

熱関連死亡の評価と将来予測

本田 靖*

Evaluation and projection of heat-related mortality

HONDA Yasushi*

Abstract

As one of the health impacts of climate change, heat-related mortality has been studied extensively. Here, I overviewed how it was evaluated over the years and how it was applied to the future projection. We first evaluated the situation in Kyushu, and confirmed that the relation between ambient temperature and mortality shows V-shaped relation, i.e., the mortality is lowest at a certain temperature (minimum mortality temperature = MMT) and it becomes higher as the temperature becomes either colder or warmer. The definition of heat-related mortality is defined as an excess mortality (mortality difference between the mortality at MMT and that at a certain temperature) beyond MMT. We found that the MMT can be estimated using 84th percentile of the temperature distribution, and used this finding for future global projection of heat-related mortality in the Report by World Health Organization. With our international collaboration, we have elucidated some characteristics of heat-related mortality. The examples are as follows: The heat-related mortality can be seen in tropical countries such as Vietnam and the Philippines; the heat-related mortality risk is higher during early summer compared with late summer; MMT has been rising over some decades along with the global warming, heat-related deaths can be regarded as year-long life shortening.

Key words: Climate change, Heat-related mortality, Projection

はじめに

本来であれば、特定の研究課題に関して、データベースを駆使した系統的な総説を準備することで、広い読者に有益な情報が届けられるということは理解している。しかし、環境疫学分野で熱関連死亡の現状および将来予測に関する研究を行った一研究者がたどった変遷をまとめておくのも、それなりに意義があるものと考え、以下にこれまでの研究の概要と今後の課題についてまとめる。

熱関連超過死亡の現在とその将来予測

既に世界的には遅くとも 1990 年代に日別の気象要因と死亡との関連が疫学的な手法によって解析されていた [1]。しかし、その頃、日本においては疫学的な手法を用いた日別の気温と死亡との関

連は報告されていなかったもので、九州のデータを用いた解析の結果を報告した [2]。この論文では、まだ気温を連続変数として扱わず、区分に分けて解析していたが、日最高気温が 28℃ -33℃ の場合に死亡率が最低となり、33℃ 以上では超過死亡が起こることを明らかにした。すなわち、気温を横軸に、死亡率を縦軸にとって関連をみると、Kunst らの報告同様、V 字型を示すことが示された。なお、この死亡率が最低となる気温を「至適気温」、あるいは "minimum mortality temperature (= MMT)" と呼ぶ。死因別に見ると、循環器疾患と呼吸器疾患で V 字型が認められ、悪性新生物では認められないこと、熱中症を死因とする死亡は、33℃ 以上の区分でも死亡数の 1% に満たないこと、脆弱集団が高齢者であること、死亡率そのものは低いものの、小学生など

* 筑波大学体育系
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

若年者でも 33℃では死亡率が上昇していることを指摘していた。死因に熱中症が少ないことは注目し値する。温暖化の進行によって熱関連の死亡数が増加することが考えられるが、熱中症死亡のみを観察するようなことがあってはならない。逆に、共同研究の中から明らかになった自殺の研究から、自殺も気温と関係していることが明らかとなった [3]。このように、一見気温と関係なさそうな死因でも関連することがあることを考えると、熱関連超過死亡を評価するためには総死亡数を用いるべきであることがわかる。なお、いくつかの研究では、事故などの外因を除いた non-accidental deaths を用いている。自殺も熱中症も non-accidental deaths には含まれないので、その意味からは問題であるが、上記のように熱関連超過死亡を発生させる死因としては循環器疾患と呼吸器疾患が大半を占めるので、実際の解析では総死亡を用いた場合と大きな差はないことが多い。

1990 年代半ばまで、気候変動を念頭に、気温の上昇によって熱関連死亡がどう変化していくのかを考えようという論文はなかったが、日本のように南北に長い国で、寒冷な地域と温暖な地域を比較することで、将来の影響についての考察が可能になるのではないかと考え、日本全体を用いた気候と熱関連死亡の解析を開始した。その結果、至適気温に着目すると、図 1 に見られるように、北海道のような寒冷地域では至適気温が低く、温暖になるにしたがって至適気温が高くなっていくという、水平シフトをおこすことを見いだした [4]。2002 年には Curriero も、米国のデータで同様の傾向を報告し [5]、このような傾向が、少なくとも中高緯度地域では認められることがうかがわれた。ただし、気

