

気候変動に伴う暑熱ストレスの増大による 屋外労働可能時間短縮に対する適応策の検討

高倉 潤也¹・藤森 真一郎²・高橋 潔²・本田 靖³
長谷川 知子²・肱岡 靖明²・増井 利彦²

¹非会員 国立研究開発法人 国立環境研究所 社会環境システム研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

E-mail: takakura.junya@nies.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 国立環境研究所 社会環境システム研究センター

(〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2)

³非会員 筑波大学 体育系 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

気候変動にともなう暑熱ストレスへの曝露の増大により、特に屋外の労働現場において高強度の身体作業に従事可能な時間が減少し、大きな経済的損失が懸念されている。本研究は、暑熱ストレスによる屋外作業可能時間の短縮を軽減するための適応策として、作業時間帯のシフトと身体作業強度の軽減について仮想的なシナリオの下で検討した。温室効果ガス排出削減を行わず気温上昇が続く仮定の下では、身体作業強度が軽減できない作業では、21世紀末には約6時間作業時間帯をシフトさせることが必要であると予測された。一方で2℃目標に対応する気候変動緩和策が実現できた場合には、必要な作業時間帯シフト量は2時間以内に抑えられると予測された。適応策の困難度を現実的な範囲に抑えるという観点からも、気候変動緩和策の実行が不可欠である。

Key Words : *climate change, heat stress, worktime loss, adaptation*

1. はじめに

気候変動に対する対策として、温室効果ガスの排出を削減し気温の上昇を抑える施策である緩和策については既に多く研究が行なわれ、知見が蓄積されている。一方で気温が上昇した場合にその影響を最小限に抑えるための施策である適応策の重要性は指摘されているものの、定量的な研究は限られており、知見の蓄積が必要である。

気候変動の影響は、様々な分野に及ぶことが予想されているが、気温の上昇にともなう屋外労働者の暑熱ストレスへの曝露の増大は深刻な影響が懸念されているものの一つである^{1,2,3}。ISO (国際標準化機構) や各国の機関において、労働現場における作業者の熱中症予防のために、暑熱ストレスの度合いと身体作業強度に応じて、推奨される休憩時間の値が定められている^{4,5}。このような推奨値に準拠すれば、熱中症のリスクは低減することが可能であるが、一方で作業可能時間の短縮による労働生産性の低下が問題となる。

労働生産性の低下は、産業部門における生産効率の低下に直結するため、GDPのようなマクロ経済指標にも大きな影響を与える。アジア・太平洋地域を対象とした将来推計においては、気候変動によって生じる経済的損失の大半が労働生産性の低下に起因すると推計されている⁶。

また、著者らのグループが行っている全球を対象とした研究においても、推奨される休憩時間を遵守することによるマクロ経済的損失は、温室効果ガスの排出削減を全く行わないシナリオでは2100年時点で世界全体のGDPの約2.6～4.0%と推計されており⁷、同一の経済モデルを用いた他の分野 (作物収量の変化⁸、低栄養による健康影響⁹、冷暖房需要の変化¹⁰、水力発電賦存量の変化¹¹、など) での気候変動による損失の推計値と比較しても1～2桁オーダーが大きい。また、仮に2℃目標に相当する緩和策を実現した場合であっても経済的損失は完全には相殺されない⁷と推計されており⁷、熱中症リスクの低減と、経済的な損失の回避を両立させるためには、効果的な適応策の導入が必要と考えられる。屋内の労働につ

いては、空調機器（エアコン）を導入することは有効な対策である。現在空調機器の普及率の低い開発途上国においても、現在のペースで経済成長が続けば空調機器の普及が進み、屋内労働に対する暑熱ストレスの影響は限定されたものになると予想される。一方で屋外の労働は空調機器の恩恵を受けることができない。また、一般に屋外での労働は作業強度の高い肉体労働である割合も多いため、暑熱ストレスの影響をより受けやすい。将来の空調機器の普及を考慮した上で、産業構造を勘案した経済モデルを用いた推計でも、経済的損失の大半は屋外の労働に起因すると予測されている⁷⁾。そのため、特に屋外での作業強度の高い労働に対して有効な適応策を検討することが必要と考えられる。

空調機器に頼らない屋外労働に適用可能な適応策はいくつか考えられるが、作業時間帯を気温の高い日中から早朝や夜間にシフトさせることは作業可能時間の割合を延長させる効果があると考えられる。また、推奨されている休憩時間は、身体作業強度が高いほど長くなるので、作業を機械化することにより作業強度を低くすることも、作業可能時間を延長させる効果があると考えられる。しかし、これらの適応策の効果を全球規模で定量的に評価を行った研究はこれまでにない。

2. 本研究の目的

本研究は、気候変動に伴う暑熱ストレスの増大による屋外労働における身体作業に従事可能な時間（作業可能時間）の短縮に対して、仮想的なシナリオの下で必要となる適応策の量を全球規模で定量化すること、および、その適応策実施の困難度が緩和策の有無によりどう変化するかを、検討することを目的とする。対象とするのは屋外の高強度の作業とし、適応策としては、作業時間帯のシフトと身体作業強度の軽減とする。

