

Environment Research and Technology Development Fund
環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

気候変動に対する地球規模の適応策の費用便益分析

(S-14-3)

平成27年度～令和元年度

Global Cost-benefit Analysis of Climate Change Adaptation

〈研究代表機関〉

芝浦工業大学

〈研究分担機関〉

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター

筑波大学

茨城大学

〈研究協力機関〉

東京大学

愛媛大学

令和2年5月

目次

I. 成果の概要	・・・・・・・・・・	1
1. はじめに（研究背景等）		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発の方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた主な成果		
6. 研究成果の主な発表状況		
7. 研究者略歴		
II. 成果の詳細		
II－1 気候変動適応策の総合的な費用便益分析と水関連災害の適応策の費用便益分析	・・・・・・・・・・	28
(芝浦工業大学)		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II－2 気候変動による穀物生産への影響評価と適応策の費用便益分析	・・・・・・・・・・	42
(国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II－3 気候変動による健康への影響評価と適応策の費用便益分析	・・・・・・・・・・	55
(筑波大学)		
要旨		
1. はじめに		
2. 研究開発目的		
3. 研究開発方法		
4. 結果及び考察		
5. 本研究により得られた成果		
6. 国際共同研究等の状況		
7. 研究成果の発表状況		
8. 引用文献		
II－4 気候変動に伴う沿岸地域の脆弱性評価と適応策の費用便益分析	・・・・・・・・・・	71
(茨城大学)		
要旨		

- 9. はじめに
- 10. 研究開発目的
- 11. 研究開発方法
- 12. 結果及び考察
- 13. 本研究により得られた成果
- 14. 国際共同研究等の状況
- 15. 研究成果の発表状況

引用文献

Ⅲ. 英文 Abstract

..... 83

I. 成果の概要

課題名 S-14-3 気候変動に対する地球規模の適応策の費用便益分析
課題代表者名 平林 由希子 (芝浦工業大学 大学院理工学研究科 教授)
研究実施期間 平成27～令和元年度
研究経費(累計額) 249,617千円
(平成27年度:53,185千円、平成28年度:50,536千円、平成29年度:
50,536千円、平成30年度:47,680千円、令和元年度:47,680千円)

本研究のキーワード 気候変動、適応費用、河川洪水、穀物生産、健康、沿岸地域
※5～10個程度

研究体制

- (1) 気候変動適応策の総合的な費用便益分析と水関連災害の適応策の費用便益分析(芝浦工業大学)
- (2) 気候変動による穀物生産への影響評価と適応策の費用便益分析(国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構)
- (3) 気候変動による健康への影響評価と適応策の費用便益分析(筑波大学)
- (4) 気候変動に伴う沿岸地域の脆弱性評価と適応策の費用便益分析(茨城大学)

研究協力機関

東京大学、愛媛大学

1. はじめに(研究背景等)

2013年11月に開催された国連気候変動枠組条約第19回締約国会議(COP19)では、カンクン適応枠組みの下に、将来の気候変動の悪影響に関する損失を定量化するワルシャワ国際メカニズムの設立が合意された。このように、国際社会の中で適応策の具体的な実施とそれに向けての課題検討が重要視されている。日本では、地球温暖化対策計画に基づく緩和策と適応計画策定に基づく適応策への国際的な取組が進められているが、具体的な適応策の実施には、より広域を対象とした適応策の費用・便益に関する知見、および適応レベルに応じた残余損失などの定量的な情報が必要となる。しかしながら、最新のIPCC第5次報告書においても、地球規模の適応策に関連した記述は単純な仮定に基づく沿岸洪水の適応費用のみで、定量的な損失被害額と適応費用便益に基づく実施可能な適応策オプションの提案などは全く行われていない。

将来の経済的制約の下での気候変動による被害対策では、気候変動の影響そのものを緩和する緩和策と発現した影響に適応する適応策とのバランスが重要である。しかしながら、地球規模の温室効果ガスの削減目標に対応するような、地球規模の適応策の投資目標やその効果などの定量的な数字は現時点では存在せず、国際社会から具体的かつ定量的な適応策の費用便益に関する科学的な情報が求められている。

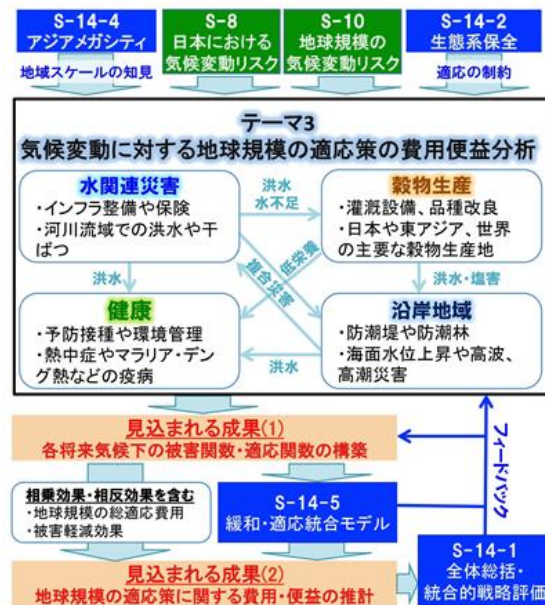


図 1.0.1 本課題全体の構成図

2. 研究開発目的

本研究では、地球規模の気候変動適応策に関する費用と便益の推定に挑戦する。対象とする領域は、気候変動に対する適応費用の大半を占めると考えられる、水関連災害、穀物生産、健康、沿岸地域の4領域である。これら4領域を対象に、1)過去の気候変動由来の被害額の整理、2)実施可能な適応策オプションの単価費用の調査、3)適応策オプションごとの適用便益の算定、4)温暖化レベル・適応策オプションごとの地球規模の気候変動による影響とその被害額の推計を行う。本研究では、それらの適応費用と便益の総和を求め、地球規模の緩和策と比較が可能な、地球規模の適応策に関する科学的定量的な基礎情報を創出することを最終目標とする。

水関連災害分野（サブテーマ1）では、グローバルな数値モデルを用いて、温暖化レベルごとの地球規模の気候由来の被害額を定量化し、各適応策オプションによる被害軽減額と適応策オプションの単価費用の比較から、適応に関する費用便益分析を実施する。また、各サブテーマで算定した適応費用と便益とを統合し、現実的に実施可能な適応策オプションを提案する。

穀物生産分野（サブテーマ2）では、全球作物モデルによる主要穀物の気候変動被害・適応関数を作成し、灌漑等の影響も加味したうえで、想定する気候変動と社会経済の将来シナリオ下での適応の費用と便益を推計する。

健康分野（サブテーマ3）では、影響の大きい健康事象である熱関連死亡、低栄養、下痢症、マラリア、デング熱、沿岸洪水のグローバルな気候影響を最新の気候シナリオ・社会経済シナリオの枠組みで推計し、費用効果分析を行う。熱関連死亡の費用便益分析に関しては、都市の影響を組み込んだ改良を行う。

沿岸地域（サブテーマ4）では、複数の気候モデル、気候シナリオ、適応シナリオに基づく沿岸域における海面上昇等の浸水影響評価を行う。また、全球規模の堤防分布データベースの構築を行い、既存の堤防等の情報から防護費用のモデルを作成することで、防護による適応の費用便益分析を実施する。また、堤防による防護以外に、マングローブ等のグリーンインフラも考慮した適応シナリオに関しても費用便益分析を行う。

3. 研究開発の方法

(1) 気候変動適応策の総合的な費用便益分析と水関連災害の適応策の費用便益分析

研究開始当初には、水関連災害の適応費用に関する地球規模のデータベースがなかったため、独自に適応単価費用および防護レベルに関する情報を文献や報告書から収集し、適応単価費用を推計するためのデータベースの構築を行った。また、全球河川氾濫モデルによるシミュレーションを実施し、適応の有無による洪水被害額を求めた。全球河川氾濫シミュレーションは、サブテーマ2で開発されたS14 databaseによる5 GCMs×4 RCPsの気象外力データを陸面過程モデルに入力し、出力された日々の流出量を用いて計算を行った。得られた河川貯水量を高解像度のDEMに分配し、全球1km×1kmの高解像度の氾濫マップを作成した。この氾濫マップに、地球規模の財分布（人口分布に1人あたりのGDPを重ねたもの）と全球浸水深一被害関数を適用し、現在の洪水防護レベルで