候の指標でうまく至適気温を推定する方法は見つかっていなかった。たとえば、長期の平均気温はよい指標のように考えられるが、沖縄県は長期の平均気温が非常に高いのに対して、夏季の気温はそれほど高くないため、長期の平均気温を用いた推定値は実際の至適気温よりもかなり高くなってしまう。さまざまな指標を検討し、2007 年、ついに日最高気温を用いた場合の至適気温は、その地域の日最高気温分布における 80～85 パーセンタイル値によって推定できることを見いだした [6]。このことが評価され、世界保健機関 (= WHO) が進めていた気候変動の健康影響評価プロジェクトに加わることであり、さらに研究を進めていった。

気候変動によって気温分布が高温側にシフトする場合、暑い日は増加するために暑さの影響は大きくなる一方、寒冷の影響は小さくなるのではないかとすることも考えられる。全体として気候変動が健康に有利なのか不利なのかということも、気候変動影響の研究者们の間で高い関心をもたれている。この点に関しても我々は解析を進め、V 字型の左側、すなわち寒冷影響は、実は季節を制御することでほとんど消失してしまうことを見いだした (図 2)。この知見を含め、気温と死亡との関連を解析する上での問題点をまとめて 2009 年に発表した [7]。

一方で、国際的な共同研究も進み、ソウル大学の Ho Kim、台湾国立大学の Leon Guo 両教授とともに解析を進めていき、上記の 80-85 パーセンタイル値を用いる方法が韓国、台湾、中国でも成り立つことが明らかになり (図 3)、さらなる一般化に向け、共同研究 (Multi-Country Multi-City (MCC) Collaborative Research Network) を世界に広げることとなった。このころには既に気温を連続変数で扱

