

鳥取県における熱中症リスクの評価 -IoT技術を用いた熱中症予測の確立-

環境学部環境学科 重田 祥 範
大谷 一貴・佐々木 琴奈

1. はじめに

昨今、地球温暖化やヒートアイランド現象の影響で、夏季日中の気温上昇が懸念されている。日本の夏、特に8月の平均気温は、1898年（明治31年）以降、100年あたり1.13℃の割合で上昇している（文部科学省・気象庁、2020）。この気温上昇に伴い、熱帯夜（日最低気温 $\geq 25.0^{\circ}\text{C}$ ）や猛暑日（日最高気温 $\geq 35.0^{\circ}\text{C}$ ）、真夏日（日最高気温 $\geq 30.0^{\circ}\text{C}$ ）の日数が増加している（文部科学省・気象庁、2020）。2018年7月28日には、埼玉県熊谷市で日最高気温が 41.1°C を記録し、2020年8月17日に静岡県浜松市で 41.1°C 、同年9月3日には新潟県三条市で 40.4°C と、様々な地域で日中の気温が 40°C 以上となった。2020年8月は浜松市以外にも全国各地で 40°C を超える気温が記録されるなど、近年は日中における気温上昇が目立っている。

このような厳しい暑熱環境が継続した場合には、我々の身体に不調を引き起こす。その最たる例が熱中症である。2013年から2022年の熱中症による救急搬送人員数（総務省）のデータを見てみると、2015年から2017年までは減少傾向がみられ20000人を下回っていた。しかし、2018年以降は搬送数が著しく増加しており、2022年には60000人を超えるなど、決して軽視できないものとなってきている（第1図）。そのため、熱中症に関する研究は多岐にわたりおこなわれてきた。例えば、人口動態統計や救急搬送データ、気象庁の観測データに基づき、熱中症死亡者数と熱帯夜・真夏日などの気象統計項目や熱中症発症リスクと日最高気温の関係性が明らかにされてきた（中井、1993；入來、2000）。南（2004）では、現在厳しい暑熱期間が長引く傾向にあることや今後気候の高温化に拍車がかかっていくことにより、熱中症患者のさらなる増加が予想されている。そのため、今後の暑熱環境の悪化にともなう熱中症リスクに備え、夏季猛暑下の気象情報を把握し、適切な対策を取っていくことが必要となってくる。

