熱ストレスの健康影響

Health effect of heat stress

本田　靖[1*]・高橋　潔[2]
Yasushi HONDA[1*] and Kiyoshi TAKAHASHI[2]

[1] 筑波大学大学院人間総合科学研究科、[2] 独立行政法人 国立環境研究所地球環境研究センター
[1]Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba
[2]Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

摘　　要

熱ストレスによる死亡率は、ある気温(至適気温)で最低となり、気温が至適気温よりも高くても低くても死亡率が高くなるというＶ字型の関連を示す。その至適気温は気候によって異なり、ある地域の至適気温を日最高気温で求めた場合、その地域の日最高気温の 85 パーセンタイル値近辺で推定できることが明らかとなった。この関連が亜寒帯から亜熱帯まで成り立つことから、全球に適用することで温暖化による影響の将来予測を行った。ただし、ここでは、将来に適応が起こらず、人口の規模・構造、年次死亡率・疾病構造が不変であり、唯一、世界各地の気候のみが、SRES-A1B 温室効果ガス排出量シナリオを想定した気候予測結果に沿って変化する、と仮定した。今後は、モデルの精緻化とともに、適応などの要因を考慮に入れた予測が必要である。

キーワード：至適気温、死亡率、将来予測、日最高気温、85 パーセンタイル値
Key words：optimum temperature, mortality rate, projection, daily maximum temperature, 85 percentile value

1. はじめに

高気温における障害は、臨床的に熱疲労、熱痙攣、熱射病に分類されている[1)]。熱疲労は、熱を体外に逃がすために皮膚血管が拡張し、また発汗するために有効循環血液量が減少して循環不全を起こしている状態である。熱痙攣は発汗によって失われた電解質のアンバランスにより、筋肉の興奮性が亢進することによって起こる。熱射病は体温上昇により、体温調節中枢が破綻し、体温が 40 ℃を越え、臓器障害を起こすものである[1)]。

通常、高温による死亡と言えば、上記のうちの熱射病が考えられる。しかし、循環系・呼吸系の疾病をもっている者、あるいは循環系・呼吸系の予備力の低下した高齢者の場合、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ことがある。

熱ストレスに対する脆弱性は、気温の高さなど熱ストレスの強度とともに、上記の感受性によっても決定されるため、場合によっては軽微な熱ストレスで死亡することもあり、このような場合には死因として原疾患の循環器疾患名などが報告される可能性が高い。

都道府県別など、集団を対象として日最高気温と死亡との関連を見ると、死亡率が最低となる気温、すなわち至適気温(optimum temperature = OT)が存在し、気温がそれより高くても低くても死亡率は高くなるというＶ字型を呈する[2)]。実は、熱中症を含む、「過度の高温」による死亡は日最高気温 33℃以上の区分に限っても１％未満と報告されており、このＶ字に主に貢献している死因は循環器疾患および呼吸器疾患である[2)]。

上に説明したように、循環器・呼吸器疾患は、熱ストレスの影響であっても、死因として報告されることは理解できる。しかし、直接には関連を考えにくい不慮の事故[2),3)]や自殺[4),5)]などでも気温と関連が見られる。このことから、高気温による影響をもらさず評価するには、通常臨床的に熱ストレスによると考えられている疾患のみでなく、むしろ総死亡を指標とすべきであると考えられる。

気候変化が起きた時の熱ストレスによる影響を評価するには、上記の総死亡と気温との関連を用いればよいと考えられるが、総死亡と気温の関連は、気候の影響も受ける。すなわち、暑さになれていると考えられる温暖な地域の OT は、そうでない寒冷な地域の OT よりも高い傾向をもつ[6)]。

こういった気候による相違を考慮しながら、途上国を含む地球温暖化が熱ストレス死亡に与える影響を予測するには、２つの方向の研究の融合が必要で

受付；2008 年 12 月 20 日，受理：2009 年 4 月 27 日
*　〒 305-8577　茨城県つくば市天王台 1-1-1 総合研究棟，e-mail：honda@taiku.tsukuba.ac.jp

