

地球温暖化に伴う熱関連死亡による被害額

高橋潔^{1*}・佐尾博志¹・本田靖²・藤森真一郎³・高倉潤也⁴

¹正会員 国立環境研究所社会環境システム研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

²非会員 筑波大学体育専門学群 (〒305-8574 つくば市天王台1-1-1)

³正会員 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8510 京都市西京区京都大学桂)

⁴非会員 国立環境研究所社会環境システム研究センター (〒305-8506 つくば市小野川16-2)

* E-mail: ktakaha@nies.go.jp

地球温暖化により異常高温の頻度・強度の世界的な増加が生じ、またその結果として暑熱に関連した死亡リスクも高まることが懸念されている。本研究では、世界初の試みとして、世界全域を対象地域とした既存の熱関連死亡数の推計手法と統計的生命価値を組み合わせて用いることで、気候および社会・経済の将来変化の不確実性幅を考慮したうえで、気候変動に伴う熱関連死亡リスクの増加について金銭的な見積もりを実施した。その結果、熱関連死亡による被害額のGDP比は、緩和策が進むRCP2.6排出シナリオの場合、世界全体で1%未満に抑えることが可能であること、一方で緩和策が進まないRCP8.5排出シナリオの場合、世界全体で見て今世紀末に2%台となることが示された。また、被害額増加の主因として、現在の途上国では経済発展に伴うVSLの増加の寄与が相対的に大きいこと、現在の先進国は逆に経済発展よりも気候変化の寄与が大きいことがわかった。

Key Words : *heat-related excess mortality, value of statistical life, RCP, SSP, climate impacts*

1. はじめに

近年、異常気象の影響による暑熱に関連した死亡が頻繁に報告されるようになった。例えば、2003年のヨーロッパの熱波や2007年の世界的猛暑等、異常高温によって多くの死者が発生した。気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書(SREX: Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation)によると、大気中の温室効果ガス濃度増加を含む人間活動の影響により、異常高温の頻度・強度は世界的に増加する¹⁾。また、世界保健機構(WHO: World Health Organization)によると、季節平均気温の上昇、熱波の頻度や強度の増加が要因となって、暑熱に関連した死亡リスクが高まる²⁾。現在考えられうる最も温暖化を抑制したシナリオでも気温上昇が産業革命以前比で1.5℃とされており、温暖化は避けられないことから、温室効果ガスの排出を削減する緩和策を行うことだけでなく、気候変動に伴う熱関連死亡リスク増加への対応をより強化していくことが今後求められる。

こういった暑熱リスクに対する適応策は適切な予報・

警報システムの確立、医療サービスの向上など様々な社会システム的な対応から、個人レベルでのこまめな水分摂取や空調設定の推奨など広範囲にわたると考えられる。こういった適応策を検討するにあたっては、将来いつ、どこでこのリスクが顕在化する可能性があるのか、またその規模はどの程度かといった情報があることが望ましいが、現在までのところそういった知識は限られており、気候変動に伴う熱関連死亡リスクの定量的把握の必要性は大きい。熱関連死亡リスクの把握にあたっては、外力(異常高温を含む極端現象の頻度・強度)の変化だけでなく、極端現象に曝される人間側の曝露(人口の分布)や脆弱性(極端現象への感度や対応能力)の変化についても併せて考慮することが必要になる。またそれらの因子の将来変化については、現時点では一点で正確に言い当てることはできないことから、不確実性幅を考慮した評価によって対処することになる。

気候変動に伴う極端現象変化の影響は、生物・物理的な指標で見積もられる場合もあれば、金銭的な指標で見積もられる場合もある。熱関連死亡についていえば、前者は、熱関連の理由での死者数、あるいは一人の人がある年に熱関連の理由で死亡する確率、などが具体的な

指標となる。後者の金銭的な指標には、その熱関連死亡を回避・軽減するための対策費用や、あるいは本来ならその死亡が無ければ受け取り得た所得、産み出し得た経済価値などが含まれる。相対的にみて熱関連死亡の発生の多い地域や、気候変動の結果としてその増加が著しい地域を見出す目的であれば、生物・物理的な指標での見積もりが有用である。一方で、緩和策・適応策の実施に要する費用との比較の目的には、さらにふみ込んで金銭的な指標での見積もりに取り組むことが求められる。

熱関連死亡リスクの評価については、WHO⁷⁾によると、従来、個々の都市や地域に限定した研究^{8) 9)}が多く行われているものの、世界全体を扱った研究は存在しなかったが、Honda et al.⁷⁾やWHO⁷⁾による超過死亡数の推計モデルの開発により、世界全体の熱関連の死亡者数の推計が可能となった。ここで超過死亡数とは、原因（本研究では暑熱）が取り除かれた場合に期待される死亡数と当該原因が存在する場合の死亡数の差を意味する。しかしながら、Honda et al.⁷⁾やWHO⁷⁾のモデルは、熱関連死亡者数の推計に留まっており、その被害の金銭換算は行われていない。（なお、気候変動に伴う世界規模での循環器・呼吸器系疾病変化の経済影響評価の事例は存在する^{8) 9)}。）

