

特集：気候変動による日常生活や健康への影響を考える

<総説>

気候変動による直接的健康リスク

—熱関連疾病・死亡—

本田靖^{1,2)}

¹⁾ 国立環境研究所気候変動適応センター

²⁾ 筑波大学

Direct health risks due to climate change:
Heat-related morbidity and mortality

HONDA Yasushi^{1,2)}

¹⁾ Center for Climate Change Adaptation, National Institute for Environmental Studies

²⁾ University of Tsukuba

抄録

気候変動の直接的健康リスクとしては、わが国のような先進国の場合、熱関連死亡がもっとも重要である。熱関連死亡とは、日別の死亡リスクが最低となる気温（=至適気温）を基準として、それより高気温になった場合の増分として定義され、死因分類としては循環器疾患や呼吸器疾患が多く、熱中症の占める割合は1%に満たない。最近では、ある日の高気温の影響が翌日以降に及ぼすラグ効果も考慮に入れた累積効果を評価するようになっている。気温以外の気象要因として、湿度なども考えられるが、その影響は気温に比べて小さい。同程度の高気温であっても、リスクは夏期の前半に比べて後半で小さくなることも確かめられている。連続した高気温である熱波の影響は、おおむねそれぞれの高気温の超過死亡の合計であり、連続することによる追加の影響は小さい。脆弱集団としては、小児および高齢者が挙げられる。ただし、死亡数で評価した場合には高齢者への影響がはるかに大きい。

適応策としては、適切なエアコンの使用と飲水につきるが、高齢化の進むわが国では、認知症、要介護の問題もあり、地域の実情に合わせた対応が必要である。更に、2019年末からパンデミックに発展したCOVID-19の影響により、適応策に新たな難題が加わった。

キーワード：熱関連死亡、至適気温、暑熱馴化、適応策、飲水、エアコン

Abstract

The most important direct health risk due to climate change in Japan, one of the developed countries, is heat-related mortality. "Heat-related mortality" is defined in the following manner. There exists a temperature at which the daily mortality risk is at its lowest. This temperature is referred to as the "optimum temperature" or "minimum mortality temperature." When the daily temperature exceeds the optimum temperature, mortality increases. This added mortality is called heat-related excess mortality, or simply

連絡先：本田靖
〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506, Japan.
Tel: 029-850-2438
E-mail: honda.yasushi.fn@u.tsukuba.ac.jp
[令和2年10月13日受理]

heat-related mortality. In terms of causes of death, heat-related mortality includes circulatory diseases and respiratory diseases, while heatstroke is responsible for less than 1% of heat-related deaths. Heat-related mortality has the following features: 1) the risk in earlier summer is higher than that in later summer; 2) the contribution due to other weather variables, such as humidity and wind speed is small; 3) vulnerable populations include children and the elderly; and, 4) the optimum temperature is lower in colder areas than in warmer areas. For adaptation measures, the appropriate use of air-conditioners and drinking water are the two most important items. Due to both population aging and COVID-19, it is becoming more difficult to adapt to hotter summers, and measures that are tailored for individual municipalities are necessary.

keywords: heat-related mortality, optimum temperature (minimum mortality temperature), acclimatization, adaptation measures, hydration, air-conditioner

(accepted for publication, October 13, 2020)

I. はじめに

気候変動の影響は、気温の上昇のみにとどまらない。湿潤な熱帯域では極端な降水がより強くより頻繁になるし、二酸化炭素の溶解で海洋の酸性化も進む[1]。その結果は広範なセクタに影響を及ぼし、それらが健康リスクも高めていくと考えられている。地球規模で考えると、WHOの報告書[2]にあるように、農業生産の低下から低栄養による死亡の増加、気温・降水量の変化によるマラリア、下痢性疾患などによる死亡の増加など、主に小児が大きな影響を受ける。一方、その報告書によれば、わが国を含む先進国においては、それらによる影響は小さく、熱関連死亡（65歳以上）の影響が大きい。気象災害もわが国の懸念材料ではあるが、気象学の発展に伴い、多くの気象災害は事前に対応が可能で、近年では災害による経済的な被害は大きいものの、死傷者数は大きくない。その意味から、わが国では健康リスクとしては熱関連死亡の影響がもっとも大きいと考えられる。この論文では、その熱関連死亡を中心に、熱による直接的な健康リスクについて述べる。

