

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 ESTIMATION OF MILD HEALTH DISORDER CAUSED BY URBAN AIR TEMPERATURE INCREASE WITH MIDPOINT-TYPE IMPACT ASSESSMENT METHODOLOGY

井原智彦^{*1}, 日下博幸^{*2}, 原 政之^{*3}, 松橋隆治^{*4}, 吉田好邦^{*5}

*Tomohiko IHARA, Hiroyuki KUSAKA, Masayuki HARA,
Ryuji MATSUHASHI and Yoshikuni YOSHIDA*

A survey was conducted to evaluate Tokyo residents' willingness to pay (WTP) to avoid mild heat disorders during a specified period. As a result, both of the WTPs to avoid feeling of listlessness/fatigue and febrile sensation increased with the temperature when the daily maximum air temperature is over 26.9 °C, and the WTP to avoid restless sleep showed an increase with the temperature when the daily maximum air temperature is above 29.4 °C. Fatigue caused by the air temperature rise was estimated to have been the second largest impact in our society after sleep disturbance.

Keywords : Global warming, Urban heat island, CVM, Fatigue, Hyperthermia, Sleep disorder

地球温暖化, ヒートアイランド, CVM, 疲労, 熱中症, 睡眠障害

1. はじめに

地球温暖化に伴う気温上昇は、水資源や生態系のみならず、人間に直接の健康影響を及ぼすだろうと認識されている²⁾。都市部では、温室効果ガスを原因とする地球温暖化による気温上昇に加えて、人工排熱や地表面被覆の人工化を主因とするヒートアイランド現象による気温上昇が加わるため、昇温量はより大きくなり、より多くの健康被害が発生すると予想される。現時点で、都市における気温上昇は、重度の熱中症による死亡といった重度の健康影響を引き起こしているほか³⁾、軽度の熱中症、疲労や不眠といった軽度の健康影響を広範に引き起こしていると推測されている⁴⁾。気温低減方策(ヒートアイランド対策、地球温暖化の適応策)の効果は時刻や場所によって変化する^{5,6)}ため、気温低減方策を合理的に導入するためには、時刻や場所によって被害量が変化するこれらの健康影響を同じ基準を用いて定量化し、相互に比較する必要がある。しかし、従来、少数の重度の熱中症による死亡のみ影響が定量化され、疲労や不眠といった軽度であるが広範に発生する健康影響は全く定量化されていなかった。

近年になって軽度の健康影響のうち睡眠障害が着目され⁷⁾、気温上昇に伴う被害量が障害調整生存年(disability-adjusted life year, DALY)⁸⁾を用いて定量化された⁹⁾。さらに、被害算定型影響評価手

法である LIME¹⁰⁾を用いた枠組み^{11,12)}に基づいて重度の熱中症を含む熱・寒冷ストレスによる死亡と睡眠障害に伴う被害とが比較され、最近 30 年間の東京の気温上昇では睡眠障害に伴う被害は熱中症による死亡の被害よりもはるかに大きいであろうことが示された¹³⁾。

睡眠障害以外の軽度の健康影響は、現時点で定量化されていないが、睡眠障害と同じように大きな被害をもたらしている可能性がある。しかし、同じように LIME の枠組みで被害を定量化するには、医学的知見を用いて軽度の健康影響に含まれるさまざまな症状を切り分けて個別の疾患として定義し、かつ疾患の重篤度(disability weight)や有病期間(average duration of the case until remission or death)⁸⁾を設定する必要がある、膨大な作業となってしまう。

そこで、本研究では、軽度の健康影響のうち、どの疾患について医学的知見を用いて評価する必要があるかを把握するために、自覚症状ベースで軽度の健康影響と気温との関係を評価する。だるさ・疲労感など自覚症状の大きさと気温との関係を、同じく軽度の健康影響である睡眠障害の自覚症状である寝苦しさと同時に評価することにより、疲労など対応すると思われる疾患による被害の大きさを推定する。影響評価にあたっては、被害算定型手法より簡便な問題比較型手法を用いる。なお、本研究では、疲労や疲労感など高温に起因する各種の疾患・自覚症状を軽度の暑熱障害と総称する。

本論文は既発表文献¹⁾を加筆・修正したものである。

^{*1} 独立行政法人産業技術総合研究所安全科学研究部門
研究員・博士(工学)

^{*2} 筑波大学計算科学研究センター 准教授・博士(理学)

^{*3} 独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域
技術研究主事・修士(理学)

^{*4} 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
教授・工博

^{*5} 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
准教授・博士(工学)

Research Scientist, Research Institute of Science for Safety and Sustainability, National
Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Dr. Eng.

Assoc. Prof., Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Dr. Sci.

Research Scientist, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth
Science and Technology (JAMSTEC), M. Sci.

Prof., Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences,
University of Tokyo, Dr. Eng.

Assoc. Prof., Department of Environment Systems, Graduate School of Frontier Sciences,
University of Tokyo, Dr. Eng.

2. 軽度の暑熱障害に関する調査

2.1 調査概要

気温と住民の軽度の暑熱障害の関係を把握するために、2009年8月中旬～9月上旬のべ15日間にわたり、東京都区部に居住する20歳以上の男女を対象に、インターネット上で調査を実施した¹⁾。できるだけ最高気温が高くかつ雨が降らない日の翌日に調査日を設定した。調査実施日を表1に示す。

(1) 調査対象

本調査は、調査会社が保有するパネル（gooリサーチモニターパネル）より、性（男・女）および年代（24歳以下、25～34歳、35～44歳、45～54歳、55～64歳、65歳以上）が調査対象地域（東京都区部）における構成とできるだけ等しくなるようにサンプリングした調査モニターを対象に実施した。

(2) 調査手法と項目の概要

調査では、回答者の属性をたずねる質問と、調査前日の高温に伴う暑熱障害（ただし寝苦しさのみ調査当日の起床後における症状）を評価する質問を設けた。下記に主な質問内容を示す。

- 属性に関する質問
年齢、性別、職業、世帯年収、居住地（23区）、住宅の種類・構造を質問した。
- 暑熱障害に関する質問
8項目の暑熱障害に関する質問（詳細は次項）、就寝時刻・起床時刻、中途覚醒回数、10項目の健康影響軽減行動に関する質問、高温による外出回避事例に関する質問を実施した。

2.2 質問票の設計

(1) 対象とする軽度の暑熱障害

睡眠障害に医学的な診断基準（たとえばDSM-IV¹⁴⁾）が存在するのに対し、睡眠障害以外の軽度の暑熱障害は疾患としての定義がなく、疲労感、食欲不振など客観的定量性の乏しい症状を多く含み、睡眠障害の評価⁹⁾に用いられた日本語版ピッツバーグ睡眠質問票¹⁵⁾のような医学的根拠に基づいた自記式質問票を利用した評価は困難である。

そこで、冒頭に述べた通り、疾患ではなく自覚症状を評価することとし、熱中症および夏季の暑熱障害に関する既往研究^{4,16,17,18,19,20,21)}をもとに、軽度の暑熱障害を以下の7種類に分類した。

