-40.31	3.34	<0.001	-	-							

【表2 注記】
回帰モデルの種類：二項ロジスティック回帰 P_x = $\frac{1}{1+e^{-(ap+bq+cr+C)}}$
ここで、p：日最高外気WBGT[°C] q：ダミー変数1 (5月：1、その他：0) r：ダミー変数2 (9月：1、その他：0)
a,b,c：係数 C：定数

高齢者の係数bのみオッズ比の95%信頼区間が1を含んでいるが、その他の条件では有意な変数となっている。また、表1と表2によると、いずれの回帰モデルにおいても陰性的中率は約80%以上、AUCは0.85以上となっているものの、陽性的中率は x の値が大きくなるほど低くなる。

2. 8道府県における熱中症発生確率 (P_x) の分析

はじめに、8道府県を対象とした全年齢・全期間モデルの結果を図4に示す。北海道・岩手県・新潟県の回帰モデルは概ね同様であり、 W_1 は約24～25°C、 W_5 は約28°C、 W_{10} は約29～30°Cであった。また、長野県・愛知県・大阪府・福岡県の回帰モデルも概ね同様であり、 W_1 は約26～27°C、 W_5 は約29～30°C、 W_{10} は約31～32°Cであった。

次に、全年齢・全期間モデルから得られる W_x と全年齢・月別モデルおよび年齢別・月別モデルから得られる W_x の相関を図5に示す。全年齢・全期間モデルと全年

齢・月別モデルの相関によると、いずれも強い正の相関(5月： $R=0.938$ ，6～8月： $R=0.999$ ，9月： $R=0.982$)があった。一方、全年齢・全期間モデルと年齢別・月別モデルの相関によると、成人と高齢者はいずれも強い正の相関があったが、少年については相関係数が低くなった(5月： $R=0.770$ ，6～8月： $R=0.838$ ，9月： $R=0.738$)。

3. 都道府県別の熱中症発生確率 (P_x) が50%となる時の日最高外気WBGT (W_x)

47都道府県に対して全年齢・全期間モデルから W_x を求めて1°C単位で丸めた結果を図6、日最高外気WBGTの平均値と W_x の相関を図7に示す。これらの図によると、比較的寒冷な気候の地域では W_x が低い傾向にあり、 W_5 と W_{10} は各地の日最高外気WBGTの平均値と正の相関(W_5 ： $R=0.721$ ， W_{10} ： $R=0.744$)があった。 W_1 については都道府県内で1人の救急搬送者が発生しただけで P_x が高くなる県があり、日最高外気WBGTと W_x の相関が

