

高温や熱波が直接的に人間健康に及ぼす影響

井原智彦（東京大学 大学院新領域創成科学研究科 環境システム学専攻）

1. はじめに

世界各地で、全球規模の気候変動を背景として、気温が上昇してきている。都市域ではヒートアイランド現象の影響も受けて、さらに高温化が進んでいる。気候変動に関する政府間パネル(IPCC) (2021)の報告書では、あらゆる将来シナリオの下で気温のさらなる上昇や極端な暑さの増加が予測されている。

2. 気候変動が人間健康に影響するメカニズム

2.1 人体の熱収支

恒温動物である人間は、常に熱を産生し続けており、それを環境に放散することで、一定の体温を保っている。環境から熱が流入することもあり、その分も放散する必要がある。人体を取り巻く熱の産生・流入・放散および人体への蓄積負荷を整理すると、式(1)・図1で表せる。

$$M - (C + R + IE) = S \quad (1)$$

ここで、 M は代謝熱で、体温維持のために人体内で産生される熱である。 C は対流（顕熱輸送）で、皮膚温と気温の差に応じ、風によって皮膚面から奪われていく顕熱である。 R は放射（純放射）で、長波放射で人体から出て行く熱から、太陽からの短波放射と地物からの長波放射で人体に流れ込んでいく熱を引いたものである。 IE は蒸発散（潜熱輸送、 I が水の蒸発潜熱・ E が蒸発量）で、湿度に応じて、皮膚の濡れ面から風による蒸発で奪われていく潜熱である。 S は産生される熱 M から奪われる熱($C + R + IE$)を引いたもので、人体に蓄積される熱（人体熱負荷）である。厳密には、人体が地物に接触することで熱の

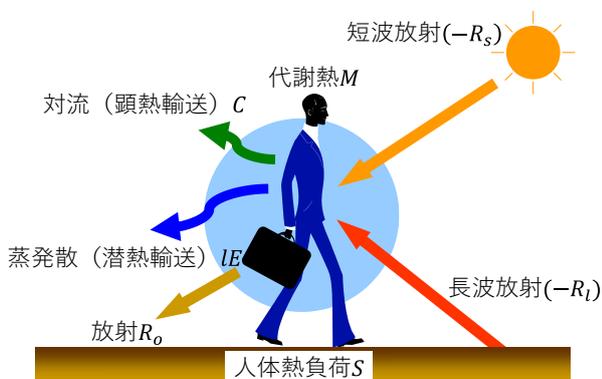


図1 人体の熱収支

伝導も考えられるが、立位の場合は小さい（図1では靴を履いた足の裏のみが地物に接触している）。

$S = 0$ でないと体温を一定に保てないため、体温調節機能が働く。 $S < 0$ となると「寒さ」を感じて、震えが発生して産熱が増大したり（ M の増加）、末梢血管を収縮させることで血流量を減らし皮膚温を低下させたり（ C と R の減少）する。一方、 $S > 0$ となると「暑さ」を感じて、発汗量を増大させたり（ IE の増加）、末梢血管を拡張させることで血流量を増やし皮膚温を上昇させたり（ C と R の増加）する。

顕熱輸送 C は、式(2)で表すことがある。

$$C = c_p \rho h_c (T_s - T_a) \quad (2)$$

ここで、 c_p は空気の比熱、 ρ は空気の密度、 h_c は対流熱伝達率（風速 U が大きいほど大きくなる）、 U は風速、 T_s は皮膚温度、 T_a は気温である。すなわち、顕熱輸送 C は気温 T_a が低いほど風速 U が大きいほど大きくなる。また、気温 T_a が皮膚温 T_s より大きい場合、 C は負となり、空気から熱を受け取ることになる。

同様に、潜熱輸送 IE は、式(3)で表すことがある。

$$IE = I p h_e w_s (p_{SAT} - p_a) \quad (3)$$

ここで、 h_e は潜熱伝達率（風速 U が大きいほど大きくなる）、 w_s は皮膚の濡れ面積率、 p_{SAT} は皮膚表面における飽和水蒸気圧、 p_a は空気の水蒸気分圧である。潜熱輸送 IE は濡れ面積率 w_s が大きいほど水蒸気圧 p_a が低いほど風速 U が大きいほど大きくなる。