- だるさ、疲労感
- たちくらみ、めまい、ふらつき
- 無気力、いらいら
- 熱っぽさ
- 食欲不振
- むくみ
- 下痢、便秘

以上に睡眠障害の自覚症状である寝苦しさを加え、計8種類の障害（自覚症状）を調査対象とした。

(2) 調査手法

仮想評価法(contingent valuation method, CVM)を用いて被害量を推定した。具体的には、8種類の軽度の暑熱障害をそれぞれ感じたかどうかを質問し、症状を感じた場合は、同程度の症状が1か月継続するとして、それを回避するためにいくら支払う意思があるかをCVMカード方式²²⁾により質問した。ただし、金額に妥当性を持

表1 調査実施日

| 調査実施日 | 前日の最高気温 [°C] | 当日の最低気温 [°C] | 回答数 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|------|
| 2009年8月20日 | 31.3 | 25.3 | 49 |
| 2009年8月21日 | 31.6 | 26.1 | 58 |
| 2009年8月22日 | 32.5 | 24.7 | 51 |
| 2009年8月23日 | 31.6 | 24.1 | 46 |
| 2009年8月24日 | 30.7 | 24.2 | 58 |
| 2009年8月25日 | 30.2 | 22.9 | 54 |
| 2009年8月26日 | 27.7 | 22.4 | 33 |
| 2009年8月28日 | 29.6 | 23.8 | 53 |
| 2009年8月29日 | 31.4 | 25.1 | 53 |
| 2009年8月31日 | 27.1 | 17.6 | 57 |
| 2009年9月2日 | 31.5 | 20.9 | 53 |
| 2009年9月6日 | 29.0 | 21.8 | 57 |
| 2009年9月7日 | 28.5 | 21.4 | 49 |
| 2009年9月9日 | 28.8 | 21.4 | 49 |
| 2009年9月12日 | 26.9 | 19.5 | 54 |
| 平均 | 29.89 | 22.75 | 51.6 |
| 期間平均 (8月20日～9月12日) | 28.63 | 21.96 | - |

表2 質問票（抜粋）

| | |
|----|--|
| 問1 | 昨日、暑さによるだるさや疲労感などを感じましたか。感じたならば、その感じた場所を記入して下さい。 <div><div>● 自宅内</div><div>● 自宅・自宅外両方</div><div>● 自宅外</div><div>● 感じなかった</div></div> |
| 問2 | では、昨日感じただるさや疲労感のみが1ヶ月間続くことを仮定して、それを回避するためにいくら支払ってもよいですか。あてはまるものをお選びください。10,000円以上の場合、具体的な金額をご記入下さい。 <div><div>● 0円</div><div>● 5,500～6,000円</div><div>● 0～500円</div><div>● 6,000～6,500円</div><div>● 500～1,000円</div><div>● 6,500～7,000円</div><div>● 1,000～1,500円</div><div>● 7,000～7,500円</div><div>● 1,500～2,000円</div><div>● 7,500～8,000円</div><div>● 2,000～2,500円</div><div>● 8,000～8,500円</div><div>● 2,500～3,000円</div><div>● 8,500～9,000円</div><div>● 3,000～3,500円</div><div>● 9,000～9,500円</div><div>● 3,500～4,000円</div><div>● 9,500～10,000円</div><div>● 4,000～4,500円</div><div>● 10,000円以上</div><div>● 4,500～5,000円</div><div>(円)</div><div>● 5,000～5,500円</div></div> |

たせるため、暑さを回避するために摂取するスポーツドリンク（500mLで150円程度）、栄養ドリンク（1本200円以上）、タクシー（わずかな距離で600～700円）、エアコン（1日あたり100～200円）の各費用を事前に提示した。さらに、金額が過大とならないように、8種類の症状について質問した後、8種類の症状回避に対する支払意思額の合計金額を支払う意思があるかどうかを確認した。支払う意思がない場合は、8種類の症状を回避する支払意思額を再度質問した。用いた質問票の一部を表2に抜粋する。

2.3 調査結果

計774の回答が得られた（すべて有効回答、1回答者につき1回答）。回答者の性別年代別の構成を表3に示す。表中の居住人口は平成17年国勢調査²³⁾における東京都特別区の人口を参照した。25～54歳では十分な回答数が得られたが、若年者（～24歳）と高齢

者（65 歳－）の回答数は居住人口と比較して少なかった。

調査結果を表 4 に示す。0 円より大きい回答者の総支払意思額（8 種類すべての症状の回避に対する支払意思額の合計）は、ほぼ対数正規分布を示した。

総支払意思額が 0 円となった回答者のうち、「全て 0 円と答えた理由について、あてはまるものを一つお選びください」という質問に対して、「このような暑さを防ぐには、税金など他の方法で対応すべきであり、各自が払うものではない」（抵抗回答）を選択した 2 人を解析対象外とした。

3. 都市気温と軽度の暑熱障害との関係の解析

3.1 解析条件

気温と軽度の暑熱障害に伴う健康影響との関係を解析するにあたって、それぞれの項目を次のように設定した。

(1) 調査対象

調査の対象者は、調査時点で解析対象者 772 人全員が東京都区部に在住していた。モニター登録時点での情報では、うち 42 人が東京都外に勤務していたが、勤務先を宮城県や兵庫県などとしている者がおり、また 4 人が東京都外に居住していることになっているため、古い情報であると考えられた。そこで、解析対象者は全員とも東京都内で 1 日を過ごすと考え、東京管区気象台の測定気温（日最高気温および日最低気温、表 1 参照）²⁴⁾を参照気温とする。

(2) 暑熱障害に伴う健康被害

暑熱障害の症状を感じたにもかかわらず、それを回避する支払意思額が 0 円の回答者は、健康影響といえるほどの症状ではないと考えられる。そこで、本研究では、症状を感じた回答者の割合ではなく、0 円より大きい支払意思額を提示した回答者の割合を、その症状を自覚した人の割合（社会における症状の出現率）と定義する。また、健康影響が大きいほど支払意思額が大きくなると考えられるため、支払意思額の大きさを自覚した場合の症状の重さ（重症度）と定義する。なお、支払意思額は、質問票では区間（たとえば 500–1,000 円）でたずねたが、解析では区間中央値（750 円）を採用する。

3.2 解析対象者の属性と暑熱障害の関係の解析結果

まず、性別・年代別に結果を集計した。集計結果のうち、性別・年代別それぞれの、各種の暑熱障害の出現率の平均値と標準偏差を表 5 に示す。次に、得られた結果に対して Kruskal-Wallis 検定を実施し、性もしくは年代によって各種の暑熱障害の出現率が変化するかどうかを確認した。表内の p 値が Kruskal-Wallis 検定の結果である。5%有意水準を採用すると、「食欲不振」「むくみ」「下痢・便秘」は女性に多いが、他の暑熱障害は性差が見られなかった。また、年代による有意な差は確認できなかった。