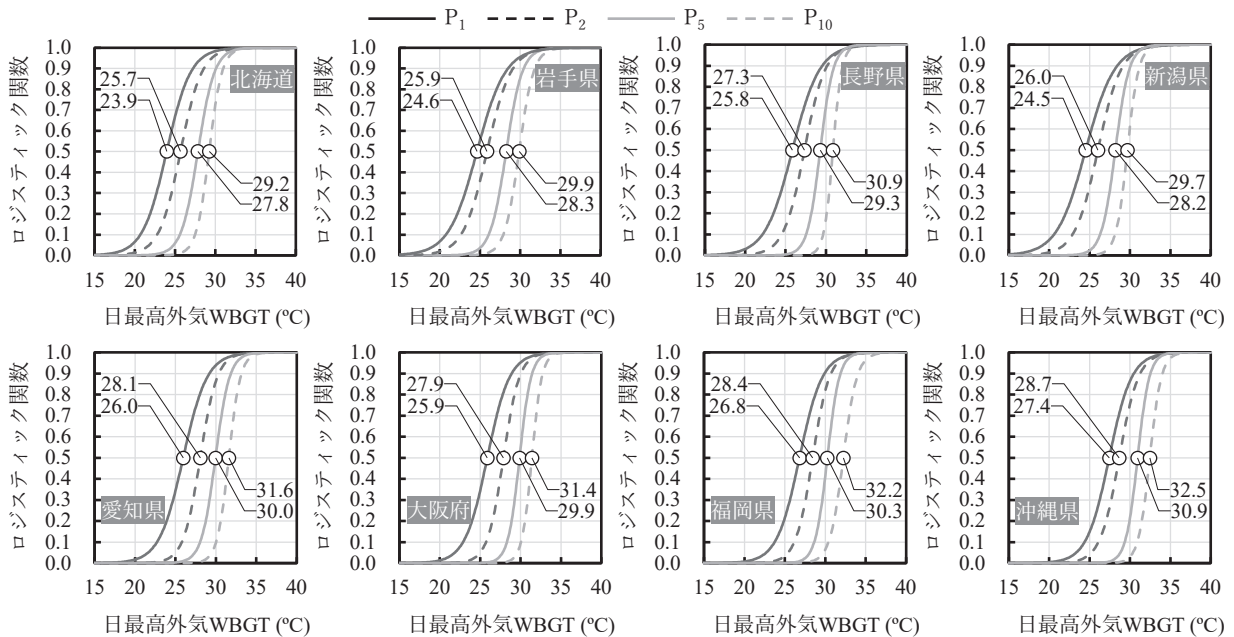


図4 8道府県における熱中症発生確率の回帰モデル (全年齢・全期間モデル)