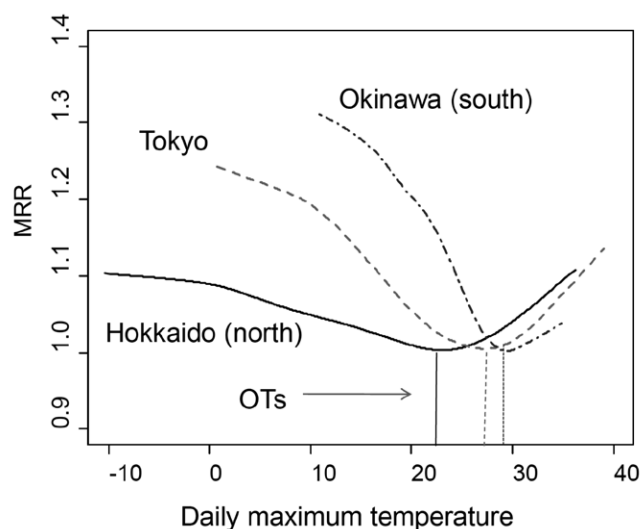


図 1 日最高気温と総死亡リスクとの関連 (沖縄県, 東京都, 北海道)。

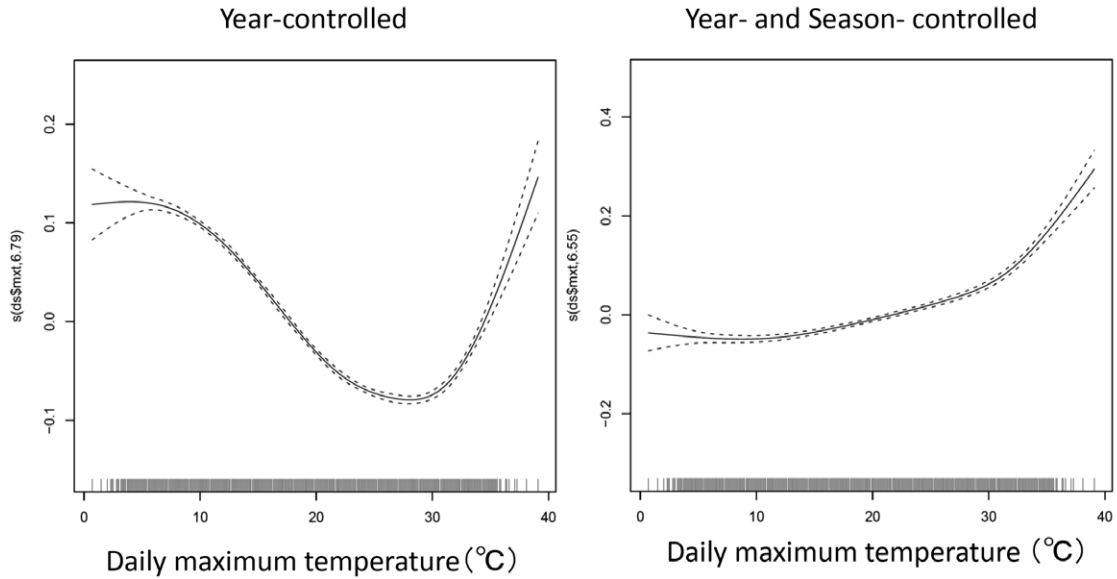


図2 日最高気温と総死亡リスクとの関連。
(左)：年次のみを制御；(右)：年次と季節を制御。

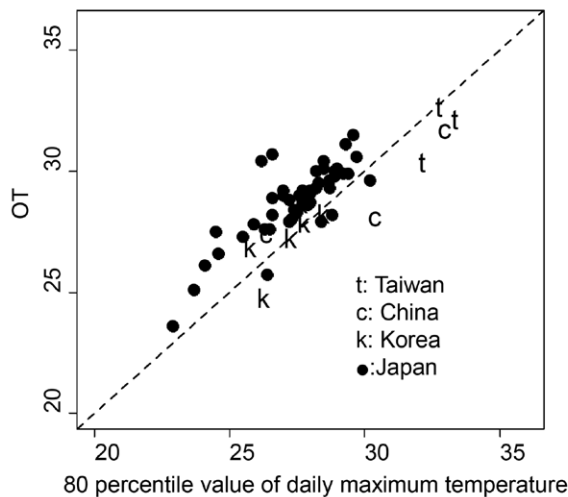


図3 各都道府県/都市の日最高気温 80 パーセンタイル値と至適気温の関連。
台湾は台北、台中、高雄、韓国はソウル、釜山、大邱、仁川、光州、大田、中国はハルビン、南京、広州の各市。

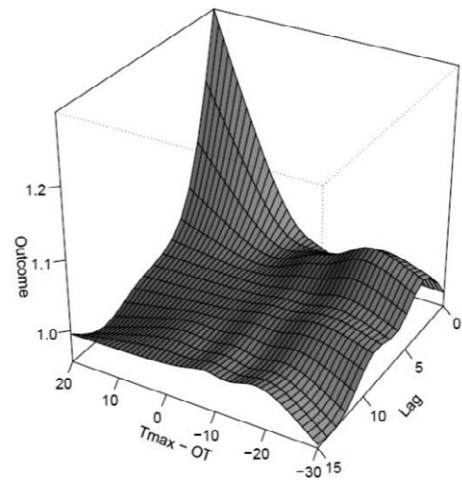


図4 Distributed lag non-linear model を用いた気温と死亡の関連の一例。
気温としては -30℃ から 20℃, lag として 0 から 15 日までをとりあげている。

い、ノンパラメトリック、あるいはセミパラメトリックな回帰曲線で関連を評価するようにはなっていた。また、暑さ寒さの影響は、その日のみに限らず、数日は影響が残る。そのタイムラグをも考慮に入れたモデル、distributed lag non-linear model (= dlrm) が、後に MCC Collaborative Research Network で共同研究を行うことになる Ben Armstrong 教授によって開発された [8]。このモデルは非常に柔軟であり、Armstrong の指導学生であった Antonio Gasparrini が統計解析環境 R のパッケージとして公表した [9] こともあり、爆発的に広がっていった (図 4 は dlrm の作画例)。

我々も、この dlrm を用いて、さらに米国、ヨーロッパなど対象の国を追加して検討をすすめ、結局脆弱な高齢者 (65 歳以上) を対象に検討した結果、84 パーセンタイル値で至適気温を推定できることが明らかとなった。図 5 はその例として米国の 20 都市における至適気温と 84 パーセンタイル値をそれぞれ 2 本の垂直線で示している。大きく乖離が見られたのは 1 都市のみであり、非常に単純な仮定としては十分評価できる推定方法と考えられたので、その仮説に基づいて表 1 のように将来の熱関連死亡を予測した [10]。