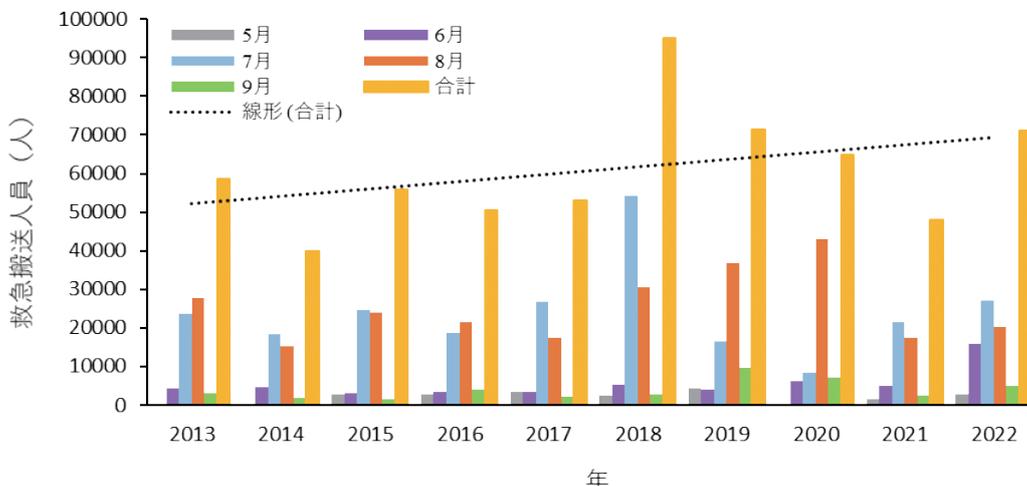


図1 全国の熱中症救急搬送人員数の経年変化（総務省の統計データより作成）

2. 暑熱障害

2. 1. 熱中症

熱中症とは、暑熱障害の総称である。症状により、熱失神、熱けいれん、熱疲労、熱射病（日射病）などの病型で分類される。人間の体は、運動や内臓の働きにより常に熱エネルギーが生み出される。そのため、暑熱環境下でも異常な体温上昇を抑えるための、効率的な体温調節機能が備わっている。体温が上昇すると主に2つの体温調節方法により平熱が保たれる。1つは、皮膚表面からの熱放散である。高温環境にさらされると自律神経を介して体表面付近の末梢血管が拡張する。血管が拡張することで、血流量が増加するため外気へと熱が放散され、体温低下を図ることができる。2つ目は発汗である。汗の蒸発にともない、気化熱により体温が低下する。平時であれば、これらの調節機能により体温が維持されるが、熱産生量と熱放散量のバランスが崩れると体温は急激に上昇する。その状態が熱中症である。多量の発汗により体水分量が減少すると、血流量の減少により意識障害が生じる。また、高体温は脳や肝臓、腎臓の機能障害にもつながる。そのため、適切な予防法及び処置の周知が重要とされている（環境省、2018）。

一般的に、脱水状態にある人、高齢者、乳幼児、障害を患っている人、肥満の人、過度の衣服を着ている人、普段から運動をしていない人、暑さに慣れていない人、病気の人、体調の悪い人等の条件に当てはまる人が熱中症になりやすいとされている（環境省、2018）。乳幼児と高齢者の熱中症リスクについては、成人に比べ劣った熱放散特性や暑熱順化の影響が指摘されている（井上、2004）。図2に2011年から2020年までの8月の年齢区分別搬送割合を示す。過去10年全てにおいて65歳以上の高齢者の搬送割合が高くなっている。上記のような問題から、高齢者を対象とし熱中症の認知度を調査した研究に注目が集まっている（例えば、柴田ほか、2010）。一方、少年（7歳以上18歳未満）やそれ未満の年齢区分は合計しても20%を超えていない。これは、教育機関等の健康管理により発症リスクが抑止されているものと考えられる。

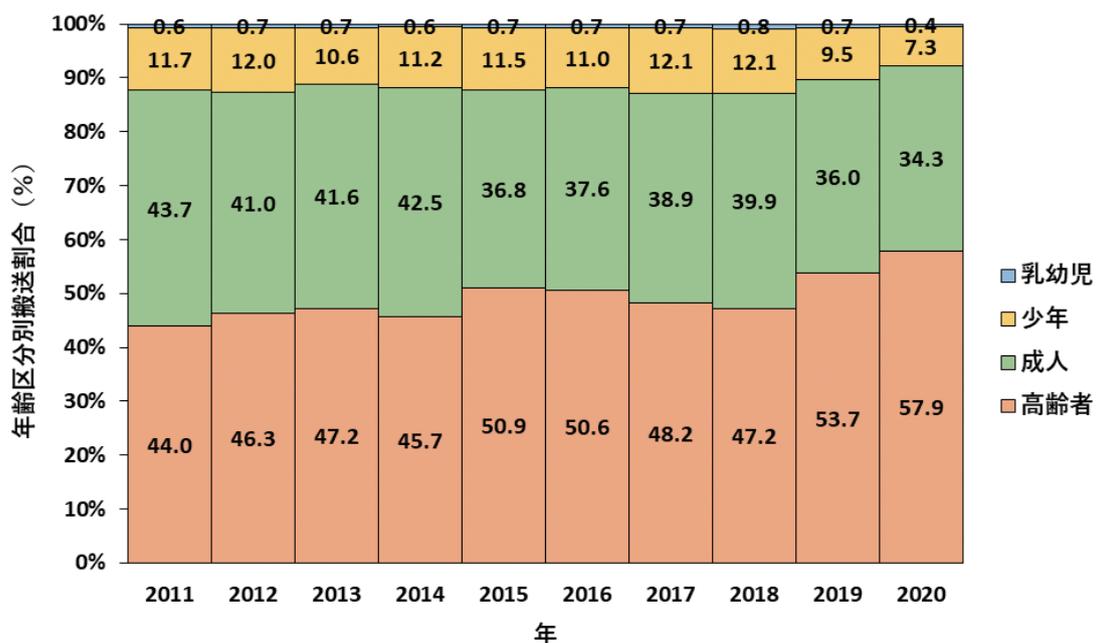


図2 年齢区分別搬送割合（2011～2020年8月統計データ）数値の単位は%

2. 2. WBGT

人が感じる温熱感覚は、気温だけでなく相対湿度、風速、放射を含む気象条件に大きく左右される。人間の身体は、高温下にさらされると、発汗や不感蒸泄（肺や皮膚からの蒸発）、末梢血管の拡張による血流調節などの体温調節機能がはたらく。この機能により皮膚温度、中枢神経温度、体深部温度が決まり、その過程で人は温熱感覚を覚えることになる。このような温熱感覚や生理現象を数値化し、表現したものが温熱指標である（大橋、2010）。