地域的に暑熱による死亡リスクの金銭評価を試みた研究では、大きく分けて2つの異なるアプローチが用いられている。一つ目のアプローチは、何からの政策によって評価対象の死亡リスクを低減する場合に発生する便益を算出する統計的生命価値（VSL: Value of Statistical Life）¹⁰⁾を用いるものであり、二つ目のアプローチは、熱ストレスによる健康影響・死亡により生ずる人的資本の損失や労働生産性の低下を考慮したうえで経済モデルを用いてGDP・消費・厚生損失などを見積もるものである。前者の手法は、調査手法の性質上、熱関連死亡による非市場的な価値（例：生命そのものの価値）の損失も評価対象に含みうる点で比較的包括性が高い。後者の手法は、市場価値（人的資本損失や労働力低下による生産活動への影響）のみを扱うことになるが、熱関連死亡に関しては、その多くは65歳以上の高齢者であり、もとより生産活動への参加は限定的であるために、労働生産性による経済損失の見積もりは小さくなる。両手法により把握できる価値の損失には重複しない部分があることから、本来は両手法での推計・対比を実施したうえでの評価が望ましいが、後者の手法で推計される経済損失が小さなものになることをふまえ、本研究ではVSLのみの評価で経済損失の推計を行うこととした。

以上をふまえ、本研究では、世界初の試みとして、世界全域を対象地域とした既存の熱関連超過死亡数の推計手法とVSLを組み合わせることで、気候および社会・経済の将来変化の不確実性幅を考慮したうえで、気

候変動に伴う熱関連超過死亡の被害額について金銭的に見積もることを目的とする。また、その被害額の増減の要因について、地域別に整理を試みる。

なお本研究は、環境研究総合推進費S-14（気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究）プロジェクトの一部として実施された。同プロジェクトでは、熱関連超過死亡以外の他セクタへの温暖化影響の経済評価も別途実施し、複数セクタを統合した評価（複数セクタの温暖化影響の総和と緩和策・適応策の実施に要する費用との比較）に取り組む計画となっており、その統合評価への貢献を見据えて、本研究の分析結果についても、同課題で標準とする（地理的・経済的な類似性で区分された）17地域への集計を行ったうえで考察を行った。

2. 熱関連超過死亡数と被害額の推計方法

(1) 本研究の推計フローと使用データについて

図-1は、本研究における熱関連死亡による被害額の推計フローを示している。生物・物理的評価パートでは、Honda et al.⁷⁾による熱関連超過死亡数推計モデルを用いることで、人口、年平均総死亡率、（日最高気温と至適気温から推計される）総死亡に占める熱関連超過死亡の比率の掛け合わせによって、熱関連超過死亡数が空間解像度2.5°×2.5°のグリッド（地球を緯度方向2.5°・経度方向2.5°のマス目で区切ったもの）別に推計され、さらに国別集計される。一方、経済的評価パートでは、OECD¹⁰⁾が用いたVSL推計式を応用し、一人当たりGDPから国別・年別のVSLが推計される。さらに国ごとの熱関連超過死亡数とVSLを乗じて、国別の熱関連死亡による被害額を推計する。また、結果考察のために、地理的・経済的な類似性から世界17地域への集計を行ったうえで、推計された被害額の地域別GDPに占める割合（以後、「被害額のGDP比」と称す）を算出した。ここで被害額の絶対値ではなくそのGDP比で評価を行ったのは、被害の深刻度の大小についての地域間比較、ならびに（消費やGDPの減少率で測られることが多い）緩和政策による経済損失の規模との比較を補助することを意図したものである。

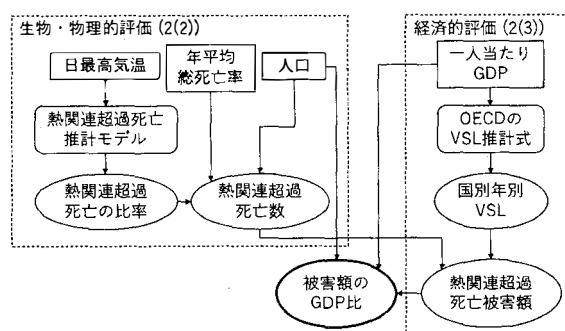


図-1 本研究での熱関連超過死亡の被害額の推計フロー

以下では、熱関連超過死亡数の推計の詳細を2(2)で、各国のVSL推計ならびに熱関連超過死亡による被害額推計の詳細を2(3)で、地域集計とGDP損失率計算の詳細を2(4)で説明する。

(2) 熱関連超過死亡数の推計方法

ここでは、図-1左上の生物・物理的評価パートについて説明する。本研究において、各国の熱関連超過死亡数（原因（本研究では暑熱）が取り除かれた場合に期待される死亡数と当該原因が存在する場合の死亡数の差）は、Honda et al.⁷⁾が開発した推計モデルを用いて、人口、年平均総死亡率、総死亡に占める熱関連超過死亡の比率の掛け合わせにより、現在期間（1981～2005年）及び将来期間（2005～2099年）について、空間解像度2.5°×2.5°のグリッド（世界を緯度・経度方向に2.5°の等間隔で区切ったマス目）別に計算される。そのうち、人口は空間解像度2.5°×2.5°の人口密度データとして与える。年平均総死亡率は国別データとして与えるが、これはある国において一人の人間がある年に死亡する確率（総死亡人口／総人口）を指す。総死亡に占める熱関連超過死亡の比率については、日最高気温が至適温度OT（日最高気温と日死亡数の統計的関係を見た場合に日死亡数が統計的に最小となる日最高気温；日最高気温を横軸に日死亡数を縦軸に取って統計的関係を見た場合に見られる下に凸の関係の極値の日最高気温に相当；この日最高気温よりも日最高気温が低い場合には熱関連超過死亡が生じないことを想定する）を超える日の、日最高気温とOTの差をもとに計算される（図-2）。よって、ここで熱関連超過死亡と呼ぶものは、あくまで日最高気温と日死亡数の統計的関係から導かれるものであり、熱中症等の具体的な疾病に分類される死亡数を推計するものではない。なお、本研究では、Honda et al.⁷⁾での扱いにならない、空間解像度0.5°×0.5°の各グリッドにおけるOTは、当該グリッドにおける1981～2000年の日最高気温の84パーセンタイル値（20年間の日最高気温を高い順に並べた場合の16%順位の日最高気温）として推計し、このOTが将来期間にわたって変化しない（気候変化に応じた暑熱環境への適応・馴化が行われない）との想定をおいた。

