

地球温暖化への適応策として屋外労働の時間帯変更の効果を推計 －増大する暑熱ストレスに対して時間帯変更のみの効果は限定的－

概要

京都大学大学院工学研究科 藤森真一郎 准教授、国立環境研究所 高倉潤也 研究員、花崎直太 同主任研究員、筑波大学 本田靖 教授らの研究グループは、地球温暖化による暑熱ストレスの増大が屋外の労働者に対して与える影響を軽減するために、労働時間帯を早朝にシフトさせる対策をとることによる効果を検証し、論文として発表しました。

検証の結果、仮に温室効果ガスの排出削減が全く行われずに地球温暖化が進行した場合、21世紀後半に暑熱ストレスのレベルを現状と同程度に保ち、経済的影響を避けるためには世界全体の平均ではおよそ6時間程度、労働開始時間を早める（現在の始業時刻が午前9時であれば、午前3時以前に始業時刻を前倒しする）ことが必要であることが分かりました。この結果は、地球温暖化に対する対策として労働時間帯の変更だけで対処することは非現実的であり、地球温暖化そのものを防ぐ対策（緩和策）や、労働時間帯シフト以外の様々な対策（適応策）との組合せが不可欠であることを示唆しています。

本研究成果は、2018年11月21日に米国地球物理学連合（American Geophysical Union）の発行する学術誌「Earth's Future」にオンライン掲載されました[※]。

※ 校正前の段階の受理された論文原稿については、9月19日付けで既に公開されています。

1. 研究の背景

地球温暖化は自然界だけでなく、人々の生活や社会にも大きな影響を及ぼします。このような影響を軽減するための対策は、大きく分けると緩和策と適応策の2種類があります。緩和策とは温室効果ガスの排出量を削減し、地球温暖化の進行を防ぐ対策のことを指します。一方で、適応策とは地球温暖化が進んでしまった場合に、その影響を少なく抑えるためにとる対策のことを指します。これまで、地球温暖化の緩和策についての研究は多く行われてきましたが、適応策についての知見の蓄積はそれほど多くありませんでした。

地球温暖化による暑熱ストレスの増大が労働者に与える影響は、適応策が必要とされている分野の一つです。これまでの研究で、地球温暖化は熱中症のリスクを避けて安全に作業に従事できる時間の割合を減少させ、世界全体の経済にも大きな影響を与える可能性が指摘されています（参考：<http://www.nies.go.jp/whatsnew/20170612/20170612.html>）。屋内の労働については、現在エアコンの普及していない開発途上国も含めて将来エアコンが普及することによって、その影響は軽減されることが期待されます（エアコンを利用することは、一種の「適応策」と解釈できます）。一方で屋外の労働はエアコンを利用することができず、他の適応策が必要となります。

屋外でも実施できる対策の一つとして、労働時間帯を暑い日中から涼しい早朝や夜間に変更することが考えられます。しかし、地球温暖化が進行した場合に、時間帯をシフトさ

せることでどの程度暑熱ストレスの軽減ができるか、どの程度の時間帯シフトが必要であるか、といったことは定量的に評価されていませんでした。そこで、本研究では、(1) 将来地球温暖化が進行した状況において現状と同程度の暑熱ストレスに抑えるには、どの程度の時間帯シフトが必要であるか？ (2) 現実的な範囲の時間帯シフトによって、暑熱ストレスに起因する経済的な影響をどの程度軽減することができるか？についての推計を行いました。

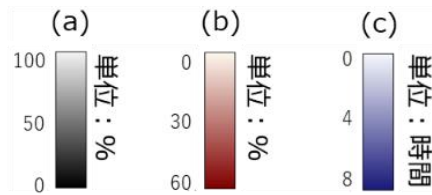
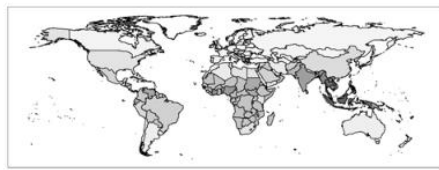
なお、本研究における労働時間帯の変更は、屋外での労働に従事している人々の労働時間帯のみを変更するという仮定しており、サマータイムのように社会全体の時計の時刻をずらすということを想定したものではありません。