ータが得られるサブ国レベルの自治体区分ごとに、過去と将来における洪水被害額を算定した。想定する適応オプション（防護シナリオ）ごとに、適応レベルごとの将来の洪水被害額も算定することで、適応をした場合としなかった場合における洪水被害額の差が求まり、適応によって将来生じる洪水の被害期待軽減額（便益）を算定した。最後に適応による便益と適応レベルに応じた適応費用との差が最大となる適応レベルを自治体区分ごとに決定し、経済的に合理性のある将来の防護レベルを決定した。以上の適応費用と便益および残余被害の推計は、得られるすべての気候シナリオ（RCP）および社会経済シナリオ（SSP）について実施した。

（ 2 ）気候変動による穀物生産への影響評価と適応策の費用便益分析

気候変動の影響を検出・評価するために専用に設計された気候データベース d4PDF と作物の生理・生態的な生育過程を数式で表現した収量モデルとを用いて、過去の（温暖化が起こっている）実際の気候条件と、温暖化がなかったと仮定した気候条件のそれぞれについて、世界各地の穀物収量を 50km メッシュで推定した。

また、現在と同じ水準の費用便益比を満たす範囲内で、気候変動影響がない水準まで穀物収量を回復するために生産者が追加支出する生産コストを適応コストとした。すなわち、各国の農業統計資料による生産コストと平年収量、先行研究による各国一人あたり国内総生産および IMF（国際通貨基金）による消費者物価指数・為替レートを用いた適応コスト関数を作成した。ここでの適応コストは、生産者が肥料や水灌漑、薬剤、燃料、労働力、機器の追加といった漸進的な適応策

（incremental adaptation）を採る際にかかる生産費用の増分を表す。播種日や品種の変更は生産コストがかからない適応策であるため、本研究で適応コストを推計する際には常に考慮した。そして、生産者が適応コストを支出した場合でも収量が気候変動のない水準まで回復しない場合、両者の差を金銭換算したものを残余被害とした。適応コストと残余被害の和を、気候変動の総コストと呼ぶ。

（ 3 ）気候変動による健康への影響評価と適応策の費用便益分析

大きな影響をもつ熱関連超過死亡に関しては、政策によって適応を目指したことはこれまでほとんどなく、知見もほとんどない。一方で、寒冷な気候の地域と温暖な気候の地域を比較すると、自動的にその気候に適応していることが観察される。これらの状況を踏まえると、緩和策による気温上昇抑制こそが影響を小さくできる手段と考えられるため、このサブテーマにおいては、緩和策を進めることを費用、気温上昇抑制による超過死亡数の減少を便益と考える。この考え方に立つため、このサブテーマ内では緩和策のレベルごとの影響評価を行い、テーマ 5 との共同研究として、費用便益分析が完成される。

気候変動による健康影響評価について、これまでもっとも包括的かつ検証可能な形で検討してきたのが世界保健機関（WHO）であり、S-14 開始時点での最新の成果は、その WHO が 2014 年に出版した報告書であった。しかしながら、この報告書は、RCPs と SSPs を用いた将来予測ではなかったため、S-14-3 の健康影響サブテーマとしては、この報告書と同様の方法で影響評価を行った。さらに、マラリアに関しては、上記報告書で感染地域の拡大・縮小を評価していたのみであったので、このサブテーマ内で国別の死亡数を指標にした影響評価を行った。

（ 4 ）気候変動に伴う沿岸地域の脆弱性評価と適応策の費用便益分析

気候変動リスクに対処するためには、緩和策と適応策それぞれの長短を的確に捉え、限られた資源でリスクを最小限に抑え込んでいく総合的な戦略が必要である。しかし、2014 年に発行された IPCC 第 5 次報告書でも適応策の費用便益に関する確信度の高い研究の記述は少なかった。

沿岸域において気候変動は、海面上昇や高潮偏差の増大、降雨変化等による浸水影響を及ぼす。世界の平均海面水位は、1901-2010 年に約 19cm 上昇した（IPCC, 2014）。今後の温室効果ガス濃度経路（RCP シナリオ）によって異なるが、21 世紀末には 1986-2005 年と比較して海面水位が 26-82cm 上昇すると予想されている（IPCC, 2014）。

こうした状況から、本研究は世界の沿岸域を対象とした気候変動による複合影響の把握と適応策にかかる費用便益の提示を目指す。そこで、世界の沿岸域を対象とした気候変動による複合影響の把握と適応策にかかる費用便益の提示を目指す。この 5 年間で沿岸域に関しては、1) 海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価、2) 防護費用データベースの構築と適応効果評価、3) 堤防データ抽出プロセスの開発、などを実施し、一連の分析枠組が確立された。

4. 結果及び考察

(1) 気候変動適応策の総合的な費用便益分析と水関連災害の適応策の費用便益分析

全球規模で経済的に合理性のある適応費用と便益を算定した結果、毎年 87～153 億ドルを適応策に投資することで、年間 463～1463 億ドルの洪水被害額を減少させることができることが明らかとなった。どの気候変動・社会経済シナリオでも地理的な分布や傾向に大きな違いは見られず、特に中国、インド、中央アフリカ、ラテンアメリカでは適応策を実施することで将来の洪水被害額を大きく減らせる可能性があることがわかった。これらの地域で適応による大きな便益が見込まれる理由は、将来大きく経済発展する可能性があるだけでなく、現在の防護レベルが 25 年未満と低く適応をする余地が十分にあるためである。ただし、これらの地域では、想定される防護の対策が完了するまでの間（ハードインフラの建設中）に発生する被害が大きいため、適切に適応策を実施すると想定したシナリオにおいても、将来の洪水被害額は現在よりも増加する（図 4.1.1）。したがって、そのような地域では、より早い対策の実施や、ソフトな対策の導入を検討する必要があることが示唆された。

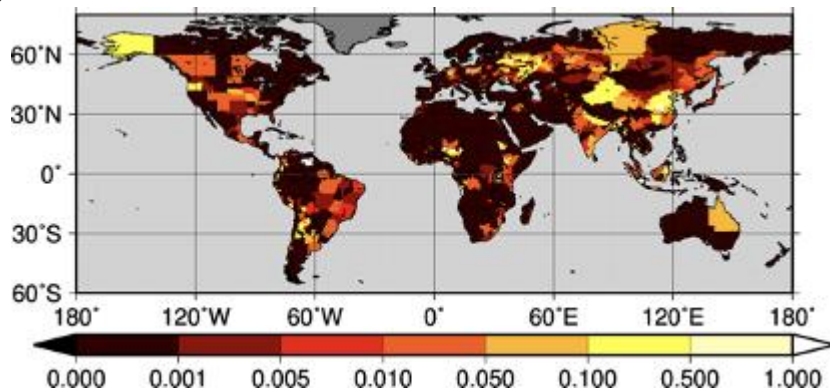


図 4.1.1 極端なシナリオ (RCP8.5/SSP5) における残余被害（適応策を実施しても、現在よりも増加する被害額）の GDP に対する割合

各サブテーマによる主要セクターに関する適応費用分析と、テーマ 2 による生態系影響を統合的に解析した結果、最も温暖化が進むシナリオ (RCP8.5/SSP3) では、適切に適応策が実施された場合でも、解析した 7 地域のいずれにおいても 2 から 4 のセクターにおいて気候変動の被害がある程度以上に増加することが判明した（図 4.1.2）。