3.3 気温と暑熱障害の関係の解析手法

8 種類の暑熱障害それぞれについて、平均的な解析対象者 1 人あたりの軽度の暑熱障害に伴う被害（回避のための支払意思額） d [円] は、症状の出現率 a [-] と重症度（症状を自覚した際の回避のための支払意思額） s [円]を用いて、次式で表せる。

$$d = as \quad (1)$$

ここで、気温が上昇するほど症状の出現率は上昇すると考えられる。また、同じ種類の症状でも、気温が上昇するほど重症度が増大

表 3 回答者の性別年代別構成

| | 男性 | 女性 | 合計 | 居住人口 |
|---------|-------------|-------------|-------------|---------|
| –24 歳 | 12 | 18 | 30 (3.9%) | (21.2%) |
| 25–34 歳 | 66 | 131 | 197 (25.5%) | (17.4%) |
| 35–44 歳 | 131 | 149 | 280 (36.2%) | (15.5%) |
| 45–54 歳 | 103 | 70 | 173 (22.4%) | (12.0%) |
| 55–64 歳 | 37 | 20 | 57 (7.4%) | (13.8%) |
| 65 歳– | 30 | 7 | 37 (4.8%) | (18.5%) |
| 合計 | 379 (49.0%) | 395 (51.0%) | 774 | |
| 居住人口 | (49.6%) | (50.4%) | | |

表 4 調査結果

| 症状 | 症状を感じたと回答した割合 [-] | 0 円より大きい支払意思額の | |
|--------------|-------------------|----------------|----------|
| | | 提示割合 [-] | 対数平均 [円] |
| 1. だるさ・疲労感 | 65.9% | 63.7% | 1,534 |
| 2. たちくらみ・めまい | 19.2% | 18.1% | 1,769 |
| 3. 無気力・いらいら | 40.9% | 39.1% | 1,511 |
| 4. 熱っぽさ | 32.6% | 31.3% | 1,399 |
| 5. 食欲不振 | 20.1% | 16.7% | 1,256 |
| 6. むくみ | 17.2% | 15.5% | 1,518 |
| 7. 下痢・便秘 | 19.9% | 18.1% | 1,572 |
| 8. 寝苦しさ | 24.9% | 24.0% | 1,730 |

する可能性がある。熱中症²⁵⁾や睡眠障害²⁶⁾に関する既往研究を参考に、症状の出現率や重症度はある気温（閾値気温）以上になると線形に上昇すると考え、症状の出現率 a あるいは重症度 s と気温 θ [°C] との間に

$$a = a_o + \underbrace{\left(\frac{\Delta a}{\Delta \theta} \right)}_{\text{when } \theta > \theta_a} (\theta - \theta_a) \quad (2)$$

$$\log s = \log s_o + \underbrace{\left(\frac{\Delta(\log s)}{\Delta \theta} \right)}_{\text{when } \theta > \theta_s} (\theta - \theta_s) \quad (3)$$

が成立すると仮定した。

式(2)において、 a_o は気温によらずその症状が出現する割合（症状の基準出現率）[-]、 θ_a は出現率が上昇する気温の閾値（閾値気温）[°C]、 $\{\Delta a / \Delta \theta\}$ は気温に対する出現率の感応度（気温感応度）[-/°C] である。式(3)も同様に、 s_o は基準重症度[円]、 θ_s は重症度の閾値気温[°C]、 $\{\Delta(\log s) / \Delta \theta\}$ は重症度の気温感応度[円/°C]である。

式(2)、(3)に、実際の調査データ（気温 θ と出現率 a あるいは重症度 s ）を代入し、最小二乗法を適用すると、未知のパラメータである a_o 、 θ_a 、 $\{\Delta a / \Delta \theta\}$ および s_o 、 θ_s 、 $\{\Delta(\log s) / \Delta \theta\}$ が推定できる。ただし、両式ともに折れ線近似問題となるため、解析の際には θ を 0.1 °C（表 1 に示す気温データの精度）ずつ走査させながら逐次最小二乗法を適用し、残差平方和が最小となる組み合わせを解とした²⁵⁾。なお、気温ごとにサンプル数が異なるため（表 1 参照）、各サンプルの寄与が等しくなるように、各気温における平均出現率（あるいは平均重症度、図 1 において○のプロット）と気温との関係ではなく、生

表5 解析対象者の属性別の各種の暑熱障害の出現率

| | | 1. だるさ・疲労感 | 2. たちくらみ・めまい | 3. 無気力・いらいら | 4. 熱っぽさ | 5. 食欲不振 | 6. むくみ | 7. 下痢・便秘 | 8. 寝苦しさ |
|-----|---------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 性別 | 男性(N=377) | 0.615±0.487 | 0.164±0.371 | 0.353±0.478 | 0.292±0.455 | 0.130±0.337 | 0.090±0.287 | 0.149±0.356 | 0.265±0.442 |
| | 女性(N=395) | 0.658±0.475 | 0.197±0.399 | 0.428±0.495 | 0.334±0.472 | 0.203±0.402 | 0.218±0.413 | 0.213±0.410 | 0.215±0.411 |
| | p 値 | 0.216 | 0.234 | 0.033 | 0.205 | 0.007 | 0.000 | 0.021 | 0.104 |
| 年代別 | -24 (N=30) | 0.533±0.507 | 0.200±0.407 | 0.400±0.498 | 0.300±0.466 | 0.233±0.430 | 0.200±0.407 | 0.233±0.430 | 0.167±0.379 |
| | 25-34 (N=197) | 0.680±0.468 | 0.198±0.399 | 0.426±0.496 | 0.345±0.477 | 0.198±0.399 | 0.198±0.399 | 0.223±0.418 | 0.234±0.424 |
| | 35-44 (N=279) | 0.638±0.481 | 0.147±0.355 | 0.369±0.483 | 0.283±0.451 | 0.151±0.358 | 0.140±0.347 | 0.186±0.390 | 0.262±0.440 |
| | 45-54 (N=173) | 0.671±0.471 | 0.214±0.411 | 0.439±0.498 | 0.329±0.471 | 0.139±0.347 | 0.145±0.353 | 0.139±0.347 | 0.208±0.407 |
| | 55-64 (N=57) | 0.544±0.503 | 0.211±0.411 | 0.333±0.476 | 0.281±0.453 | 0.193±0.398 | 0.123±0.331 | 0.175±0.384 | 0.281±0.453 |
| | 65- (N=36) | 0.472±0.506 | 0.139±0.351 | 0.222±0.422 | 0.361±0.487 | 0.167±0.378 | 0.111±0.319 | 0.083±0.280 | 0.250±0.439 |
| | p 値 | 0.070 | 0.460 | 0.136 | 0.699 | 0.533 | 0.436 | 0.194 | 0.677 |

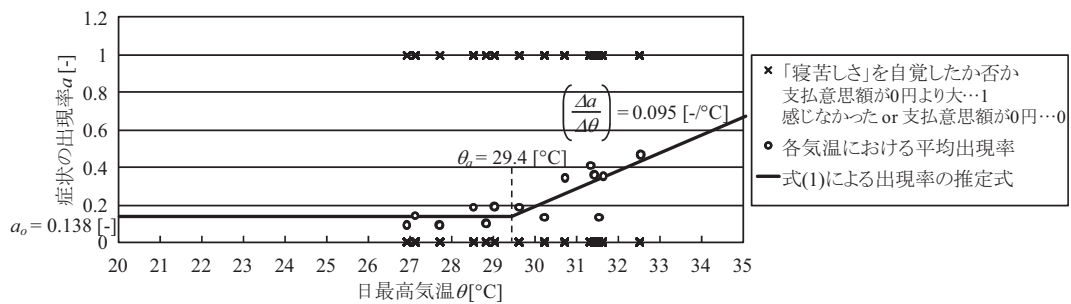


図1 日最高気温と寝苦しさの出現率との関係

の調査データ（図1において×のプロット）、すなわち、回答者が症状を自覚したか否か（あるいは回答者の重症度）と調査前日（あるいは調査当日）の気温との関係を解析した。