なお、本研究が分析対象とするは、あくまで熱中症のリスクを避けて作業することが可能な時間であり、実際の労働現場における作業時間ではない。

3. 方法

(1) WBGT/作業強度と作業可能時間の関係

暑熱ストレスの度合いを表す際に Wet Bulb Globe Temperature (WBGT) が指標としてよく用いられる。WBGTは、人体と環境の熱収支を考慮した指標であり、ISO等の休憩時間推奨値も WBGT に基づき値が示されている。WBGTの値が高いほど推奨される休憩時間の割合は長くなる。また、身体作業強度が高くなると代謝による体内

での熱産生量を増大させるため体温を上昇させる効果がある。そのため、同じ WBGT の環境下であっても、身体作業強度が高いほど推奨される休憩時間の割合は長くなる。

それぞれの機関ごとに推奨する休憩時間の値は若干異なるが、本研究では比較的近年に改訂が行われた NIOSH による推奨値⁹⁾に基づいた。その中では、1時間（60分）のうち必要とされる休憩時間の割合が0分、15分、30分、45分となる WBGT と作業強度の値がそれぞれ離散的に示されているが、その値を線形に補間することで、連続的な任意の WBGT と作業強度の値に対応する作業可能時間割合をテーブル参照方式で算出できるようにした（図-1）。なお、作業に従事できる時間の割合が0となる基準は、現行の推奨値⁹⁾では定められていないが、これに従うと図-1の範囲外のような極端に高い WBGT の下であっても作業に従事することが可能という仮定となってしまうため、旧版¹²⁾における基準値を参照した。また、休憩時間の推奨値は暑熱環境に馴化した作業員に対する値と、馴化していない作業員に対する値がそれぞれ示されているが、ここでは暑熱環境に馴化した作業員に対する推奨値を用いた。

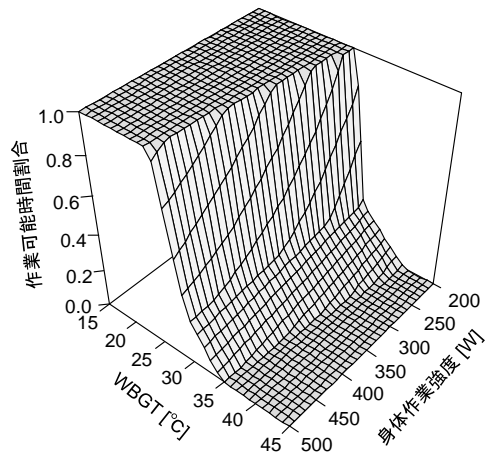


図-1 WBGT/身体作業強度と作業可能時間の関係

(2) 将来のWBGTの日内変動の再現

将来気候については大循環モデル（General Circulation Model; GCM）で計算された値が利用可能であるが、一般に利用可能であるのは、日平均の気温、湿度、気圧、風速、日射、および、日最高気温、日最低気温といった日代表値である¹³⁾。一方、作業時間帯をシフトさせることの効果を検証するためには、作業時間帯ごとの WBGT の値、すなわち WBGT の日内変動を推定することが必要である。そこで、日代表値から毎時の WBGT の値を統計的に再現する式を以下の手順により構築した⁷⁾。

まず、時間毎の値が直接利用可能であるか、推定することが可能な過去の気象観測データ^{14, 15)}を入手し、その

気象観測データから時間毎のWBGTの値を計算する¹⁶⁾。
ここで計算した、ある日（ d ）のある時刻（ hh ）の
WBGTの値を $wbgt_{d, hh}$ と表す。また、時間毎の気象観測
データから気象データの1日の代表値 \mathbf{x}_d も計算する。こ
こで、

$$\mathbf{x}_d = (x_{d,1}, x_{d,2}, x_{d,3}, x_{d,4}, x_{d,5}, x_{d,6}, x_{d,7}) \quad (1)$$

であり、 $x_{d,1}$ から $x_{d,7}$ はそれぞれ、日平均気温、日最高気
温、日最低気温、日平均湿度、日平均気圧、日平均風速、
日平均日射量である。翌日および前日についても同様に
日代表値を求めることができ、それぞれ \mathbf{x}_{d-1} 、 \mathbf{x}_{d+1} とお
く。また、太陽の角度は観測地点の緯度、経度、年月日
から各時刻の値を計算することができ、天頂角を $\theta_{d, hh}$ と
すると、

$$r_{d, hh} = \begin{cases} x_{d,7} \cos \theta_{d, hh} & \cos \theta \geq 0 \\ 0 & \cos \theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mathbf{r}_d = (r_{d,00}, r_{d,01}, \dots, r_{d,23}) \quad (3)$$

