

令和元年6月18日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03069

研究課題名(和文) 簡易暑熱順化トレーニング法開発とその実用化にむけたコベネフィット評価

研究課題名(英文) Development of new preventive methods for hyperthermia and evaluation of Co-benefit of its autonomous adaptation

研究代表者

本田 靖 (Honda, Yasushi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：20165616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,500,000円

研究成果の概要(和文)：暑熱下運動時の新しい暑熱対策方法として、1)冷気吸入法は、深部体温上昇を抑制する、2)下肢冷却法は、運動時の呼吸代謝応答や主観的な辛さや温度感覚を改善する、3)下肢段階的着圧タイツ着用は、体温上昇時の換気亢進反応を抑制すること、などで有効であることが示唆された。新しいシミュレーション方法によって熱関連超過死亡を評価すると、気温1.5℃上昇に比べ、4.0℃上昇では今世紀末に超過死亡数がおよそ倍近くとなった。ただし、50%自動的適応を仮定すると、仮定しない場合に比べて約2割減少することが明らかとなった。アジア、欧米の検討から、自動的適応に関して、推測が単純でないことも新たに明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化対策は地球環境問題の中でも最重要の課題と考えられている。対策として、個人で行なう方法と行政が行なう方法を平行して開発する必要がある。個人としてできる方法として、新たな3つの方法の生理学的根拠を提示できたことには意義があると考えられる。また、行政的な対策は、evidence based policy makingの考え方に則って行われなくてはならず、そのためには、科学的な裏付けのある方法で気候変動の影響評価・将来予測を行う必要がある。本研究は、世界で初めての熱関連超過死亡全球将来予測法を発展させたもので、今後の政策の基礎として用いられるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：As new developed methods for preventing hyperthermia during exercise, 1) inhaling cold air, which could lead to suppression of increasing brain temperature, 2) cooling lower leg, which could lead to improvement in thermal sensation and suppression of increase in ventilation, 3) lower leg compression garment, which could lead to suppression of increase in ventilation, would be effective. Using the new simulation method, we estimated that the heat-related excess mortality in case of 4.0℃ increase at the end of the century was twice as much compared with 1.5℃ increase. The mortality was, however, about 20% lower when we assumed 50% autonomous adaptation. Based on Asia, Europe and US analyses, we found that estimation of autonomous adaptation was not straightforward.

研究分野：環境保健学

キーワード：地球温暖化 暑熱 換気量

## 1. 研究開始当初の背景

2007年ノーベル平和賞を受賞したIPCC(気候変動に関する政府間パネル)によれば、2100年までの世界平均気温の上昇は約5.8になると予測されている。熱中症予防に関しては、日本体育協会での予防指針としてまとめられており、それによると日本における通常の気候(湿度)においては、気温31度において厳重警戒(激しい運動は中止)であり、それをそのまま現場サイドにあてはめた場合、現在においても関東以南においては、7・8月期のほとんどの体育授業、各種スポーツ大会は開催できなくなり、いわんや将来における温暖化においては然りである。さらに、2020東京オリンピックの開催時期が7月末から8月初旬の最も暑い時期に行われることから、暑熱下での体育・スポーツ場面において実践可能な熱中症予防対策の早期確立は喫緊の課題である。

熱中症予防法で、行政からの対応として、春から秋における運動時の熱中症に注意すべき時間と場所、すなわち熱中症ハザードマップを作成し、それにより事前の注意を周知すること、が重要と考えられる。我々は、過去の気候情報と地域での熱中症発症との関係をモデル化し、近未来での気候予想と熱中症やそれが健康や社会に及ぼす影響について検討してきているが、地域毎の気候と熱中症発症を関係づけるシミュレーションモデルについてはまだ開発途上である。

熱中症予防法での個々人の対応に関して、我々の先行研究において、暑熱順化後には安静時および運動時の深部温度低下および最大下運動時の代謝量が低下することを見出している。このことから、暑熱対策によって、室内環境においてはクーラーの使用を抑える、すなわちクーラーの設定温度を上げることが可能であるかもしれない。しかしながら、簡便かつ効果的な、暑熱順化方法や新しい暑熱対策法及びその奏功メカニズムについては明らかでなく、これらが奏功した際の社会的な効果(コベネフィット(付加的利益))についても明らかではない。