II. 熱関連死亡

高気温の短期的な影響を観察するために、日別の気温と死亡との関連を散布図として描き、平滑化スプライン関数を用いてその回帰曲線を追加したものが図1である。ここでは総死亡数を用いていて、28℃あたりで死亡数が最低になっている。この気温を至適気温あるいはminimum mortality temperature (=MMT) と呼び、MMTを境に気温が高いほど死亡数も高くなっている。このMMTを超えた際の、MMTでの死亡数を超えた部分を熱関連超過死亡あるいは簡単に熱関連死亡と呼ぶ。我々が1995年の論文[3]で示したように、熱関連死亡の多くは循環器疾患や呼吸器疾患であり、熱中症（国際疾病分類では「過度の高温」）は1%にも満たないため、暑熱の短期影響評価は、熱中症のみで行ってはならない。

このことは温熱生理学の観点からも説明可能である。暑熱曝露により、まずは血液分布を皮膚に近い血管に移

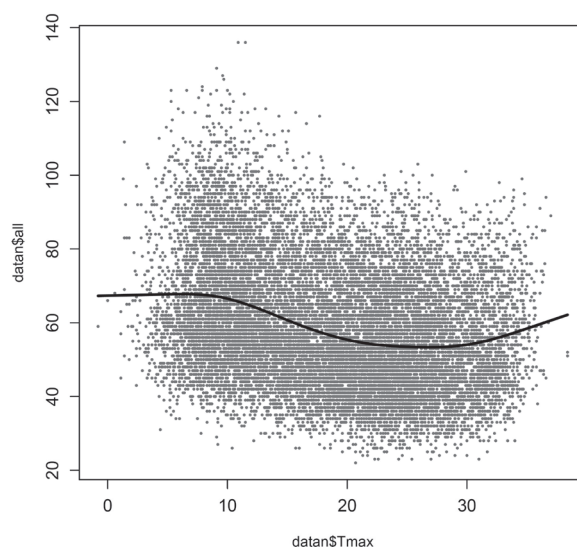


図1 日最高気温と総死亡数との関連（茨城県，1972年～2015年）

動させ、発汗とともに熱の放散を図ることで主要臓器の温度上昇を防ぐ。さらに曝露が続くと、主要臓器の温度が上昇して機能不全となり、最終的には播種性血管内凝固など重篤な状態となって死に至る。そこに至る死亡であれば熱中症による死亡となる。しかし、熱の影響としては軽微～中等症であっても、循環系や呼吸系に異常があれば、血液の分布変化と発汗による有効循環血液量の低下で致命的な転帰をとることが考えられる。その場合には、通常原疾患である循環系や呼吸系の疾病による死亡として報告される。

熱関連死亡に関しては、上記のようにもともと循環系や呼吸系に疾病をもつ人が多く死亡することもあり、本来数日後には死亡するような重症の人が暑熱曝露によって数日早く死亡するだけ（mortality displacementと呼ばれる）ではないか、という批判がなされていた。また、ある日の高気温の影響が、その日のみでなく何日か影響を及ぼし続ける、すなわちラグをもって作用することも考えられた。これらのことを評価するため、distributed lag non-linear model (=dlnm)が開発された[4]。このモ

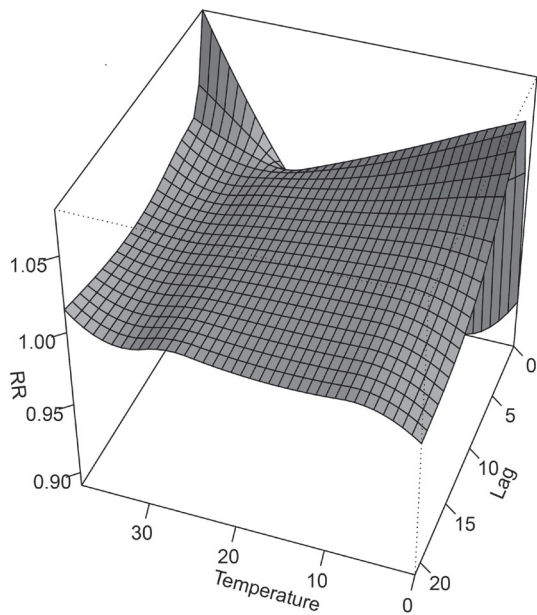


図2 日最高気温とその持ち越し効果のリスク(茨城県, 1972年~2015年)

注: Temperatureとしては日最高気温を用い, 持ち越し効果は21日までとした.