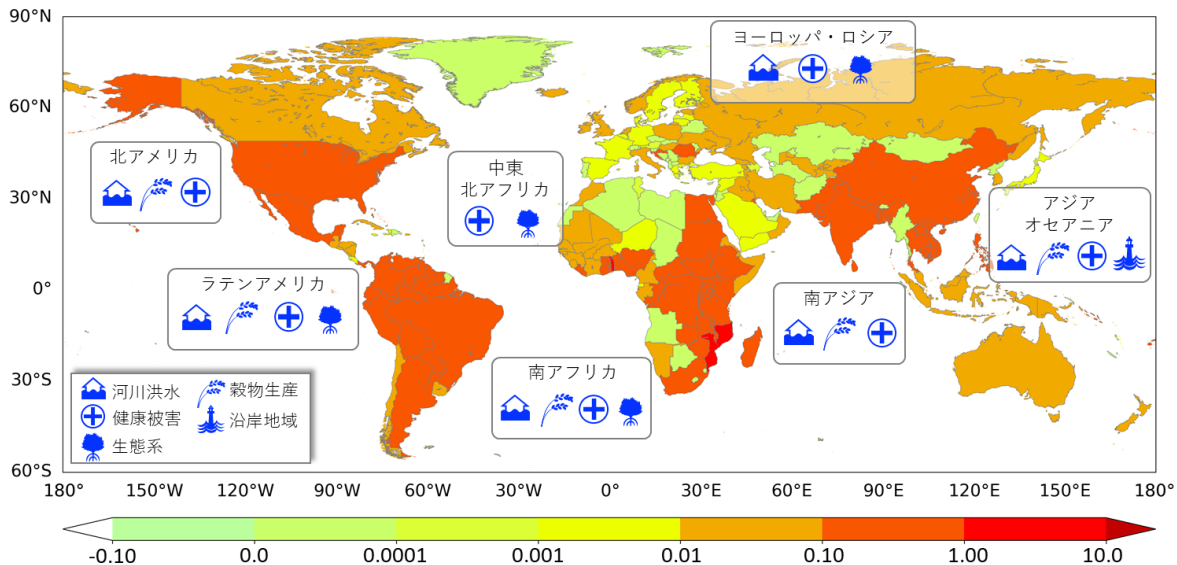


図 4.1.2 適応後も気候変動による被害が増加するセクター（アイコン）および極端シナリオ (RCP8.5/SSP3) 下における河川洪水、穀物生産、沿岸地域分野の適応費用と残余被害の合計 (GDP 割合 [%])

(2) 気候変動による穀物生産への影響評価と適応策の費用便益分析

気候変動の影響を検出・評価するために専用に設計された気候データベース d4PDF と収量モデルを利用し、過去 30 年間 (1981-2010 年) の気候変動による収量影響を推計した。その結果、世界の平均収量に対する過去の気候変動の影響は、トウモロコシでは -4.1%、コムギでは -1.8%、ダ

イズでは-4.5%と見積もられた。コメについては世界平均収量に有意な収量影響は検出されなかった。有意な収量影響が見られた3穀物を生産被害額に換算すると、世界全体で年間424億ドルに上ると推定された。

次に、3.(2)の方法で計算した適応コストについて示す。異なる気候モデルや社会経済シナリオ、生産コストモデルからなる複数のシナリオの平均では、気温上昇を2°Cで安定化するシナリオ(RCP2.6)と気候変動が著しく進行するシナリオ(RCP8.5)のいずれでも適応コストの額はほぼ同じで、4穀物を合計した年間の適応コストは世界全体で今世紀半ば(2041-2050年)には680-700億ドル、今世紀末(2091-2100年)には910-940億ドルと推計された(図4.2.1a)。一方で残余被害はRCP8.5の方がRCP2.6よりも大きいと見積もられた。4穀物を合計した世界全体での年間の残余被害の推計結果は、RCP8.5では今世紀半ばには180億ドル、今世紀末には1770億ドルだが、RCP2.6シナリオでは今世紀半ばから末にかけて残余被害はほぼゼロに抑えられるとの結果だった(図4.2.1b)。適応コストについてはRCP2.6とRCP8.5の間の差が小さいが、残余被害はRCP8.5の方がRCP2.6よりも大きいため、気候変動の総コストの将来変化は残余被害と似た傾向を示した。すなわち、気候変動の総コストは、RCP2.6では今世紀半ばには650億ドル、今世紀末には900億ドルに増加するが、RCP8.5ではそれよりも今世紀半ばでは約1.4倍(880億ドル)、今世紀末では約3倍(2680億ドル)大きいと見積もられた(図4.2.1c)。

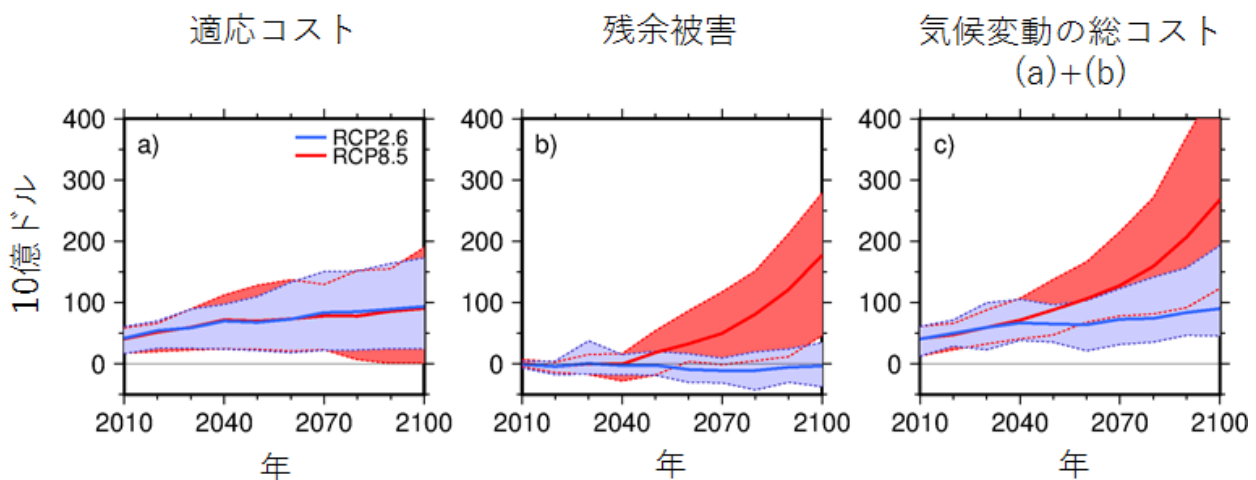


図 4.2.1 RCP2.6 と RCP8.5 排出シナリオにおける世界全体での4穀物合計の適応コスト (a)、残余被害 (b)、気候変動の総コスト (c)。それぞれの排出シナリオについて、異なる50のシナリオ(気候モデル5種類×社会経済シナリオ5種類×生産コストモデル2種類)を考慮した。太線は50シナリオの平均値、陰影と破線は90%信頼区間を示す。

穀物生産では、気候変動(主に気温上昇)の悪影響が大きいと作物の生理的な限界により、生産者が資材などを追加投入して適応しようとしても収量低下を防ぐことが困難になる。このため、費用便益比の観点から適応コストの支出が見合わなくなり、気候変動の進行が著しい場合には適応コストに代わって残余被害が増加する。年間の適応コストは気温上昇に伴い徐々に増加し、4穀物を合計すると世界全体では+1.5°Cで530億ドル、+2°Cで610億ドル、+3°Cで780億ドルと推定された。一方、穀物生産における年間の残余被害は気温上昇に伴い急速に増加し、4穀物を合計すると世界全体では+1.5°Cで100億ドル、+2°Cで190億ドル、+3°Cで500億ドルに達すると推計された。

気候変動の総コストに占める適応コストの割合は、+1.5°Cでは84%だが、+2°Cでは76%、+3°Cでは61%に低下する(図4.2.2bの緑色の線)。一方で、残余被害の割合は+1.5°Cでは16%だが、+2°Cでは24%、+3°Cでは39%に上昇する(図4.2.2bのピンク色の線)。これらの結果から、気候変動を安定化した場合、気候変動の悪影響の大部分は生産者の漸進的な適応により吸収することが可能と示唆される。一方、気候変動が著しく進行した場合、生産者の適応コストも増加するうえ、そのみでは気候変動の悪影響を吸収することはできず、大きな残余被害が生じると示唆される。

上記の残余被害を相対化するために、現在気候の極端気象による穀物生産被害と比較する。世界全体で見ると、最も生産被害が大きい農業気象災害は干ばつであることが知られている。4穀物の干ばつ被害は世界全体では過去27年間(1983-2009年)の累積値で1660億ドルと報告されている。これは非干ばつ年も含めて期間平均すると年間60億ドルの生産被害に相当する。また、簡略化のため、干ばつの頻度を10年に1回と仮定すると、干ばつ年の平均被害額は600億ドルである。気候変動の残余被害は+1.5°C(100億ドル)と+2°C(190億ドル)ではそれよりも小さいが、+3°C(500億ドル)では現在の干ばつ年の平均被害額に匹敵する大きさになる可能性がある。