## 2. 研究の目的

スポーツ・体育現場における新しい熱中症対策を近未来気候変化と熱中症発症との関係をシミュレーションしつつ、緊急に検討する必要がある。本研究では、1)運動時の暑熱耐性向上のための新しい対策方法開発、平行して、2)暑熱対策や適応を加味した、地域毎の気候と熱中症発症に関する新しいシミュレーションモデルを検討することである。

## 3. 研究の方法

1)暑熱対策方法開発として、(1)運動時の冷気吸入、(2)運動間の活動筋冷却、(3)下肢段階的着圧タイツ(Compression garment; CG)、の効果について検討した。それぞれ、

(1)被験者は健康な男性9名で、室温38℃、湿度50%の暑熱環境下で、半仰臥位で行う自転車エルゴメーターを用いた50%VO<sub>2</sub>peakの一定負荷運動を冷気(10℃)吸入(Cold-air条件)、もしくは室内空気(38℃)吸入(Hot-air条件)の2条件下で生理的反応を比較した。

(2)暑熱下における短時間高強度運動間の下肢冷却がその後の運動時の運動パフォーマンスに与える影響について、運動間の回復法としてよく用いられる軽運動を行う場合と異なるかどうか比較することで検討した。健康な成人10名を被験者とした。気温35℃の暑熱環境下において短時間高強度運動を60分間の休息を挟んで2回行うものとし、運動間の休息時に下肢冷却を行う条件と軽運動を行う条件の2条件を行った。

(3)被験者は9名として、日射及び輻射を伴う暑熱環境下において、60分間の一定負荷運動(60%VO<sub>2</sub>max)をCGを着用する条件(CG条件)と着用しない条件(Control条件)の2条件下で行った。

### 2)気候と熱中症発症に関する新しいシミュレーション方法開発

世界気候研究計画(WCRP)の第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)に提出された予測シミュレーションの実験結果を精査して、高めの予測値を出すもの、低めの予測値を出すもの、中間的なものをそろえて、用いるべきモデルを決定した。また、コベネフィット効果による介入が可能になった場合に使用できるようなモデルの開発に関しては、既にある全球モデルについて、これまで評価できていなかった熱帯地域でも適用可能であることを確認し、ほぼ全球をカバーできる状況になった。

平成27年度、熱関連超過死亡予測モデルに組み込むためのShared Social Pathways(SSPs)にそった組別死亡率予測データをInternational Institute for Applied Systems AnalysisのWolfgang Lutzらのグループが作成した。そのデータを手に入れることができたので、他の予測値などとの整合性を検討した。次に、この国別死亡率予測データを、既に検討済みの3種類の全球気候予測モデル(GFDL-ESM2M、IPSL-CM5A-LR、MIROC5)と整合させて将来の熱関連超過死亡数を予測するため、0.5度のグリッド別死亡数に変換した。これらに我々の開発した熱関連超過死亡リスク関数を組み合わせ、更に温暖化の程度としてRepresentative Concentration Pathwaysの2.6と6.0を用いて将来影響を予測した。扱った期間は現状として1981-1990年、1991-2000年、将来予測として2021-2030年、2031-2040年、と10年ごとの予測を2091-2099年まで行った。ただし、この計算には適応の影響は含めていない。

気温と死亡との関連が形成するV字型の死亡リスクが最低となる気温、すなわち至適気温が温暖化とともに右方シフトするという自動的適応と、能動的に熱波警報システムや暑熱順化トレーニングなどによって暑熱リスクを低下させる、政策的適応の二つについて将来予測を行った。まず、自動的適応については、産業革命前の気温を基準として、それから1.5℃上昇にあたるのが、MIROC5を用いた場合のRCP2.5シナリオと言われているので、パリ協定でも目標となっているこの1.5℃ターゲットでの熱関連超過死亡数を予測した。