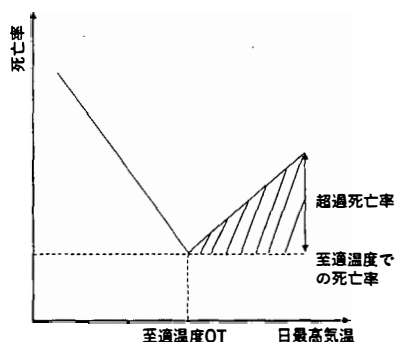


図-2 熱関連超過死亡の比率のイメージ図

現在期間の空間解像度2.5°×2.5°の各グリッドの人口密度データについては、GPW (Gridded Population of World) Version 3による1990年と2000年のデータを時間内挿することで、各年データを用意した。将来の人口密度データについては、Jones and O'Neill¹¹⁾が開発した3つの異なる社会経済発展想定における2010年から2100年までの10年ごとの人口密度シナリオデータを時間内挿することで、各年データを用意した。ここでは3つのSSP (Shared Socioeconomic Pathways) シナリオを用いたが、人口増加が小さく技術・経済発展の速いSSP1（持続可能シナリオ）、逆に人口増加が早く技術・経済発展の遅いSSP3（分断シナリオ）、SSP1とSSP3の中間的な性格を持つSSP2（中間的シナリオ）の3シナリオを評価対象に含めることで、熱関連超過死亡・被害額の推計における人口・経済発展の将来の見通しの不確実性幅を考慮することとした。

SSPシナリオは、気候変化影響・対策評価の共通前提として用いることを想定して、国際共同開発された社会・経済・技術等の将来発展経路に関するシナリオである。SSPシナリオは叙述シナリオと定量シナリオで構成されており、緩和策と適応策の困難度の大きさと特徴づけられる5つの異なる社会・経済発展像についてシナリオの開発・配信が行われている。5つのSSPの特徴を表-1にまとめる。各SSPの詳細については、O'Neill et al.¹²⁾を参照されたい。

表-1 各SSPシナリオの概要

	想定状況	人口成長	環境意識	技術発展	社会格差	経済発展
SSP1	持続可能	低い	高い	速い	縮小	持続可能
SSP2	中間的	中間	中間	中間	中間	中間
SSP3	分断	高い	低い	遅い	拡大	緩やか
SSP4	格差	低い	高い	速い	拡大	持続可能 緩やか
SSP5	在来型発展	緩やか	低い	遅い	縮小	速い

国別の年平均総死亡率について、過去期間については1990～2000年を用いた。また将来期間（2010年～2100年）については、SSP1・SSP2・SSP3の人口シナリオから逆算的に年平均総死亡率を推定し、それを用いた。

さらに、総死亡に占める熱関連超過死亡の比率の推計に用いる日最高気温データについては、4つのRCP (Representative Concentration Pathways)と呼ばれる温室効果ガス排出シナリオ（RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5）を前提とした5つの異なる全球気候予測モデル（GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, NorESM1-M）によるCMIP5向けの気候予測実験出力について、WFDEI再解析実験データと照らしたバイアス補正を施し開発された分野横断影響評価プロジェクト（ISI-MIP: Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project）補正済み気候シナリオ¹³⁾から、日最高気温シナリオを抽出し

て用いた。ISI-MIP補正済み気候シナリオは空間解像度 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ を有しており、過去に観測された大気中温室効果ガス濃度を前提条件とする過去再現実験期間（1981～2005年）と4RCP排出シナリオを前提とする将来予測実験期間（2006～2099年）についてデータが作成・配信されている。同データの活用により、将来の温室効果ガス排出の幅（緩和政策の強さの幅）と気候予測モデルの違いによる予測不確実性の幅を広く捉えることが可能になる。なお、将来予測期間については、4RCP×5GCMの気候変化シナリオに加えて、仮に気候変化が生じず社会・経済条件のみ変化する仮想条件（気候変化なしシナリオ）での推計も追加的に行った。いずれのRCPとSSPの組み合わせも生じうると仮定し、21種の気候変化想定（4RCP×5GCM+気候変化無し1ケース）×3種の社会経済発展想定（SSP1・SSP2・SSP3）の、計63ケースの分析を実施している。なお、本研究では、SSPシナリオは社会経済条件（人口・GDP）の将来想定としてのみ用いており、気候予測の前提となる排出シナリオとしては用いていない。

また、空間解像度 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ のグリッド別に現在（1981～2005年）ならびに将来（2005～2099年）期間について推計された熱関連超過死亡数は、続く国別での被害額評価において国別VSLとあわせて用いるために、国別集計を行った。