WBGT（Wet-bulb Globe Temperature：湿球黒球温度）は、軍隊訓練において熱中症予防のため Yaglou and Minard（1957）によって考案された熱中症発症の可能性の大小を評価する指標の一つである。この指標は1982年に有効な指針であることが認められISO-7243に規定された。それ以降は、日本においても労働環境や教育現場など、さまざまな場面で用いられるようになった（福井、2018）。WBGTは、人体の熱収支に大きな影響を与える気温、相対湿度、輻射熱などの要素を考慮した指標であり、以下の定義式（1）・（2）より算出される。（1）式は日中、（2）式は夜間の算出に用いる。なお、ここで T_w は湿球温度、 T_g は黒球温度、 T_a は乾球温度を示しており、単位はすべて℃である。

$$WBGT_d = 0.7 T_w + 0.2 T_g + 0.1 T_a \quad (1)$$

$$WBGT_n = 0.7 T_w + 0.3 T_g \quad (2)$$

日本において、日本生気象学会や日本体育協会などが熱中症予防にWBGTを用いてそれぞれの指針を公開している。その中で日本生気象学会は、日常生活における熱中症予防指針（第1表）にて4段階の温度基準を設定し暑熱リスクを評価している。一方、日本スポーツ協会は熱中症予防運動指針を公表している（表2）。そのような中、環境省では2006年より「環境省熱中症予防情報サイト」を開設し、熱中症の知識やメカニズムを説明するほか、WBGTを暑さ指数と称し、全国の暑さ指数の予測値や実況値の情報提供をおこなっている。

WBGTに関する既往研究も種々存在し、WBGTの数値は日最高気温より熱中症患者数と指数関数的な相関が明瞭にあらわれることや嚴重警戒（28.0～30.0℃）の領域内で特に熱中症発症数が多くなること、WBGTが急に上昇した日は熱中症の危険性がさらに高くなることなどが明らかにされている（大橋、2010；中井、2011；登内、2012）。一方で、WBGTの算出に必要な3種類の測定項目のうち、湿球温度と黒球温度は東京や大阪などの管区気象台以外では、一般的に観測されていない。黒球温度に関しては、環境省の管轄の下、観測がおこなわれているが、全国11地点のみにとどまっている。また、公式のベルノン式グローブ温度計などはその場の景観に影響を与えること、維持管理をこまめにおこなう必要があるなどの面から長期的な観測には不向きであるといえる。そのため、従来のWBGTに関する研究の多くは、気温、相対湿度、日射量、風速などの気象庁の観測データを用いて、推定式（例えば、小野・登内、2014）よりWBGTを算出し議論している（福井、2016）。しかし、大橋ほか（2010）は、熱中症の発生は活動空間ごとに形成される局所的な微気象の影響を強く受けるため、その空間ごとに計測したWBGTを考察することが望ましいと指摘している。

表1 日常生活における熱中症予防指針

温度基準 (WBGT)	注意すべき生活活動の目安	注意事項
危険 (31℃以上)	すべての生活活動でおこる危険性	高齢者においては安静状態でも発生する危険性が大きい。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
厳重警戒 (28～31℃)		外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25～28℃)	中等度以上の生活活動でおこる危険性	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取り入れる。
注意 (25℃未満)	強い生活活動でおこる危険性	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。