とおく。すると、過去の観測データについては、各時刻
のWBGTの値 $wbgt_{d, hh}$ と、 \mathbf{x}_d 、 \mathbf{x}_{d-1} 、 \mathbf{x}_{d+1} 、 \mathbf{r}_d のペアを求
めることができる。このペアの間の統計的な関係性を学
習させれば、以下のようなWBGTについての回帰式を構
築することができる。

$$\hat{wbgt}_{d, hh} = f_{hh}(\mathbf{x}_{d-1}, \mathbf{x}_d, \mathbf{x}_{d+1}, \mathbf{r}_d) \quad (4)$$

ここで、 \mathbf{x}_d 、 \mathbf{x}_{d-1} 、 \mathbf{x}_{d+1} 、 \mathbf{r}_d の値は、GCMの出力として
得られるか計算が可能であるので、一旦この回帰式を構
築してしまえば、将来についても日代表値のみから時刻
間のWBGTの値を求めることが可能になる。

回帰式を学習させるためのデータとして、地理的・季
節的な偏りが無いように、世界 576 の観測地点から1996
年1月1日から2005年6月30日までの期間で、計292,380 ペ
アのデータを取得し^{14, 15)}、回帰式の学習を行なった。回
帰式としては、統計的機械学習の一手法であるサポート
ベクター回帰（Support Vector Regression）を採用した¹⁷⁾。
当初開発した回帰式⁷⁾においては、すべての変数を予測
に用いていたが、ステップワイズ法による変数選択を実
施し、それぞれの時刻のWBGTの回帰式ごとに使用する
変数の組み合わせを選択することにより予測精度を向上させた。

回帰式の精度は、クロスバリデーション法により評価
した。空間的な汎化能力を評価するために、576 の観測
地点を4グループに分割し、3/4の観測地点のデータで回
帰式を学習させ、残りの1/4の観測地点のデータを評価
用のデータとして精度の評価を行う。この手順を評価用
のデータとして用いる観測地点のグループを変えて4回
実施し、系統誤差、誤差のRoot Mean Square Error
（RMSE）値、および、相関係数をそれぞれ求めた。

表-1 WBGTの日内変動推定精度

時刻	系統誤差[°C]	RMSE [°C]	相関係数
0:00	0.000	0.970	0.986
1:00	0.000	0.959	0.987
2:00	0.000	0.958	0.987
3:00	0.002	0.966	0.987
4:00	-0.005	1.010	0.986
5:00	-0.001	1.189	0.979
6:00	-0.004	1.596	0.961
7:00	-0.013	1.923	0.946
8:00	-0.012	1.883	0.938
9:00	-0.010	1.772	0.939
10:00	-0.010	1.668	0.941
11:00	-0.009	1.570	0.945
12:00	-0.007	1.460	0.949
13:00	-0.007	1.421	0.950
14:00	-0.006	1.362	0.953
15:00	-0.002	1.314	0.955
16:00	-0.005	1.254	0.959
17:00	-0.005	1.174	0.964
18:00	0.007	1.056	0.971
19:00	0.001	0.976	0.977
20:00	0.000	0.963	0.980
21:00	0.001	0.961	0.982
22:00	0.005	0.974	0.983
23:00	-0.002	1.000	0.983
平均	-0.003	1.266	0.966

4グループでの評価結果の平均を取った値を表-1に示
す。朝の時間帯においてやや誤差が大きくなる傾向はあ
るものの、系統誤差の値はほぼ無視できる値であり、時
間帯ごとの違いを把握するには十分な精度であると思わ
れる。また、回帰式により推定されたWBGTの日内変動
と、時刻毎の観測値から求められたWBGTの日内変動の
比較の一例を図-2に示す。

なお、実際のWBGTの推定においては、4グループ全
てのデータを用いて学習させた回帰式を使用した。

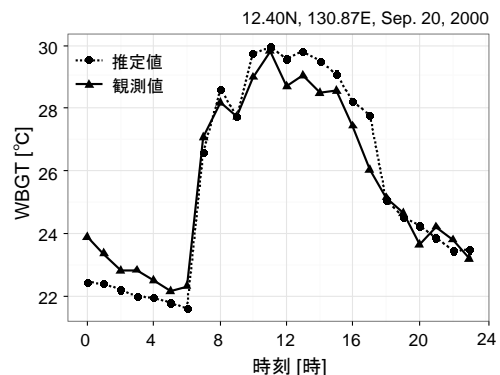


図-2 WBGTの日内変動推定結果の例

(3) 将来の作業可能時間短縮量と適応策の効果の推定

将来の気候条件としては、Representative Concentration Pathway (RCP) シナリオ¹⁸⁾のうち、温室効果ガスの排出量削減が行なわれないケース (RCP8.5) と、2°C目標に対応する排出量削減が行なわれるケース (RCP2.6) の2ケースを採用した。気候データは、RCPシナリオに基づいて、GCMによってシミュレーションされた値を利用し、気候予測の不確実性を考慮するため5つの異なるGCM¹⁹⁾による結果を用いる。ただし、一般にGCMから出力される値は、地上観測によって得られる値からは統計的な性質が異なる。従って、地上観測値により構築したWBGTの回帰式をGCMの出力に直接適用すると、WBGTの推定値にバイアスが生じる。そのため、データの統計的な性質が、地上観測データと一致するようにGCMの出力データに対してバイアス補正^{13, 19)}の手続きを施したものをWBGTの回帰式への入力値として利用した。