ある。ひとつの方向は、統計資料が整備されていない途上国の予測のために、少ない変数で熱ストレスの影響を評価し、しかもその気候の影響のモデル化を進めるものである。もうひとつの方向は、いくつかのモデル都市において、気候のみならず所得レベルなど社会要因まで含めた多くの変数を用いて、単純なモデルでは決定できないリスクの細分化を行うものである。両者およびそれらの融合を図るための研究が相俟って、精度の高い予測が可能となる。

本稿は、我々の研究のうち、前者の単純なモデル作成を目的として気候との関連をモデル化したHonda *et al.*[7]の論文と、その論文をもとに、将来の地球温暖化によって、熱ストレスによる死亡がどのように変化するのかを推定したTakahashi *et al.*[8]の論文を中心に解説し、将来の展望を述べる。

2. 資料と方法

2.1 資料

日最高気温と死亡率との関連：気象データは気象庁の各測候所における普通気候観測日別資料、死亡データは1972～1995年までの人口動態統計死亡票（総承統158号）、人口データは総務庁統計局（当時）の国勢調査と人口推計資料を用いた。

全球の超過死亡推計：対象期間は「現在」として1991～2000年、将来として100年後の2091～2100年を設定した。メッシュの人口データはCIESIN *et al.*[9]を用いた。現在ならびに将来の気候データに関しては、CCSR/NIES/FRCGCモデル[10]による温暖化シミュレーション実験出力と、過去の月別観測気候値[11]を組み合わせて用いて、メッシュ毎の日最高気温分布を求めた。なお、利用した温暖化シミュレーション実験で想定している温暖化ガス排出シナリオはSRES-A1Bシナリオ[12]である。

2.2 方法

まず、気温と死亡の関連について、日最高気温をx軸、対応する日の総死亡率をy軸としてプロットし、自由度6の平滑化スプラインを用いて近似すると**図1**のようにV字型を形成する。このV字の死亡率が最低になる気温を、上述のように至適気温（OT）と呼ぶ。なお、途上国などでは、年齢階級別の死亡率も正確でないことが多いため、この解析においても年齢による層別は行わず、人口全体の総死亡率を用いた。

上記の作業を47都道府県について求めた。その際、都道府県の日最高気温は都道府県庁所在地のもので代表させた（埼玉県、滋賀県は県庁所在地に測候所がないため、それぞれ熊谷と彦根で代用した）。AMeDASを用いて市町村別のデータから再構成した場合と比較しても、それほど大きな相違がなかった[13]ことから、都道府県庁所在地で代表させることに大きな問題はないものと考えられる。

OTにおける死亡率は、気温のコントロールがもっともうまくいった場合の最適な気温と考えられるので、それ以上の気温によって、この最低死亡率よりも高い死亡率が引き起こされる部分を、熱ストレスによる超過死亡と呼ぶ（**図2**）。

超過死亡のうち、OTに近い気温ではそれほどリスクは高くないのに対し、OTから大きく離れた気温ではリスクが非常に高くなる。その状況を的確に評価するには、この部分の気温、特にOTよりも5℃以上高いような気温を記録する日数が不十分で、統計的に不安定である。たとえば、北海道や東京都ではOT＋5℃以上の日は約5%しかなく、沖縄県に至っては、データが返還後の1973年からではあるが、23年間で2日（0.02%）しかない。そのため、都道府県を総合して対処することとした。すなわち、OT以上の気温をOT＋5℃で2つに分けてリスクを以下のように推定した。県iの至適気温をOTi、その県における観察開始後第j日の最高気温をtijとしたとき、OTi＜tij≦OTi＋5となる日の平均死亡率を、OTiにおける死亡率で除したものをOTi＜tij＜OTi＋5における相対リスクとする。この相対リスクを47都道府県で平均して、弱い熱ストレスによる相対リスクとする。同様に、OTi＋5＜