※「日常生活における熱中症予防指針」Ver.3 確定版（日本生気象学会）より作成。

表2 熱中症予防運動指針

気温 (参考)	暑さ指数 (WBGT)	熱中症予防運動指針	
35℃以上	31以上	運動は原則中止	特別の場合以外は運動を中止する。特に子どもの場合には中止すべき。
31～35℃	28～31	厳重警戒 (激しい運動は中止)	熱中症の危険性が高いので、激しい運動や持久走など体温が上昇しやすい運動は避ける。10～20分おきに休憩をとり水分・塩分の補給を行う。暑さに弱い人(体力の低い人, 肥満の人, 暑さに慣れていない人など)は運動を軽減または中止。
28～31℃	25～28	警戒 (積極的に休憩)	熱中症の危険が増すので、積極的に休憩をとり適宜、水分・塩分を補給する。激しい運動では、30分おきくらいに休憩をとる。
24～28℃	21～25	注意 (積極的に水分補給)	熱中症による死亡事故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分・塩分を補給する。
24℃未満	21未満	ほぼ安全 (適宜水分補給)	通常は熱中症の危険は小さいが、適宜水分・塩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。

※日本スポーツ協会「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」(2019)より作成。

3. 研究背景および目的

熱中症の発生は各活動空間で形成される局所的な微気象の影響を強く受ける。そのことを踏まえ、定点型観測や移動観測を実施した研究もおこなわれている。大橋ほか(2009)は、岡山市街地を対象としてビル街や住宅街、スポーツトラックなど6種の異なる活動空間でWBGTの観測をおこなった。その結果、屋外空間では地点間で最大3.4℃の差異が認められ、それは主に黒球温度の影響であり、活動空間における人体への入力放射量の違いによると明らかにした。さらに、その結果より乾球温度(気温)と湿球温度のみでWBGTを推定することは、注意が必要であると言及している。河野ほか(2018)は、都市街区スケールにおいて晴天時と曇天時の熱ストレスを把握するため、東京都市街地を対象に約3kmの経路においてWBGTの移動観測をおこなった。その結果、平均WBGTは晴天時と曇天時で日射量が大きく異なるにも関わらず29.0℃を記録した。そのことを踏まえ、WBGTの構成要素に着目した結果、晴天時は黒球温度、曇天時は湿球温度が支配的であり、WBGTが同程度であっても人体が感じる暑さの感覚は異なることを考察している。日下ほか(2019)は、商業地、住宅地、緑地という異なる土地利用を1～2km以内に有する東京都渋谷区を対象にして、土地利用や人間活

動の違いが、気温とWBGTに及ぼす影響を観測によって明らかにした。その中で、同一空間で気温とWBGTの数値に非一様性がみられる原因は、湿度によるものと言及している。以上のように、街区スケールで観測を実施し、活動空間の違いによるWBGTの特徴や形成要因について明らかにした研究は複数存在する。しかしながら、観測をおこない得られたデータより、暑熱環境の地域性について言及した研究は数少ない。

そこで、本研究では猛暑期の鳥取県を対象に沿岸、都市、内陸部を網羅するように乾球温度（気温）、相対湿度、黒球温度の定点型観測をおこない、WBGTを算出することで、各地区およびそれぞれの地区内の熱中症リスクの特徴や時空間変動を明らかにする。さらに、地理的要因が暑熱環境の形成にどのように寄与しているかを分析し考察する。本研究が対象とした鳥取県は、日本海側に位置しているため、夏季にフェーン現象が発生すると、地域によっては40℃近い猛暑を記録することもある。そのような中、鳥取県の熱中症搬送者数（人口10万人あたり）は全国的にみても常に上位である。なかでも2019年と2020年は、2018年より搬送数が少なかったものの、順位の高さが目立った。このように、鳥取県は熱中症が発生しやすい地域と言っても過言ではない。

4. 研究概要

4. 1. 対象地域

鳥取県は、中国地方の北東部に位置し、東西約126km、南北約62kmと東西に幅広い県である。県西部には、中国地方最高峰の大山（標高 1729m）が存在し、東部には氷ノ山（標高 1510m）や扇ノ山（標高 1310m）が存在している（図3）。海岸線の入り込みは少ないが、中国山地を主とした比較的標高の高い地域が沿岸部付近まで迫り、起伏の大きい地域もみられる。このように、鳥取県は山地が多く、平野はごく一部に限られている。また、各地区には一級河川〔東部（鳥取地区）：千代川、中部（倉吉地区）：天神川、西部（米子地区）：日野川〕が中国山地を起点に日本海にかけて流れている。3本の河川の流域には平野が形成され、それぞれ鳥取市（185943人）、倉吉市（45215人）、米子市（146110人）が流域の中心都市として存在している（2022年11月1日現在）。鳥取県の気候は日本海側気候に属し、小気候区で分類すると平野部は山陰型気候区、山間部は中国山地気候区に分けられる（鳥取地方气象台）。