(3) 熱関連死亡による被害額の推計方法

ここでは、図-1右上の経済的評価パートについて説明する。本研究ではOECD¹⁰が提案する方法を用いて一人当たりGDPを説明変数としてVSLを国別・年別に推計し（式(1)）、それに熱ストレス死亡数を乗じる（式(2)）ことで、熱ストレスの被害額を国別に現在及び将来期間（2005～2099年）について算出した。何からの政策による評価対象の死亡リスクの低減により発生する便益として定義されるVSLは、人間の実行動データに基づく顕示選好法 (Revealed Preference)あるいはアンケート調査等により回答者の選好を尋ねて評価する表明選考法 (Stated Preference)のいずれかにより推定される。OECD¹⁰はこのうち表明選考法を用いた環境・健康・交通リスクに関わる成人VSLの世界各地の推計事例を収集・データベース化したうえで、そのメタ分析を通じて、回答者の社会経済条件やその他諸条件とVSLの関係について検討している。その検討をふまえ、結論として、OECD諸国における平均的な成人のVSLを150万～450万US\$（標準値は300万2005US\$）と見積もるとともに、所得水準の異なる国間での補正、経時的な実質所得上昇に応じた補正についても併せて提案をしており、式(1)は同提案を数式化したものである。

本研究においては、全球を対象に複数時点について国

別に被害額を推定する必要があることから、特定地域・特定時点でのVSL推計値を選択して用いることはせず、VSL推計値のメタ分析により国別VSLを式(1)の形で関数化したOECD¹⁰をVSL推計に採用することを決めた。メタ分析の事例はOECD¹⁰以前にもKochi et al.¹⁴やMrozek et al.¹⁵など複数存在しているが、後発でメタ分析対象のデータ数が大きいことから、本研究ではOECD¹⁰に依拠して国別VSLを推計することとした。なお、OECD¹⁰の推計・提案をふまえ、式(1)において VSL_{ref} は標準値の300万US\$, 所得水準の異なる国間での補正の係数 α は0.8を採用した。なお本論文ではOECD¹⁰が示す VSL_{ref} の推計値の不確実性幅を論じていないが、式(1)の式形から、その不確実性幅を考慮した場合、本研究の被害額推計値は0.5～1.5倍の幅を取りうる。また本研究の被害額推計値の理解にあたっては、OECD¹⁰のメタ分析による推計値自体、VSLの推計事例の蓄積に応じて今後もその見直しが行われていくべきものであることにも注意が必要である。

式(2)は熱ストレス死亡被害額の算出式であり、式(1)で推計した国別・年別VSLに国別・年別の熱ストレスによる死亡者数を乗じて算出した。

$$VSL_{t,c} = VSL_{ref} \cdot \left(\frac{GDPPC_{2005,c}}{GDPPC_{ref}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{GDPPC_{t,c}}{GDPPC_{2005,c}} \right) \quad (1)$$

$$Damage\ Cost_{t,c} = VSL_{t,c} \cdot Death_{t,c}^{Heat\ Stress} \quad (2)$$

ただし、 $VSL_{t,c}$: t 年の c 国の統計的生命価値、 VSL_{ref} : OECD加盟国の平均統計的生命価値（2005年US\$）、 $GDPPC_{t,c}$: t 年の c 国の1人あたりGDP（購買力平価換算US\$）、 $GDPPC_{ref}$: 2005年のOECD加盟国の1人あたりGDP（2005年の加盟国35ヶ国の平均値・約US\$35400）、 α : 所得水準の異なる国間での補正の係数、 $Damage\ Cost_{t,c}$: t 年の c 国の熱関連超過死亡による被害額、 $Death_{t,c}^{Heat\ Stress}$: t 年の c 国の熱関連超過死亡数

各国・各年のVSL推計にあたり用いる国別一人当たりGDPについては、現在期間（1981～2005年）は世界銀行¹⁶を使用した。将来期間（2005～2099年）については、IIASA¹⁷が公表しているSSP1～3の2005年と2010年～2100年の10年間隔のGDPデータ、ならびに前述（2(2)）のSSP1～SSP3の人口データを用いて用意した。

(4) 地域への集約

前節で推計した国別の熱関連死亡による被害額について、表-2の17地域に集計（式(3)）した。さらに、被害の深刻さを地域間で比較できるように、被害額のGDP比（地域別に被害額を当該地域のGDPで除したもの）を計算した（式(4)）。

$$Damage\ Cost_{t,r} = \sum Damage\ Cost_{t,c} \quad (3)$$

$$Damage\ Cost\ to\ GDP_{t,r} = \frac{Damage\ Cost_{t,r}}{GDP_{t,r}} \quad (4)$$

ただし、 $Damage\ Cost_{t,r}$ ： t 年の r 地域の熱関連超過死亡による被害額、 $Damage\ to\ GDP_{t,r}$ ： t 年の r 地域の被害額のGDP比、 $GDP_{t,r}$ ： t 年の r 地域のGDP

表-2 所得別の地域の定義

所得レベル	地域名
高所得地域（一人当たりGDP ≥US\$20000/年）	カナダ, EU, 日本, ニュージーランド・豪州, 米国
中所得地域（US\$5000/年 ≤ 一人 当たりGDP < US\$20000/年）	ブラジル, 中東, ラテンアメリカ, その他欧州, トルコ
低所得地域（一人当たりGDP < US\$5000/年）	中国, 旧ソ連, インド, 北アフリカ, その他アフリカ, その他アジア, その他東・東南アジア