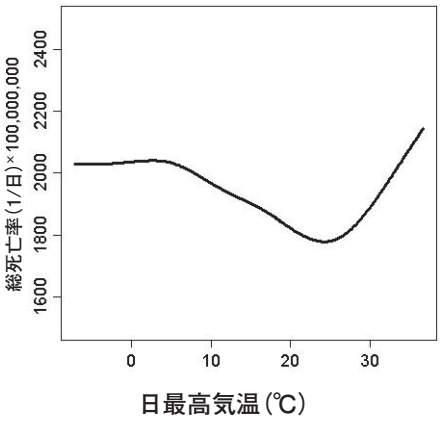

図1　日最高気温と死亡率の関連.
（青森県，1972～1995年）.

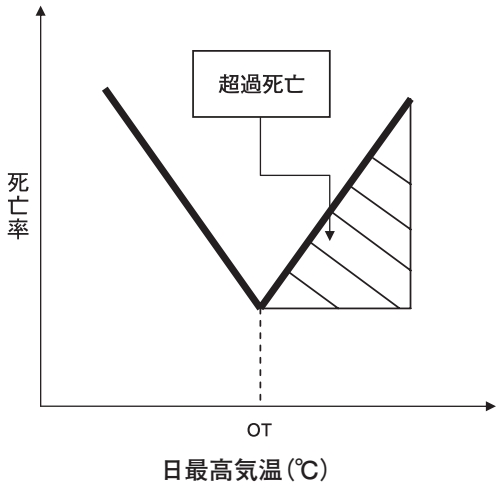

図2　超過死亡の模式図.

tij となる場合の平均相対リスクを求め、強い熱ストレスによる相対リスクとする。

次に、OT における死亡率であるが、途上国では得られる情報が年次別総死亡率のみであることも多い。よって、ここでは、47 都道府県における平均年次死亡率と OT での死亡率との比を求め、この比を用いて年次死亡率から OT における死亡率を推定する方法を用いた。

上記の 2 つの相対リスク、OT における死亡率、2 つの区分 OTi ＜ tij ≦ OTi ＋ 5 と OTi ＋ 5 ＜ tij に属する日数を用いて、1991 ～ 2000 年を現在、2091 ～ 2100 年を将来として、超過死亡を予測した。

将来推計にあたっては、以下の仮定をおいた。

(1) 適応は起こらない(すなわち、OT は現在の気候によって決定され、将来も変化しない)。

(2) 人口規模・構造および疾病構造・死因別死亡率は変わらない。

(3) 各メッシュの日最高気温は、SRES-A1B 温室効果ガス排出シナリオを想定した CCSR/NIES/FRCGC モデルによる温暖化実験出力を感度補正したものに従って変化する(感度補正は、CCSR/NIES/FRCGC モデルの気候感度が他気候モデルの平均に比べて高いことを考慮して実施した。補正手順については、Takahashi *et al.*[8] に詳述している)。

これらの仮定に関しては、考察において議論する。

3. 結果

図 3 に 47 都道府県の日最高気温 85 パーセンタイル値と OT の関連を示す。非常にきれいな相関関係が認められ、しかも 85 パーセンタイル値そのものが OT とほぼ同じ値になるよう分布している。日最高気温 85 パーセンタイル値とは、観察期間の全ての日最高気温測定値のうち、85%がその値以下となるような値のことである。逆に言うと、この気温よりも暑くなった日が観察期間の 15%存在した、ということになる。

この結果は、Honda *et al.*[7] において日最高気温、日平均気温、日最低気温それぞれのパーセンタイル値を網羅的に調べ、もっとも相関が高く、外れ値もないものを探索した結果、発見したものである。ただし、論文発表後、気温分布、死亡率双方の経時変化によって、V 字型の関連に偏りが生じることが明らかになった[14] ために、**図 3** は、年次を制御した死亡率を用いた場合の結果を示している。すなわち、期間全体の平均死亡率をそれぞれの年次の平均死亡率で除した係数を計算し、年次ごとの毎日の死亡率にその係数をかけることにより、各年次の平均が期間全体の平均と等しくなるようにした。