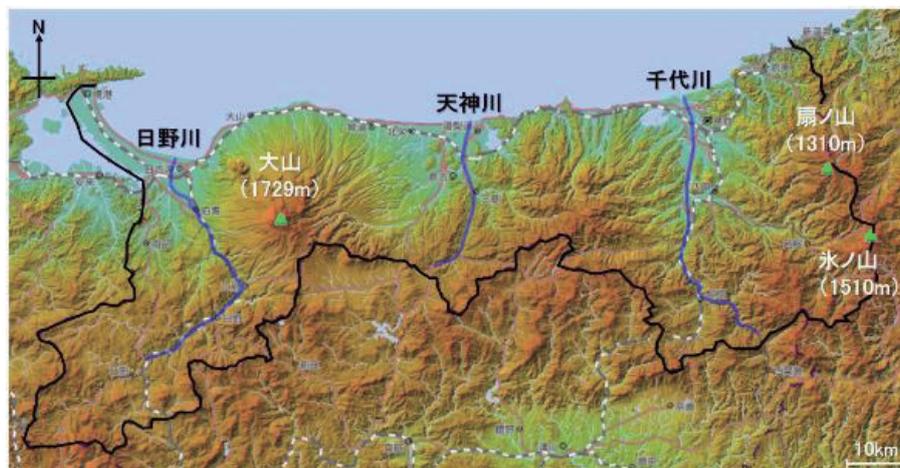


図3 鳥取県の地形図（地理院地図より作成）

4. 2. WBGT観測

本研究では、鳥取県を対象に沿岸部から内陸の山間部にかけて西部10地点、中部7地点、東部12地点の計29地点で定点型WBGT観測をおこなった。観測地点は、各地区の沿岸部から山間部にかけて約3km毎に設定した(図4)。観測期間は、2022年8月5日から9月11日である。気象観測には、自然通風式シェルターと小型黒球温度計を作成して使用した。自然通風式シェルターに温湿度センサ(IFS-TH1Mini:INKBIRD社)を用いて、気温・相対湿度を測定した。また、小型黒球温度計には、温湿度センサ(IFS-TH1:INKBIRD社)を用い、黒球温度を測定した。サンプリング間隔は、気温と相対湿度および黒球温度ともに1分である。観測機器は、各地点の街区公園や公共施設の外灯等を利用し、地上から約2.5mの高さに設置した(図5)。

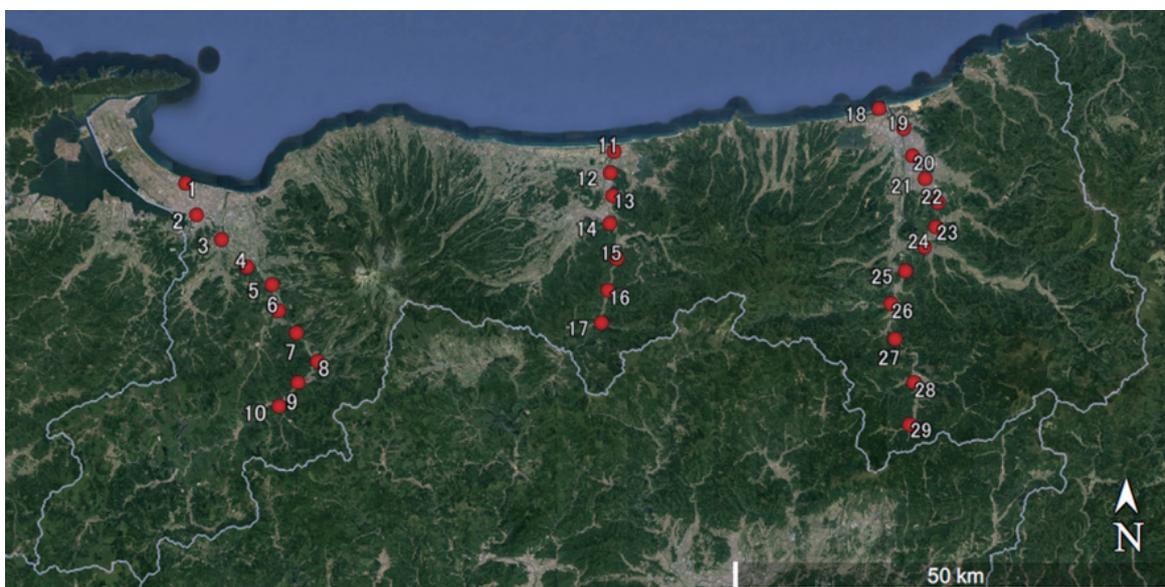


図4 観測地点(1～10を西部、11～17を中部、18～29を東部)