3.4 気温と暑熱障害の関係の解析結果

(1) 気温と暑熱障害（症状）の出現率との関係

式(2)に基づき、調査前日の最高気温および調査当日の最低気温と症状の出現率との関係を解析した。

例として、日最高気温と寝苦しさの出現率との関係の解析結果を図1に示す（生の調査値×は0と1しか存在しないため、図上では0および1の軸上に重なり合って存在する）。閾値気温 θ_0 の29.4℃を境に、気温 θ が上昇するにつれ出現率 a が増大するのがわかる。

すべての暑熱障害の解析結果を、日最高気温との関係については表6に、日最低気温との関係については表7にそれぞれ示す。表中、閾値気温 θ_0 に付記した位置は、15個ある気温データ（表1参照）の中で閾値気温がどこに存在するかを示している。「4-1-10」ならば、閾値気温より低い気温データが4個、等しい気温が1個、高い気温が10個あるという意味である。閾値気温より高いデータが0個あるいは1個の場合は、計算された閾値気温や気温感応度は有意でないと考えられる。気温感応度 $(\Delta a / \Delta \theta)$ に付記した t および p 値は、気温感応度が存在する気温区間（すなわち閾値気温以上の区間）における t 検定の結果のうち $(\Delta a / \Delta \theta)$ に関する結果である。

5%有意水準を採用すると、だるさ・疲労感および寝苦しさの出現率は日最高気温および日最低気温と相関し、熱っぽさは日最高気温とのみ相関するが、他の暑熱障害の出現率は気温と相関しないという結果が得られた。ただし、決定係数 R^2 が小さいことから、気温のみでは暑熱障害を説明できず、他の影響因子の寄与も大きいことが

わかる。実際、睡眠障害に関する既往研究⁹⁾では、気温との関係が有意に示されたが、その決定係数は小さく、疲労・ストレスと飲酒の影響も大きいことを定量的に示している。

日最高気温と日最低気温は互いに相関するため、 p 値の小さい方を選択すると、だるさ・疲労感は日最高気温が上昇すると出現率が增大すると推定された。寝苦しさに関しては日最高気温・日最低気温ともほぼ同じ p 値、 R^2 もほぼ同値を示した。以下、寝苦しさはより小さい p 値を示した日最高気温と相関するとして扱うが、参考として日最低気温と相関するとした場合の結果も示す。

(2) 気温と暑熱障害（症状）の重症度との関係

同様に、式(3)に基づいて、暑熱障害を自覚した場合の重症度と気温の関係を解析した。しかし、5%有意水準の下では、いずれの暑熱障害も、その重症度の気温感応度 $\{ \Delta (\log s) / \Delta \theta \}$ は日最高気温の場合にも日最低気温の場合にも有意にならなかった（表省略）。つまり、式(3)は成立せず、暑熱障害の重症度はすべて気温にかかわらず一定であると考えられる。その場合の重症度（月額） s_0 は表8に示す通りとなった（表8の s_0 は対数平均である）。

(3) 気温と暑熱障害に伴う健康影響との関係

以上の解析結果を式(1)に代入すると、平均的な回答者には、気温上昇に伴って以下の健康影響（月額）が発生すると推定できる。

$$\begin{aligned} d_1 &= 0.054 \times (\theta_{\max} - 26.9) \times 1534 \quad (\theta_{\max} > 26.9) \\ d_4 &= 0.030 \times (\theta_{\max} - 26.9) \times 1399 \quad (\theta_{\max} > 26.9) \\ d_8 &= 0.095 \times (\theta_{\max} - 29.4) \times 1730 \quad (\theta_{\max} > 29.4) \end{aligned} \quad (4a)$$

ここで、 d_1 , d_4 , d_8 はそれぞれだるさ・疲労感、熱っぽさおよび寝苦しさの健康影響（支払意思額）[円]、 θ_{\max} は日最高気温[°C]である。寝苦しさが日最低気温と相関するとした場合、 θ_{\min} を日最低気温[°C]

表 6 日最高気温と各種の暑熱障害の出現率との関係

| | 1. だるさ・疲労感 | 2. たちくらみ・めまい | 3. 無気力・いらいら | 4. 熱っぽさ | 5. 食欲不振 | 6. むくみ | 7. 下痢・便秘 | 8. 寝苦しさ |
|-----------------------------------|------------|--------------|-------------|---------|---------|--------|----------|---------|
| a_o [-] | 0.475 | 0.159 | 0.341 | 0.224 | 0.141 | 0.157 | 0.176 | 0.138 |
| θ_a [°C] | 26.9 | 26.9 | 29.6 | 26.9 | 28.7 | 30.7 | 31.7 | 29.4 |
| 位置 | 0-1-14 | 0-1-14 | 7-0-8 | 0-1-14 | 4-0-11 | 9-0-6 | 14-0-1 | 6-0-9 |
| $(\Delta a/\Delta \theta)$ [-/°C] | 0.054 | 0.008 | 0.053 | 0.030 | 0.017 | -0.005 | 0.098 | 0.095 |
| t | 5.5 | 0.9 | 0.6 | 3.1 | 1.2 | 0.0 | - | 3.6 |
| p 値 | 0.000 | 0.345 | 0.525 | 0.002 | 0.220 | 0.974 | - | 0.000 |
| R^2 | 0.037 | 0.001 | 0.010 | 0.012 | 0.003 | 0.000 | 0.001 | 0.052 |
| N | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 |

表 7 日最低気温と各種の暑熱障害の出現率との関係

| | 1. だるさ・疲労感 | 2. たちくらみ・めまい | 3. 無気力・いらいら | 4. 熱っぽさ | 5. 食欲不振 | 6. むくみ | 7. 下痢・便秘 | 8. 寝苦しさ |
|-----------------------------------|------------|--------------|-------------|---------|---------|--------|----------|---------|
| a_o [-] | 0.459 | 0.186 | 0.402 | 0.229 | 0.152 | 0.158 | 0.188 | 0.142 |
| θ_a [°C] | 17.6 | 25.6 | 25.9 | 18.8 | 21.4 | 25.1 | 25.7 | 22.4 |
| 位置 | 0-1-14 | 14-0-1 | 14-0-1 | 1-0-14 | 5-0-10 | 13-0-2 | 14-0-1 | 7-0-8 |
| $(\Delta a/\Delta \theta)$ [-/°C] | 0.035 | -0.131 | -0.717 | 0.021 | 0.008 | -0.028 | -0.211 | 0.084 |
| t | 4.7 | - | - | 2.3 | 0.0 | 0.6 | - | 3.1 |
| p 値 | 0.000 | - | - | 0.022 | 0.961 | 0.576 | - | 0.002 |
| R^2 | 0.028 | 0.001 | 0.003 | 0.009 | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.051 |
| N | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 |