3. 熱関連超過死亡による被害額の推定結果

(1) 世界全体の熱関連超過死亡被害額のGDP比

緩和策が進んだRCP2.6シナリオと、緩和策が進まないRCP8.5シナリオの2つの極端な気候状況を取り上げ、複数の社会経済発展想定（SSP1・SSP2・SSP3）における熱関連超過死亡による被害額のGDP比の経年変化を図-3に示す。なお図-3において、曲線は5つのGCMを前提とした各年の推計結果を局所多項式回帰により平滑化関数にフィッティングさせたもので、灰色の部分はその95パーセント信頼区間を示している。世界全体の熱関連超過死亡による被害額のGDP比は全てのシナリオで増加傾向だが、RCP間で異なる挙動を示した。RCP2.6では、どのSSPも熱関連超過死亡による被害額のGDP比の増加量が低く、SSP間で大きな差が見られず、どの年次でも1%未満となった。一方、RCP8.5では、熱関連超過死亡による被害額のGDP比の増加量が大きく、どのSSPシナリオでも今世紀末には増加が加速し、今世紀末には2%台になることが分か

った。このように、緩和策が進んだ社会であれば、被害額のGDP比を1%未満に留めることが出来るが、緩和策が進まなければその被害も増加していくことが分かった。

なお、緩和政策（例えばRCP8.5→RCP2.6）により生じる経済損失（対策費用）と、その際に回避できる影響被害額の直接比較は、熱関連超過死亡以外の温暖化影響の大小も合わせて評価する必要がある。第1章章末で述べたS-14での統合分析を待たねばならない。ただし、IPCC第5次評価報告書によれば21世紀中の工業化前比気温上昇を66%以上の確率で2℃以下に抑制するシナリオ（RCP2.6に相当）では対策を取らないケース（RCP8.5に相当）に比して2100年に世界消費が3～11%減少すると評価されており、その緩和による経済損失と比して、本研究が示す2%台（RCP8.5）から1%未満（RCP2.6）への影響被害（被害額のGDP比）の軽減は、桁までは変わらない無視できない大きさであることがわかった。

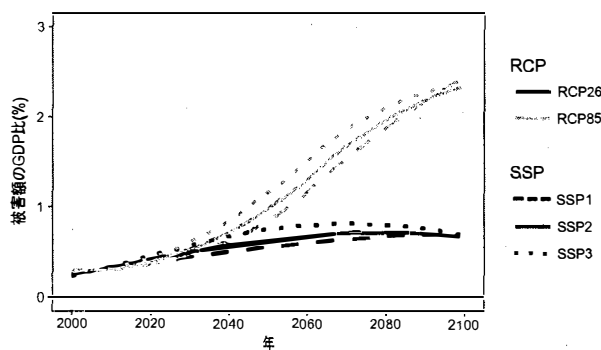


図-3 熱関連超過死亡による被害額のGDP比（世界）

(2) 地域別の熱関連超過死亡による被害額のGDP比

地域別の被害額のGDP比について、紙面の都合、各所得水準から2つの代表地域を抽出し、ここでは議論する。高所得地域は日本と米国、中所得地域はブラジルと中東、

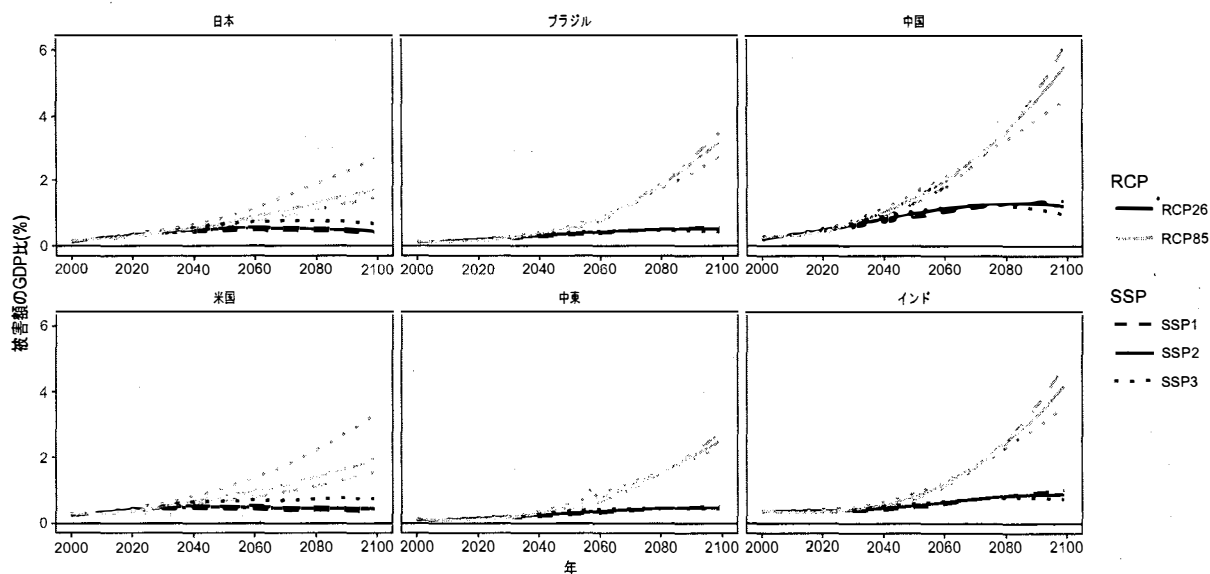


図-4 熱関連超過死亡による被害額のGDP比（左上から日本、ブラジル、中国、米国、中東、インド）

低所得地域は中国とインドを選んだ。図-3において世界全体での結果を示したのと同様に、各地域における熱関連死亡による被害額のGDP比を図-4に示す。高所得地域は両地域とともに世界全体と類似した傾向を示しており、今世紀末ではRCP2.6では1%未満に対して、RCP8.5では1% (SSP1) ~3% (SSP3) となった。中・低所得地域は今世紀末でSSP間の差が少ないことと、2070~2090年頃にSSP間で順序が入れ変わる結果が示された。