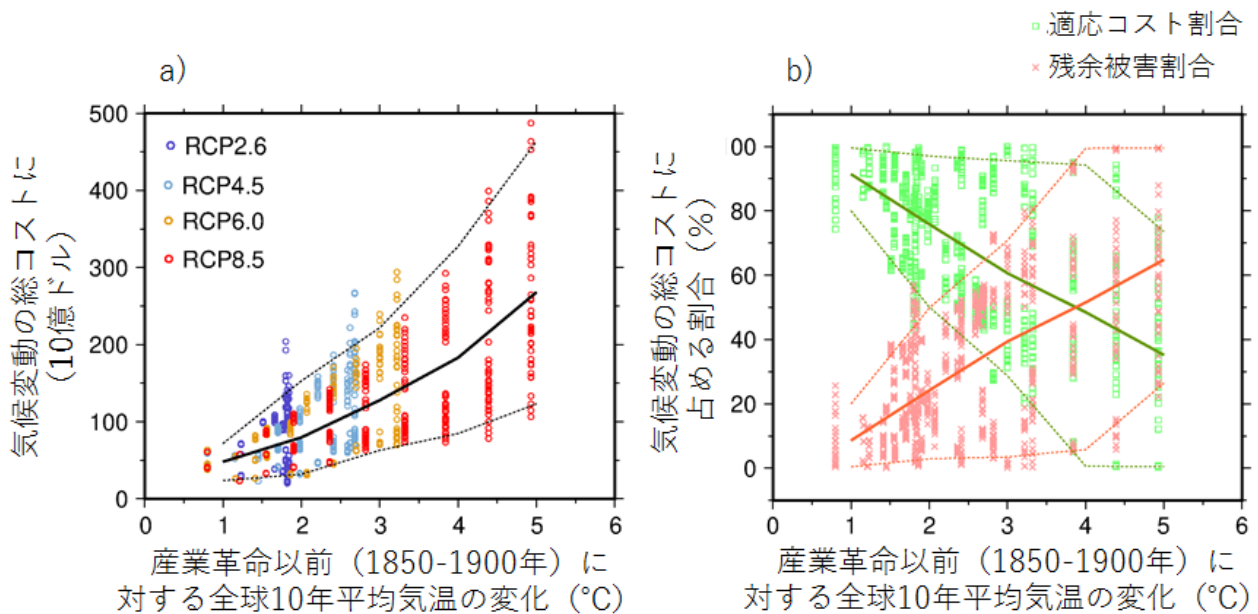


図 4.2.2 (a) 気温上昇に伴う気候変動の総コスト（適応コスト+残余被害）、および (b) 気候変動の総コストに占める適応コストと残余被害のそれぞれの割合。200 シナリオから得られた結果を示す（排出シナリオ 4 種類×気候モデル 5 種類×社会経済シナリオ 5 種類×生産コストモデル 2 種類×10 期間）。左右のそれぞれのパネルにおいて、太線はシナリオの平均、破線は 90%信頼区間を表す。

(3) 気候変動による健康への影響評価と適応策の費用便益分析

RCPs と SSPs ごとの影響評価に関しては、図 4(3)-1 のようになる。ここでは、CO₂ 排出 1kg ごとの各死因による DALY (= Disability Adjusted Life Years、障害調整生存年数) を示している。DALY では死亡年齢が大きく影響するため、熱関連超過死亡のように、主に高齢者が死亡する場合には、この図のように影響は小さく表される。低栄養、下痢性疾患、マラリアは、小児が影響を受けるので、ここでの影響も大きくなっている。また、SSP による相違も認められ、SSP1 がもっとも小さな影響を受けることが予測された。

マラリアの死亡数に関しては図 4(3)-2 のようになる。ここでは Kenya を一例としてあげている。2050 年には、RCP6.0 を除くと、やはり温暖化が進むほど死亡数も増加することが認められる。年次が進むにつれて死亡数が減少傾向にあるのは、GDP 上昇による死亡率減少の影響が、気温上昇など、気候変動の影響を凌駕するためである。その意味からは、経済発展によって最終的にはマラリア死亡数を減らすことができるものの、やはり気候変動を小さく抑えることで更に死亡数を減少させることができるし、公衆衛生の観点からは、当然現在できるマラリア予防策の推進によって将来まで減少を待たずに死亡数を減少させる努力をする必要がある。

上記以外に、本サブテーマの研究によって明らかになった、全球の将来予測を行うにあたって考慮すべき点について、詳細は「II. 成果の詳細」で述べるが、中でも緩和策をとることによる化石燃料燃焼の減少による大気汚染の改善をもたらす便益が大きいことが明らかになったこと、個別の適応策のみでは複合災害の場合に対処できないことを明らかにできたことは重要な知見であると考えられる。

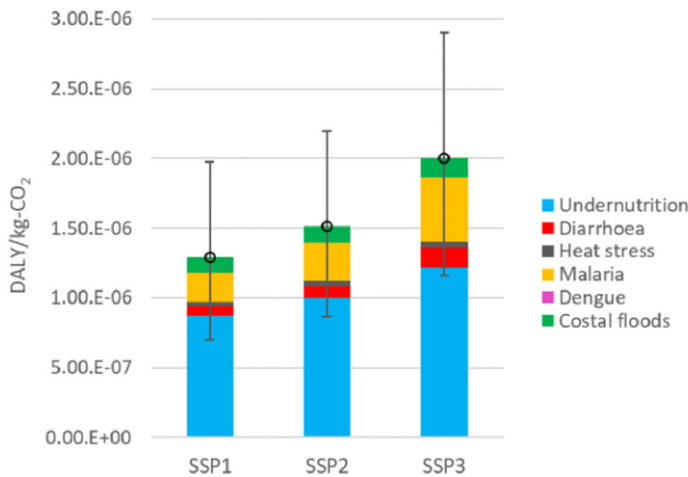


図 4.3.1 CO₂排出 1kg ごとの disability-adjusted life years.

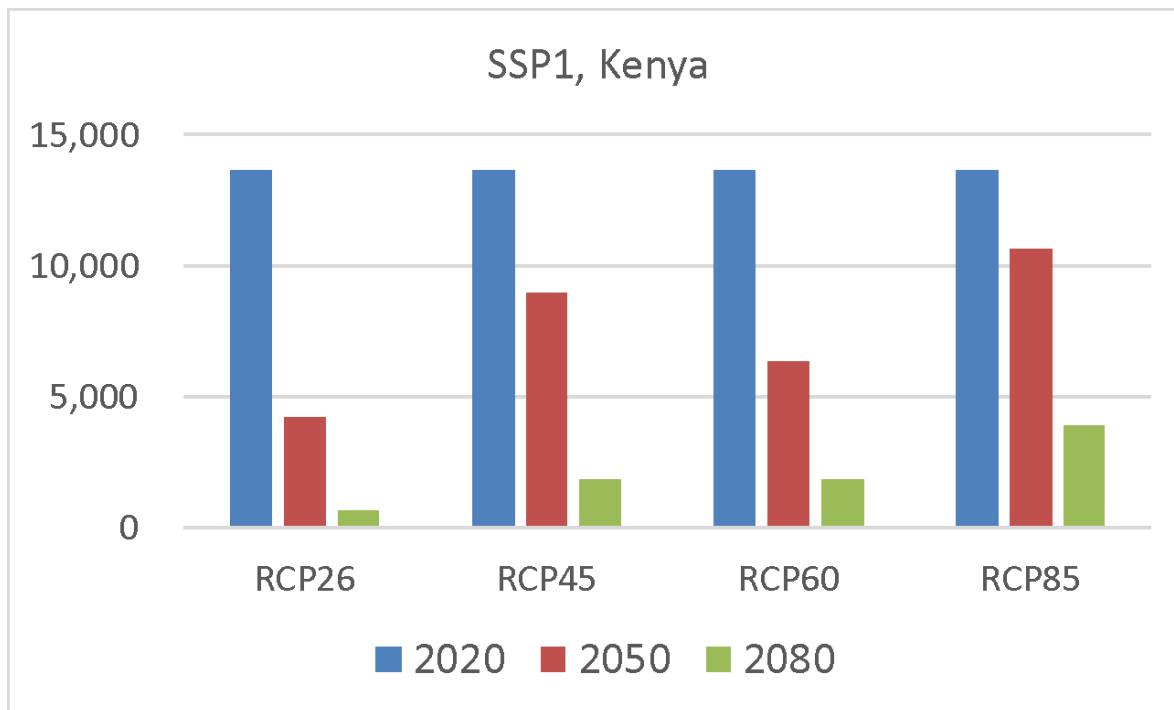


図 4.3.2. RCP, SSP ごとのマラリア死亡数予測 (Kenya の例) .