気候データの空間分解能は全球で緯度・経度 0.5 度のグリッドである。各グリッドについて、気候データの日代表値から前述した方法で各時刻のWBGTの値を推定した。各時刻のWBGTに対応する作業可能時間を1時間毎に求め、各時刻の値の始業時刻から終業時刻までの積分値を、その日の総労働時間で除したものをその日の作業可能時間割合として求めた。さらにその値の年間平均値を求めた上で、世界106地域別に各グリッドの人口分布²⁰⁾の値で重み付けして平均した値を各地域の年間平均作業可能時間割合とした。人口分布は、社会経済シナリオ Shared Socioeconomic Pathway (SSP) ²⁰⁾のうち、中庸なシナリオであるSSP2の仮定を用いた。計算は、2001年の1月1日から2099年の12月31日までの期間、1日ステップで、南極大陸を除く全陸域を対象として実施した。

実際には地域によって労働条件は異なるが、ここでは同一の条件下での比較を行うため、世界全ての地域で一律に、始業時刻を9:00、終業時刻を17:00とし、身体作業強度は高強度 (400 [W]) をベースラインの条件として仮定した。400 [W] の身体作業強度は、たとえば、鍬で土を耕す、シャベルで土を掘る、早い歩行 (時速6.4 km/h程度) といった作業に相当する²¹⁾。

適応策としては、始業から終業までの合計時間は一定としたまま、作業時間を早い時間帯にシフトさせることで、身体作業強度が300 [W]に軽減される場合 (100 [W]の軽減)、200 [W]に軽減される場合 (200 [W]の軽減) を考慮した。300 [W] の身体作業強度は、たとえば草抜き、モップ掛け、通常の歩行 (5.1 km/h程度) といった作業に相当し、200 [W] の身体作業強度は、たとえば自動車の運転、自動運転の重機の操作、遅い歩行 (3.2 km/h程度) といった作業に相当する²²⁾。なお、これらの作業の例はあくまで身体作業強度を説明するために示したものであり、互いに代替関係にあることを意味するの

ではない。また、仮想的な条件として設定しているものであり、400 [W]の強度の作業を、将来300 [W] や200 [W] まで軽減できると主張するものでもない。

4. 結果

(1) 適応策が無い場合の作業可能時間短縮量

各地域の労働力人口で重み付けした屋外での高強度 (400 [W]) の作業可能時間割合のベースラインシナリオにおける推定結果を図-3に示す。影付きの領域はGCMの違いによる不確実性幅を示し、実線または破線は中央値を表す。ただし、ここで示している値は、推奨される休憩時間に従い、熱中症のリスクを避けて作業することが可能な時間であり、実際の労働現場における作業時間の推計値ではない。

RCP8.5 においては、気候変動による気温の上昇につれて作業可能時間割合は減少を続け、21世紀の終わりには5割近い時間を休憩にあてなければならなくなる。一方、RCP2.6 においては作業可能時間割合の急激な減少は21世紀中盤までには止まり、RCP8.5 と比較すると影響は小さく抑えられることが分かる。

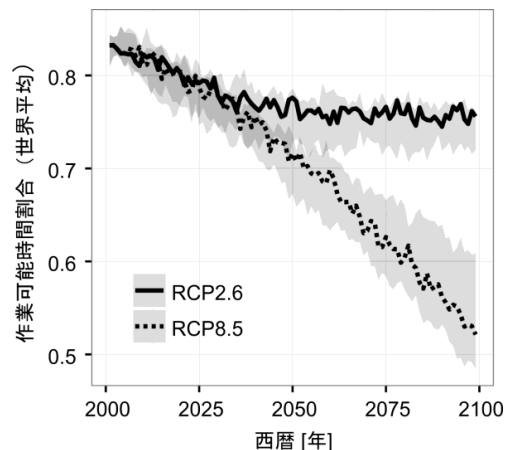


図-3 将来の作業可能時間割合の変化 (屋外の高強度作業)

(2) 必要な作業時間帯シフト量

適応策として、作業時間帯を早める策を取った場合に、2001年から2010年の期間での平均作業可能時間とほぼ同等 (95%以上) の作業可能時間を確保しようとした場合に必要となる作業時間帯シフト量を世界106地域別に求め、各地域の労働力人口で重み付けした値を図-4に示す。

RCP2.6 においては、必要な作業時間帯のシフト (中央値) は2時間以内に抑えられている。一方で、RCP8.5 においては、作業開始時間を約6時間早めることが必要となる。