2. 研究で用いた手法

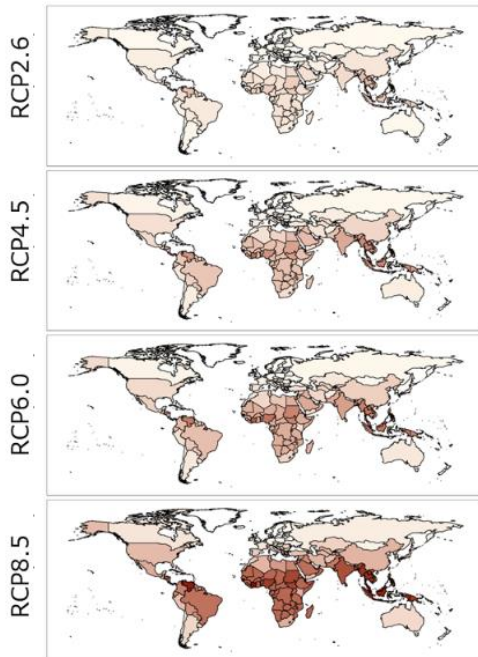
労働時間帯の変更の効果を検証するためには、労働に影響をあたえる暑熱ストレスの値が1日の中でどのように変動するかを推定する必要があります。本研究では、気候モデルの計算結果から得られる気温や湿度などの結果をもとに、統計的機械学習¹の手法を用いて1時間毎のWBGT²（暑さ指数）の値を推定する手法を開発し使用しました。推定された1時間毎のWBGTの値に基づき、熱中症のリスクを避けて安全に作業ができる時間の割合を1時間毎に計算します。そして、1時間毎の安全に作業ができる時間を1日分足し合わせることで、合計の作業可能時間が算出できます（図1）。図1（a）の例では、就業時刻が午前9時から午後5時であれば、熱中症のリスクを避けて安全に作業に従事できる時間の合計は5時間20分といった形で計算できます。図1（b）のように、将来地球温暖化が進んだ状況では、午前9時から午後5時までの就業時刻のままでは、作業に従事可能な時間の合計は大幅に減少してしまいます。しかし仮に終業時刻を午前5時から午後1時に変更すれば、作業に従事可能な時間の合計は5時間20分となり、現状と同じ値を保つことができます。つまり、この例では労働時間帯を4時間前倒しすれば、現状と同じ作業時間を保つことができることとなります。

将来の地球温暖化の進行度合いはRCPシナリオ³と呼ばれる4種類のシナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）を用いて計算を行いました。RCPの後についている数字が大きいほど温暖化が進行することを表し、RCP8.5は温室効果ガス排出削減の努力が全く行われないうちに相当し、RCP2.6は厳しい緩和策を実施することによりパリ協定⁴で合意された2°C目標が達成される場合に相当します。それぞれのシナリオの下で、必要となる労働時間帯のシフト量を求めました。

(a) 現状（2000年代）の
作業従事可能な時間の割合



(b) 作業従事可能な時間の割合の
現状からの減少率（2090年代）



(c) 現状の作業従事可能な時間を保つために
必要な労働時間帯のシフト量（2090年代）

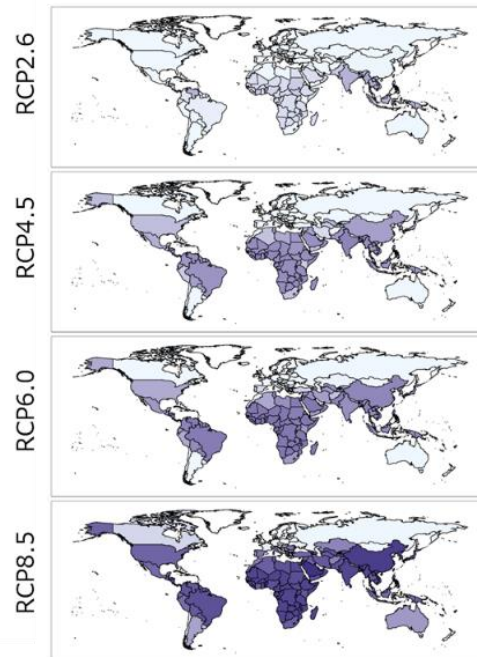


図2：熱中症のリスクを避けて作業に従事可能な時間（年間の平均）への影響と影響を避けるために必要な労働時間帯のシフト量

現状でも既に、特に東南アジアを中心とする低緯度地域において大きな影響を受けていることが分かりますが、地球温暖化の進行に伴い更に大きな影響が予測されています。仮に、この影響を避けようとした場合、特に RCP8.5 シナリオの元では、低緯度地域において6～8時間といった非現実的なシフトが必要になります（各国の人口で重み付けをして平均を取ると5.7時間）。より厳しい緩和策が実施される（RCPの後ろの数字が小さくなる）にしたがい影響は小さくなりますが、影響を完全に避けられるわけではないことも分かりました。RCP2.6 シナリオの元であっても、影響を避けるためには多い国では概ね2～3時間程度の時間帯シフトが必要であると推計されました。

労働時間帯のシフトを行わなかった場合と行った場合での経済的損失を、経済モデルを用いて比較した結果が図3のグラフです。ここでは、労働時間帯のシフトは日の出の時刻を考慮して最大3時間と仮定しています。RCP8.5 シナリオの下では、労働時間帯シフトを導入しない場合（2.4%のGDP損失）に比較すると、労働時間帯シフトを導入することで損失は少なく抑えられるものの1.6%のGDP損失が依然生じることが予測されました。一方、2℃