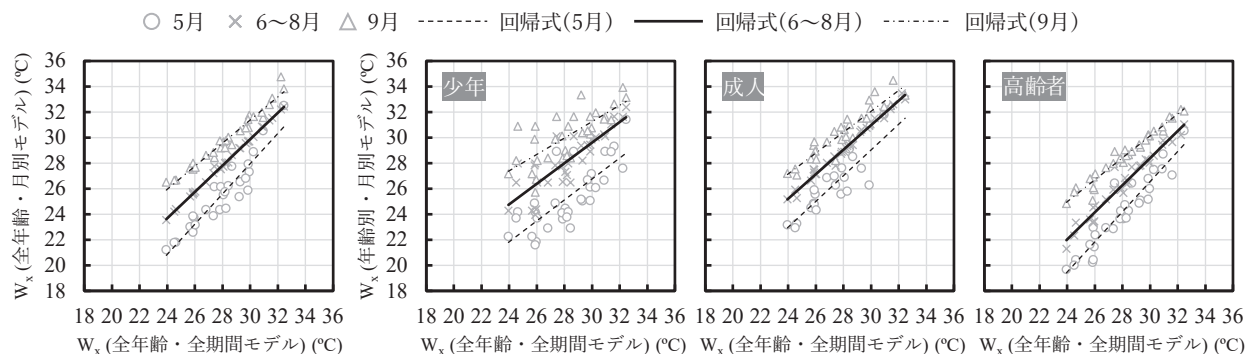


図5 全年齢・全期間モデルと全年齢・月別モデルおよび年齢別・月別モデルの相関

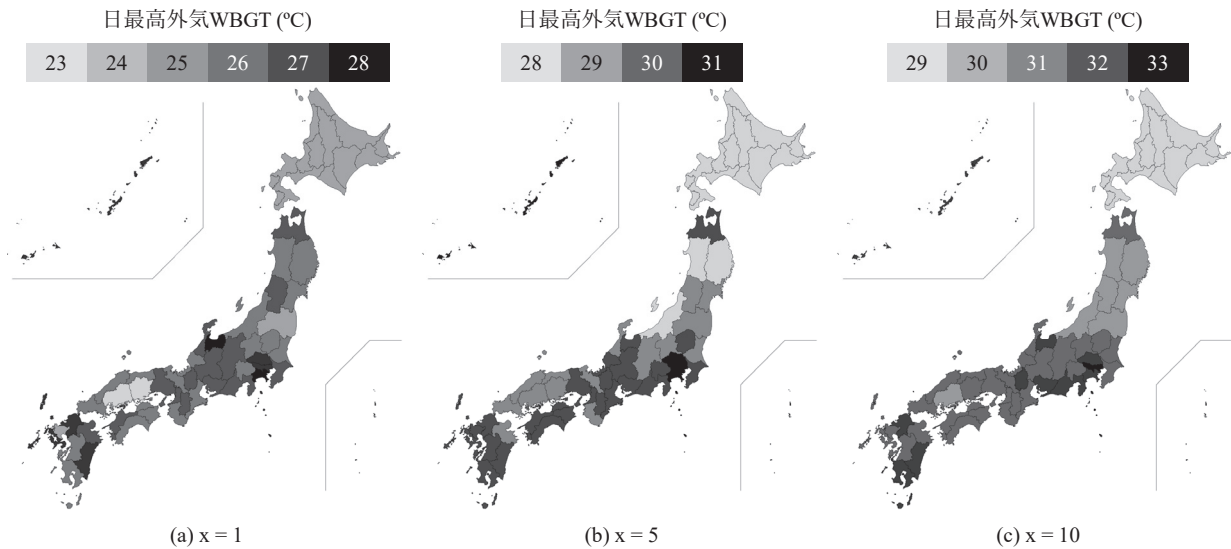


図6 人口100万人あたりx人以上の熱中症救急搬送者数が生じるときの日最高外気WBGT (全年齢・全期間モデル)

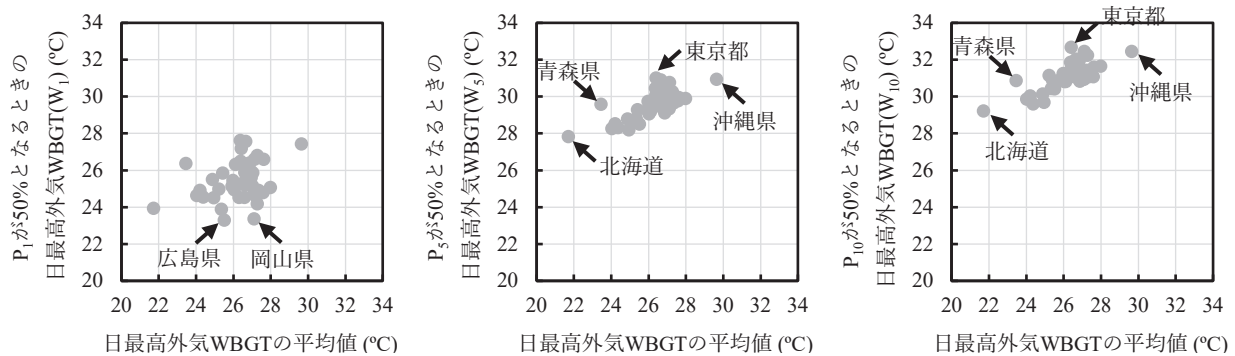


図7 日最高外気WBGTの平均値と熱中症発生確率が50%となる時の日最高外気WBGTの相関

低下した。

IV. 考察

はじめに、 P_x による熱中症発生の評価について考察する。図2と図3によると、 P_x が増加するときの日最高外気WBGTは9月、6～8月、5月の順、成人、少年、高齢者の順に高くなっており、Sheridanら[22]の熱中症発生の時期の違いに関する研究やLienら[19]・星ら[23]の熱中症発生の年齢差に関する研究を裏付けるものとなった。特に、図2では5月と9月の P_{10} は0%であり、9月は日最高外気WBGTが30°C以上となる日が42日あるにもかかわらず P_{10} が0%であることから、 P_x による熱中症発生の評価は暑熱順化による影響も評価可能であるという利点もある。

次に、 P_x の回帰モデルの妥当性について考察する。表1・表2によると、いずれの回帰モデルにおいてもxの値が大きくなるほどデータの不均衡により陽性的中率が低

下するが、全年齢・全期間モデルと全年齢・月別モデルは $x=10$ の場合でも陽性的中率の低下はそれぞれ40%までに抑えられていた。両モデルから得られる W_{10} については図1と図2の結果とも概ね合致していることから、一定程度の精度を有していると考えられる。一方、年齢別・月別モデルでは $x=10$ の場合に極端にデータが不均衡となることから、陽性的中率は少年が13%、成人が0%であり、当てはまりの良いモデルではない。ただし、高齢者については $x=10$ の場合でも陽性的中率は67%であったことから、高齢者の熱中症救急搬送者数が増加するときの日最高外気WBGTを予測する際には年齢別・月別モデルが利用できる可能性がある。

最後に、 W_x について考察する。図4によると、北海道・東北地方などの比較的寒冷な地域では W_x が低く、関東以西では W_x が高くなっていることから、星ら[15]・入来ら[18]の熱中症発生の全国的な地域差に関する研究を裏付けるものとなった。また、本研究に関連の大きい研究として、Uenoら[27]が提案する人口10万人あたり1人の