RCP8.5 について、作業時間シフトに加えて、身体作業強度の軽減が行なわれた場合の必要な作業時間帯シフト量を求めた結果を図-5に示す。例えば身体作業強度が300 [W]に低減されれば、2050 年ごろまでは作業時間帯をシフトさせなくても、2001から2010年までの期間と同等の作業可能時間を確保することができる。しかし、気温上昇がさらに進むと、作業時間帯をシフトさせることが必要となる。仮に身体作業強度を200 [W]に低減できたとしても、21世紀の後半には作業時間帯をシフトさせることが必要となる。

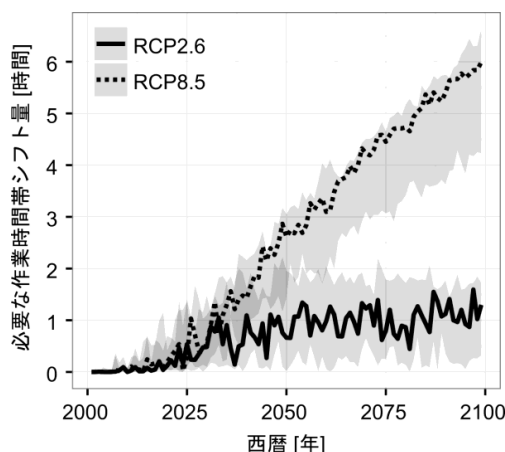


図-4 必要となる作業時間帯シフト量（屋外の高強度作業）

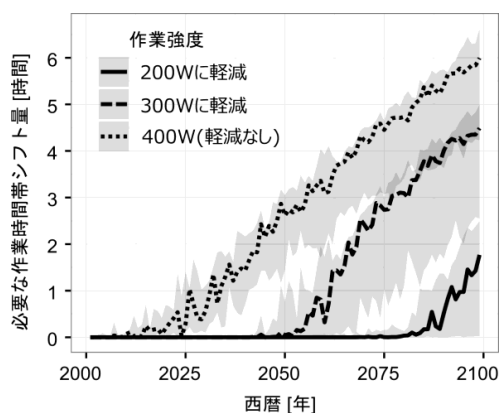


図-5 作業強度が軽減された場合の必要となる作業時間帯シフト量（RCP8.5）

(3) 作業時間帯シフトの費用対効果

適応策として実施する作業時間帯シフト量を費用（具体的な金銭値をここでは意味しない困難度），それによって2090年代に回避される2000年代から比較した作業可能時間の減少率を効果とみなし，その関係を地域ごと，RCPごとに表したものを図-6に示す。図中のプロットの位置が左上であるほど，適応策としての費用対効果が高

いことを表す。なお，ここで示しているのは5つのGCMによる結果の中央値である。

RCP8.5の気候条件の下で，特にアジア，アフリカ，中・南アメリカなど低緯度地域において必要な作業時間帯シフト量が多いことが分かる。また，必要な作業時間帯シフト量が4時間程度以下の領域においては，費用と効果の間には1対1の関係がある一方，4時間以上の作業時間帯シフトが必要な場合，費用と効果の関係が地域のよって大幅に異なることが見て取れる。それに対してRCP2.6の気候条件の下では，必要な作業時間帯シフト量は，最も大きい地域でも約3時間以下であり，また，プロットされる位置もRCP8.5のプロットに比べてやや左上に位置する。

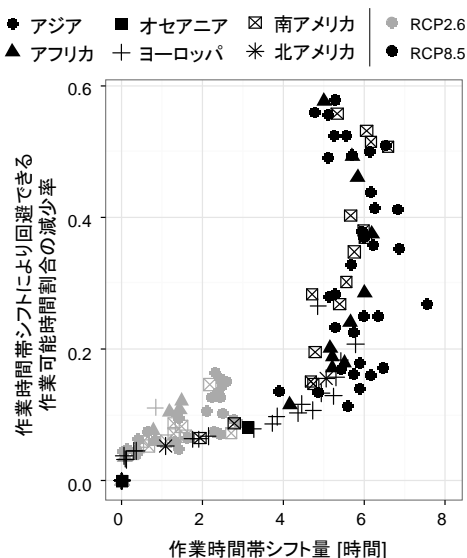


図-6 必要となる作業時間帯シフト量と作業時間帯のシフトにより回避される影響

5. 考察

(1) 適応策の効果の推定結果について

本研究では，第一に作業時間帯のシフトを対象とした推計を行った。作業時間帯のシフトが作業可能時間の維持にどの程度有効であるかの推計に対して，特に重要な要素はWBGTの日内変動である。3.2節で示したように，WBGTの日内変動はよく再現できており，少なくとも現在気候の下では得られた結果は妥当な予測であると考えられる。