このように被害額のGDP比の時間変化は地域により異なる挙動を示すが、次節ではここで取り上げた地域のうち、3地域（日本・米国・インド）を対象に、被害額の将来変化への各要因の寄与について検討した。

(3) 熱関連超過死亡の被害額変化への各要因の寄与

各地域での被害額の挙動を理解するために、各地域の熱関連死亡被害額の将来変化について、その因子の寄与の経年変化を調べる。前述の式(2)が示すように、本研究では、VSLと熱関連超過死亡数を乗じることで熱関連死亡被害額を計算している。また式(1)が示すように、VSLは当該地域の一人当たりGDPに比例して変化すると想定されている。一方、熱関連超過死亡数は、人口、年平均総死亡率、（日最高気温データに基づき推計される）総死亡に占める熱関連超過死亡の比率を掛け合わせることで算出される。

そこで熱関連死亡被害額の将来変化について、4つの変化因子（1人あたりGDPの変化によるVSL変化、人口変化、年平均総死亡率変化、熱ストレスによる超過死亡率の変化）の寄与を算定した。4因子の寄与については、4因子の変化率を乗じて算出される熱関連死亡被害額の現在から将来各時点までの変化率（図-5・図-6・図-7の黒線）を4因子の変化率で按分して示した。なお、一人あたりGDPはあらゆる地域で将来期間に多かれ少なかれ増加することから、その増加に伴うVSLの増加は、常に被害額の上昇に寄与する。また熱ストレスによる超過死亡率の変化についても、一般的にどの地域でも21世紀を通じて気温上昇（とそれに伴う超過死亡率の上昇）が予想されるため、常に被害額の上昇に寄与する。一方で、人口変化、年平均総死亡率変化については、地域により、21世紀中に増減があることから、被害額を上昇させる場合（寄与がプラス）もあれば下降させる場合（寄与がマイナス）もある。ここでは3地域（日本、米国、インド）について、被害額の現状からの変化率への4因子の寄与を図-5~図-7に示す。これらの図は、各因子による被害額の変化率の積み上げグラフであり、黒線が現在期間からの被害額の変化倍率（4つの因子の寄与の和）、赤色部が熱関連超過死亡率変化の寄与、緑色部が年平均死亡率変化の寄与、青色部が人口変化の寄与、紫色部が一人あたりGDP変化に伴うVSL変化の寄与である。