(4) 気候変動に伴う沿岸地域の脆弱性評価と適応策の費用便益分析

沿岸地域に関しては、1)海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価、2)防護費用データベースの構築と適応効果評価、3)堤防データ抽出プロセスの開発、などを実施し、一連の分析枠組みが確立された。これらの成果は 13 本の査読付き論文(英文 3、和文 10)などへ発表され、IPCC(2019)SROCC 報告書にも引用された。

4-1 海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価

海面水位は、満潮・干潮、また大潮・小潮といった天文潮でも変動しており、これらに将来の気候変動に伴う海面上昇が加わると予想されている。気候モデル(MIROC-ESM 等)を用いて、放射強制力、社会経済シナリオ(RCP/SSP)に基づく将来の浸水影響を評価した。海面上昇と大潮時の満潮の両方を考慮した場合、21 世紀末には世界全体で、RCP4.5 で約 39 万 km²、RCP8.5 で約 42 万 km² が潜在的浸水域になると推計された(MIROC-ESM)。地域別には中国の長江デルタ、メコンデルタ、カナダ、バングラデシュの低地、アマゾン河口等に潜在的に大きな浸水リスクがあると推計された。これらの潜在的浸水域は海面上昇と潮汐を含めた場合で陸地面積の約 0.3%だが、沿岸域の人口密度が内陸域よりも高いことは問題をいっそう複雑にしている。RCP8.5 での 2100 年の浸水影

響人口は約 6,300 万人 (SSP1)～1.06 億人 (SSP3) と推計された。これは 2100 年の総推計人口の約 1% に上る。

さらに 8GCM による不確実性評価からは 2100 年の最大値が MIROC-ESM-CHEM_SSP3 で約 97 百万人であり、最小値は NorESM1-M_SSP1 の約 50 百万人であった。平均値は、RCP8.5 では約 22%、RCP2.6 では約 15% の幅があった。

4-2 防護費用データベースの構築と適応効果評価

図 4.4.1、図 4.4.2、図 4.4.3 は堤防嵩上げの有無による浸水域、浸水面積、影響人口、被害額の違いを示している。ここでは、浸水可能性のある海岸線に対して、一律 50cm、ないしは 1m の堤防の嵩上げを行った場合の浸水影響を試算した。浸水域は、2100 年において適応策がない場合と比べて 50cm 嵩上げで約 2 割、1m 嵩上げで約 4 割軽減される。被害額は 3 つの経済水準別の推計式では 2100 年に約 1,700～4,800 億\$ となった。影響人口、被害額は RCP シナリオの違いよりも SSP シナリオの一人当たり GDP の違いによる影響が大きい。

次に、これらに掛かる追加的適応費用を算出した。世界各国の堤防に掛かる費用データベースを構築し、防護費用の将来推計を行った。アメリカ合衆国ではアメリカ軍・各州の報告書、日本では港湾空港技術研究所、ヨーロッパ各国では EU 報告書、新興国においては JICA 報告書などから費用データを収集した。堤防費用 (1km あたりの建設費用) を、20 カ国 455 個のデータと各国の施工終了年次の一人当たり実質 GDP とを比較し、推計近似式を提案した。同一国内でも立地や建設形式によって多様であるが、総じて国の経済水準が高くなると防護基準も上がり、防護費用も高くなる傾向にある。追加的適応費用は、国別の浸水可能性がある海岸線長に防護費用データベースより求めた国毎の堤防単価を乗じ、耐用年数 30 年として管理費用を加えたものである。世界の堤防分布情報が未整備なため、浸水可能性がある海岸線の全てに 1m の堤防を新設する場合と、同様の海岸線に既に堤防が存在するとしてそれらの全てを 1m まで嵩上げする場合、という 2 つの極端なシナリオを仮定した。

図 4-4 は、世界の沿岸域における追加的適応費用である。全て新設と仮定した場合は全て嵩上げと仮定した場合よりも費用が 4 倍弱高くなる。地球温暖化に伴う海面上昇で河口域や低地などが浸水した場合の被害額は、今世紀末に世界全体で約 4,820 億ドルになるが、高さ 1m の堤防を整備すると費用は最大 2,030 億ドルかかるが、被害額は 6～7 割に抑えられるという試算を得た。後述の通り、堤防分布情報は整備中であるが、真値はこれらの範囲内にあると推察される。それでもなお、追加的適応費用は浸水被害額よりは概ね低くなった。すなわち、全球規模で評価する場合には適応策を講じる経済合理性が確認された。

4-3 堤防データ抽出プロセスの開発

沿岸域における気候変動に対する防護策を検討する上で、本来は世界の既存堤防の設置場所を把握する必要がある。しかしながら、安全保障等の理由から我々がアクセス可能かつ一律の基準を満たす世界の堤防データベースは存在しない。そこで、リモセンデータ (ALOS World 3D や Google Earth 等) から全球の堤防を抽出するプロセスを開発した。上記の分析に今後は堤防情報を組み合わせることで、より現実的な推計を得ることが期待される。

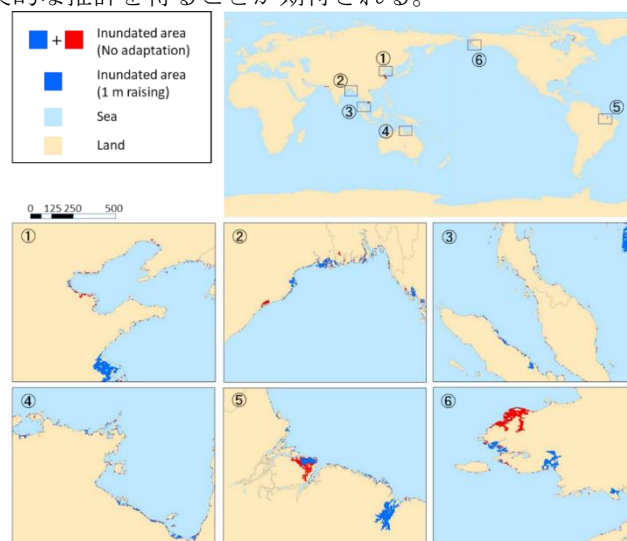


図 4.4.1 適応策の有無による浸水域の相違 (Tamura et al., 2019)

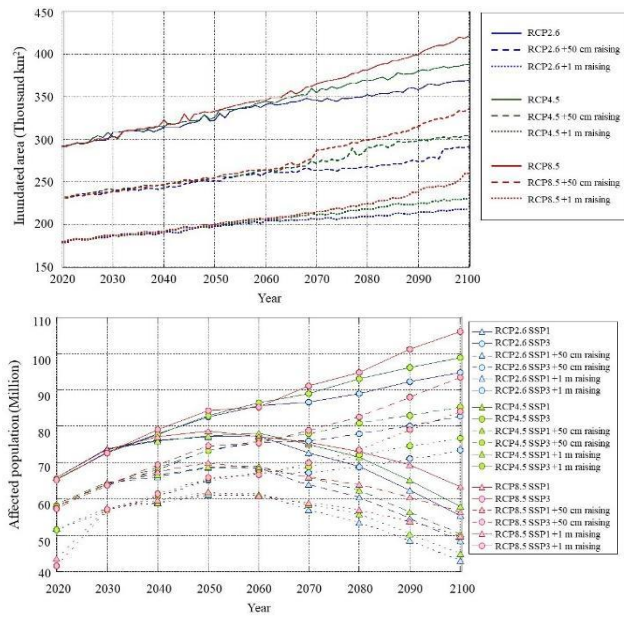


図 4.4.2 堤防嵩上げの有無による浸水面積、影響人口の比較 (Tamura et al., 2019)