なお、この時点では、年較差が非常に小さい熱

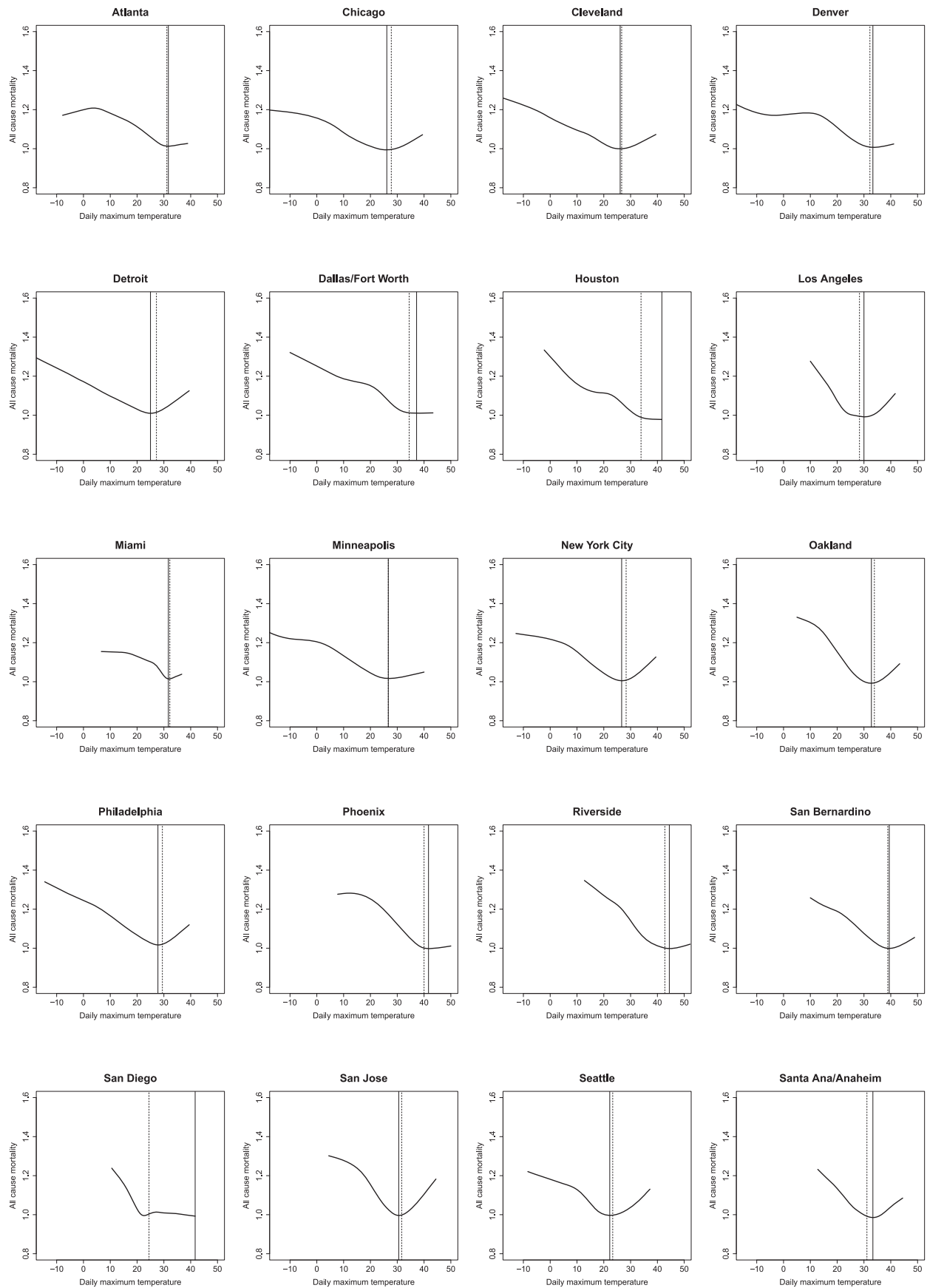


図5 米国20都市における日最高気温と65歳以上総死亡リスクとの関連。
縦の実線はリスク最低の気温、破線は84パーセントイル値を示す。

表 1 熱関連超過死亡の将来予測.