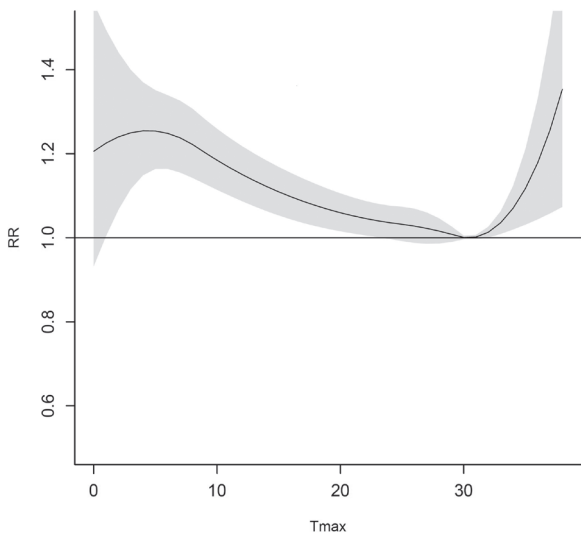


図3 持ち越し効果を累積した日最高気温のリスク(茨城県, 1972年~2015年)

デルでは, 図2のように死亡リスクを気温とそのラグの2次元平面上にプロットする, 3Dの図を描くことができる. さらに, 図3のように, ラグ方向にそれぞれの気温のリスクを累積したもので全体としての暑熱リスクを評価することができる. このモデルを用いることで, 暑熱の影響は主に3日程度続くことが明らかとなった[5]. また, 最近のArmsstrongらの研究によって[6], 暑熱の短期影響は数日のmortality displacementのみでなく, ほ

とんどの場合1年以上の生存期間短縮になっていることが明らかとなっている.

なお, 「熱波」という表現があり, これはある一定の高気温の日が複数続く場合を指す. 様々な定義が存在するが, いずれにしても, その影響は上記dlnmで得られる1日ごとの影響の合計でほとんど説明でき, 継続的な暑熱による追加的影響は非常に小さく, また4日以上継続する場合のみと結論づけられている[7]. このことから, 暑熱の影響の評価および将来予測においては, 熱波の追加的影響を含まないモデルで十分と考えられる.

気温以外の気象要因についても報告がある. 気温の影響に比べると, 湿度の影響は小さく, 高湿度がリスクを下げるようであった[8]が, さらなる研究を要するとの結論であった. 死亡の多くを占める高齢者は, 主に屋内で亡くなっているため, 風速や降水などが強い影響を及ぼすことは考えにくい. 以上から, 気温のみを指標とし, 他の気象要因を加えなかったとしても, 結論が大きく変わるような影響はないと考えて良さそうである.

なお, 上記の意味では, 熱関連の救急搬送についても, 熱中症のみでなく総搬送数による解析を行うことにも意味があると考えられるが, 簡単に入手できるデータは総務省消防庁の熱中症救急搬送報告に限られるため, ここでは必要に応じてそのデータを紹介する.

1. 脆弱集団

生理学的には, 小児は汗腺が未発達であるなど暑熱曝露に脆弱と考えられており, 屋外ではより暑い地表近くに全身があるため, 脆弱と考えられる. しかしながら, 通常は親や教員などの管理下にあるため, 早めに異常を発見されることが多く, 細胞内液量も多いことから, 熱中症の重症化はまれである.

それに対して, 高齢者は暑さに対する感受性が低いため熱中症に気づきにくく, 細胞内液量が少ないことから重症になりやすい. 熱関連死亡については, 相対リスクこそ小児でも高めになるが, 実数で見ると圧倒的に高齢者に多い[3].