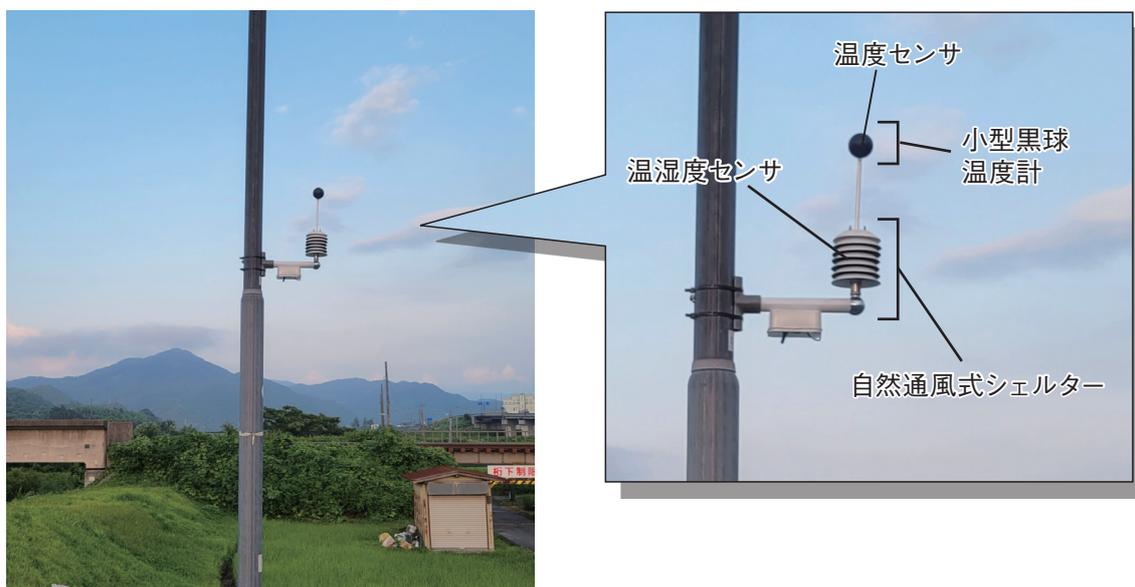


図5 観測機器

5. 結果

5. 1. 地点別日最高値の比較

日降水量0.0mm以下かつ日照率60%以上だった7日間における各観測地点の暑熱環境を比較した。その結果、日最高気温と日最高湿球温度は都市部で高くなり、気温においては、人工土地被覆率の高い山間部でも高値（最大36.8℃）を示した。また、日最高黒球温度は、地点間に10.0℃以上の差異が見られ、日最高WBGTについては、地点間に最大4.9℃の差が認められた。これより、活動空間によって暑熱環境は異なり、1地点の計測データを広域に適用するには注意が必要であることが示唆された。

5. 2. 暑熱環境と熱中症救急搬送人員数

熱中症搬送者数に違いが見られた2日間を比較した。全地点でWBGT31.0℃以上を記録した8月9日は、熱中症搬送者数7人中6人が中等症であり、搬送者数が最も多かった9月4日は、13人中10人が軽症であった。9月4日は、8月9日に比べて気温などの最低値が低く、日最大差が大きかった。これより、暑熱環境の日変化は熱中症発症リスクにWBGTは症状の重さに寄与することが示唆された（図6）。