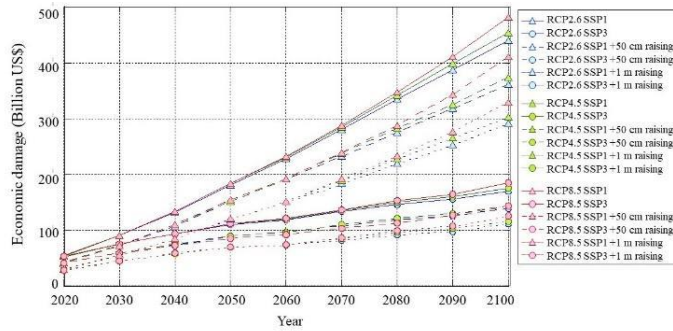


図 4.4.3 堤防嵩上げの有無による被害額の比較 (経済水準別の推計; Tamura et al., 2019)

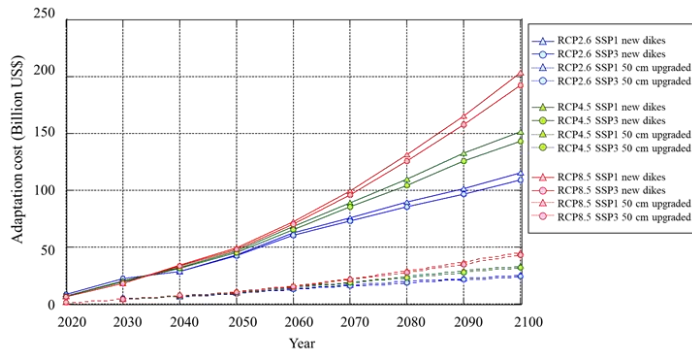


図 4.4.4 世界全体の追加的適応費用 (Tamura et al., 2019)

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

河川洪水、穀物生産、健康分野、沿岸地域に関するグローバルな物理モデルによる、気候と社会経済に関する複数シナリオのシミュレーションに基づき、気候由来の被害額と各適応策オプションによる被害軽減額を算出した。また、グローバルスケールでこれら主要分野における適応策オプションの提示と、それに対する費用便益分析を世界で初めて実施した。最後に、本課題の主要セクターおよび生態系影響を統合的に解析し、気候変動に適応することが難しいホットスポットとなる地域を同定した。また、極端シナリオ下において特に適応の限界が危惧される地域を世界で初めて示すことに成功した。

水関連災害分野（サブテーマ1）では、河川洪水に関するグローバルな適応の費用便益を実施した。過去の堤防建設などの洪水対策のハード対策に関する単価費用モデルを洪水の防護レベルに対する被害額算定モデルと組み合わせることで算定する手法を構築した。費用対効果がみあうところまで適応するシナリオにおいては世界全体で残余被害が生じること、気候変動による洪水の増加分を全て適応することを目指した場合においても、残余被害が発生するという適応の限界が示された。そのため、ハード対策だけでなく洪水の頻度が上昇する地域における洪水予警報などのソフト対策による被害軽減の取り組みや、土地利用など別の対策も考慮する必要があることが示唆された。また、本テーマで対象とした4分野に加えて、テーマ2から提供を受けた生物多様性を含めて、世界のどこに気候影響や適応の限界があるのかをホットスポットとして提示した。

穀物生産分野（サブテーマ2）では、全球作物モデルによる主要穀物の気候変動被害と適応関数を構築し、想定する気候変動と社会経済の将来シナリオ下での適応の費用と便益を推計した。農業分野における気候変動への適応については、これまで農業者が、過去にも異常気象等への対応で行ってきた簡易な対策技術、すなわち窒素肥料の投入量の増加、改良品種とそれに付随する栽培管理手法の使用割合の増加を、気候変動への本格的な対応と分離することで、より現実に近い将来予測と適応コストの算出を可能とした。また温室効果ガス排出シナリオおよび共通社会経済シナリオの組み合わせごとに、適応コスト及び残余被害の定量的評価を行った。

健康分野（サブテーマ3）では、熱関連死亡、低栄養、下痢症、マラリアとデング熱、沿岸洪水についてのグローバルな気候影響と費用便益分析を実施した。熱関連死亡に関しては、これまでは亜熱帯までの知見しか得られていなかったが、熱帯地域でも全球予測のためのモデルが適用可能であることが示された。また、多くの国を対象にした量的な評価によって、高湿度ではややリスクが低いものの、湿度を考慮せず気温のみを用いた将来予測において大きな問題にならないことも明らかにした。熱関連超過死亡に対する適応の影響の量的評価では、温暖化によって至適気温が高温側に移動すること、エアコンの普及などによって同じ高温でもリスクが低くなってきていることなどを明らかにした。停電の影響で、熱関連超過死亡が増加することは、ニューヨークでの例に関する報告があったものの、熱中症に関する報告はこれまでなく、我が国のデータでそのことが示されたことは、今後の適応研究に大きな影響を与えることが考えられる。

沿岸地域（サブテーマ4）では、複数の気候モデルによる複数気候シナリオ・社会経済シナリオの不確実性を考慮した沿岸域における総合的な影響評価と適応策の費用便益分析を実施した。全球規模の海面上昇に伴う浸水影響、防護費用データベース構築、防護効果評価、その防護費用と費用便益を提示し、一連の分析枠組みが確立し、沿岸域における気候変動の影響に関する経済損失評価と、適応策による経済評価を実施した。

(2) 環境政策への貢献

構築した全球規模のモデルシミュレーションにより、河川洪水、穀物生産、健康分野、沿岸地域という主要な4分野において、気候シナリオおよび社会経済シナリオ事に具体的な適応策オプションの費用便益と残余被害が示された。これは、今後の気候政策や適応策を実行する際の基礎的な科学的知見として位置付けられる。

水関連災害分野に関しては、アジアやアフリカなど特に気候変動によって洪水の増加が見込まれる地域などにおいて、どの程度の費用を洪水対策として投資すべきかを具体的な数値として示した。また、適切な適応策を進めたとしても気候変動による被害を現在気候と同じレベルにすることが困難な適応の限界が存在する地域を特定し、気候変動の緩和策や他国の適応策を進めるための支援に関する環境政策に貢献する情報を提供した。

穀物生産分野に関しては、今後、気候変動の下で継続的に収量を増加させるためには、従来の増収技術（施肥管理や高収量品種の利用）の開発途上国での一層の普及に加えて、高温耐性品種や灌漑・排水設備の整備といった、より積極的な気候変動への適応技術の開発・普及を加速していく必要があることを示した。また本成果から、世界の乾燥・半乾燥地域における農地土壌の炭

素貯留が、温暖化の緩和、食料安全保障、土壌保全、といった複数の SDGs の達成に同時に寄与できることが、具体的な数値とともに示された。

健康分野に関しては、同じレベルの高気温において、夏の初めに熱関連超過死亡および熱中症搬送者数のリスクが大きく、熱中症対策を季節が始まる前から行うべきことを示した。更に、停電と熱中症の救急搬送者数が急増することから、今後の適応策において、個別の政策のみでなく、複合災害を想定した総合的な政策が必要であることを示した。すなわち、熱関連超過死亡に対する適応策として、水分補給とエアコンの適切な使用だけでなく、送電線を地中に埋設するなどの台風に対する強靱化や、太陽光発電などで地域の電源を独立して確保するなどの方策、洪水の影響を受けやすい地域ではエアコンの室外機を高い位置に設置することなども重要な適応策と位置付けられる。このように、気候変動による様々な影響について、複合災害を防ぐという観点が必要であることを示したことは環境政策への大きな貢献と考えられる。

沿岸地域に関しては、海面上昇等に伴う全球規模の浸水影響、防護費用データベース構築、防護効果評価、その防護費用と費用便益を提示した。不確実性はあるものの全球規模では概ね費用便益比は 1 を超え、早期の防護策の実施に経済合理性があることが示された。今後の適応政策の判断材料となる。