一方で，将来予測については，同一のRCPシナリオの下であってもGCM間で予測に幅があることから分かるように，予測に不確実性が存在する。加えて温室効果

ガスの濃度が更に上昇した状況における推計結果については、若干注意が必要である。メカニズムについては十分解明されていないが、温室効果ガス濃度の上昇に伴って気温の日較差（最高気温と最低気温の差）は減少傾向にある^{23,24}。将来、温室効果ガス濃度の更なる上昇により、気温の日較差が更に小さく（それにともないWBGTの日較差も小さく）なった場合、現在の気候のデータに基づき構築したWBGTの回帰式は、実際よりも大きな日較差を予測として出力する可能性がある。また、本研究で使用した世代のGCMでは、気温の日較差の減少傾向を十分に再現できていないことも報告されている²⁵。したがって、特に温室効果ガス濃度の大幅な増大を仮定するRCP8.5シナリオでは、作業時間帯のシフトによる効果を過大評価する可能性が考えられる。ただし、日較差そのものの大きさ（夏季の陸域の平均で約8～18[K]²⁶）と比較すると、日較差の減少傾向は-0.07[K/decade]²⁵と小さな値であるため、大幅な推定誤差をもたらしているとは考えづらい。

また、地域的にみると、低緯度地域でより大きな作業時間帯のシフトが必要であると推定されている。これは気候変動による気温の上昇が、北半球の高緯度地域で大きいという予測²⁷と、一見矛盾するようにも感じられる。しかし、北半球の高緯度地域は、気温が現在と比較して上昇したとしても、年間の大半の期間において依然WBGTは作業可能時間を制限する値よりは低いため、影響が少なく推計されているものであり、将来気候の予測と矛盾するものではない。

第二に機械化による身体作業強度の軽減の効果についても推計を行った。図-5に示した結果は、作業可能時間を一定に保つために必要な作業時間帯シフト量が示されている。しかし、一般に作業を機械化することは、労働生産性の向上をもたらす（作業する時間が短くても、より多く生産することができるようになる）。したがって、作業時間ではなく生産性を現在と同等のレベルに保つという観点から考えるならば、図-5に示す必要な作業時間帯シフト量は過大評価された値である。一方で、“気候変動がなければ本来享受できたはずの生産性向上を実現するために必要な作業時間帯シフト量”と解釈するならば、額面通り受け取ることができるため、この値の解釈には注意が必要である。

(2) 適応策の実現可能性について

本研究で仮定したシナリオの下では、温室効果ガスの排出量削減を行わない場合に相当するRCP8.5条件においては、屋外の高強度の作業について2000年代とほぼ同じ作業可能時間割合を確保しようとした際、作業時間帯のシフト量として、全世界の平均で始業時刻を約6時間早めることが必要となる。これはすなわち、深夜3時に

始業し午前11時に終業することに相当する。このような大幅な作業時間帯のシフトは実現可能だろうか？

まず考慮すべき点として、日照の有無が挙げられる。暑熱ストレスの低減という観点から見れば、日照は存在しないほうが望ましいが、一方で、作業に必要な照度を確保するという観点からは、多くの屋外労働作業において日照は必要不可欠である。したがって、日の出の時刻以前まで始業時刻をシフトさせるということは困難である。日の出の時刻は、低緯度地域では年間を通して午前6時前後である。したがって、3時間以上の作業時間帯シフトは、作業に必要な照度を確保するという観点からは難しいと考えられる。

また、ヒトの生物学的なリズム（概日リズム）も考慮することが必要である。現在でも既に、暑熱ストレスを回避するという目的ではないが、多くの産業で夜勤や交代制勤務が導入されている。このような勤務形態では、概日リズムの位相と社会的活動の間で位相のずれのある状態が生じ、social jetlag（社会的時差ぼけ）と呼ばれる問題が生じている²⁸。深夜から明け方にかけては、作業効率の低下や事故発生率が上昇することが報告されており²⁹、また、交代制勤務に従事することは疾病リスクを高めることが知られている³⁰。このような観点からも、大幅な作業時間帯シフトは望ましいものではない。

一方で2℃目標に相当する気候緩和が実現されたRCP2.6シナリオにおいては、必要な作業時間帯シフト量は平均で約2時間以内の範囲に抑えられている。この範囲であれば始業時間は日の出よりも遅い時刻であるので、作業に必要な日照は確保することができる。また、介入により概日リズム位相をシフトさせることもできる範囲である³¹。すなわち、緩和策を実施することにより、作業時間帯シフトの困難度が低減され、適応策実施の実現可能性が高まる。

一方で、地域ごとの特性についても考慮することも必要である。本研究では労働条件は、世界全地域で共通の仮定を用いているが、実際には地域あるいは産業分野によって労働条件は異なる。たとえば、強い暑熱ストレスを受けている地域においては、現在、既に日の出直後の早朝から作業を開始している例もある³²。このような現場においては、これ以上作業開始時間を早めることは困難であり、作業強度の軽減など他の適応策が必要である。

図-5に示すように機械化などによる作業強度の軽減も、作業可能時間割合の短縮を抑える効果があることが示された。過去の傾向から見ても多くの産業において機械化は進んでおり、今後もその傾向は続くと考えられる。しかし、暑熱ストレスの影響を強く受ける低緯度地域は、経済的には開発途上である国の割合も高く、資金的な観点から機械化ができないケースも起こりうると考えられる。適応の困難度を軽減するためには、気候変動の緩和