一方、同じMIROC5、RCP2.6ではあるが、緩和と適応の困難度が最も低いSSP1について、適応なしの場合と政策的適応によりリスクが一律に10%減少した場合の熱関連超過死亡数を予測した。

なお、自動的適応に関しては、共同研究によって新たな知見が得られたのでそれについても報告する。日最高気温と総死亡との関連を評価するに当たり、数日間の持ち越し効果を含む気温の影響を評価するため、distributed lag non-linear modelを用いて、至適気温の経時的変化を多数の国・地域で評価した。

#### 4. 研究成果

##### 1) 暑熱対策方法開発

暑熱環境下の一定負荷運動時における冷気吸入は、深部体温上昇を抑制し、換気量の増加さらには脳血流反応の低下を抑制することが示唆された。このことから、暑熱下運動時に冷気吸入を行うことは、暑熱下での運動パフォーマンス低下を防ぐ有効な手段となることが考えられる。

また、暑熱下での短時間高強度運動後に下肢冷却を行うことで、軽運動を行う場合と比較して冷却後の運動パフォーマンスに差はないが、運動時の呼吸代謝応答が抑えられること、さらに運動前の主観的な辛さや温度感覚が改善することが示唆された。

平均皮膚温及び下肢の皮膚温はCG条件でControl条件よりも高値を示したが、食道温、心拍数、主観的指標は条件間で差は見られなかった。運動終盤において、換気量はCG条件でControl条件よりも低値を示し、呼気終末二酸化炭素分圧はCG条件でControl条件よりも高値を示した。したがって、CGの着用により体温上昇時の換気亢進反応及び動脈血中二酸化炭素分圧の低下が抑制される可能性が示唆され、暑熱下における運動時の運動パフォーマンス低下や熱中症の予防に貢献できる可能性を示された。

##### 2) 気候と熱中症発症に関する新しいシミュレーション方法開発

適応を含めない予測については、どのSSPにおいても、RCPが2.6から6.0になると今世紀末に超過死亡数がおよそ倍近くとなった。SSPの間では、2030年代から相違が現れ始め、RCP2.6の場合には世紀末にはSSP1で約45万人、SSP2で約55万人、SSP3になると約74万人となった。

自動的適応に関しては、適応がなければ2100年に全世界で約52万人が死亡すると予測されたのに対し、50%適応を仮定すると、約35万人となった。政策的適応に関しては、適応なしでは今世紀末に全世界で約45万人であるが、適応によって約40万人に低下することが明らかとなった。

自動的適応に係わる至適気温の推移については以下の結果が得られた。日本の47都道府県においては、基本的に至適気温は右方シフトしていたが、主に近畿、中四国地方では最近になってそのスピードが上がってきていた。一方、韓国においては、1990年代がほぼ横ばい、それ以降は左方シフトが認められ、特にBusan、Incheon、Daeguでその傾向が顕著であった。オーストラリアは都市によって全くパターンが異なり、Brisbaneでは2000年まで左方シフト、それ以降右方シフトに転じていた。Melbourneでは基本的に左方シフトが続いていた。以上のように、ここ数十年は気候が温暖化に向かっているにもかかわらず、日本以外ではそれに呼応した至適気温の右方シフトが認められなかった。このことは、自動的適応を一律に全球で当てはめることができないことを示しており、今後、さらなる詳細な研究が必要なが明らかとなった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計16件)

Takakura J, Fujimori S, Takahashi K, Hijioka Y, Honda Y, Site-specific hourly resolution wet bulb globe temperature reconstruction from gridded daily resolution climate variables for planning climate change adaptation measures. Int J Biometeorol. 2019 Jun; 63(6):787-800. doi: 10.1007/s00484-019-01692-3. Epub 2019 Feb 23. (査読有)

Tsuiji B, Hoshi Y, Honda Y, Fujii N, Sasaki Y, Cheung SS, Kondo N, Nishiyasu T, Respiratory

mechanics and cerebral blood flow during heat-induced hyperventilation and its voluntary suppression in passively heated humans. *Physiol Rep*. 2019 Jan; 7(1):e13967. doi: 10.14814/phy2.13967. ( 査読有 )