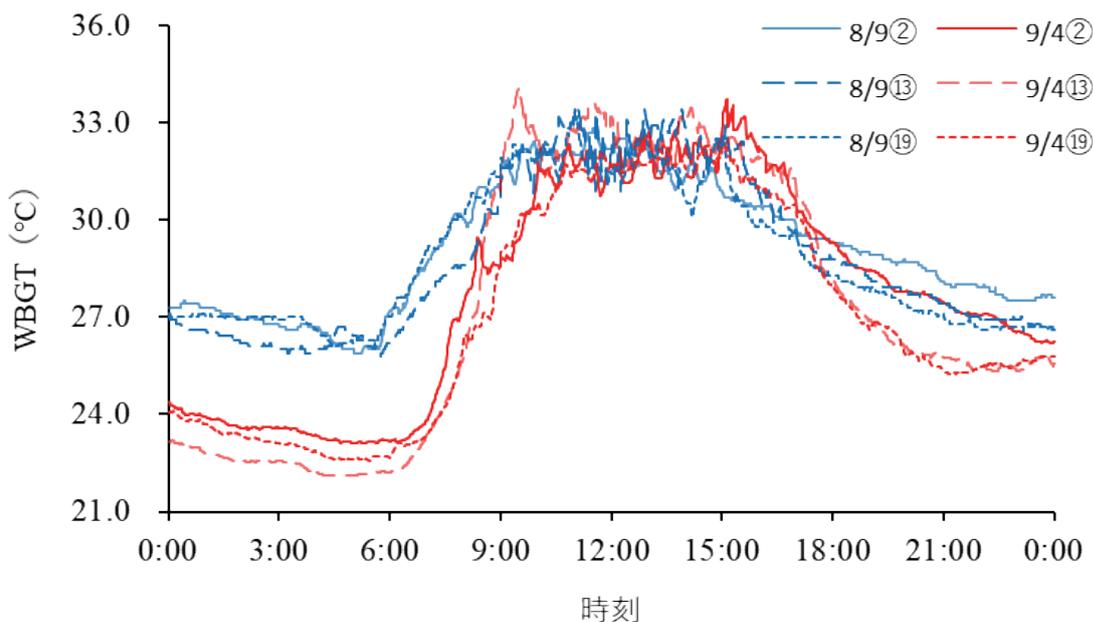


図6 WBGTの時間変化

5. 3. 暑熱環境と地理的要因の関係性

地形（海岸距離、標高）および周辺環境（天空率、人工土地被覆率）との相関分析をおこなった。その結果、地形との間にはほぼ相関は見られなかったが、フェーン現象発生日において、気温との間に有意な負の相関（海岸距離： $r = -0.84$ 、標高： $r = -0.88$ ）が認められた。また、天空率との間には負の相関（最大 $r = -0.54$ ）、人工土地被覆率との間には正の相関（最大 $r = 0.70$ ）が認められた。これより、周辺環境が暑熱環境に与える影響は、地形に比べて大きいことに加え、フェーン現象発生日は、気温と地形の関係性が大きくなることが明らかとなった（図7）。