上記の日最高気温 85 パーセンタイル値と OT との関連を用い、あるメッシュの日最高気温 85 パーセンタイル値で OT を推定し、方法の項で述べた仮定・計算方法に従って、1991 ～ 2000 年、2091 ～ 2100 年における全球の超過死亡をメッシュ別に予測し、その変化率(将来の超過死亡／現在の超過死亡× 100 － 100(%))を求めたものが**図 4** である。

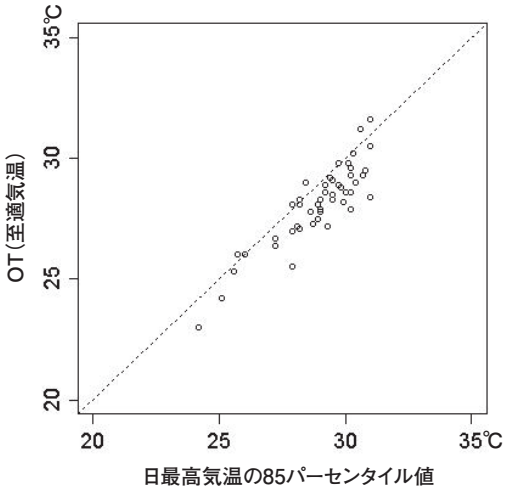

図 3　日最高気温 85 パーセンタイル値と至適気温との関連(日本, 1972 ～ 1995 年).

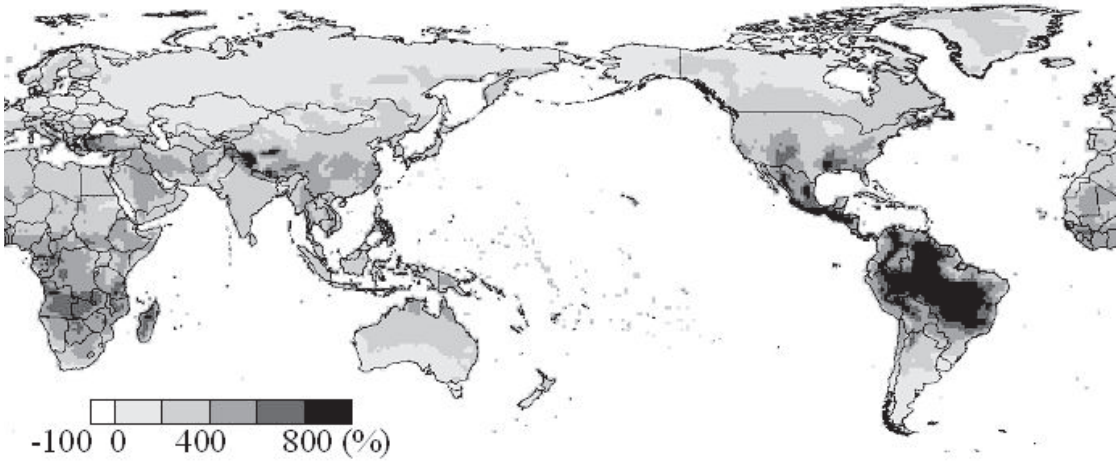

図 4　熱ストレスによる超過死亡の変化率(%).

熱ストレスの影響のみを評価しているので、当然ながら温暖化に伴って超過死亡はほとんどの地域で増加している。CCSR/NIES/FRCGC モデルによる温暖化実験で大きな気温上昇が予測されているチベット、メキシコ、南米北部、地中海周辺、アフリカ大陸南部では、超過死亡の変化率が 7 倍以上にもなると見積もられた。ちなみに、超過死亡の変化率 7 倍というのは、集団にもよるが、おおむね 1 日 20 本程度の喫煙による肺癌死亡率に近い値である。一方、北半球高緯度においては大きな気温上昇にもかかわらず、超過死亡の増加率は比較的小さい。概して、低緯度地域において超過死亡の増加率が大きい。これは、低緯度地域では OT が一般的に高いが、1 年を通じて寒暖の差が少なく温暖であるため、気温上昇した場合に、日最高気温が OT を上回る日数が著しく増加することによる。