に加えて、特に開発途上国における社会経済状況の改善も重要と考えられる。

6. 限界と今後の課題

本研究では緯度・経度 0.5 度の空間分解能のグリッドで解析を行っており、都市部におけるヒートアイランド現象といった現象はモデル化されていない。また、必要な適応量の推計も最小でも国単位で実施している。適応に対して利用できるリソースや産業構造なども地域によって大きな違いがある。本研究のようなトップダウン型の全球を対象とした研究は全体の傾向を把握する上で有用であるが、具体的な適応策を策定する際には、地域ごとに詳細な検討を行うことも必要である。

ヒトの暑熱ストレスに対する耐性には地域差（民族差）も存在する³⁹。また、21世紀には多くの地域で高齢化が進行する³⁰と考えられているが、高齢化に伴う身体機能の低下により暑熱ストレスに対する耐性も低下する³⁰。また、生活習慣の変化によっても暑熱ストレスに対する耐性が変化する可能性もある³⁰が、本研究ではこのような変化は考慮していない。

また、本研究では暑熱ストレスの増大に伴う作業可能時間の減少を対象として分析を行った。地域によっては寒冷ストレスの減少により、実際の作業時間が増大するケースも存在すると考えられるが、本研究では考慮していない。ただし、人口や労働集約的な産業の地理的分布^{31,30}から考えると、世界全体で見た際には、寒冷ストレスの影響は暑熱ストレスの影響と比較して大きくはないと考えられる。

適応策を実施する場合には、費用対効果の観点からの評価も不可欠である。本研究では屋外の高強度の作業可能時間割合の減少率を指標として簡易的な評価を行っている。しかし、屋外の高強度の身体作業が経済全体に対して寄与する割合は地域や年代によって異なる³⁰。また、労働生産性が低下した分、労働力を追加的に投入することで対処するという選択肢もありうる。こういった差異を表現可能な経済モデルと組み合わせる分析⁷を行うことで、より正確な費用対効果分析を実施できると考えられ、これは今後の課題である。加えて、緩和策、適応策にかかるコスト、残余被害をそれぞれ定量化した上で比較検討することで、気候変動政策を決定する上でより有用な情報を提供できると考えられる。

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）により実施された。

参考文献

- 1) Kjellstrom, T., et al.: The direct impact of climate change on regional labor productivity. *Arch Environ Occup Health*, 64(4): p. 217-27. 2009.
- 2) Dunne, J.P., R.J. Stouffer, and J.G. John: Reductions in labour capacity from heat stress under climate warming. *Nature Climate Change*, 3(6), p. 563-566. 2013.
- 3) Suzuki-Parker, A. and H. Kusaka: Future projections of labor hours based on WBGT for Tokyo and Osaka, Japan, using multi-period ensemble dynamical downscale simulations. *Int J Biometeorol*, 60(2): p. 307-10. 2016.
- 4) ISO: Hot environments -- Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature) ISO 7243:1989. 1989.
- 5) NIOSH: Occupational exposure to heat and hot environments. Criteria for a recommended standard, 2016-106. 2016.
- 6) Kjellstrom, T.: Impact of climate conditions on occupational health and related economic losses: A new feature of global and urban health in the context of climate change. *Asia Pac J Public Health*. 28(2 Suppl): p. 28S-37S. 2016.
- 7) Takakura J., et al.: Cost of preventing workplace heat-related illness through worker breaks and the benefit of climate-change mitigation. *Environmental Research Letters*, 12(6): 064010. 2017.
- 8) Fujimori, S., et al.: Macroeconomic impacts of climate change associated with changes in crop yields. *Climatic Change*. under Review.
- 9) Hasegawa, T., et al.: Economic implications of climate change impacts on human health through undernourishment. *Climatic Change*. 136(2): p. 189-202. 2016.
- 10) Hasegawa, T., et al.: Quantifying the economic impact of changes in energy demand for space heating and cooling systems under varying climatic scenarios. *Palgrave Communications*. 2: 16013. 2016.
- 11) Zhou, Q., et al.: Model-based analysis of impact of climate change and mitigation on hydropower. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1*. 72(4): p. 19-24. 2016.
- 12) NIOSH: Criteria for a recommended standard: Occupational exposure to heat and hot environments. 86-113. 1986.
- 13) Hempel, S., et al.: A trend-preserving bias correction -