Region	2030					2050				
	Population ^a	Baseline	0 % ^b	50 % ^b	100 % ^b	Population ^a	Baseline	0 % ^b	50 % ^b	100 % ^b
AP_HI	177,053	2,427	4,802	3,635	2,598	162,307	2,528	6,866	4,395	2,588
As_C	9,529	611	1,458	975	598	103,588	947	3,797	2,024	854
As_E	1,428,481	5,343	18,423	11,053	5,837	1,332,115	7,050	36,739	18,612	7,184
As_S	2,033,885	10,692	26,666	18,022	11,296	2,284,943	17,429	65,562	37,524	18,489
As_SE	723,970	1,449	5,718	3,078	1,594	777,181	2,487	19,662	8,371	2,549
Au	32,982	119	370	230	125	37,063	156	837	424	174
Ca	48,633	2	195	75	2	49,792	3	553	261	3
Eu_C	115,732	988	3,123	1,955	1,090	107,099	1,058	5,396	2,998	1,417
Eu_E	195,411	1,708	6,350	3,647	1,860	178,872	1,732	10,471	4,845	1,721
Eu_W	441,260	3,570	6,214	4,722	3,485	446,713	4,425	13,367	8,334	4,677
LA_A	66,776	41	372	160	40	75,150	71	1,760	548	78
LA_C	287,206	700	2,181	1,239	711	318,626	1,226	7,364	3,363	1,249
LA_S	69,901	234	924	537	263	74,285	301	2,069	925	289
LA_T	229,162	364	2,050	1,066	432	233,166	563	6,546	2,545	694
NA_HI	401,536	2,408	7,394	4,704	2,702	446,749	2,953	15,441	7,877	3,235
NA_ME	584,318	1,596	4,780	2,977	1,683	681,137	3,209	15,331	7,940	3,302
Oc	14,113	4	47	14	3	18,172	8	195	68	7
SSA_C	152,539	201	918	482	221	212,327	438	4,007	1,645	485
SSA_E	574,918	858	3,686	1,923	857	848,878	1,679	14,734	6,060	1,776
SSA_S	81,752	156	539	319	165	87,940	246	1,737	798	300
SSA_W	543,556	775	2,491	1,486	785	809,872	1,578	9,468	4,465	1,679

^a In thousands. Based on United Nations 2010 revision, medium estimates^b 0, 50, and 100 % represent adaptation level

表 1 の地域名.

略記名	地域名
AP_HI	Asia Pacific, High Income
As_C	Asia, Central
As_E	Asia, East
As_S	Asia, South
As_SE	Asia, Southeast
Au	Australasia
Ca	Caribbean
Eu_C	Europe, Central
Eu_E	Europe, Eastern
Eu_W	Europe, Western
LA_A	Latin America, Andean
LA_C	Latin America, Central
LA_S	Latin America, Southern
LA_T	Latin America, Tropical
NA_HI	North America, High Income
NA_ME	North Africa/Middle East
Oc	Oceania
SSA_C	Sub-Saharan Africa, Central
SSA_E	Sub-Saharan Africa, East
SSA_S	Sub-Saharan Africa, Southern
SSA_W	Sub-Saharan Africa, West

帯地域での情報はなく、その点では不完全であったが、後日、筑波大学の博士課程で指導した Tran Ngoc Dang、Xerxes Seposo 両名により、ベトナムのホーチミン [11]、フィリピンのマニラ、セブ、ダバオ [12] でもやはり至適気温は存在することが報告された。至適気温のパーセンタイル値は低めであったものの、もともと年較差が小さいこともあり、84 パーセンタイル値で至適気温を推定することによる誤差は大きくないと考えられた。

この方法を応用した気候変動による熱関連死亡の将来予測は、他の死因の予測とともに WHO から報告された [13]。その結果の一例が図 6 である。全世界では低栄養、マラリア、下痢性疾患といった、小児が多くを占める死因による影響が大きいものの、それらは先進国での影響がほとんどないのに対して、熱関連死亡の影響は、先進国でも非常に大きい。このことから、気候変動の影響は途上国のみのものでないことが明らかである。なお、表 1 および WHO 報告書での予測にあたっては、適応も考慮した。適応に関しては、至適気温が同じでも同じレベルの暑熱に対するリスクが低下するタイプと、至適気温が高温側にずれるタイプと 2 種類が考えられるが、リスク低下に関しては、その時点で利用可能なモデルが存在しなかったため、至適気温が高温側