4. 考察

OT からある程度離れた気温での死亡率が、OT の近傍での死亡率に比べて高くなることは、たとえばヨーロッパなどでも見られている[15]。その意味からは、たとえば日最高気温が 33℃の場合その熱ストレスによる超過死亡数は、OT が 30℃に近い九州などの県ではそれほど多くないのに対し、北海道、東北などでは相対的に多くなる。この点で、OT が低い地域は高い地域に比べて同じ程度の熱波でも大きな影響を受けることが考えられる。

また、ここでは示していないが、年齢別の解析を見ると（たとえば本田[2]，Fouillet *et al.*[16]）、熱ストレスに対して高齢者が圧倒的に脆弱であることがわかる。同様に、循環器疾患や呼吸器疾患をもっている場合も脆弱となる。

今回は人口構造が不変であることを仮定したが、人口が高齢化すれば、気候が一定でも脆弱性は高くなり、超過死亡が増加することが予想される。以上のことを考えると、熱波警報システムなどの適応策実行の場合に、高齢者、循環器疾患・呼吸器疾患罹患者には特に注意を向ける必要がある。

適応に関して、今回はまったく起こらないとの仮定で計算を行った。しかし、現在の状況で、気候の相違によって OT が異なり、OT が日最高気温 85 パーセンタイル値で推測できることから考えると、OT を温暖化が起こった時点での 85 パーセンタイル値で推測してやれば、100％適応（ただちに新しい気候に適応してしまう状態）といえよう。温暖化の速度によっても、どの程度適応できるかが異なると思われるので、今後は 100％適応から 0％適応（全く適応が起こらない状態）までの連続的な適応のうち、たとえば 25％、50％、75％適応した場合の超過死亡を計算することを考えている。

なお、人口規模・構造も疾病構造・死因別死亡率も不変という仮定で将来予測を行ったのは、気候がまったく変化せず、人口規模だけが変化しても影響の大きさは変化するため、温暖化の影響を評価するには他の要因を一定にした方がよいとの判断からである。もちろん、このようなアプローチ以外に、適応・緩和策といった政策決定のためには、人口規模など同時に変化する要因も含んだ総合的な評価も必要となる。

なお、今回は OT ＋ 5℃以上をひとつの区分として用いた。このことは、OT＋5.1℃でも OT＋10℃でも超過死亡は同じとみなすことを意味するが、36℃～ 37℃という体温レベルを越えると、人体からの熱放散ができなくなるため、それ以下の気温と超過死亡が同じということは考えにくい。また、区分を 2 つのみとしたことも単純すぎる嫌いがある。いずれにしても超過死亡は外挿によって推測することになるため、注意は必要であるが、より実態に即したモデルを開発する必要がある。

温暖化が進行すれば、熱ストレスによる超過死亡は当然増加するが、同時に寒冷ストレスによる超過死亡は減少することが考えられる。当然のことながら、寒冷ストレスによる超過死亡で相殺されるからといって熱ストレスによる超過死亡を放置して良いわけではなく、適応策をとるべきである。とはいえ、政策決定のための情報としては、温暖化の「正味の」影響を評価しておくことも意味がある。

いわゆる先進国における熱ストレスの影響は数日間しか続かないのに対し、寒冷ストレスによる影響、特に呼吸器疾患死亡に与える影響は、2 週間近くも持続するという報告があり[17]、また冬期にはインフルエンザによる超過死亡も起こる。ニュージーランドの研究者によるとオーストラリアやニュージーランドでインフルエンザが流行するのは現地の冬、つまり北半球の夏である[18]。このことから、寒い季節という意味では寒冷の影響がインフルエンザ流行に関与しているように考えられるものの、流行は必ずしも非常に寒い時期のみでない。わが国でも、北海道で起こる流行が鹿児島で起きないということはないので、温暖化によってインフルエンザの流行が小規模になるとは考えにくい。これらの要因を考慮に入れた上で、「正味」の影響を評価する必要がある。