2.2 人間健康への影響

気温が上昇し、 C が小さい、あるいは負となるような環境下で、体温調節機能では調節しきれない場合がある。そうすると、コア体温は上昇し、熱中症に至る可能性が出てくる(Bouchama and Knochel 2002)。循環器や呼吸器の疾病を持っている人々、あるいは能力が低下した高齢者は、熱中症に至る前に、熱疲労などによる循環不全で死亡する(本田・高橋 2009)。

睡眠と体温はともに概日リズムによって調節されている(Refinetti and Menaker 1992)。睡眠は体温が下がると起こり、上がると終わる傾向がある。周囲温度が睡眠に適さない場合、睡眠サイクルが乱れる(Haskell et al 1981)。

2.3 間接的な影響

気温上昇が直接人体熱収支に影響を与えることで引き起こされる直接的な影響のほか、間接的な影響も存在する。

紫外線により大気中の VOCs や NO_x がオゾンなどの光化学オキシダントを生成する反応は、気温上昇により活性化される(Yoshikado 2023)。この光化学オキシダント濃度の増大は、呼吸器系疾患に影響を及ぼす(Shahriyari et al 2021)。

気温上昇は、媒介動物の生息域を変化させ、条件によって、マラリアやデング熱など動物媒介性感染症を拡大させる。また、水や食物を介する伝染性媒体が拡大することにより、下痢や他の感染症を増大させる恐れがある(地球温暖化と感染症に係る影響に関する懇談会 2007)。

また、気温上昇は、飽和水蒸気圧の上昇を通じて、降水パターンの変化をもたらす。洪水はしばしば人命を直接奪う。作物の収量減少も、低栄養を通じて子供たちの生育を損なうほか、人命を奪うこともある(World Health Organization 2014)。

3. 世界のさまざまな健康影響の実態

気温の上昇は、直接的にも間接的にも人間健康に影響をもたらす。その影響の大きさはどのくらいなのだろうか？ IPCC Working Group II (2022)によると、気候変動による死亡数は 2019 年に 39 百万人に達し、年間総死亡数の 69.9%を占めている。内訳としては、心血管疾患が 32.8%、呼吸器疾患として慢性呼吸器疾患は 7%、呼吸器感染症と結核は 6.5%を占めている。1990 年から 2017 年までの傾向を見ると、デング熱が十万人あたり 1.5 人から 2.0 人に増加した一方、下痢性疾患が同 350 人から 150 人と減少したのを始め、自然災害、暑熱・寒冷曝露、マラリア、低栄養はいずれも減少している。これは公衆衛生が向上したためと考えられる。

一方、世界保健機関(World Health Organization, WHO)(2014)は、温室効果ガス排出量が SRES A1b シナリオかつ社会経済条件が基準シナリオの場合の、2030 年と 2050 年の気候変動による死亡数を予測している。予測によると、2030 年に低栄養が 95,000 人、マラリアが 60,000 人、デング熱が 260 人、下痢性疾患が 48,000 人、暑熱曝露が 38,000 人の死亡につながっているのに対し、2050 年はそれぞれ 85,000 人、33,000 人、280 人、33,000 人、95,000 人の死亡と、

暑熱曝露を除いて減少する傾向にある。ここでも公衆衛生の向上が健康影響を軽減しているが、暑熱曝露は公衆衛生の向上のみでは増加を防げないことがわかる。なお、暑熱曝露による死亡は世界的に増加するが、増加が大きく見込まれるのは南アジアと東アジアである。

4. 日本国内の健康影響の実態

日本国内で問題となっている、あるいは問題になりそうな健康影響は、熱中症を始めとする直接的な健康影響(暑熱曝露)である。間接的な健康影響では自然災害(水害)が問題視される。