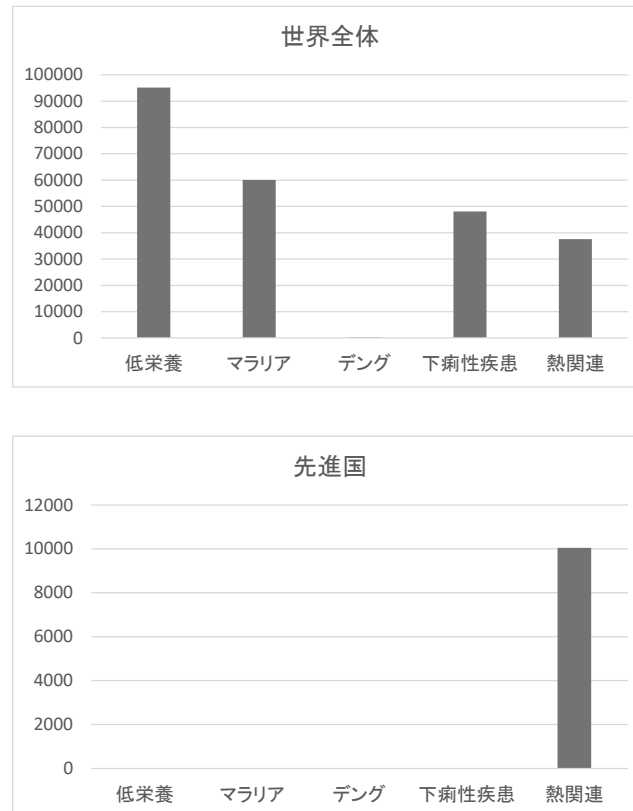


図6 気候変動による死亡影響 (2030年, SRESA1b シナリオ)。

にずれるタイプのみを扱った。その際に、至適気温が現在の 84 パーセンタイル値のままである場合に適応なし (0%適応)、2030 年なら 2030 年の 84 パーセンタイル値の場合にはタイムラグなくその気温分布に適応していると言うことで 100%適応、両者の中点を 50%適応とした。両タイプの適応に関する研究は、更に進められているが、リスク低下タイプに関しては国による相違も大きく、いまだに良いモデルは提案されていない。

共同研究の成果としても、上記 MCC Collaborative Research Network は、ここ数年間で、例えば以下のような多くの重要な研究成果を上げている。

(1) 日別に見た気温と死亡の関連 [14]

当時参加していたすべての国の、多くの都市・地域についての関連を統一的に評価した論文であり、国際環境疫学会の最優秀論文賞を受賞した。

(2) 初夏と晩夏の暑熱リスクの相違 [15]

経験的に納得できる結果であるが、多くの都市・地域での評価を行い、順化の進んでいない初夏で暑熱リスクが高く、晩夏にはリスクが低下することを示した。

(3) 日別の暑熱影響は単に数日間の生存時間短縮ではない [16]

日別の暑熱影響は高齢者に大きく、通常循環器疾患や呼吸器疾患を持つ人が犠牲になるため、数日後死亡するだろうという重篤な人が暑熱のために数日早く死ぬだけではないかという懸念があったが、この論文で、少なくとも年単位の生存時間短縮であろうということが明らかとなった。

(4) 浮遊粒子状物質の健康影響 [17]

大気汚染の短期影響は、これまでにも多く検討されてきたが、MCC の枠組みで統一的に評価を行った結果、広く注目を集め、New England Journal of Medicine の Notable Articles of 2019 の一つに選定された。

今後の展開

これまでの将来予測では、解像度がせいぜい 100km 四方であり、都市を考慮に入れた予測は不可能であった。上記ホーチミン市の解析においては、市の中心部と周辺部を分け、それぞれで熱関連超過死亡を評価し、図 7 のように暑熱リスクは中心部と周辺部ではほぼ同じという結果が得られた。これは世界で初めての報告であり、非常に重要な結果と考えられる。同様の研究が他の都市でも行われ