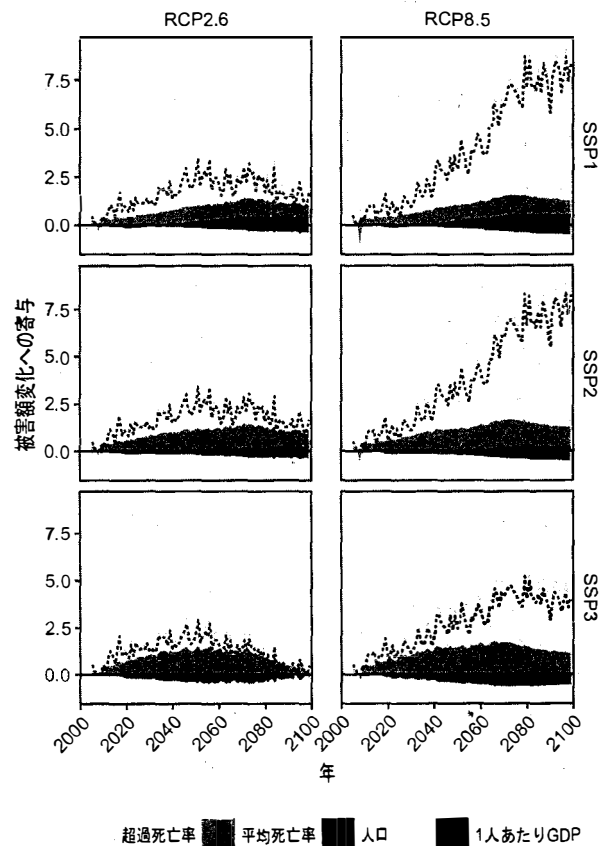


図-5 被害額の変化率への4因子の寄与（日本）

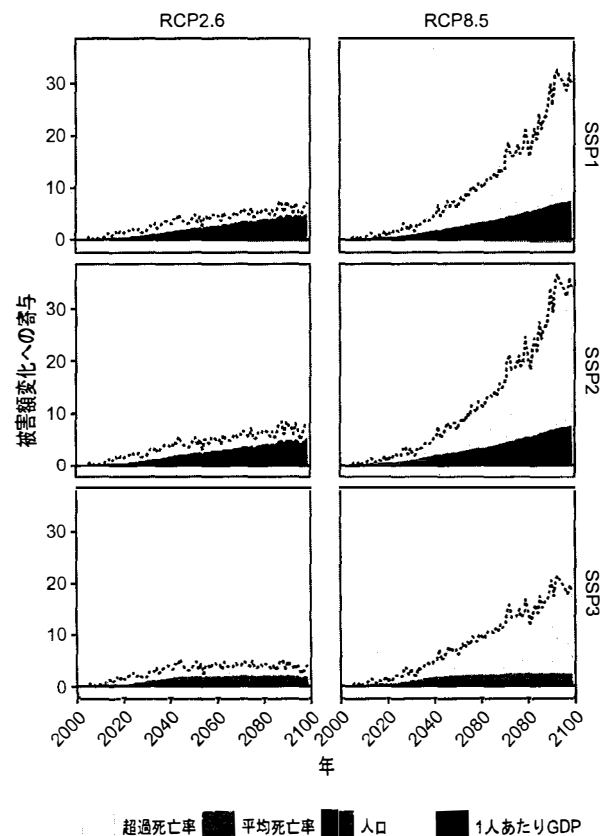


図-6 被害額の変化率への4因子の寄与（米国）

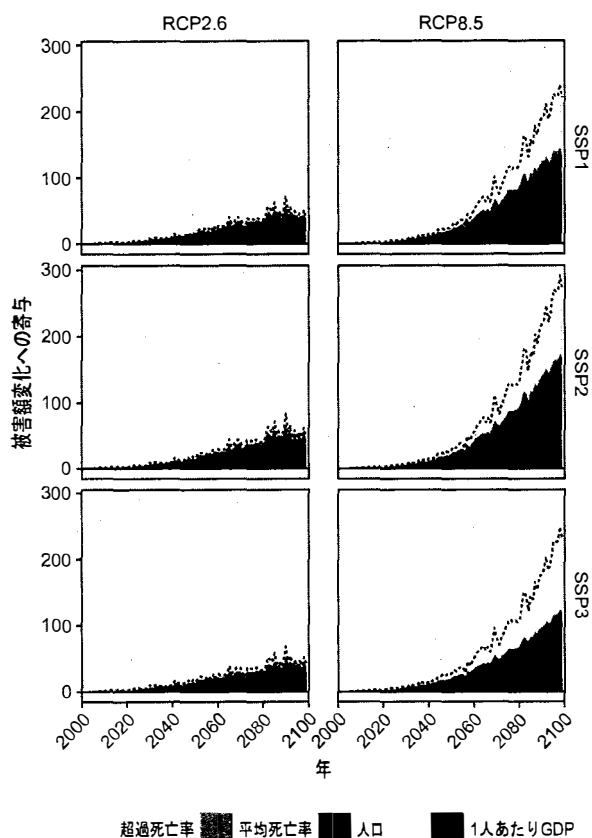


図-7 被害額の変化率への4因子の寄与（インド）

RCP間で比較すると、いずれの地域においても、RCP2.6よりもRCP8.5の方が気温の上昇が大きくなるため、熱関連超過死亡率も大きくなり、今世紀末にかけて寄与は増加傾向を示した。

地域差を見ると、米国のように熱関連超過死亡率の寄与が大きな地域が多く、これは人口・経済成長ともに将来の変化が比較的小さな社会にみられる傾向である。ただしその中であっても例えば日本のように、SSPによっては年平均死亡率変化の寄与がみられる地域も存在する。また、将来に大きな経済成長が想定されている低所得・中所得地域については、例えばインドのように一人当たりGDP変化に伴うVSL変化と熱関連超過死亡率変化が同程度に正に寄与する地域もあり、この傾向は旧ソ連でも見られる（図省略）。他の挙動として、一人あたりGDP変化と人口変化、熱関連超過死亡率変化がプラスの寄与を占め、1人あたりGDP変化と人口変化の寄与の合計が熱関連超過死亡率変化の寄与に匹敵するケースがあり、中所得地域では中東、低所得地域ではその他アフリカやその他アジア、北アフリカが該当した（図省略）。

なお、現在期間からの被害額の変化は、RCP、SSPに関わらず、どの地域も概ねプラスであり、RCP間では大きく変化が見られるものの、SSP間では比較的差が小さいことが分かった。つまり、被害額は社会要因よりも気候要因の影響を強く受けることが分かった。

4. まとめ

本研究では、世界全域を対象地域とした既存の熱関連超過死亡数の推計手法とVSLを組み合わせることで、気候および社会・経済の将来変化の不確実性幅を考慮したうえで、気候変動に伴う熱関連超過死亡リスクの増加について金銭的な見積もりを実施した。その結果、以下の知見を得た。

- ① 熱関連死亡による被害額のGDP比は、緩和策が進むRCP2.6シナリオの場合、世界全体で1%未満に抑えることが可能である。一方、緩和策が進まないRCP8.5シナリオの場合、世界全体で見て今世紀末に2%台となった。また、地域別に見た場合には、SSP間の差などに違いがみられた。
- ② 熱関連死亡による被害額の変化に寄与している因子について、熱関連超過死亡率の寄与が大きな地域が多く、特に緩和策が進まず気候変化が大きくなるRCP8.5シナリオにおいてその傾向が顕著となる。地域別にみると、年平均死亡率変化の寄与が大きい地域（例：日本）もあれば、一人当たりGDP増加に伴うVSL増加の寄与が大きい地域（例：インド）もあり、地域差が大きい。現在の途上国は将来の経済発展が見込まれるため、VSL増加を通じた経済発展の寄与率が相対的に高くなる傾向にあり、現在の先進国は逆に経済発展よりも気候変化に伴う熱関連超過死亡率変化のほうが大きく寄与することがわかった。

最後に、本研究の今後の課題について整理する。一つ目の課題として、熱関連超過死亡の金銭換算のために用いた国別・年別VSLの推計方法について、今後に更新・改良が行われた場合に、それを反映した分析を随時実施していく必要がある。2(3)で述べたように、本研究では全球を対象に複数時点について国別に被害額を推定する必要との整合性から、多数のVSL推計事例のメタ分析をふまえて提示されたOECD¹⁰の手法を用いた。OECD¹⁰では、今後個別のVSL推計事例が追加・更新された場合にメタ分析の再実施が必要になることが論じられている。また、メタ分析の手法自体も今後に改良される可能性もある。VSLの推計方法の更新・改良自体は本研究の取り組みの範疇を超えるが、VSLの推計方法の定期的な確認と分析への反映に努める必要がある。