2. 至適気温

至適気温は気候と関連する. 基本的には寒冷な地域では至適気温も低く, 温暖になるに従って至適気温も高くなる. ただし, 単純な平年の年平均気温と至適気温の関連をみると, 47都道府県で沖縄県のように冬季が非常に温暖な地域が外れてしまう[9]. その後の解析で, 中国, 台湾, 韓国, 欧米の都市を含めた解析では, 日最高気温の84パーセンタイル値がもっともよい推定値となることが明らかとなった[10]. 四季のある国々では, 概ね夏期の平均気温に近い値と考えられるので, 冬季の寒さに関係なく, 夏期の平均的な状況で至適気温が決まるようである.

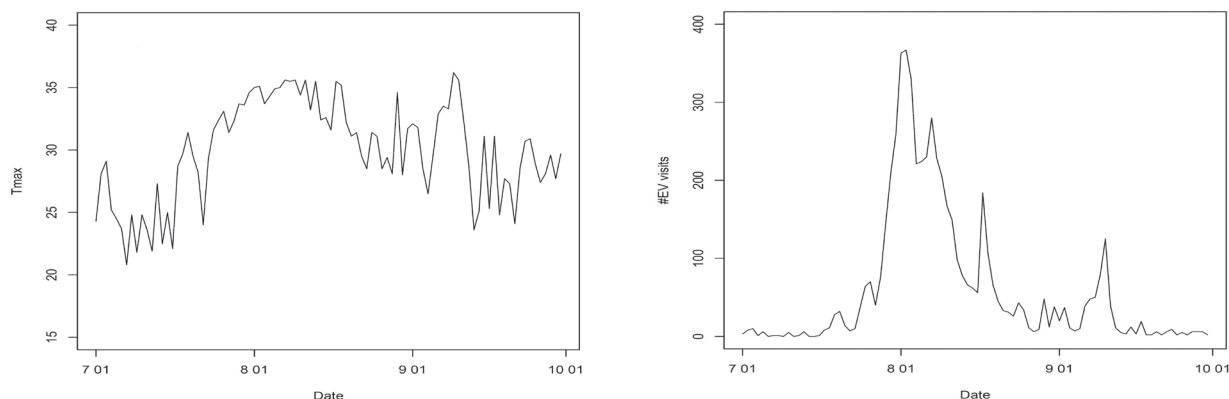


図4 東京における日最高気温と熱中症救急搬送数の経時変化 (2019年)

3. 暑熱馴化

Gasparriniらの9カ国、305カ所を対象とした研究では、図2のような関連について、夏期を前半と後半に分けて評価している。その結果、至適気温でのリスクに比べて気温の99パーセンタイル値のリスクが、前半の1.15-2.03に対して後半は0.97-1.41とリスクが小さくなることが報告されている[11]。このリスク低下は、主にラグが短くなることによっており、生理学的な暑熱馴化はもちろん関与するが、エアコンの使用などの行動変化なども関与するのではないかと考察がなされている。わが国の救急搬送数をみても、図4のように、同じ程度の気温でもリスクが低下していく様子が認められた。

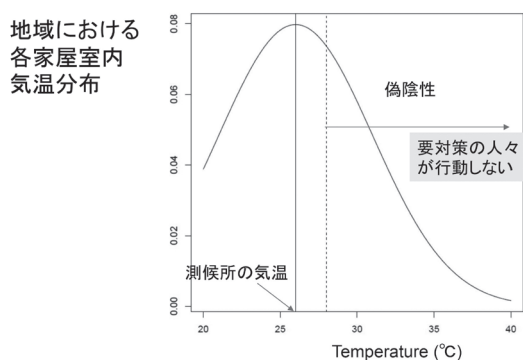
III. 適応策：熱関連死亡と熱中症

上記の影響評価では熱中症のみを観察すると過小評価になると述べたが、熱関連死亡も曝露は暑熱であり、予防策としては共通である。

熱中症対策の一つとして、熱中症警報・注意報がある。これは、天気予報の情報に基づき、例えば日本気象学会「日常生活における熱中症予防指針 Ver.3」[12]によれば、暑さ指数 (WBGT) が28°Cを超えたらすべての生活