Iguchi JA, Seposo XT, Honda Y, Meteorological factors affecting dengue incidence in Davao, Philippines. *BMC Public Health*. 2018 May 15; 18(1):629. doi: 10.1186/s12889-018-5532-4. ( 査読有 )

Chung Y, Yang D, Gasparri A, Vicedo-Cabrera AM, Fook Sheng Ng C, Kim Y, Honda Y, Hashizume M, Changing Susceptibility to Non-Optimum Temperatures in Japan, 1972-2012: The Role of Climate, Demographic, and Socioeconomic Factors. *Environ Health Perspect*. 2018 May 2; 126(5):057002. doi: 10.1289/EHP2546. ( 査読有 )

Kim Y, Ng CFS, Chung Y, Kim H, Honda Y, Guo YL, Lim YH, Chen BY, Page LA, Hashizume M, Air Pollution and Suicide in 10 Cities in Northeast Asia: A Time-Stratified Case-Crossover Analysis. *Environ Health Perspect*. 2018 Mar 6; 126(3):037002. doi: 10.1289/EHP2223. ( 査読有 )

Gasparri A, Guo Y, Sera F, Vicedo-Cabrera AM, Huber V, Tong S, de Sousa Zanotti Stagliorio Coelho M, Nascimento Saldiva PH, Lavigne E, Matus Correa P, Valdes Ortega N, Kan H, Osorio S, Kyselý J, Urban A, Jaakkola JJK, Rytty NRI, Pascal M, Goodman PG, Zeka A, Michelozzi P, Scortichini M, Hashizume M, Honda Y, Hurtado-Diaz M, Cesar Cruz J, Seposo X, Kim H, Tobias A, Iñiguez C, Forsberg B, Åström DO, Ragettli MS, Guo YL, Wu CF, Zanobetti A, Schwartz J, Bell ML, Dang TN, Van DD, Heaviside C, Vardoulakis S, Hajat S, Haines A, Armstrong B, Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet Health*. 2017 Dec; 1(9):e360-e367. doi: 10.1016/S2542-5196(17)30156-0. ( 査読有 )

Lee JY, Park EH, Lee S, Ko G, Honda Y, Hashizume M, Deng F, Yi SM, Kim H, Airborne Bacterial Communities in Three East Asian Cities of China, South Korea, and Japan. *Sci Rep*. 2017 Jul 17; 7(1):5545. doi: 10.1038/s41598-017-05862-4. ( 査読有 )

Fujii N, Nikawa T, Tsuji B, Kenny GP, Kondo N, Nishiyasu T, Wearing graduated compression stockings augments cutaneous vasodilation but not sweating during exercise in the heat. *Physiol Rep*. 2017 May; 5(9). pii: e13252. doi: 10.14814/phy2.13252. ( 査読有 )

Dang TN, Seposo XT, Duc NH, Thang TB, An DD, Hang LT, Long TT, Loan BT, Honda Y, Characterizing the relationship between temperature and mortality in tropical and subtropical cities: a distributed lag non-linear model analysis in Hue, Viet Nam, 2009-2013. *Glob Health Action*. 2016 Jan 13; 9: 28738. doi: 10.3402/gha.v9.28738. eCollection 2016. ( 査読有 )

Imai C, Barnett AG, Hashizume M, Honda Y, The Role of Influenza in the Delay between Low Temperature and Ischemic Heart Disease: Evidence from Simulation and Mortality Data from Japan. *Int J Environ Res Public Health*. 2016 Apr 28; 13(5). pii: E454. doi: 10.3390/ijerph13050454. ( 査読有 )

Seposo XT, Dang TN, Honda Y, Effect modification in the temperature extremes by mortality subgroups among the tropical cities of the Philippines. *Glob Health Action*. 2016 Jun 28; 9: 31500. doi: 10.3402/gha.v9.31500. eCollection 2016. ( 査読有 )