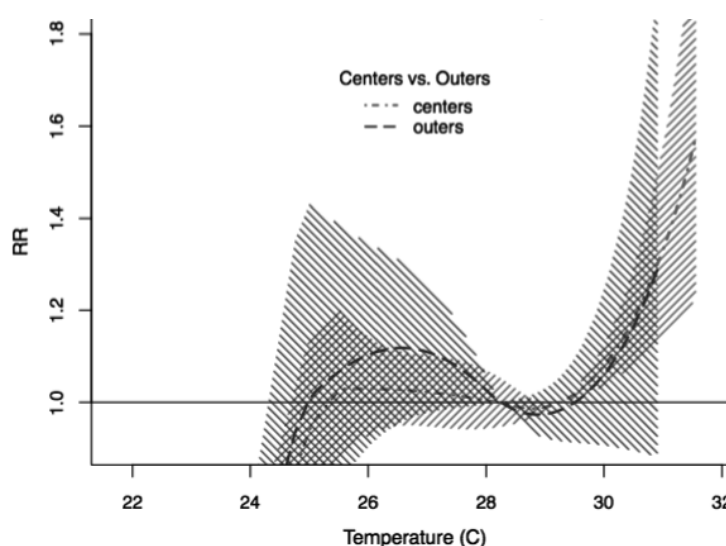


図7. ホーチミン市における気温と死亡リスクとの関連。
一点鎖線は中心部、破線は周辺部。

ば、ヒートアイランド現象の起こっている都市での気候変動影響の評価が可能となり、解像度の高いモデルを用いて、将来予測も行うことができるようになるものと考えられる。

現在、共同研究グループによって至適気温の地域差、経年変化に関する解析が進められており、近い将来それらに関する論文が発表できるものと考えている。

なお、今回は含めていなかったが、途上国などでの化石燃料の燃焼は、大気汚染の原因でもあるため、その使用量削減は温室効果ガス削減のみでなく、大気汚染の影響を小さくすることもできるという、「共便益」も、健康関連の分野では大きなテーマとなっており、その将来予測も今後大きな発展が見込まれている。

参考文献

1. Kunst, A.E., C.W.N. Looman, and J.P. Mackenbach, *Outdoor Air Temperature and Mortality in the Netherlands: A Time-Series Analysis*. Am J Epidemiol, 1993. 137(3): p. 331-341.
2. Honda, Y., et al., *Relationship between Daily High Temperature and Mortality in Kyushu, Japan*. Japanese Journal of Public Health, 1955. 2(4): p. 260-268.
3. Kim, Y., et al., *Suicide and Ambient Temperature: A Multi-Country Multi-City Study*. Environ Health Perspect, 2019. 127(11): p. 117007.
4. Honda, Y., et al., *Shift of the short-term temperature mortality relationship by a climate factor - some evidence necessary to take account of in estimating the health effect of global warming*. Journal of Risk Research, 1998. 1(3): p. 209-220.
5. Curriero, F.C., et al., *Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States*. Am J Epidemiol, 2002. 155(1): p. 80-7.
6. Honda, Y., et al., *Determination of optimum daily maximum temperature using climate data*. Environ Health Prev Med, 2007. 12(5): p. 209-16.
7. Honda, Y. and M. Ono, *Issues in health risk assessment of current and future heat extremes*. Glob Health Action, 2009. 2.
8. Armstrong, B., *Models for the relationship between ambient temperature and daily mortality*. Epidemiology, 2006. 17(6): p. 624-31.
9. Gasparrini, A., B. Armstrong, and M.G. Kenward, *Distributed lag non-linear models*. Stat Med, 2010. 29(21): p. 2224-34.
10. Honda, Y., et al., *Heat-related mortality risk model for climate change impact projection*. Environ Health Prev Med, 2014. 19(1): p. 56-63.
11. Dang, T.N., et al., *Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City*. Am J Public Health, 2018. 108(S2): p. S137-S143.
12. Seposo, X.T., T.N. Dang, and Y. Honda, *Effect modification in the temperature extremes by mortality subgroups among the tropical cities of the Philippines*. Glob Health Action, 2016. 9: p. 31500.
13. Honda, Y., et al., *Heat-related mortality, in Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and*

- 2050s, S. Hales, et al., Editors. 2014, World Health Organization. p. 17-24.
14. Gasparrini, A., et al., *Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study*. Lancet, 2015. 386(9991): p. 369-75.
 15. Gasparrini, A., et al., *Changes in Susceptibility to Heat During the Summer: A Multicountry Analysis*. Am J Epidemiol, 2016. 183(11): p. 1027-36.
 16. Armstrong, B., et al., *Longer-Term Impact of High and Low Temperature on Mortality: An International Study to Clarify Length of Mortality Displacement*. Environ Health Perspect, 2017. 125(10): p. 107009.
 17. Liu, C., et al., *Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities*. N Engl J Med, 2019. 381(8): p. 705-715.