活動で熱中症が発生する可能性があることをニュースなどで伝える。もちろん、これによる注意喚起で一定数の熱中症・熱関連死亡の減少は起きているものと考えられるものの、この方式にはいくつか問題がある。上に述べたように、至適気温は寒冷な地方ほど低いので、一律の指針ではなく、機構に応じた基準を設定する必要がある。さらに根本的な問題として、測候所での予報気温に対して、その測候所管内の各居住空間における気温は分布を持っている。図5に示す架空の例で説明する。測候所の予報気温を用いて、たとえば基準を28°Cとした場合に、a)のように予報が26°Cであれば警報を発令しないので、地域の家屋で室温が28°C以上の部分は対策をとるべきであるにとらないことになる。一方b)のように予報が33°Cであれば警報を発令するが、一部の家屋では対策が不要である。基準をどのレベルに設定しても、その地域の一部で偽陽性が起こり、発令しない場合には偽陰性が起こる。特に、偽陰性は、本来対策をとるべきであるにもかかわらず対策をとらないことになるため、深刻である。この問題を防ぐためには、別のアプローチが必要となる。我々は、医療機関にかかっていない集団において、1)夏期の間常に飲水を勧め、2)居住空間での気温に応じて基準を超えたらエアコンを使用することを勧め

a) 28°Cで要対策、測候所では26°C



b) 28°Cで要対策、測候所で33°C

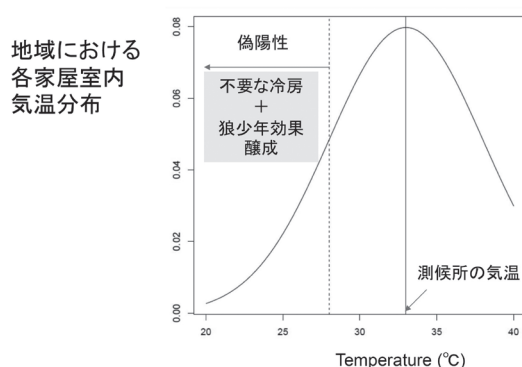


図5 熱中症警報の問題点

る、簡単なメッセージを送るというアプローチをとることを提案した。飲水によって水中毒や低ナトリウム血症が起こるには通常数リットルが必要であり、暑くない場合でも、コップで1,2杯程度の飲水であればまず問題ない。また、居室での気温に応じてエアコンを使用すれば、偽陽性・偽陰性の問題も起こらない。このアプローチの有効性を評価するため、我々は長崎県五島市において介入試験を行った。介入群Aは予報のみ配信し、介入群Bは上記の二つのメッセージとともにペットボトルの水を配送した。これら2群と対照群を65歳から84歳の住民から無作為に抽出して、効果を評価したところ、介入群A及び対照群と比較して、介入群Bにおいてエアコンの夜間使用時間及び水分補給の頻度が有意に増加していた [13]。このアプローチはある程度有効と考えられるが、地域においてはさらなる改善が必要である。人口高齢化が進み、要介護の人の割合、認知症の人の割合も増加しているため、そのような人々に対しては、単にメッセージを届けるだけでは不十分で、地域における取り組みによって、自分で飲水やエアコンの使用ができない人々への対応をとる必要がある。

IV. 新たな問題

2019年の台風15号は、甚大な被害を千葉県南部にもたらし、大規模停電が起こったことは記憶に新しい。この台風が続いて、関東地方では9月10日に高気温が観察された。我々の予備的な検討では、停電の被害がほとんどなかった東京都では熱中症搬送のリスクが例年とそれほど異ならなかったのに対して、千葉県では通常よりはるかに高いリスクが認められた。感染症研究所の超過死亡の報告中の補足資料6 [14]によると、2019年9月の大きな超過死亡が千葉県で認められており、被害が死亡にも及んでいたことが推測される。なお、この超過死亡報告は、予測死亡数に対して観測死亡数がどの程度多かったかを示すものであり、インフルエンザ流行のない2019年9月の超過死亡は、熱関連死亡を含む災害関連死亡によってもたらされたと考えられる。