今回の将来予測においては、OT が 85 パーセンタイル値で推測できるということがすべての地域で成り立つと仮定して全球の予測を行った。確かに、正確に 85 パーセンタイルではないにせよ、日本では亜寒帯の北海道でも成り立っているし、亜熱帯の台湾でもそれほど外れてはいない[19]。また、過去の文献を調べる限り[20]、ヨーロッパでも成り立つように見える。

論理的に考えると、冷房によって居住環境での気温は外気温よりも低くできるので、冷房が普及することによって熱ストレスの影響は消失するのではな

いかと考えられる。しかし、少なくとも冷房の普及が非常に進んでいる台湾の3都市ではやはりV字型が観察される[19]。また、最近の低中所得国に関する報告でも、Bangkok や Salvador といった熱帯地域で高気温による高死亡率が報告されている[21]。ただし、この報告では、寒冷側で死亡率が高くないという意味で、中緯度地域でも必ずしもV字型にはなっていない都市が存在する。上記のインフルエンザの影響などを含め、さらなる検討が必要である。

上記のことから、熱帯地方でも熱ストレスによる死亡は起こっており、適応策をとらない場合に、温暖化によって影響は拡大すると考えてもよさそうである。

最後に、ここではわが国で問題になると思われる温暖化の直接影響に関してのみ報告したが、世界的に見ると、低栄養、下痢性疾患、マラリアといった間接影響が大きな問題であり、東南アジア、アフリカといった発展途上国での影響が特に大きい[22]。国際的な視野に立てば、これらの問題に関する研究・適応策に資源を投入すべきであろうと考えられる。とはいえ、間接影響の評価は、社会経済文化的な要因を多く含み、また大きな影響を受けると考えられる途上国では資料が不足しているため、直接影響の評価・適応策実施に比べて多くの困難が伴う。

謝　辞

この研究は環境省地球環境研究総合推進費（S-4）「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合評価に関する研究」によって行われた。

引 用 文 献

1）山下 衛（2002）高温による障害. 高久文麿・尾形悦郎・黒川 清・矢崎義雄（監修），新臨床内科学，第8版，医学書院, 2013-2016.

2）本田 靖・小野雅司・佐々木昭彦・内山巌雄（1995）九州における日最高気温と死亡との関係．日本公衆衛生雑誌, 42, 260-268.

3）Ishigami, A., S. Hajat, R.S. Kovats, L. Bisanti, M. Rognoni, A. Russo and A. Paldy（2007）An ecological time-series study of heat-related mortality in three European cities. *Environ. Health*, 28, 5.

4）Page, L., S. Hajat and R.S. Kovats（2007）Relationship between daily suicide counts and temperature in England and Wales. *The British Journal of Psychiatry*, 191, 106-112.

5）Likhvar, V. N.（2009），博士論文，*Modelling* the temperature mortality *Relation in Japan*．筑波大学大学院人間総合科学研究科ヒューマン・ケア科学専攻.

6）Honda, Y., M. Ono, A. Sasaki and I. Uchiyama（1998）Shift of the short-term temperature-mortality relationship by a climate factor－some evidence necessary to take account in estimating the health effect of the global warming. *J. Risk Res.*, 1, 209-220.

7）Honda, Y., M. Kabuto, M. Ono and I. Uchiyama（2007）Determination of optimum daily maximum temperature using climate data. *Environ. Health Prev. Med.*, 12, 209-216.

8）Takahashi, K., Y. Honda and S. Emori（2007）Assessing mortality risk from heat stress due to global warming. *J. Risk Res.*, 10, 339-354.