表 8 各種の暑熱障害の出現率および重症度（解析結果まとめ）

| | 1. だるさ・疲労感 | 2. たちくらみ・めまい | 3. 無気力・いらいら | 4. 熱っぽさ | 5. 食欲不振 | 6. むくみ | 7. 下痢・便秘 | 8. 寝苦しさ |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| a_o [-] | 気温と相関 (表 6 参照) | 0.181 ± 0.386 | 0.391 ± 0.488 | 気温と相関 (表 6 参照) | 0.167 ± 0.373 | 0.155 ± 0.363 | 0.181 ± 0.386 | 気温と相関 (表 6 参照) |
| N | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 | 772 |
| s_o [円] | 1,534 (442-5,329) | 1,769 (527-5,942) | 1,511 (460-4,962) | 1,399 (410-4,772) | 1,256 (408-3,865) | 1,518 (473-4,875) | 1,572 (554-4,461) | 1,730 (534-5,605) |
| $\log s_o$ [円] | 3.185 ± 0.540 | 3.248 ± 0.526 | 3.179 ± 0.516 | 3.146 ± 0.533 | 3.099 ± 0.488 | 3.302 ± 0.436 | 3.196 ± 0.453 | 3.238 ± 0.511 |
| N | 492 | 140 | 302 | 242 | 129 | 120 | 140 | 185 |

とすると、以下の式で健康影響を表現できる。

$$d_g = 0.084 \times (\theta_{\min} - 22.4) \times 1730 \quad (\theta_{\min} > 22.4) \quad (4b)$$

なお、解析結果からは、同時に、気温によらず以下の健康影響（月額） d_o [円]が発生するといえる。

$$d_o = (0.475 \times 1534) + (0.181 \times 1769) + (0.391 \times 1511) + (0.224 \times 1399) + (0.167 \times 1256) + (0.155 \times 1518) + (0.181 \times 1572) + (0.138 \times 1730) \quad (5)$$

4. 現時点での気温上昇に伴う健康影響評価

4.1 健康影響の定量化

前節で定式化した気温上昇と軽度の暑熱障害による健康影響との関係式を用いて、東京の気温上昇に伴う健康影響を定量化する。ヒートアイランド現象や地球温暖化に伴う東京の気温上昇は、20 世紀初頭には既に始まっている²⁴⁾。しかし、式(4)は暑熱障害の影響評価に日最高気温を用いるため、現時点まで同じ条件で計測が継続されている気温データが必要となる。そこで、既往の被害算定型の環境影響評価¹³⁾に合わせ、1968-1978 年（中央年:1973 年）を基準期間として、基準期間の 11 年間平均気温と 1998-2008 年（中央年:2003

年）の 11 年間平均気温の差を対象に、東京の 30 年間に及ぶ気温上昇による健康影響を評価する。気温値に 11 年移動平均を採用したのは、太陽活動による短期的な気温変動の影響を除去するためである¹¹⁾。

気温データの一例として、1968-1978 年と 1998-2008 年の 8 月の日最高気温の分布を図 2 に示す。1968-1978 年に比べて 1998-2008 年の方が全体的に最高気温の分布が高温となっていることがわかる。26.9 °C および 29.4 °C を基準温度としてデグリーデーと比較すると、それぞれ 132 °C 日から 144 °C 日、71.2 °C 日から 80.3 °C 日に上昇していた。また、日最低気温 22.4 °C を基準とするデグリーデーは 57.4 °C 日から 79.9 °C 日と大幅に上昇していた。

この気温データに対して、式(4)で推定した個人の月単位の健康影響を、30 日で除算し、東京都区部（2005 年）の人口²³⁾を乗算すれば、30 年間の気温上昇による東京都区部の居住人口の暑熱障害による健康影響が 1 日ごとに推定できる。

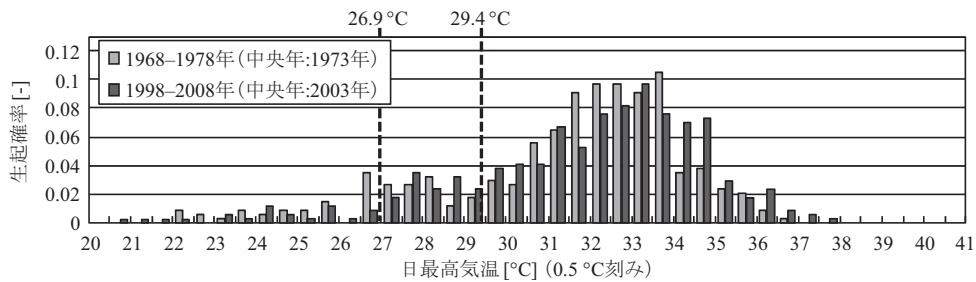


図2 1968-1978年と1998-2008年の8月の日最高気温の分布

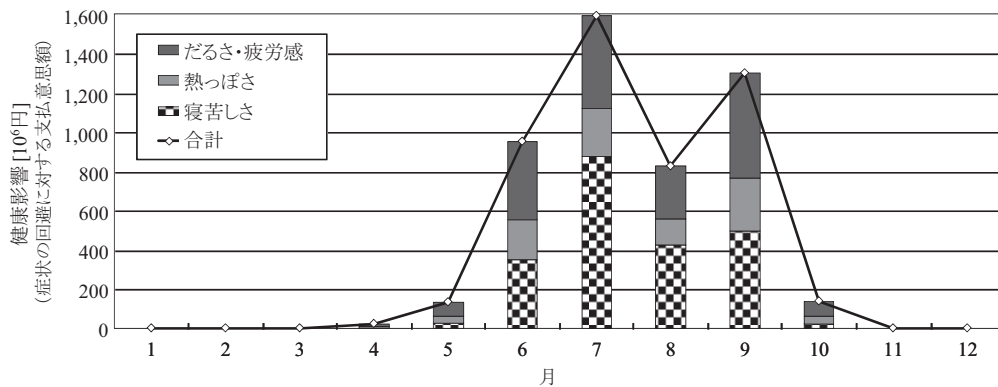


図3 東京の30年間の気温上昇（中央年:1973年→2003年）に伴う軽度の暑熱障害による健康影響の月別評価

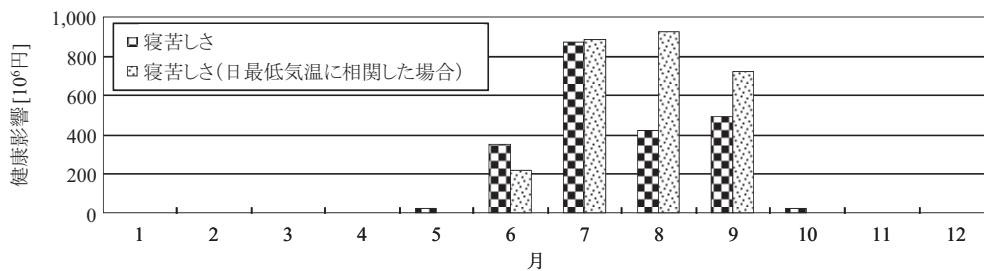


図4 東京の過去30年間の気温上昇に伴う寝苦しさによる健康影響の月別評価の比較

4.2 評価結果

通年で定量化した結果、30年間の東京の気温上昇はだるさ・疲労感で 1.84×10^9 円、熱っばさで 9.32×10^8 円、寝苦しさで 2.18×10^9 円（日最低気温に related case 2.75×10^9 円）の健康影響を及ぼしていた。これらの症状が互いに独立であるとして合計 4.96×10^9 円（同 5.53×10^9 円）の影響となっていることがわかった。月別の結果を図3に示す。また、寝苦しさを日最低気温と related caseした場合の結果を図4に示す。暑熱障害による健康影響は夏季に顕著であり、特に寝苦しさは6-9月に集中する。寝苦しさの被害が最も大きい、これは式(4a)に示したように気温感応度が大きいこと、また日最低気温に related case に関して過去30年間の基準デグリーデーが大幅に上昇したため（前述）であると考えられる。5月や10月に寝苦しさの被害がきわめて小さいのは、現時点ではほとんどの日が寝苦しさが発生する閾値気温を下回るためである。一方、これまで比較可能な形では定量化されていなかっただるさ・疲労感による被害は寝苦しさよりも小さいものの、同じオーダーの被害が発生している可能性があることが示唆された。また、だるさ・疲労感や熱っば