2019年暮れから猛威をふるい始めたCOVID-19も問題をより困難にする。クールシェルターなどはよい施策と考えられるが、密集・密閉・密接を避けるためには、シェルターへの収容人数の密度を下げる、現在多くの割合を占める「換気のできない」エアコンから熱交換機能を備えた換気のできるエアコンへの移行を図る、椅子の間隔を広くするなど、新たな対策が必要となるものと考えられる。

参考文献

[1] Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor

M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM, eds.]. IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge(UK); Cambridge University Press: 2013.

[2] Hales S, Kovats S, Lloyd S, Campbell-Lendrum D, ed. Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected Causes of Death, 2030s and 2050s. Geneva: World Health Organization; 2014.

[3] 本田靖, 小野雅司, 佐々木明彦, 内山巖雄. 九州における日最高気温と死亡の関係. 日本公衆衛生学会誌. 1955;42(4):260-268.
Honda Y, Ono M, Sasaki A, Uchiyama I. [Relationship between daily high temperature and mortality in Kyushu, Japan.] Japanese Journal of Public Health. 1955;42(4):260-268. (in Japanese)

[4] Armstrong B. Models for the relationship between ambient temperature and daily mortality. *Epidemiology*. 2006;17(6):624-631.

[5] Gasparrini A, Armstrong B. Time series analysis on the health effects of temperature: Advancements and limitations. *Environment Research*. 2010;110:633-638.

[6] Armstrong B, Bell ML, de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M, Guo YL, Guo Y, Goodman P, et al. Longer-term impact of high and low temperature on mortality: An international study to clarify length of mortality displacement. *Environment Health Perspectives*. 2017;125(10):107009.

[7] Gasparrini A, Armstrong B. The impact of heat waves on mortality. *Epidemiology*. 2011;22(1):68-73.

[8] Armstrong B, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Abrutzky R, Astrom DO, Bell ML, et al. The role of humidity in associations of high temperature with mortality: a multicountry multicity study. *Environmental Health Perspectives*. 2019;127(9):097007.

[9] Honda Y, Kabuto M, Ono M, Uchiyama I. Determination of optimum daily maximum temperature using climate data. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2007;12(5):209-216.

[10] Honda Y, Kondo M, McGregor G, Kim H, Guo YL, Hijioka Y et al. Heat-related mortality risk model for climate change impact projection. *Environmental Health and Preventive Medicine*. 2014;19(1):56-63.

[11] Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M, Lavigne E, Tobias A, Zanobetti A et al. Changes in susceptibility to heat during the summer: A multicountry analysis. *American Journal of Epidemiology*. 2016;11:1027-1036.

[12] 日本生気象学会. 日常生活における熱中症予防指針 Ver.3. 2013. <http://seikishou.jp/content/files/news/shishin.pdf> (accessed 2020-10-10)
Japanese Society Biometeorology. [Nichijo seikatsu ni okeru necchusho yobo shishin Ver.3. 2013.] <http://>

- seikishou.jp/content/files/news/shishin.pdf (in Japanese)(accessed 2020-10-10)
- [13] Takahashi N, Nakao R, Ueda K, Ono M, Kondo M, Honda Y, et al. Community trial on heat related-illness prevention behaviors and knowledge for the elderly. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015;12:3188-3214.
- [14] 国立感染症研究所感染症学研究センター. わが国における超過死亡の推定—2020年9月. <https://www.niid.go.jp/niid/ja/from-idsc/493-guidelines/9887-excess-mortality-20sep.html#table1> (accessed 2020-10-10)
- niid.go.jp/niid/ja/from-idsc/493-guidelines/9887-excess-mortality-20sep.html#table1 (accessed 2020-10-10)
- Infectious Disease Surveillance Center, National Institute of Infectious Diseases. [Wagakuni ni okeru chokashibo no suitei -2020.9-.] <https://www.niid.go.jp/niid/ja/from-idsc/493-guidelines/9887-excess-mortality-20sep.html#table1> (in Japanese) (accessed 2020-10-10)