4.1 熱中症

直接的な健康影響の代表格が熱中症である。熱中症による死亡数は、コロナ禍の 2021 年を除いて近年 1,000 人を超えており、2018 年に 1,581 人を数えたほか、2022 年も 1,477 人となっている(厚生労働省 2023)。ほぼ一貫して死亡数が増加している原因は、気温上昇のほか、高齢化や死因に用いられる疾病及び関連保健問題の国際統計分類(International Statistical Classification of Diseases and Related Problems, ICD)の改訂にあるが、高齢化や ICD の改訂を調整しても、死亡率の増加には有意な傾向が認められている(藤部 2013)。熱中症死亡数は人口動態調査の死亡票を死因別に解析することで算出されるが、値が確定するのは 1 年以上かかること、また「熱中症」という ICD はなく、対応させる ICD によって値が変化することに注意が必要である(中井 2019)。

熱中症の被害は、救急車による搬送数(救急搬送数)でも表現される。救急搬送数は、2010 年に 56,119 人を記録して以降、50,000 人前後で推移していたが、2018 年に 95,137 人を記録、以降は 2021 年の 47,877 人を除くと 60,000~100,000 人程度で推移しており、2023 年には 91,467 人を数えた(総務省消防庁 2024)。各自治体の救急搬送数を集計した救急搬送数データが出典であり、翌年に値が確定する。救急搬送数も年々増加しており、気温上昇と高齢化によるものと思われるが、2010 年の急増などはそれらだけでは説明が付かず、社会情勢の変化を受けている可能性がある。

熱中症の被害を示した事例として、他に受診数も存在する。熱中症に伴う受診数は、2010 年以降について判明しており、300,000~400,000 人程度で推移

していたが、2018 年に 600,000 人近くを記録している（2019 年以降は未解析）（環境省 2022）。受診数は死亡数や救急搬送数よりも対象が広くなり、より熱中症の実態を反映していると考えられるが、診療報酬明細書を医療従事者が解析しないと算出できず、死亡数や救急搬送数のようには入手しやすくないのが難点である。

4.2 熱疲労などによる循環不全

前述の通り、身体能力が低下した場合は、熱中症に至る前に熱疲労などによる循環不全で死亡する。呼吸器疾患や循環器疾患が死因となり、暑熱特有の死因ではないため、死因別の死亡数から定量化できない。しかし、日最高気温と日死亡数の関係を解析し、高温になった際の死亡数の増加から推測することは可能である。これを超過死亡と呼ぶ。1985–2012 年の日本の暑熱超過死亡は全死亡の 0.32% であり、同期間の死亡数は 27 百万人であることから、年平均 3,000 人程度となる（Gasparrini et al 2015）。このうち熱中症が占めるのは 2 割程度であり、残りを循環不全と考えると、被害としては循環不全の方が大きく、熱中症のみでは暑熱の健康影響を評価できないことがわかる。

4.3 睡眠困難

暑熱は睡眠を悪化させる。睡眠は熱中症や熱疲労のように統計は存在しないが、疫学調査を用いて名古屋市（2,300 千人）の実態を明らかにした研究によると、年間のべ 355,000 人が暑熱による睡眠困難を経験したと推定された（夏季を 3 か月とすると夏季の毎日におおよそ 0.2% の人口が暑熱による睡眠困難となっている）（Ihara et al 2023）。睡眠困難は直接的には死亡に繋がらないが、障害調整生存年（disability-adjusted life year, DALY）を用いると、名古屋市の毎年の暑熱に伴う睡眠困難の損失余命は 100 年程度と推定される。熱中症の死亡に伴う損失余命も 100 年程度と推定されていることから、社会における睡眠困難の被害は熱中症の死亡の被害に匹敵すると考えられる。

4.4 疲労

実際に人々が真夏に経験する症状としては、熱中症よりも、不眠や疲労・変調を訴える方が大きい（環境情報科学センター 2009）。

疫学調査より実態を推測した研究が存在し、1°C 上昇するごとに 0.76% の疲労の有症者が増加し、大阪府（8,800 千人）では 40 年間の気温上昇で DALY で 2,600 年の余命が損失されたと推定されている（鳴海ほか 2019）。睡眠困難は 4,100 年の損失余命と推定されることから、疲労は睡眠困難の 6 割程度の被害をもたらしていることになる。