Seposo XT, Dang TN, Honda Y, Evaluating the Effects of Temperature on Mortality in Manila City (Philippines) from 2006-2010 Using a Distributed Lag Nonlinear Model. *Int J Environ Res Public Health*. 2015 Jun 16; 12(6):6842-57. doi:10.3390/ijerph120606842. ( 査読有 )

Kayaba M, Kondo M, Honda Y, Characteristics of elderly people living in non-air-conditioned homes. *Environ Health Prevent Med*, 20(1):68-71, 2015. doi:10.1007/s12199-014-0426-2. ( 査読有 )

水口恵美子, 中澤浩一, 萱場桃子, 近藤正英, 本田 靖, 夏季における高齢者の冷房装置使用

の調査：2010-2011 の比較 日本生気象学会 50(1):9-21, 2014. (査読有)

Fujii N, Honda Y, Komura K, Tsuji B, Sugihara A, Watanabe K, Kondo N, Nishiyasu T, Effect of voluntary hypocapnic hyperventilation on the relationship between core temperature and heat loss responses in exercising humans. J Appl Physiol, 117(11):1317-1324, 2014, 1152/ japplphysiol.00334.2014. (査読有)

Woodward A, Smith KR, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Olwoch J, Revich B, Sauerborn R, Chafe Z, Confalonieri U, Haines A. Climate change and health: on the latest IPCC report, Lancet, 383(9924): 1185-1189, 2014, 10.1016/S 0140-6736(14) 60576-6. (査読有)

〔学会発表〕(計 13 件)

Honda Y. Heat-related excess mortality and its prevention system. Climate Change and Health Symposium, Miami, USA, Apr 2018.

Honda Y. Prevention of heat-related excess mortality -Intervention. The First Heat Health Forum of Global Heat Health Information Network, Hongkong, China, Dec, 2018.

Honda Y, Hashizume M. Area difference in cold-related excess mortality is related to temperature distribution. 第 77 回日本公衆衛生学会総会, 郡山, 10 月, 2018.

Honda Y, Six years after Fukushima disaster-lessons learned. The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, Sept, 2017. (Invited speech)

Honda Y, Takahashi K, Yoshikawa M, Climate change impact on heat-related mortality. Impacts World 2017, Potsdam, Germany, Oct, 2017.

Honda Y, Climate Change Impact on Health - from S-14 Project. International Forum on Climate Change and Health under the Belt and Road Initiative, Guanzhou, China, December 2017. (Invited Speech)

Honda Y, Heat-related mortality: Impact and adaptation. 10th ASIAHORCs General Meeting and 8th Joint Symposium, Muntinlupa, the Philippines, September, 2016. (Invited Speech)

Honda Y, Heat-related mortality: Impact of climate change and Adaptation. CWB-APCC Workshop on Climate Service for Health, Taipei, Taiwan, October, 2016. (Invited Speech)

Honda Y, New aspect of climate change impact on heat-related mortality. Dasan Conference, Jeju, Korea, November, 2016. (Invited Speech)

本田 靖, 気温と死亡の関連に関するシミュレーション - 季節要因による影響の評価 - . 第 81 回日本民族衛生学会総会, 東京, 11 月, 2016.

Honda Y, Kim H, Climate change impact on heat-related mortality under some RCP scenario. Our Common Future under Climate Change, Paris, France, July 2015.

Honda Y, Takahashi K, Yoshikawa M, Oka K, Takano S, Kim H, Guo YL, Projection of heat-related excess mortality using new climate and population scenarios. Twenty-seventh Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Sao Paulo, Brazil, August-September, 2015.

本田靖, 熱関連死亡の将来予測. 第 54 回日本生気象学会, 名古屋 (招待講演) 11 月, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

本田 靖 (HONDA, Yasushi)  
筑波大学・体育系・教授  
研究者番号：20165616

##### (2) 研究分担者

西保 岳 (NISHIYASU, Takeshi)  
筑波大学・体育系・教授  
研究者番号：90237751

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。