さは6-9月だけではなく、4-5、10-11月にも被害が発生していることが明らかになった。

なお、式(4)は8月の結果に基づいた推定式であるため、短期的な暑熱順化を考慮しておらず、6月などでは被害がより大きい可能性がある。また、今回の調査では年齢による脆弱性の違いが認められなかった（表5参照）が、調査対象者に若年者・高齢者が少数しか含まれていない（表3参照）。そのため、年齢による脆弱性が考慮されていない可能性があり、こうした脆弱性を考慮すると、被害はもっと大きくなる可能性があることに留意したい。

5. 将来の気温上昇に伴う健康影響評価

5.1 擬似温暖化手法による将来気温の予測

将来の被害を予測するには、まず気温を予測する必要がある。地球規模の気候変動を考慮した地域気候の予測は、従来、全球気候モデル(global climate model, GCM)によって計算される将来気候値からの直接的な力学的ダウンスケールが一般的であった。しかし、地域気候では、観測値とGCMによる現在気候計算値との間の誤差が

無視できない場合が多い。近年、擬似温暖化手法²⁶⁾が開発され、観測値に GCM における現在気候計算値と将来気候計算値の差分を加算した値からダウンスケールすることによって、現在の地域気候をより考慮した将来気候を予測できるようになった²⁷⁾。この擬似温暖化手法は、都市域の観測値と良く一致し、気温低減方策の評価にも応用されている²⁸⁾。そこで、本研究でも擬似温暖化手法を用いて将来気温を予測する。

最も暑い 8 月を評価対象期間とする。地域気候モデル(regional climate model, RCM)として WRF V3.0.1.1²⁹⁾を用い、2000–2009 年 8 月および 2070–2079 年 8 月(IPCC 第 4 次評価報告書²⁾の SRES A2 シナリオベース)における関東平野の気温を予測した。主な計算条件を表 9 に示す。なお、擬似温暖化であるため、2070–2079 年の気温は、文字通り 2070–2079 年の予測値ではなく、RCM による 2000–2009 年の気温に GCM³⁵⁾による 70 年後の温暖化差分をダウンスケールした結果を加算した値である。また、温暖化に伴う冷房需要増大による気温上昇(気温と冷房需要との正のフィードバック)は考慮されていない。計算結果である 2000 年代(2000–2009 年)と 2070 年代(2070–2079 年)の東京管区気象台が位置するメッシュにおける 8 月の日最高気温の分布を図 5 に示す。2000 年代の時点で 89%の日最高気温が既に 26.9 °C を超えており、気温の上昇がそのままだるさ・疲労感や熱っぽさの悪化に繋がることが推測される。一方、寝苦しさに関しては、現時点では日最高気温が 38%の日が 29.6 °C を下回っており、従来は気温の上昇が寝苦しさの悪化に必ずしも繋がらない可能性があったが、2070 年代にはそれがわずかに 9%となり、寝苦しい夜が続くことが推測された。

5.2 評価結果と考察

前節と同様に、前述の関数(式(4)参照)を用いて、8 月における、SRES A2 ベースでの今後 70 年間の気温上昇に伴う軽度の暑熱障害による健康影響を評価した。結果を図 6 に示す。過去 30 年間の 8 月の気温上昇は、だるさ・疲労感で 2.68×10^8 円、熱っぽさで 1.36×10^8 円、寝苦しさで 4.21×10^8 円、合計 8.24×10^8 円の健康影響を及ぼした。一方、今後 70 年間の 8 月の気温上昇は、だるさ・疲労感で 2.14×10^9 円、熱っぽさで 1.08×10^9 円、寝苦しさで 3.60×10^9 円、合計 6.82×10^9 円の健康影響を及ぼすと推測された。いずれの症状についても被害量は 1 桁近く増加した。現時点と同じく、寝苦しさが最も大きなウェイトを持つが、だるさ・疲労感は昼間気温が上昇する将来においてはさらに大きな被害をもたらすことが明らかになった。ただし、ここでは短期的な暑熱順化・年齢による脆弱性を考慮していない。また、逆に、長期的な暑熱順化により、被害が縮小する可能性もある。

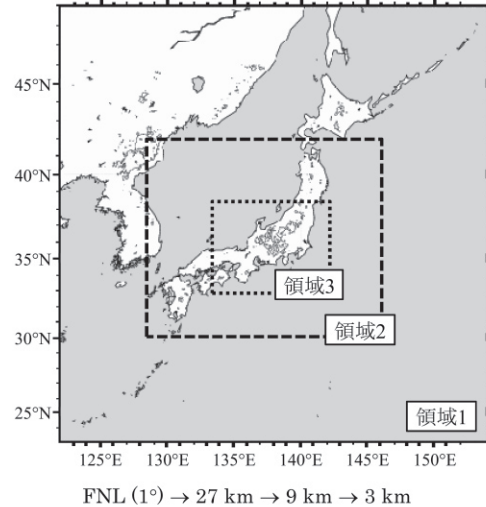
6. おわりに

6.1 結論

軽度の暑熱障害を 8 種類の自覚症状(だるさ・疲労感、たちくらみ・めまい・ふらつき、無気力・いらいら、熱っぽさ、食欲不振、むくみ、下痢・便秘、寝苦しさ)に分類し、東京都区部居住者を対象に、インターネット調査を通じて CVM により症状回避のための支払意思額を評価し、気温の関係を解析した。

8 種類の症状の出現率と気温の関係を評価したところ、だるさ・疲労感、熱っぽさは日最高気温と相関し、ともに 26.9 °C 以上にな

表 9 WRF の主な計算条件

| | |
|--------|--|
| 計算領域 |  |
| | FNL (1°) → 27 km → 9 km → 3 km |
| 長波放射 | RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) ³⁰⁾ |
| 短波放射 | Dudhia スキーム ³¹⁾ |
| 地表面 | Noah LSM (Land-Surface Model) ³²⁾ |
| 雲微物理過程 | WSM3 class スキーム ³³⁾ |
| 積雲過程 | Kain-Fritsch パラメタリゼーション ³⁴⁾ |