熱中症救急搬送者が発生するときの日最高外気WBGTと概ね合致しており、妥当性のある結果が得られていると考えられる。Uenoらの研究との違いは P_x において x の値を任意に変更し、想定する救急搬送者数に応じて熱中症警戒情報を発出する気候条件を変更できる点が挙げられる。また、図5によると、全年齢・全期間モデルの W_x から全年齢・月別モデルの W_x が推定できる可能性が示された。この手法を用いることで、他の府県においても時期を考慮した W_x を推定できる可能性がある。一方、全年齢・全期間モデルの W_x と年齢別・月別モデルの W_x には相関係数が低くなる場合があったが、この理由として、対象とした8道府県の内、岩手県・新潟県・長野県・沖縄県の少年人口が約10～20万人であることが挙げられる。当該4県では救急搬送者数が1人であっても人口100万人あたりに換算すると5～10人となり、年齢別・月別モデルから得られる W_1 、 W_2 、 W_5 、 W_{10} が同一の値となることから回帰式の相関係数が低下する。なお、図7によると、日最高外気WBGTの平均値と W_1 との相関係数(R)は0.35であり、 W_5 、 W_{10} の相関係数(それぞれ $R=0.72$ 、 $R=0.74$)と比較して低くなった。これは、人口が少ない都道府県において人口100万人あたりの熱中症救急搬送数を用いることで、 W_1 を決定する要因に占める気候の比率が低くなったことが要因と考えられ、岡山県のような外れ値が生じてしまった。また、本論文では都道府県の気候を都道府県庁所在地の代表点にて観測されたデータで分析したことから、青森県を例として、都道府県内での気候の差が大きく、かつ人口が複数都市に分散する都道府県では特に、都道府県庁所在地のデータを用いることの影響が大きくなった可能性がある。

以上より、都道府県庁所在地の代表点にて観測されたデータを利用しているなどの注意点があるものの、 P_x と W_x を用いることで熱中症救急搬送者数が増加するときの日最高外気WBGTについて地域差ならびに時期を考慮できるとともに、高齢者に限れば年齢も考慮可能であることも示された。日本においては小野らが提案した外気温度・外気相対湿度・全天日射量・平均風速から屋外のWBGTを推定する実況推定値[28]により、熱中症警戒情報の発出が成されている。一方、このシステムに依存せずに、独自に屋外のWBGTを測定して自動的に警報を発出するシステムを構築している自治体もある[29]。本研究の成果はこのような自治体において警報発出基準を定める際に利用できる可能性がある。ただし、同一の都道府県内でも熱中症の発生状況が異なるという報告[16,18,19]もあることから、都道府県よりも小さな単位(消防本部単位など)で分析することで、より精度の高い警報発出基準の策定につながると考えられる。

V. まとめ

本研究では熱中症発生確率(P_x)という指標を定義し、

熱中症救急搬送者数が増加するときの日最高外気WBGTについて地域差、時期、年齢差を評価した。便宜的に P_x が50%となるときの日最高外気WBGT(W_x)が人口100万人あたり x 人以上の熱中症救急搬送者が発生する閾値と考えることができる。最終的に都道府県別に W_x を提示し、熱中症が発生するときの日最高外気WBGTには地域差があることが示された。また、「 x の値」を任意に変更し、想定する救急搬送者数に応じて警報発出基準を変更できる点も P_x の利点であると考えられる。今後は都道府県よりも小さな単位で分析することや、地域差ならびに時期を考慮した警報発出の効果についても検討が求められる。

注

- 1) 2010～2014、2020年は6～9月のデータを使用した。
- 2) 総務省が公開しているのは5歳階級別の人口である[30]。本研究では年齢別の分析には5～14歳の人口を少年の人口、15～64歳の人口を成人の人口、65歳以上の人口を高齢者の人口として取り扱った。なお、東京都では各歳の人口を公開している[31]。両者を使用して P_x を算出しても大きな差異は見られていない。また、総務省消防庁が公開している年齢別の熱中症救急搬送者数は「新生児」と「乳幼児」も区別して示されているが、いずれの救急搬送者数も全体の1%未満であることから、分析の対象外とした。