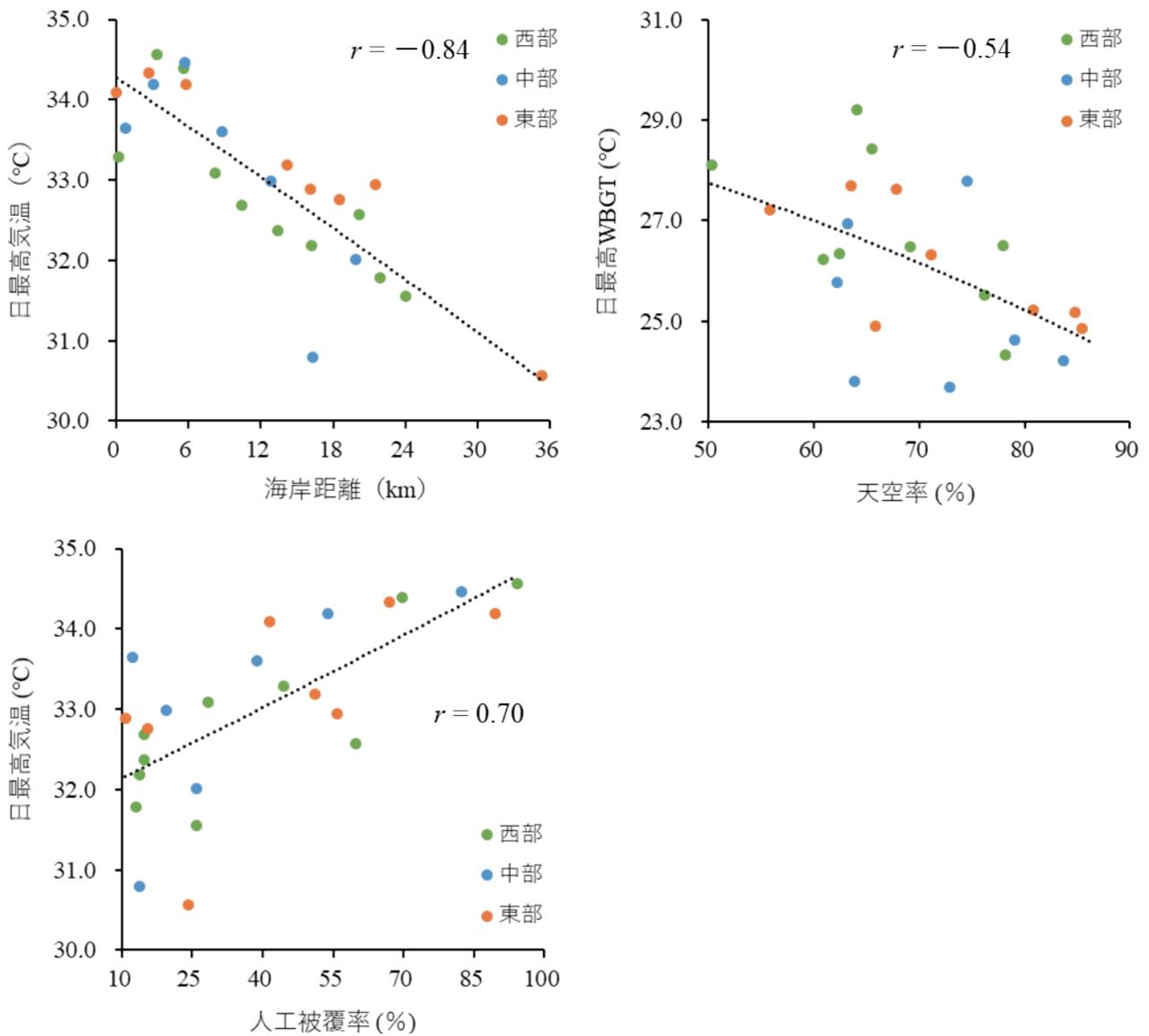


図7 相関分析の結果

引用文献

- 福井健弘, 2016: 日本の夏季におけるWBGTの地域性とその経年変化. 法政地理 48: 61-70.
- 福井健弘, 2018: 日本における夏季のWBGT (湿球黒球温度) の地理的分布に関する気候学的考察. 法政地理 50:1-14.
- 井上芳光, 2004: 子供と高齢者の熱中症予防策. 日生氣誌, 41 (1) : 61-66.
- 入來正躬, 2000: 1995—1999年夏の山梨県での熱中症に関する研究. 日生氣誌, 37 (2) :63-72.
- 環境省, 2018: 熱中症環境保健マニュアル2018.
- 河野恭佑, 植田弥月, 稲垣厚至, 小田僚子, 2018: 街区領域における晴天時と曇天時のWBGT 分布の特徴. 土木学会論文集B1 (水工学) Vol.74, No.4, I 247- I 252.
- 日下博幸, 狩浩介, 久保礼子, 藤拓人, アングアンヴァン 2019.: 地利用と人間活動が都市中心部の 気温と暑さ指数の分布特性に及ぼす影響. E-journal GEO 14: 180-196.

- 南利幸, 2004: 地球の温暖化と熱中症の予報について. 日生氣誌, 41 (1) :41-44.
- 文部科学省, 気象庁, 2020: 日本の気候変動2020 大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書.
- 中井誠一, 1993: 熱中症死亡数と気象条件－日本における21年間の観察－. 日生氣誌, 30 (4) :169-177.
- 中井誠一, 2011: 熱中症の定義と発生の実態. ウォーキング研究 15, 13-17.
- 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. 日生氣誌, 46 (2) : 59-68.
- 大橋唯太, 2010: 温熱指標. 天気, 57 (1) : 57-59.
- 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. 日生氣誌, 50 (4) ,147-157.
- 柴田祥江, 飛田国人, 松原斎樹, 藏澄美仁, 2010: 住宅内の熱中症に対する高齢者の認知度と暑熱対策の実態. 日生氣誌, 47 (2) : 119-129.
- 登内道彦, 2012: 日本の夏の気象と熱中症. 日本臨床, 70-6, 981-985.
- Yaglou, C.P. and Minard, D. (1957) : Control of Heat Casualties at Military Training Centers, American Medical Association Archives of Industrial Health, Vol. 16: 302-316.