二つ目の課題として、適応の費用ならびに効果の考慮が挙げられる。本研究では、熱関連の超過死亡の推計に際して、将来的に一切、適応・馴化が生じないことを仮定した。しかし現実には、相応の費用は生じうるものの、気候の変化に応じて様々な適応・馴化が行われ、超過死亡の増加を軽減しうることが予想される。その点からは、本研究の被害額は悲観的な想定での推計となっていると

いえる。今後、適応について考慮し、より現実在即した被害額推計に取り組むことが課題といえる。

謝辞：本研究は、（独）環境再生保全機構の環境研究総合推進費（S-14/5/S-14/3/2-1702）により実施された。

参考文献

- 1) IPCC: Summary for Policymakers. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*, Cambridge University Press, pp. 3-21, 2012.
- 2) WHO : *Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s*, World Health Organization, 2014.
- 3) Curriero, F.C., Heiner, K.S., Samet, J.M., Zeger, S.L., Strug, L. and Patz J.A. : Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States, *American journal of epidemiology*, 155(1), pp.80-87, 2002.
- 4) Baccini, M., Biggeri, A., Accetta, G., Kosatsky, T., Katsouyanni, K., Analitis, A., Anderson, H.R., Bisanti, L., D'Ippoliti, D., Danova, J., Forsberg, B., Medina, S., Paldy, A., Rabczenko, D., Schindler, C. and Michelozzi, P. : Heat effects on mortality in 15 European cities, *Epidemiology*, 19(5), pp.711-719, 2008.
- 5) McMichael, A.J., Wilkinson, P., Kovats, R.S., Pattenden, S., Hajat, S., Armstrong, B., Vajanapoom, N., Niciu, E.M., Mahomed, H., Kingkeow, C., Kosnik, M., O'Neill, M.S., Romieu, I., Ramirez-Aguilar, M., Barreto, M.L., Gouveia, N. and Nikiforov, B. : International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOTHURM' project, *International Journal of Epidemiology*, 37, pp.1121-1131, 2008.
- 6) Egondi, T., Kyobutungi, C., Kovats, S., Muindi, K., Ettarh, R. and Rocklöv, J.: Time-series analysis of weather and mortality patterns in Nairobi's informal settlements, *Global Health Action*, 5, pp.1-10, 2012.
- 7) Honda, Y., Kondo, M., McGregor, G., Kim, H., Guo, Y-L., Hijioka, Y., Yoshikawa, M., Oka, K., Takano, S., Hales, S. and Kovats, S.: Heat-related mortality risk model for climate change impact projection, *Environ. Health Prev. Med.*, 19(1), pp.56-63, 2014.
- 8) Bosello, F., Roson, R. and Tol, R.S.J.: Economy-wide estimates of the implications of climate change: Human health, *Ecol. Econ.*, 58, pp.579-591, 2006.
- 9) Selin, N.E., Wu, S., Nam, K.M., Reilly, J.M., Paltsev, S., Prinn, R.G. and Webster, M.D. Global health and economic impacts of future ozone pollution, *Environ. Res. Lett.*, 4, 044014, 2009.
- 10) OECD : *Mortality risk valuation in environment, health and transport policies*, OECD Publishing, 2012.
- 11) Jones, B and O'Neill, B.C.: Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environ. Res. Lett.*, 11, 084003, 2016.
- 12) O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., van Ruijven, B.J., van Vuuren, D.P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M. and Solecki, W. : The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, *Global Environmental Change*, 42, pp.169-180, 2017.
- 13) Hempel, S., Frieler, K., Warszawski, L., Schewe, J., and Piontek, F.: A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach, *Earth Syst. Dynam.*, 4, pp.219-236, 2013.
- 14) Kochi, I., Hubbel, B. and Kramer, R.: An empirical Bayes approach to combining and comparing estimates of the value of a statistical life for environmental policy analysis, *Environmental and Resource Economics*, 34, pp. 385-406, 2006.
- 15) Mrozek, J. R. and Taylor, L.O.: What Determines the Value of Life? A Meta-Analysis, *Journal of Policy Analysis and Management*, 22(1), pp. 253-270, 2002.
- 16) The WORLD BANK : *DataBank*.
<http://databank.worldbank.org/data/home.aspx>
- 17) IIASA : *SSP Database*.
<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>

(2018. 4. 9 受付)

Estimation of Economic Damage Caused by Change in Heat Stress Mortality under Anthropogenic Climate Change

Kiyoshi TAKAHASHI, Hiroshi SAO, Yasushi HONDA, Shinichiro FUJIMORI and Jun'ya TAKAKURA

Anthropogenic climate change in this century will cause the increase in frequency and intensity of extremely hot day and, as a result, heat stress mortality is also expected to increase. This study analyses the economic damage caused by change in heat stress mortality under climate change considering uncertainty in future climate and socio-economic change. As a result, the global economic damage caused by heat stress mortality relative to GDP would be limited to below 1% under RCP2.6 emission scenario assuming progress in GHGs mitigation. On the other hand, under RCP8.5 scenario, which is the most warming case, the global economic damage by the end of the century will be above 2% of GDP. While the primary factor of the economic damage increase in the developed regions is the heat stress mortality increase caused by the expected temperature increase, the VSL increase according to the expected economic growth will also contribute to the economic damage increase in the present developing countries.