ると 1 °C 上昇につきだるさ・疲労感は 5.4%ずつ、熱っぽさは 3.0%ずつ上昇した。寝苦しさは日最高気温と相関すると考えると 29.6 °C 以上で 9.5%ずつ、日最低気温と相関すると考えると 22.4 °C 以上で 8.4%ずつ上昇した。既往研究によると、熱中症の閾値は最高気温が約 25 °C の条件³⁾に存在、睡眠障害の閾値は深夜 0 時気温が約 26 °C の条件⁹⁾に存在するため、得られた閾値気温は妥当であると考えられる。ただし、日最高気温が高い期間に調査が実施されたため、表 6 に示した閾値気温の位置から判断する限り、だるさ・疲労感および熱っぽさの実際の閾値最高気温はもう少し低い可能性がある。また、本研究では、一般に広く採用されている日最高気温と日最低気温を暑熱指標としたが、寝苦しさは双方とも同程度の p 値を示したため、より適切な指標(たとえば深夜 0 時気温⁹⁾)があることが示唆された。

一方、他の症状の出現率およびすべての症状の重症度は気温と相関しない結果となった。そもそも気温と相関しない可能性も存在するが、今回の調査が限られた気温区間でおこなったため閾値を見いだせなかった、あるいは、調査日ごとに能動的に調査に参加したモニターを回答者としたため重症者が回答に参加しなかった可能性もある。

次に、統計を用いて過去 30 年間の気温上昇に伴う東京の健康影響の被害を評価した。その結果、寝苦しさの被害が大きく 2.18×10^9 円に達したが、だるさ・疲労感で 1.84×10^9 円と寝苦しさと同程度の被害であることが示唆された。熱っぽさは 9.32×10^8 円とやや小さかった。被害算定型手法での影響評価¹³⁾における睡眠障害の評価結果と本研究の寝苦しさの評価結果を対応させると、疲労(だるさ・疲労感)による被害は、睡眠障害の次に大きい可能性があり、冷房需要に伴うエネルギー消費の増大や重度の熱中症の増加による被害よりも大きい可能性があることがわかった。

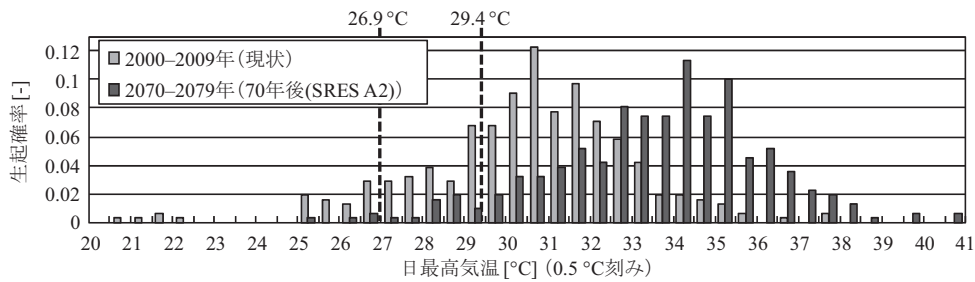


図5 2000年代と2070年代の8月の日最高気温の分布

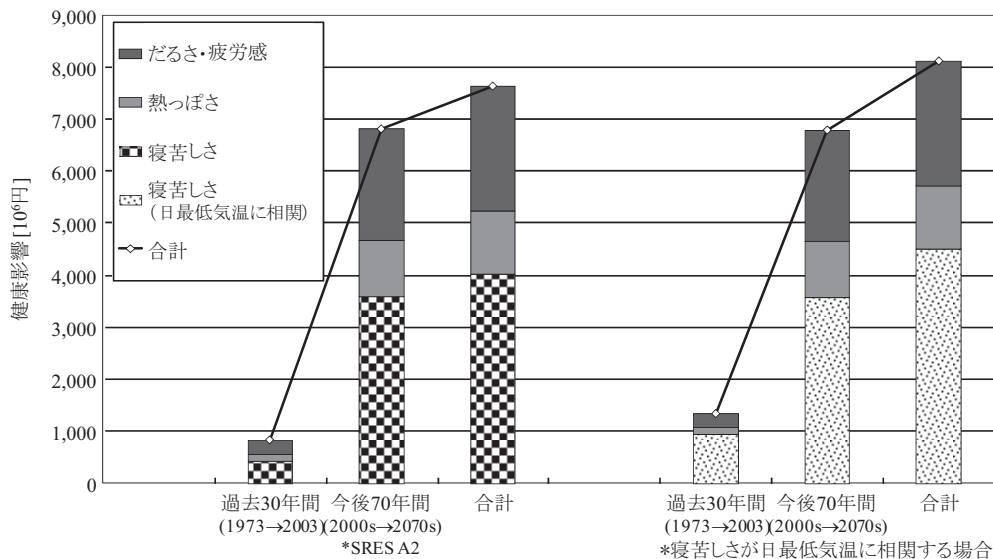


図6 現時点および将来の8月における軽度の暑熱障害による健康影響の評価

また、IPCC 第4次評価報告書のSRES A2ベースでの今後70年間の気温上昇を気象シミュレーションにより推測し、70年後の軽度の暑熱障害の被害を評価した。その結果、寝苦しさ、だるさ・疲労感、熱っぽさともに被害は1桁近く増加することがわかった。

6.2 今後の課題

だるさ・疲労感（疲労に相当すると考えられる）は既に大きな健康影響をもたらしていることが推定されたが、さらに、昼間気温が上昇する将来において、被害は深刻化する可能性があることがわかった。しかし、その影響を、気温上昇に伴う他の影響と合理的に比較するためには、DALYの損失を計算して被害算定型影響評価手法で評価することが必要である。そのためには、だるさ・疲労感に対応する疾患を定義し、罹患率を調査するとともに重篤度や有病期間を設定する必要がある。

熱っぽさ（軽度の熱中症に相当か）の被害は、だるさ・疲労感よりは小さいが、既往研究¹³⁾と比較すると、睡眠障害、だるさ・疲労感について大きい可能性がある。熱っぽさについてもDALYでの評価が望まれる。

以上の軽度の暑熱障害は原発性ではなく、他の暑熱障害に誘発されて発生している可能性も否めない。そのため単純にそれらの被害を積み上げてしまうと過大評価となってしまう恐れがある。疾患の定義の際に各疾患の併存性の検討も必要になると考えられる。

さらに、夏期以外の評価や将来の評価を実施する際は、暑熱順化

の問題や年齢による脆弱性も考慮する必要がある。熱中症の短期的な暑熱順化に関しては近年、定量的な評価^{36,37)}が進められてきているが、長期的な暑熱順化や本研究で対象とした軽度の暑熱障害に関しては未だ定量的な研究はおこなわれていない。年齢による脆弱性についても熱中症では評価事例³⁶⁾が見られるが、軽度の暑熱障害では存在しない。正確に評価し、さらに現実の緩和策に結びつけるためには、暑熱順化や年齢による脆弱性に関する研究が必要であると考えられる。また、適応策の観点からは、気温以外の影響因子を考慮した解析⁹⁾も必要となるであろう。

謝辞

本研究は、筑波大学大学院修士課程の高田智行氏および東京大学大学院修士課程の茂泉優氏（ともに当時）とともに遂行された。また、実施にあたっては、環境省の地球環境研究総合推進費(S-5-3)の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 茂泉優, 松橋隆治, 吉田好邦, 井原智彦: ヒートアイランド現象に伴う熱中症の現状とその将来予測, 第26回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, (CD-ROM), 2010.1
- 2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4), 2007, http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_and_data_re