9）CIESIN（Center for International Earth Science Information Network）, Columbia University, and CIAT（Centro Internacional de Agricultura Tropical）（2005）*Gridded Population of the World Version 3（GPWv3）: Population Density Grids.* SEDAC（Socioeconomic Data and Applications Center,Columbia University）. http://sedac.ciesin.columbia.edu/gpw（accessed 8 October 2005）

10）K-1 Model Developers（2004）*K-1 Coupled Model（MIROC）Description*: *K-1 Technical Report 1*. Center for Climate System Research, University of Tokyo, Japan.

11）Mitchell, T. D.（2004）An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids. http://www.cru.uea.ac.uk/,timm/grid/CRU_TS_2_1.html（accessed 29 August 2004）

12）IPCC（2000）*Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press.

13）本田 靖・原沢英夫（2001）地域気象観測システムを用いた気温－死亡モデルの再評価．平成11年度～12年度 科学研究費補助金（基盤研究（C）（1））研究成果報告書.

14）本田 靖・小野雅司・内山巌雄（2008）気温と死亡の関連に見られたパラドックス－死亡数と死亡率．日衛誌, 63, 351（第78回日本衛生学会総会講演集）.

15）Koppe, C., S. Kovats, G. Jendritzky and B. Menne（2004）Heat-waves: risks and responses. *Health and Global Environmental Change Series No.2*, World Health Organization.

16）Fouillet, A., G. Rey, F. Laurent, G. Pavillon, S. Bellec, C. Guihenneuc-Jouyaux, J. Clavel, E. Jougla and D. Hémon（2006）Excess mortality related to the August 2003 heat wave in France. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 80, 16-24.

17）Hajat, S., R.S. Kovats and K. Lachowycz（2007）Heat-related and cold-related deaths in England and Wales: Who is at risk? *Occup. Environ. Med.*, 64, 93-100.

18）Simonsen, L.（1999）The global impact of influenza on morbidity and mortality. *Vaccine.*, 17, S3-S10.

19) Honda, Y., V.N. Likhvar, Y. Wang and F. Sung (2008) *Do Taiwan Cities Show Similar Pattern to Japanese Data?: Temperature-mortality Relation and Its Relation to Climate*. 18th International Congress of Biometeorology.

20) Keatinge, W.R., G.C. Donaldson, C. Elvira, M. Martinelli, A.E. Kunst, J.P. Mackenbach, *et al.* (2000) Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. *BMJ,* 321, 670-673.

21) McMichael, A.J., P. Wilkinson, R.S. Kovats, S. Pattenden, S. Hajat, B. Armstrong, N. Vajanapoom, E.M. Niciu, H. Mahomed, C. Kingkeow, M. Kosnik, M.S. O'Neill, I. Romieu, M. Ramirez-Aguilar, M.L. Barreto, N. Gouveia and B. Nikiforov (2008) International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project. *Int. J. Epidemiol.*, 37, 1121-31.

22) Patz, J.A., D. Campbell-Lendrum, T. Holloway and J.A. Foley (2005) Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438, 310-317.

本田　靖

Yasushi HONDA

1955年岡山県日生町生まれ。博士(医学)。専門は環境疫学、疫学方法論。大学卒業後、2年間の内科研修を経て研究生活に入り、成人における死亡のモデリングなどを研究していたが、1987年からの米国留学を機に、疫学方法論、産業疫学の研究を開始した。帰国後、国立環境研究所において地球温暖化の健康影響評価の研究に従事することになり、今日に至る。本年度より、世界保健機関で行われている気候変化の疾病負荷推定のプロジェクトに参加し、熱関連死亡の計算を担当している。

高橋　潔

Kiyoshi TAKAHASHI

1973年山形県鶴岡市生まれ。博士(工学)。専門は、環境システム工学、地球環境モデリング。大学在学中より地球温暖化の影響対策に関する統合評価モデルの開発の研究プロジェクトに携わり、地理情報システムを活用した全球規模の農業・水資源分野の温暖化影響評価手法の開発を担当してきた。最近では、影響予測の不確実性の定量化およびその伝達に焦点を当てて影響評価手法の高度化に取り組むとともに、予期される悪影響を軽減するための適応策の評価についても重要な研究事項と認識している。