目標が達成される状況の下では、最大3時間の労働時間帯シフトにより GDP 損失は 0.44% から 0.14%まで軽減されると推計されました。

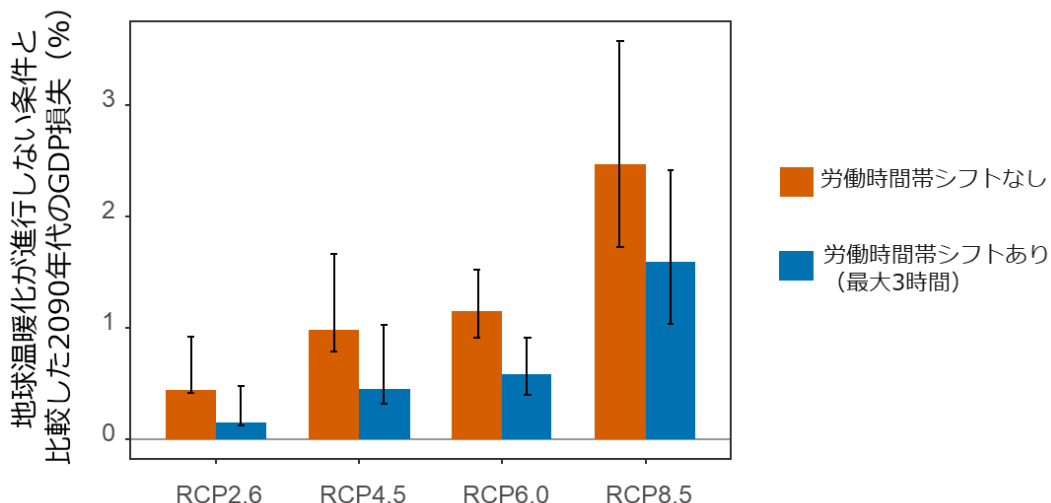


図3：経済モデルによって推計された世界全体での経済影響。棒グラフは5つの異なる気候モデルによる結果の中央値、エラーバーは5つの気候モデルによる幅を表す。労働時間帯を変更するために必要なコストは含まれていない。

これらの結果は、地球温暖化の緩和策が実行されない限りは、労働時間帯のシフトだけで暑熱ストレスの影響を避けることは困難であり、仮に2°C目標に相当する緩和策が実施されたとしても、影響を完全に避けるためには、無視できない量(多い地域では2~3時間程度)の適応策の導入が必要であることを示しています。

なお、経済モデルを用いた分析では、最大3時間の労働時間帯シフトを適応策として導入する仮定をおいていますが、これは3時間以内の時間帯シフトが現実の世界においても実行可能であり、他の副次的な悪影響がないことを意味しません。たとえば生活リズムを変更することは様々な健康上の問題を生じさせることが知られています。また、通勤や電力供給等のインフラストラクチャ、各種のサービスの営業時間、文化的な風習など様々な影響が考えられます。こういった副次的な影響を避けるためにも、労働時間帯を変更することだけで対処することは望ましくなく、地域や産業ごとの事情を考慮した上で、他の様々な適応策も組み合わせることが必要であると考えられます。また、地球温暖化に対する適応策であると思図していない社会の変化が、結果として適応策として機能する場合があります(たとえば、コストダウンを意図して労働を機械化・無人化することは、労働者が強い暑熱ストレスに曝されることを避けることにもつながります)。このように、社会のあり方などを含めてさまざまな要因の考慮が必要ですが、本研究の結果は、適応策を検討するために必要となる情報の一つとして活用されることが期待されます。

4. 研究助成など

本研究は独立行政法人環境再生保全機構の環境研究総合推進費 戦略研究プロジェクト S-14（気候変動の緩和策と適応策の統合的戦略研究）によって実施されました。

5. 発表論文

Takakura, J., Fujimori, S., Takahashi, K., Hasegawa, T., Honda, Y., Hanasaki, N., et al. (2018). Limited role of working time shift in offsetting the increasing occupational-health cost of heat exposure. *Earth's Future*, 6. <https://doi.org/10.1029/2018EF000883>

6. 用語解説

¹統計的機械学習：大量のデータの統計的な性質に基づき、データの予測や分類に用いられる各種の手法のことを指す。ここではサポートベクター回帰という予測に用いられる手法を用いた。

²WBGT：Wet Bulb Globe Temperature の略。気温以外の湿度、風速、日射などの要因を考慮して算出される暑さの指標。暑さ指数とも呼ばれる。この値に基づいて、熱中症のリスクを避けて作業に従事可能な時間の割合の推奨値が定められている。

³RCP シナリオ：Representative Concentration Pathway の略。国際的な研究グループによって開発された温室効果ガスの排出量に関するシナリオ。RCP の後についている数字は、21 世紀末における放射強制力を表す。RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 の下では 21 世紀末における産業革命前から比較した平均気温の上昇は、それぞれおよそ 1.7°C、2.5°C、3.0°C、4.5°C。

⁴パリ協定：気候変動（地球温暖化）対策についての国際的な枠組み。2015 年 12 月の第 21 回気候変動枠組条約締約国会議（COP21）で採択され、2016 年 11 月に発効した。

⁵Asia-Pacific Integrated Model（アジア太平洋統合評価モデル）：国立環境研究所と京都大学の共同研究により、アジア太平洋地域の複数の研究所からの協力を得つつ開発をすすめている大規模シミュレーションモデル。