- the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics*, 4(2): p. 219-236. 2013.
- 14) National Oceanic and Atmospheric Administration: Integrated Surface Database. <https://www.ncdc.noaa.gov/isd>.
 - 15) Atmospheric Science Data Center: SSE Daily Data. https://eosweb.larc.nasa.gov/project/sse/sse_daily_data.
 - 16) Liljegren, J.C., et al.: Modeling the wet bulb globe temperature using standard meteorological measurements. *J Occup Environ Hyg*, 5(10): p. 645-55. 2008.
 - 17) Fan, R.-E., et al., LIBLINEAR: A library for large linear classification. *Journal of machine learning research*, 9: p. 1871-1874. 2008.
 - 18) van Vuuren, D.P., et al.: A new scenario framework for Climate Change Research: scenario matrix architecture. *Climatic Change*, 122(3): p. 373-386. 2013.
 - 19) Weeden, G.P., et al.: THE WATCH FORCING DATA 1958-2001: A meteorological forcing dataset for land surface and hydrological models. *WATCH technical report* No. 22. 2010.
 - 20) Jones, B. and B.C. O'Neill: Spatially explicit global population scenarios consistent with the shared socioeconomic pathways. *Environmental Research Letters*, 11(8): 084003. 2016.
 - 21) O'Neill, B.C., et al.: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3): p. 387-400. 2013.
 - 22) Ainsworth, B.E., et al.: 2011 Compendium of physical activities: a second update of codes and MET values. *Med Sci Sports Exerc*, 43(8): p. 1575-81. 2011.
 - 23) Easterling, D.R., et al.: Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324): p. 364-367. 1997.
 - 24) Vose, R.S., D.R. Easterling, and B. Gleason: Maximum and minimum temperature trends for the globe: An update through 2004. *Geophysical Research Letters*, 32(23): L23822. 2005.
 - 25) Lewis, S.C. and D.J. Karoly: Evaluation of historical diurnal temperature range trends in CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26(22): p. 9077-9089. 2013.
 - 26) Geerts, B.: Empirical estimation of the monthly-mean daily temperature range. *Theoretical and Applied Climatology*, 74(3): p. 145-165. 2003.
 - 27) Collins, M. et al.: *Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility*, in *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. p.1029-1136. Cambridge University Press. 2013.
 - 28) Wittmann, M., et al.: Social jetlag: misalignment of biological and social time. *Chronobiol Int*, 23(1-2): p. 497-509. 2006.
 - 29) Folkard, S.: Shift work, safety and productivity. *Occupational Medicine*, 53(2): p. 95-101. 2003.
 - 30) Haus, E.L. and M.H. Smolensky: Shift work and cancer risk: potential mechanistic roles of circadian disruption, light at night, and sleep deprivation. *Sleep Med Rev*, 17(4): p. 273-84. 2013.
 - 31) Khalsa, S.B., et al.: A phase response curve to single bright light pulses in human subjects. *J Physiol*, 549(Pt 3): p. 945-52. 2003.
 - 32) Crowe, J., et al.: Heat exposure in sugarcane workers in Costa Rica during the non-harvest season. *Global Health Action*, 3(1): 5619. 2010.
 - 33) Lee, J.-Y., et al.: Ethnic differences in thermoregulatory responses during resting, passive and active heating: application of Werner's adaptation model. *European Journal of Applied Physiology*, 111(12): p. 2895-2905. 2011.
 - 34) KC, S. and W. Lutz: The human core of the shared socioeconomic pathways: Population scenarios by age, sex and level of education for all countries to 2100. *Global Environmental Change*, 42: p. 181-192. 2017.
 - 35) Kenny, W.L.: Thermoregulation at rest and during exercise in healthy older adults. *Exercise and Sport Sciences Reviews*, 25(1): p. 41-76. 1997.
 - 36) Yu, J., et al.: A comparison of the thermal adaptability of people accustomed to air-conditioned environments and naturally ventilated environments. *Indoor Air*, 22(2): p. 110-118. 2012.
 - 37) ILO: Employment by sector -- ILO modeled estimates, Nov. 2016.
http://www.ilo.org/ilostat/faces/oracle/webcenter/portal/app/pagehierarchy/Page3.jspx?MBI_ID=33.

(2017. 3. 24 受付)

A STUDY ON THE ADAPTATION MEASURES FOR OUTDOOR WORKTIME REDUCTION DUE TO HEAT STRESSES CAUSED BY CLIMATE CHANGE

Jun'ya TAKAKURA, Shinichiro FUJIMORI, Kiyoshi TAKAHASHI, Yasushi HONDA,
Tomoko HASEGAWA, Yasuaki HIJIOKA and Toshihiko MASUI

The effect of the climate change on the worktime reduction due to heat stresses can produce serious economic impact. In this study, we investigated two possible adaptation measures, i.e. shifting work time and lowering work intensity by mechanization. Future workable hours are estimated based on a recommendation to prevent heat-related injuries. Without climate-change mitigation, at the end of the 21st century, start time of the work has to be shifted approximately 6 hours to keep current-level workable hours. On the other hand, if the temperature rise is kept below 2 degrees Celsius compared to the pre-industrial level, required shift time is estimated to be less than 2 hours. Lowering work intensity also contributes to alleviating worktime reduction, but not all type of works are able to be mechanized. Considering these facts, it is highly important to implement climate-change mitigation policies in order to reduce difficulties in adaptation measures.