- ports.shtml, (参照 2011-01-01)
- 3) 環境情報科学センター: 平成 17 年度ヒートアイランド現象による環境影響に関する調査検討業務報告書, 環境省, 2006, <http://www.env.go.jp/air/report/h18-06/index.html>, (参照 2011-01-01)
- 4) 国立環境研究所: 温暖化に関するアンケート調査 (平成 15 年度実施), 2003, http://www.nies.go.jp/impact/jp_quest.html, (参照 2011-01-01)
- 5) Ihara, T., Kikegawa, Y., Asahi, K., Genchi, Y., Kondo, H.: Changes in year-round air temperature and annual energy consumption in office building areas by urban heat island countermeasures and energy-saving measures, *Applied Energy*, Vol.85, No.1, pp.12-25, 2008.1
- 6) Ihara, T., Kikegawa, Y., Asahi, K., Genchi, Y., Kondo, H.: Effect of air temperature decrease and energy saving under installing urban heat island countermeasures, *Proceedings of the 16th Regional Conference of Clean Air and Environment in Asian Pacific Area*, (CD-ROM), 2005.8
- 7) 環境情報科学センター: 平成 18 年度ヒートアイランド現象の実態把握及び対策評価手法に関する調査報告書, 環境省, 2007, <http://www.env.go.jp/air/report/h19-02/index.html>, (参照 2011-01-01)
- 8) World Health Organization (WHO): Metrics: Disability-Adjusted Life Year (DALY), 2011, http://www.who.int/healthinfo/global_burden_disease/metrics_daly/en/, (参照 2011-01-01)
- 9) 岡野泰久, 井原智彦, 玄地裕: 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, Vol.3, pp.22-33, 2008.9
- 10) 伊坪徳宏, 稲葉敦 (編): ライフサイクル環境影響評価手法, 産業環境管理協会, 2005.
- 11) 井原智彦, 玄地裕: 被害算定型ライフサイクル影響評価手法によるヒートアイランド現象の環境影響評価, 日本建築学会環境系論文集, Vol.73, No.634, pp.1407-1415, 2008.12
- 12) Genchi, Y., Ihara, T.: Environmental impact assessment of urban air temperature increase based on endpoint-type life cycle impact (Part 1) – Its framework, *The 7th International Conference on Urban Climate Preprints*, (CD-ROM), 2009.6
- 13) Ihara, T., Genchi, Y.: Environmental impact assessment of urban air temperature increase based on endpoint-type life cycle impact (Part 2) – Quantification of environmental impact in Tokyo, *The 7th International Conference on Urban Climate Preprints*, (CD-ROM), 2009.6
- 14) American Psychiatric Association: DSM-IV-TR 精神疾患の診断・統計マニュアル, 高橋三郎・大野裕・染矢俊幸訳, 新訂版, 医学書院, 2004
- 15) 内山真 (編): 睡眠障害の対応と治療ガイドライン, じほう, 2002
- 16) 環境省: 熱中症環境保健マニュアル (2009 年 6 月改訂版), 2008, http://www.env.go.jp/chemi/heat_stroke/manual.html, (参照 2011-01-01)
- 17) 森田茂徳: 熱中症・その予防と治療のポイント, *救急医療ジャーナル*, Vol.4, No.5, pp.8-11, 1996.10
- 18) 福家伸夫: 薬物による熱中症, *救急医療ジャーナル*, Vol.4, No.5, pp.23-26, 1996.10
- 19) 川原貴: スポーツにおける熱中症, *臨床スポーツ医学*, Vol.14, No.7, pp.735-740, 1997.7
- 20) 安岡正蔵ほか: 熱中症(暑熱障害)I-III度分類の提案. *救急医学*, Vol.23, No.9, pp.1119-1123, 1999.9
- 21) 夏バテ防止, 対策&解消法! 夏バテの症状, 2006, <http://natsubate.x8q.net/001/ent1062.html>, (参照 2011-01-01)
- 22) 栗山浩一: 環境の価値と評価手法—CVM による経済評価, 北海道大学図書刊行会, 1998
- 23) 総務省 統計局: 平成 17 年国勢調査, 2007, <http://www.stat.go.jp/data/kokusei/2005/index.htm>, (参照 2011-01-01)
- 24) 気象庁: 気象統計情報, 2010, <http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>, (参照 2011-01-01)
- 25) Ihara, T., Genchi, Y., Sato, T., Yamaguchi, K., Endo, Y.: City-block-scale sensitivity of electricity consumption to air temperature and air humidity in business districts of Tokyo, Japan, *Energy*, Vol.33, No.11, pp.1634-1645, 2008.11
- 26) Kimura, F., Kitoh, A.: Downscaling by pseudo global warming method, *The Final Report of the ICCAP*, Research Institute for Human and Nature, 2007
- 27) 佐藤友徳: 疑似温暖化実験. *天気*, Vol.57, No.2, pp.37-38, 2010.2
- 28) 飯塚悟, 金原和矢, 日下博幸, 原政之, 秋本祐子: 夏季の名古屋の温暖環境を対象とした現状再現の精度検証と疑似温暖化手法を併用した将来予測の試み 領域気候モデル WRF による名古屋都市圏の温暖環境シミュレーション (その 1), *日本建築学会環境系論文集*, Vol.75, No.647, pp.87-93, 2010.1
- 29) The Weather Research & Forecasting Model (WRF), 2010, <http://www.wrf-model.org>, (参照 2011-01-01)
- 30) Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., Clough, S. A.: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 102, No.D14, pp.16663-16682, 1997.7
- 31) Dudhia, J.: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *Journal of the Atmospheric Science*, Vol.46, No.20, pp.3077-3107, 1989.10
- 32) Chen, F., Dudhia, J.: Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation and sensitivity, *Monthly Weather Review*, Vol.129, No.4, pp.569-585, 2001.4
- 33) Hong, S.-Y., Dudhia, J., Chen, S.-H.: A revised approach to ice-microphysical processes for the bulk parameterization of cloud and precipitation, *Monthly Weather Review*, Vol.132, No.1, pp.103-120, 2004.1
- 34) Kain, J. S., Fritsch, J. M.: Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, *The representation of cumulus convection in numerical models*, Emanuel, K. A., Raymond, D. J. (eds), American Meteorological Society, 1993
- 35) Nozawa, T., Nagashima, T., Ogura, T., Yokohata, T., Okada, N., Shiogama, H.: Climate change simulations with a coupled ocean-atmosphere GCM called the model for interdisciplinary research on climate: MIROC, CGER's Supercomputer Monograph Report 12, Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, 2007
- 36) 中井誠一, 新矢博美, 芳田哲也, 寄本明, 井上芳光, 森本武利: スポーツ活動および日常生活を含めた新しい熱中症予防対策の提案—年齢, 着衣及び暑熱順化を考慮した予防指針, *体力科学*, Vol.56, No.4, pp.437-444, 2007.
- 37) 廉林篤, 二浦尾友佳子, 鳴海大典, 下田吉之, 水野稔: 都市域における気温変化が人間の健康面に及ぼす影響, 第 36 回空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp.25-28, 2007.

(2010 年 9 月 6 日原稿受理, 2010 年 12 月 21 日採用決定)