4.5 水害

水害による死亡数（行方不明を含む）は、1959 年に 5,565 人を記録するなど、過去には 1,000 人を超えることも珍しくなかったが、近年は大きな災害がない限り 100 人以下となっており、今世紀に入ってから年平均 90 人程度である（国土交通省 2023）。これは社会基盤の整備の効果であると考えられる。しかし、平成 30 年 7 月豪雨が発生した 2018 年には 254 人、令和元年東日本台風のあった 2019 年には 122 人と、長期的には死亡数はやや増大しているように見受けられる。

4.6 その他の健康影響

気温の上昇は、さまざまな感染症（ヘルパンギーナ、手足口病、咽頭結膜炎、腸管出血性大腸炎感染症、感染症胃腸炎、流行性角結膜炎、突発性発疹）に影響を与えるが、その被害は合計しても睡眠困難や疲労より 2 桁小さい（鳴海ほか 2019）。また、熱中症、睡眠困難、疲労以外の直接的な健康影響も存在するかもしれないが、自覚症状から推測する限りでは、小さいことがわかっている（井原ほか 2011）

5. 暑熱環境の予測

5.1 温熱指標

人体の熱収支を計測できれば、熱中症のリスクを評価できるが、熱収支そのものを計測するのは困難である。人体熱収支に主に関係するのは温熱 6 要素と呼ばれる 6 個の因子であることがわかっており（Fanger 1970）、温熱 6 要素を計測すれば、人体の熱収支を類推できる。温熱 6 要素は、物理的環境因子である温度、湿度、気流、輻射（放射）の 4 個の因子に、人体の生理にかかわる活動量（代謝量）と着衣量（着衣の熱抵抗）の 2 個の因子を加えたものである。人体熱収支と温熱 6 要素の関係は図 2 のようにまとめられる。

温熱 6 要素あるいはその一部を合成することで温

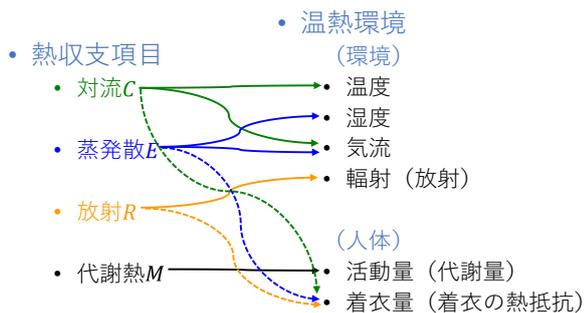


図 2 人体の熱収支項目と温熱 6 要素の関係

熱指標を作成し、1 つの指標を計算することで、人体の熱収支あるいは体感を推計しようという試みは広くおこなわれており、現在では数多くの指標が存在する(Carlucci and Pagliano 2012)。

特に有名であるのが、温度と湿度から計算される有効温度(effective temperature, ET) (Houghton and Yaglou 1923)、温度と放射から計算される作用温度(operative temperature, OT) (Winslow et al 1937)、温度と風速から計算される風冷指数(wind chill index, WCI) (Siple and Passel 1945)、温度・湿度・放射から計算される湿球黒球温度(wet-bulb globe temperature, WBGT) (Yaglou and Minard 1957)、温度と湿度から計算される不快指数(discomfort index, temperature-humidity index, THI) (Thom 1959)、熱ストレス指数(heat stress index, HSI) (Belding and Hatch 1955)である。このうち OT と HSI は体感に基づいていないが、ET・WCI・WBGT・THI は体感に基づいて計算式が開発されている。特に、WBGT は軍隊訓練時の熱中症予防のために開発されたものであり、ISO-7243 で規定されている。熱中症発症と相関することが良く知られており、環境省では「暑さ指数」と呼んで、WBGT が 35°C に達すると予測される場合は熱中症特別警戒アラートを発令することで、熱中症予防に利用している。一方で、WBGT の各係数は人体の熱平衡式から算出される係数から外れているため、実験条件を外れた環境では合わない可能性も指摘されている(持田・佐古井 2011)。

人体熱収支を模擬できる熱的快適性モデルを開発し、モデルを用いて理論的に正しい温熱指標を開発する試みも存在する。予測平均温冷感申告(predicted mean vote, PMV) (Fanger 1970)はその走りであり、その後、2 ノードモデルに基づいた標準有効温度(standard effective temperature, SET) (Gagge et al 1971)、