利益相反

利益相反なし

引用文献

- [1] WMO. Global climate indicators. In: State of the global climate 2023. 2024. p.3-10.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. A. Current status and trends. In: Climate change 2023 Synthesis Report. 2023. p.4-11.
- [3] British Columbia. Extreme heat and human mortality: A review of heat-related deaths in B.C. in Summer 2021. 2022
- [4] Ballester J, Quijal-Zamorano M, Turrubiates RFM, Pegenaute F, Herrmann FR, Robine JM, et al. Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022. Nat Med. 2023;29(7):1857-1866. doi: 10.1038/s41591-023-02419-z
- [5] 総務省消防庁. 熱中症情報、救急搬送状況. Fire and Disaster Management Agency. [Necchusho joho, kyukyu hanzo joho.] <https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html> (in Japanese) (accessed 2024-11-15).
- [6] Ebi KL, Teisberg TJ, Kalkstein LS, Robinson L, Weiher RF. Heat watch / Warning systems save life, estimated

- costs and benefits for Philadelphia 1995-98. American Meteorological Society. 2004;85(8):1067-1074. doi: 10.1175/BAMS-85-8-1067
- [7] Casanueva A, Burgstall A, Kotlarski S, Messeri A, Morabito M, Flouris AD, et al. Overview of existing heat-health warning systems in Europe. 2019;16(15):1-22. doi: 10.3390/ijerph16152657
- [8] Ebi KL, Schmier JK. A stitch in time: improving public health early warning systems for extreme weather events. *Epidemiologic Reviews*. 2005;27:115-121. doi: 10.1093/epirev/mxi006
- [9] Toloo G, FitzGerald G, Aitken P, Verrall K, Tong S. Are heat warning systems effective?. *Environmental Health*. 2013;12(27):1-4. doi: 10.1186/1476-069X-12-27
- [10] 環境省. 熱中症予防サイト, 熱中症警戒情報とは. Ministry of the Environment. [Necchusho yobo site, Necchusho keikai joho towa]. https://www.wbgt.env.go.jp/about_alert.php (in Japanese) (accessed 2025-01-14)
- [11] 環境省. 熱中症予防サイト, 熱中症特別警戒情報とは. Ministry of the Environment. [Necchusho yobo site, Necchusho tokubetsu keikai joho towa]. https://www.wbgt.env.go.jp/about_alert.php (in Japanese) (accessed 2025-01-14)
- [12] Health Canada. 3.4 Developing an alert protocol. In: Heat alert and response systems to protect health: Best practices guidebook. 2012. p.23-31.
- [13] 環境省. 熱中症予防サイト, 熱中症警戒アラートの発表履歴. 2023. Ministry of the Environment. [Necchusho yobo site, Necchusho keikai alert no happyo rireki 2023.] https://www.wbgt.env.go.jp/alert_record_2023.php (in Japanese) (accessed 2025-01-14)
- [14] 国立環境研究所. 熱中症予防情報, 熱中症発生数(救急搬送). National Institute of Environmental Studies. [Necchusho yobo joho, Necchusho hasseisu (kyukyu hanzo)] <https://nies.maps.arcgis.com/apps/instant/portfolio/index.html?appid=b3bae4b7be9b46e6bd53f19788869831> (in Japanese) (accessed 2025-01-14)
- [15] 星秋夫, 中井誠一, 金田英子, 山本亨, 稲葉裕. 我が国における熱中症死亡の地域差. *日生氣誌*. 2010;47(4):175-184. Hoshi A, Nakai S, Kaneda E, Yamamoto T, Inaba Y. [Regional characteristics in the death due to heat disorders in Japan.] *Jpn J Biometeor*. 2010;47(4):175-184. doi: 10.11227/seikisho.47.175
- [16] 松本太. 東京都における高齢者の熱中症発生に関する地域的特徴. *日生氣誌*. 2022;59(3,4):67-77. Matsumoto F. [Regional characteristics of the incidence of heat disorders among the elderly in Tokyo.] *Jpn J Biometeor*. 2022;59(3,4):67-77. doi:10.11227/seikisho.59.67
- [17] 赤塚慎, 宇野忠, 堀内雅弘. 山梨県における熱中症発生の地域特性. *日生氣誌*. 2014;51(1):23-36. Akatsuka S, Uno T, Horiuchi M. [Regional characteristics of heat disorder incidence in Yamanashi prefecture.] *Jpn. J. Biometeor*. 2014;51(1):23-36. doi: 10.11227/seikisho.51.23
- [18] 入来正躬, 橋本真明. 熱中症発症の地域差 - 山梨県と北海道の比較から -. *日生氣誌*. 2006;43(1):23-33. Iriki M, Hashimoto M. [Regional difference in the incidence characteristics of heat disorder: Yamanashi and Hokkaido.] *Jpn J Biometeor*. 2006;43(1):23-33. doi: 10.11227/seikisho.43.23
- [19] Lien T, Tabata T. Regional incidence risk of heat stroke in elderly individuals considering population, household structure, and local industrial sector. *Science of The Total Environment*. 2022;(853):158548. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158548
- [20] Saha S, Brock JW, Vaidyanathan A, Easterling DR, Luber G. Spatial variation in hyperthermia emergency department visits among those with employer-based insurance in the United States: a case-crossover analysis. *Environ Health*. 2015;14(20):1-9. doi: 10.1186/s12940-015-0005-z
- [21] Grundstein AJ, Hosokawa Y, Casa DJ. Fatal exertional heat stroke and American football players: The need for regional heat-safety guidelines. *Injury Prevention and Risk Factor Screening*. 2018;53(1):43-50. doi: 10.4085/1062-6050-445-16
- [22] Sheridan S, Kalkstein A. Seasonal variability in heat-related mortality across the United States. *Natural Hazards*. 2010;55:291-305. 10.1007/s11069-010-9526-5
- [23] 星秋夫, 稲葉裕. 暑熱障害発生における高齢者の特徴 - 新聞記事の事例から -. *日本歯科大学紀要*. 2005;35:69-74. Hoshi A, Inaba Y. [Characterstics of heat disorders in old men, in cases of news paper reports.] *Nihon Shika Daigaku Kiyo*. 2006;35:69-74. doi: 10.14983/00000618
- [24] 環境省. 熱中症予防サイト, 全国の暑さ指数(WBGT). Ministry of the Environment. [Necchusho yobo site, zenkoku no atsusa shisu (WBGT)]. https://www.wbgt.env.go.jp/record_data.php (in Japanese) (accessed 2024-07-17)
- [25] 総務省統計局. 住民基本台帳に基づく人口, 人口動態及び世帯数調査. Statistics Bureau of Japan. [Jumin kihon daicho ni motozuku jinko, jinko dotai oyobi setaisu chosa]. <https://www.e-stat.go.jp/statistics/00200241> (in Japanese) (accessed 2024-07-17)
- [26] 国土交通省. 地域区分新旧表. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. [Chiiki kubun shinkyuhyo]. https://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/shoenehou_assets/img/library/chiikikubun-sinkyuu.pdf (in Japanese)(accessed 2025-01-14)
- [27] Ueno S, Hayano D, Noguchi E, Aruga T. Investigating age and regional effects on the relation between the incidence of heatrelated ambulance transport and daily maximum temperature or WBGT. *Environmental Health and*