SET を屋外に適用させた OUT_SET* (Pickup and de Dear 1999)、生理的相当温度(physiological equivalent temperature, PET) (Höppe 1999)が開発されている。近年、国際生気象学会が開発したユニバーサル熱気候指数(universal thermal climate index, UTCI) (Błażejczyk et al 2013)は、すべての気候・季節・時間に適用できる屋外の熱ストレス・熱環境の評価指標を目指し、最先端の人体熱モデルに基づき、12 種類の生理量を再現できるように開発された指標である。UTCI は広範な気象条件に適用可能であるが、もとの人体熱モデルのソースコードが公開されておらず、着衣量は気温の関数となって組み込まれてしまっているため、条件を変えた評価がおこないにくく、日本国内ではほとんど使用されていない(石井・渡邊 2021)。

5.2 熱中症リスクの予測

熱中症救急搬送数や死亡数を、WBGT あるいは気温・湿度・日射量など複数の変数で回帰させることによって、予測モデルを開発することが広くおこなわれてきた(たとえば布施ほか(2014))。こういった古典的な予測モデルを用いることで、熱中症リスクを予測可能である。

一方で、実際の人体の熱収支は性別や年齢によって異なるため、正確に予測するには環境因子に限らず多くのパラメーターを組み込む必要がある。また、熱中症の過半数は屋内で発生しているため、屋外の熱環境下における人体の熱収支を再現しても、正しく熱中症リスクを評価することはできない。

数値計算の高度化と相まって、近年は、高度な予測モデルも登場してきている。たとえば、天気情報に加えて暦情報や人口・高齢化率なども入力して機械学習で予測するモデル(Ogata et al 2021)や、個人のコア体温や発汗量の計算をもとに予測するモデル(Takada et al 2023)であり、後者は実際に名古屋市で運用されている。

6. 熱中症の対策

具体的な熱中症の対策については、環境省(2024)による各種のマニュアル・ガイドラインを参照されたい。ここでは、主な熱中症対策について、人体熱収支(図 1 参照)の観点から解説する。

6.1 環境温度の低減

気候変動やヒートアイランド現象を受けて気温が

上昇し、人体熱収支が悪化している。そこで、積極的な CO₂ 排出量の抑制やネガティブエミッションの導入、および人工被覆の自然被覆化が実施されれば、気温が低減し、人体熱収支を元に戻すことが期待できる。しかし、費用と時間を必要とするため、残念ながら即効的な熱中症対策となりえない。

一方で、屋内の環境温度は、エアコンにより低減可能である。環境温度を低減することで、人体からの顕熱輸送を増加させることが期待できる。社会的にも、実際にエアコンは暑熱関連死亡を減らしたと考えられており、日本では普及率が 30% から 80% に上昇したことで、暑熱関連死亡が 20.3% 減ったと推計されている (Sera et al 2020)。エアコンは睡眠困難の削減にも有効であり、エアコンの使用は実際に睡眠困難を減らしている (岡野ほか 2008)。

6.2 熱収支の各項目の制御

人体への放射を減少させるには、街路樹や日除け、屋内ではすだれや緑のカーテンを用いて、日射を遮るとよい。日中においては日射が熱の流入の多くを占めるため、効果的である。

人体からの潜熱輸送を増加させるには、風速の増大が有効である。扇風機や最近人気のハンディファンは、この仕組みを利用したものである。しかし、環境温度が皮膚温度 (33°C 程度) より高いと、人体からの顕熱輸送が負となってしまう、人体からの潜熱輸送の増加を打ち消して逆効果となる可能性がある。そのため、冷却機能が付いていない扇風機は、猛暑日には有効ではない。

夏の暑さに身体を馴らす暑熱馴化は、暑くなる前からの運動や入浴で達成できる。暑熱馴化できている場合は、血流量の増加がより効果的におこなわれ、皮膚温が上がる結果、人体からの顕熱輸送や放射が増大する。飲水や適切な服装も発汗量を減らさない点で有効である。