- Preventive Medicine. 2021;26(116):1-14. doi: 10.1186/s12199-021-01034-z
- [28] 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. 日生気誌. 2014;50(4):147-157. Ono M, Tonouchi M. Estimation of wet-bulb globe temperature using generally measured meteorological indices. Jpn J Biometeor. 2014;50(4):147-157. doi: 10.11227/seikisho.50.147 (in Japanese)
- [29] Martinez GS, Imai C, Masumo K. Local heat stroke prevention plans in Japan: characteristics and elements for public health adaptation to climate change. Int J Environ Res Public Health. 2011;8(12):4563-4581. doi: 10.3390/ijerph8124563
- [30] 総務省統計局. 各年 10 月 1 日現在人口. Statistics Bureau of Japan. [Kakunen 10 gatsu 1 nichi genzai jinko.] https://www.e-stat.go.jp/stat-search/files?page=1&layout=datalist&toukei=00200524&tstat=000000090001&cycle=7&tclass1=000001011679&cycle_facet=tclass1&tclass2val=0 (in Japanese)(accessed 2024-11-22)
- [31] 東京都の統計. 住民基本台帳による東京都の世帯と人口. Statistics of Tokyo. [Jumin kihon daicho ni yoru tokyoto no setai to jinko.] <https://www.toukei.metro.tokyo.lg.jp/juukiy/jy-index.htm> (accessed 2024-12-03)