ただし、熱収支の観点からは、放射を除くと効果はそれほど大きくなく、過度な期待は禁物である。

7. おわりに

気候変動が人間健康に及ぼすメカニズム、および被害の実態と対策について概説した。

人体の熱収支が崩れ、体温調節機能で調節しきれない場合に、熱中症を始めとする直接的な影響が発生する。一方で、光化学オキシダントによる呼吸器

疾患、動物媒介性感染症、下痢や他の感染症、洪水、低栄養といった間接的な影響も引き起こされている。

世界では暑熱曝露に伴う心血管疾患や呼吸器疾患による死亡数が大きく、他の疾病と異なり公衆衛生の向上による削減があまり期待できない。日本国内でも同様に、熱疲労などによる循環不全による死亡が最も大きく、次いで熱中症であり、水害は 1 桁小さい。また、睡眠障害や疲労は死に至らないが、損失余命では無視できない被害をもたらしている。

人体熱収支を計算する代わりに温熱 6 要素からさまざまな温熱指標が開発されており、WBGT もその一つである。WBGT は「暑さ指数」として熱中症予防に用いられているが、一方で熱収支に即していないことも指摘されている。人体熱収支を模擬できる人体熱モデルに基づいた温熱指標も開発されているが、あまり利用されていない。救急搬送数や死亡数と WBGT などの関係を回帰することにより古典的な予測モデルが開発されてきたが、近年はより人体側のパラメーターを充実された機械学習に基づく予測モデルが開発され、実際に運用されている。

熱中症対策は人体の熱収支を改善することで、人体熱負荷の増大を防いでいる。しかし、屋外の日射遮蔽を除けば、効果は必ずしも大きくなく、エアコンを使用して環境温度を低減することが重要である。

今後の課題としては、社会における被害の実態把握や将来予測からの重点課題の抽出、より実用的な温熱指標やリスク予測モデルの開発、そして実効的な熱中症対策の開発と普及が挙げられる。

参考文献

- Belding HS, Hatch TF (1955): Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strain. *Heating, Piping and Air Conditioning*, 27, 129–136.
- Bouchama A, Knochel JP (2002): Heat stroke. *The New England Journal of Medicine*, 346, 1978–1988.
- Błażejczyk K, Jendritzky G, Bröde P, Fiala D, Havenith G, Epstein Y, Psikuta A, Kampmann B (2013): An introduction to the universal thermal climate index (UTCI). *Geographia Polonica*, 86(1), 5–10.
- Carlucci S, Pagliano L (2012): A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. *Energy and Buildings*, 53, 194–205.
- Fanger PO (1970): *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Copenhagen Danish Technical Press, Copenhagen.
- Gagge A, Stolwijk A, Nishi Y (1971): An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions*, 77, 247–257.
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, et al (2015): Mortality risk

- attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *Lancet*, 386, 369–375.
- Haskell EH, Palca JW, Walker JM, Berger RJ, Heller HC (1981): The effects of high and low ambient temperatures on human sleep stages. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 51(5), 494–501.
- Houghton FC, Yaglou CP (1923): Determining equal comfort lines. *Journal of American Society of Heat Ventilation Engineers*, 29, 165–176.
- Höppe P (1999): The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *Biometeorology*, 43, 71–75.
- Ihara T, Narumi D, Fukuda S, Kondo H, Genchi Y (2023): Loss of disability-adjusted life years due to heat-related sleep disturbance in the Japanese. *Sleep and Biological Rhythms*, 21, 69–84.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2021): Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022): *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Ogata S, Takegami M, Ozaki T, Nakashima T, Onozuka D, Murata S, Nakaoku Y, Suzuki K, Hagihara A, Noguchi T, Iihara K, Kitazume K, Morioka T, Yamazaki S, Yoshida T, Yamagata Y, Nishimura, K (2021): Heatstroke predictions by machine learning, weather information, and an all-population registry for 12-hour heatstroke alerts. *Nature communications*, 12(1), 4575.
- Pickup J, de Dear R (1999): An outdoor thermal comfort index (OUT SET*) : Part I — The model and its assumptions. *Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology and International Conference on Urban Climatology*, 279–283.
- Refinetti R, Menaker M (1992): The circadian rhythm of body temperature. *Physiology & Behavior*, 51(3), 613–637.
- Sera F, Hashizume M, Honda Y, Lavigne E, Schwartz J, Zanobetti A, Tobias A, Iñiguez C, Vicedo-Cabrera AM, Blangiardo M, Armstrong B, Gasparrini A (2020): Air conditioning and heat-related mortality: a multi-country longitudinal study. *Epidemiology*, 31(6), 779–787.
- Shahriyari HA, Nikmanesh Y, Jalali S, Tahery N, Zhiani Fard A, Hatamzadeh N, Zarea K, Cheraghi M, Mohammadi MJ (2021) : Air pollution and human health risks: mechanisms and clinical manifestations of cardiovascular and respiratory diseases. *Toxin Reviews*, 41(2), 606–617.
- Siple PA, Passel CF (1945): Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 89, 177–199.
- Takada A, Kodera S, Suzuki K, Nemoto M, Egawa R, Takizawa H, Hirata A (2023): Estimation of the number of heat illness patients in eight metropolitan prefectures of Japan: Correlation with ambient temperature and computed thermophysiological responses. *Frontiers in Public Health*, 11, 1061135.
- Thom EC (1959): The discomfort index. *Weatherwise*, 12(2), 57–60.
- Yaglou CP, Minard D (1957): Control of heat casualties at military training centers. *AMA Archives of Industrial Health*, 16, 302–316.
- Yoshikado H (2023): Correlation between air temperature and surface ozone in their extreme ranges in the greater Tokyo region. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 17, 9.
- Winslow CEA, Herrington LP, Gagge AP (1937): Physiological reactions and sensations of pleasantness under varying atmospheric conditions. *ASHVE Transactions*, 44, 179–196.
- World Health Organization (WHO) (2014): Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s.
- 石井仁, 渡邊慎一(2021): UCI の開発過程と特徴. 日本生気象学会雑誌, 57(4), 107–115.
- 井原智彦, 日下博幸, 原政之, 松橋隆治, 吉田好邦(2011): 問題比較型影響評価手法を用いた都市気温上昇に伴う軽度の健康影響の推定. 日本建築学会環境系論文集, 76(662), 459–467.
- 岡野泰久, 井原智彦, 玄地裕(2008): インターネット調査を用いた夜間のヒートアイランド現象による睡眠障害の影響評価. 日本ヒートアイランド学会論文集, 3, 22–33.
- 環境省(2022): 熱中症環境保健マニュアル 2022. https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php
- 環境省(2024): 熱中症予防情報サイト 普及啓発資料のダウンロード. https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_pr.php
- 環境情報科学センター(2009): ヒートアイランド対策の環境影響等に関する調査業務報告書, 環境省. <https://www.env.go.jp/air/report/h21-06/01.pdf>
- 厚生労働省(2023): 熱中症による死亡数 人口動態統計(確定数) より. https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyuu/nec_chusho22/index.html
- 国土交通省(2023): 令和3年水害統計調査.
- 総務省消防庁(2024): 救急搬送状況. <https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/post3.html>
- 地球温暖化と感染症に係る影響に関する懇談会(2007): 地球温暖化と感染症—いま、何が分かっているのか?. 環境省.
- 中井誠一(2019): 我が国における熱中症の死亡統計 —どのような統計分類を使用すべきか?—. 日本生気象学会雑誌, 56(2), 67–75.
- 鳴海大典, 井原智彦, 福田早苗, 下田吉之(2019): 都市における屋外気温変化が多種の疾患に与える影響の総合評価. 日本建築学会環境系論文集, 84(756), 205–214.
- 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(5), 371–381.
- 布施明, 坂慎弥, 布施理美, 荒木尚, 金史英, 宮内雅人, 横田裕行(2014): 気象データから熱中症救急搬送者数を予測する. *日本救急医学会雑誌*, 25(10), 757–765.
- 本田靖, 高橋潔(2009): 熱ストレスの健康影響. *地球環境*, 14-2, 257–262.
- 持田徹, 佐古井智紀(2011): WBGT 指標の科学. 日本生気象学会雑誌, 48(4), 103–110.