<行政が既に活用した成果>

特になし

<行政が活用することが見込まれる成果>

- 洪水に関しては、経済発展の進展に伴う自律的な適応の効果と、経済的合理性の観点から適応の限界がある地域を提示した。これは、今後の災害マネジメントと気候変動適応策を策定するために重要な科学的定量的情報である。また、1.5℃と2℃では洪水による潜在的な死亡数は有意に異なっていることが IPCC の 1.5℃特別報告書に引用され、将来の緩和策達成目標を決定するための重要な判断材料として環境政策への貢献が大きい成果を創出した。
- 穀物生産に関しては、本サブテーマで可能となった将来の農業生産コストの推計を、適応コストおよび残余被害コストに分離した上で緩和策のコストと比較することで、発展途上国のみならず先進国における気候変動対応政策への貢献が期待できる。また、土地利用変化の推計結果やテーマ 5 で行われる応用一般均衡モデルによる貿易量と併せることにより、世界の食料安全保障政策への提言も可能となる。気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 1 ならびに第 2 作業部会の第 5 次評価報告書、1.5℃特別報告書および陸域特別報告書に多数の論文が引用されている。
- 健康に関しては、今回の計算は、政策オプションごとの影響を提示できる内容を含んでおり、特に熱関連死亡の成果は、2016 年には UNFCCC と WHO (世界保健機関) とのプロジェクト、WHO UNFCCC Climate and Health Country Profiles にも用いられて、結果が WHO から公表されている (<http://www.who.int/globalchange/resources/countries/en/>) ほか、既に活動が開始されている IPCC の 1.5℃特別報告書とともに、近く開始される都市の特別報告書にも直接貢献するものである。他の健康影響に関しても、世界に先駆けて幅広い政策オプションに対応した結果が出されているので、環境政策への貢献は大きい。上記環境政策への貢献で述べたように、複合災害を念頭において地方の適応計画を策定していくことが見込まれる。なお、直接的な気候変動の影響ではないが、緩和策によって化石燃料の燃焼による浮遊粒子状物質が減少し、大気汚染レベルが低下することによる健康への便益が大きいという co-benefit を明らかにした。この成果は、今後の健康影響将来予測に組み込まれ、IPCC の報告書にも盛り込まれることになると期待される。
- 沿岸地域に関しては、海面上昇等に伴う潜在的浸水面積、影響人口、被害額等の浸水影響、堤防等による適応効果を評価した。堤防嵩上げ以外にも養浜やマングローブ等の適応策オプションも評価を実施した。さらに、国内外への成果の発信も積極的に行っている。例えば、ベトナム沿岸域での影響と適応策の研究成果は、マスメディアにて発信されて広く世間に周知された。2015 年 11 月に実施したベトナムのメコンデルタやハイハウ海岸での現地調査には、朝日新聞が一部同行取材し、同紙「地球異変」シリーズ (12/9) および科学面での続編 (12/17) に掲載されている。パリでの COP21 の期間中にベトナムでの気候変動の現況と適応策の重要性を一般に伝える意義があった。加えて、2016 年 9 月にベトナム社会科学院東北アジア研究所 (INAS) 主催の国際シンポジウムで講演を行った様子が現地新聞等で報道され、ベトナムでも本サブテーマの成果を発信した。IPCC (2019) SROCC 報告書第 4 章にこれらの成果 (Tamura et al., 2019) が複数引用され、今後の IPCC 報告書や環境政策等にも貢献可能な知見が得られた。

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) A. C. G. VARQUEZ, N. S. DARMANTO, Y. HONDA, T. IHARA and M. KANDA: Scientific Reports, 10:9304, doi:10.1038/s41598-020-66288-z (2020) “Future increase in elderly heat-related mortality of a rapidly growing Asian megacity”
- 2) M. TANOUE, R. TAGUCHI, S. NAKATA, S. WATANABE, S. FUJIMORI and Y. HIRABAYASHI: Water Resource Research, 56, e2019WR026092. <https://doi.org/10.1029/2019WR026092> (2020)
Estimation of direct and indirect economic losses caused by a flood with long-lasting inundation: a case study of the 2011 Thailand flood
- 3) T. IIZUMI and T. SAKAI: Scientific Data, 7, 97, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0433-7> (2020)
The global dataset of historical yields for major crops 1981-2016
- 4) T. IIZUMI and R. WAGAI: Scientific Reports, 9, doi:10.1038/s41598-019-55835-y (2019)
Leveraging drought risk reduction for sustainable food, soil and climate via soil organic carbon sequestration.
- 5) W. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58, 1233-1244. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0174.1> (2019)
Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009.
- 6) B. SULTAN, D. DEFRANCE and T. IIZUMI: Scientific Reports, 9, 12834, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49167-0> (2019)
Evidence of crop production losses in West Africa due to historical global warming in two crop models.
- 7) S. FUJIMORI, T. IIZUMI, T. HASEGAWA, J. TAKAKURA, K. TAKAHASHI and Y. HIJIOKA: Sustainability, 10, 3673, <https://doi.org/10.3390/su10103673> (2018)
Macroeconomic impacts of climate change driven by changes in crop yields.
- 8) J. Y. LEE, H. KIM, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, M. L. BELL, F. SERA, E. LAVIGNE, R. ABRUTZKY, S. TONG, M. D. S. Z. S. COELHO, P. H. N. SALDIVA, P. M. CORREA, N. V. ORTEGA, H. KAN, S. O. GARCIA, J. KYSELY, A. URBAN, H. ORRU, E. INDERMITTE, J. J. K. JAAKKOLA, N. R. I. RYTI, M. PASCAL, P. G. GOOMAN, A. ZEKA, P. MICHELOZZIM, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, M. HURTADO, J. CRUZ, X. SEPSO, B. NUNES, J. P. TEXEIRA, A. TOBIAS, C. ÍÑIGUEZAF, B. FORSBERGAG, C. ÅSTRÖMAG, A. M. VICEDO-CABRERAB, M. S. RAGETTLIAH, Y. L. GUO, B. CHEN, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, T. N. DANG, D. D. VAN, F. MAYVANEH, A. OVERCENCO, S. LI and Y. GUO: Environment International, 131, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105027> (2019)
Predicted temperature-increase-induced global health burden and its regional variability.
- 9) Y. KIM, H. KIM, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, Y. HONDA, Y. CHUNG, C. F. S. NG, A. TOBIAS, C. ÍÑIGUEZ, E. LAVIGNE, F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, M. S. RAGETTLI, N. SCOVRONICK, F. ACQUAOTTA, B. CHEN, Y. L. GUO, X. SEPOSO, T. N. DANG, M. D. S. Z. S. COELHO, P. H. N. SALDIVA, A. KOSHELEVA, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, M. L. BELL and M. HASHIZUME: Environmental Health Perspect, 127, 11, 117007, <https://doi.org/10.1289/EHP4898> (2019)
Suicide and Ambient Temperature: A Multi-Country Multi-City Study.
- 10) B. ARMSTRONG, F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, R. ABRUTZKY, D. O. ÅSTRÖM, M. L. BELL, B. CHEN, M. D. S. Z. S. COELHO, P. M. CORREA, T. N. DANG, M. H. DIAZ, D. V. DUNG, B. FORSBERG, P. GOODMAN, Y. L. GUO, Y. GUO, M. HASHIZUME, Y. HONDA, E. INDERMITTE, C. ÍÑIGUEZ, H. KAN, H. KIM, J. KYSELY, E. LAVIGNE, P. MICHELOZZI, H. ORRU, N. V. ORTEGA, M. PASCAL, M. S. RAGETTLI, P. H. N. SALDIVA, J. SCHWARTZ, M. SCORTICHINI, X. SEPOSO, A. TOBIAS, S. TONG, A. URBAN, C. D. L. C. VALENCIA, A. ZANOBETTI, A. ZEKA and A. GASPARRINI: Environmental health perspectives, 127, 9, 97007, <https://doi.org/10.1289/EHP5430> (2019)
The Role of Humidity in Associations of High Temperature with Mortality: A Multicountry, Multicity Study.
- 11) W. LEE, Y. CHUNG, C. H. MICHELLE, D. KIM, Y. HONDA, Y. L. GUO and H. KIM:

- Epidemiology, 30, S99-S106, doi:10.1097/EDE.0000000000000997 (2019)
Interactive Effect of Diurnal Temperature Range and Temperature on Mortality, Northeast Asia.
- 12) C. MA, J. YANG, S.F. NAKAYAMA and Y. HONDA: Environment International, 127, 125-133, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.025> (2019)
The association between temperature variability and cause-specific mortality: Evidence from 47 Japanese prefectures during 1972-2015.
- 13) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, Y. HIJIOKA and Y. HONDA: International Journal of Biometeorology, 63, 6, 787-800, <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01692-3> (2019)
Site-specific hourly resolution wet bulb globe temperature reconstruction from gridded daily resolution climate variables for planning climate change adaptation measures
- 14) L. TANG, Y. FURUSHIMA, Y. HONDA, T. HASEGAWA and N. ITSUBO: The International Journal of Life Cycle Assessment, 24, 6, 1118-1128, <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1561-6> (2019)
Estimating human health damage factors related to CO2 emissions by considering updated climate-related relative risks.
- 15) 熊野直子、田村誠、横木裕宗：土木学会論文集 G（環境），75(5)，pp.I_339-I_350，(2019)
海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討
- 16) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、横木裕宗：土木学会論文集 G（環境），75(5)，pp.I_331-I_337，(2019)
海面上昇による浸水影響及び防護策による適応効果評価
- 17) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、桑原祐史：土木学会論文集 G（環境），75(5)，pp.I_323-I_330，(2019)
全球堤防データを用いた浸水被害額推計に関する基礎的検討-東京湾および伊勢湾を対象として-
- 18) 西浦理、藤森真一郎、田村誠：土木学会論文集 G（環境），75(5)，pp.I_81-I_88，(2019)
全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価
- 19) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, N. HANASAKI, T. HASEGAWA, Y. HIRABAYASHI, Y. HONDA, T. IIZUMI, N. KUMANO, C. PARK, Z. SHEN, K. TAKAHASHI, M. TAMURA, M. TANOUE, K. TSUCHIDA, H. YOKOKI, Q. ZHOU, T. OKI and Y. HIJIOKA: Nature Climate Change, 9, 737-741, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0578-6> (2019)
Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways.
- 20) M. TAMURA, N. KUMANO, M. YOTSUKURI and H. YOKOKI: Climatic Change, 152, 3-4, 363-377, <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2356-2> (2019)
Global assessment of the effectiveness of adaptation in coastal areas based on RCP/SSP scenarios.
- 21) T. YOKOHATA, K. TANAKA, K. NISHINA, K. TAKAHASHI, S. EMORI, M. KIGUCHI, Y. ISERI, Y. HONDA, M. OKADA, Y. MASAKI, A. YAMAMOTO, M. SHIGEMITSU, M. YOSHIMORI, T. SUEYOSHI, K. IWASE, N. HANASAKI, A. ITO, G. SAKURAI, T. IIZUMI, M. NISHIMORI, W. -H. LIM, C. MIYAZAKI, A. OKAMOTO, S. KANAE and T. OKI: Earth's Future, DOI:10.1029/2018EF000945 (2019)
Visualizing the interconnections among climate risks.
- 22) S. KOIRALA, H. KIM, Y. HIRABAYASHI, S. KANAE and T. OKI: Water Resources Research, published online, doi:10.1029/2018WR023434 (2018)
Sensitivity of global hydrological simulations to groundwater capillary flux parameterizations.
- 23) T. IIZUMI, W. -S. KIM and M. NISHIMORI: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 99-112, <https://doi.org/10.1029/2018MS001477> (2019)
Modeling the global sowing and harvesting windows of major crops around the year 2000.
- 24) X. ZHOU, J. POLCHER, T. YANG, Y. HIRABAYASHI and T. N-QUANG: Hydrology and Earth System Sciences, 22, 6987-6108, doi:10.5194/hess-22-6087-2018 (2018)
Understanding the water cycle over the upper Tarim basin: retrospect the estimated

discharge bias to atmospheric variables and model structure.

- 25) C. MORA, D. SPIRANDELLI, E.C. FRANKLIN, J. LYNHAM, M.B. KANTAR, W. MILES, C.Z. SMITH, K. FREEL, J. MOY, L.V. LOUIS, E.W. BARBA, K. BETTINGER, A.G. FRAZIER, J.F. COLBURN IX, N. HANASAKI, E. HAWKINS, Y. HIRABAYASHI, W. KNORR, C.M. LITTLE, K. EMANUEL, J. SHEFFIELD, J.A. PATZ and C.L. HUNHTER: *Nature Climate Change*, 8, 1062, doi:10.1038/s41558-018-0315-6 (2018)
Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by GHG emissions.
- 26) T. IIZUMI, M. KOTOKU, W. KIM, P.C. WEST, J.S. GERBER and M.E. BROWN: *PLoS ONE*, 13, 9, e0203809, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203809> (2018)
Uncertainties of potentials and recent changes in global yields of major crops resulting from census- and satellite-based yield datasets at multiple resolutions.
- 27) V.-C. A.M., Y. GUO, F. SERA, V. HUBER, C.-F. SCHLEUSSNER, D. MITCHELL, S. TONG, M.D.S.Z.S. COELHO, P. HILARIO, N. SALDIVA, E. LAVIGNE, P.M. CORREA, N.V. ORTEGA, H. KAN, S. OSORIO, J. KYSELÝ, A. URBAN, J.J.K. JAAKKOLA, N.R.I. RYTI, M. PASCAL, P.G. GOODMAN, A. ZEKA, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, M. HURTADO-DIAZ, J. CRUZ, X. SEPOSO, H. KIM, A. TOBIAS, C. ÍÑIGUEZ, B. FORSBERG, D.O. ÅSTRÖM, M.S. RAGETTLI, M. RÖÖSLI, Y.L. GUO, C. WU, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, M.L. BELL, T.N. DANG, D.D. VAN, C. HEAVISIDE, S. VARDOULAKIS, S. HAJAT, A. HAINES, B. ARMSTRONG, K.L. EBI and A. GASPARRINI: *Climatic Change*, 150, 391, <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2274-3> (2018)
Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios.
- 28) M. TAMURA, K. YASUHARA, K. AJIMA, V.C. TRINH and S.V. PHAM: *International Journal of Global Warming*, 16, 1, 102-117, <https://doi.org/10.1504/IJGW.2018.094312> (2018)
Vulnerability to climate change and residents' adaptations in coastal areas of Soc Trang province, Vietnam.
- 29) F. DOTTORI, W. SZEWCZYK, J.-C. CISCAR, F. ZHAO, L. ALFIERI, Y. HIRABAYASHI, A. BIANCHI, I. MONGELLI, K. FRIELER, R. BETTS and L. FEYEN: *Nature Climate Change*, 8, 781, doi:10.1038/s41558-018-0257-z. (2018)
Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming.
- 30) T. IIZUMI, H. SHIOGAMA, Y. IMADA, N. HANASAKI, H. TAKIKAWA and M. NISHIMORI: *International Journal of Climatology*, 38, 5405-5417, <https://doi.org/10.1002/joc.5818> (2018)
Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels.
- 31) M. OKADA, T. IIZUMI, T. SAKAMOTO, M. KOTOKU, G. SAKURAI, Y. HIJIOKA and M. NISHIMORI: *Earth's Future*, 6, 1207-1220, <https://doi.org/10.1029/2017EF000763> (2018)
Varying benefits of irrigation expansion for crop production under a changing climate and competitive water use among crops.
- 32) A. HAIRETI, Y. HIRABAYASHI, B. JOHNSON, J.-F. VUILLAUME, A. KONDOH and M. URAI: 1970-2014, *Remote Sensing*, 10, 18, 1166, doi:10.3390/rs10081166 (2018)
Inventory of glaciers in the Shaxsgam Valley of the Chinese Karakoram Mountains.
- 33) A. HAIRETI, Y. HIRABAYASHI, B. JOHNSON, J.-F. VUILLAUME, A. KONDOH and M. URAI: 1970-2014, *Remote Sensing*, 10, 18, 1166, doi:10.3390/rs10081166 (2018)
Inventory of glaciers in the Shaxsgam Valley of the Chinese Karakoram Mountains.
- 34) W.H. LIM, D. YAMAZAKI, S. KOIRALA, Y. HIRABAYASHI, S. KANAE, S.J. DADSON, J.W. HALL and F. SUN: *Earth's Future*, 6, doi:10.1002/2017EF000671 (2018)
Long-term changes in global socioeconomic benefits of flood defenses and residual risk based on CMIP5 climate models.
- 35) J.A. IGUCHI, X.T. SEPOSO and Y. HONDA: *BMC Public Health*, 18, 1, 629, doi:10.1186/s12889-018-5532-4 (2018)
Meteorological factors affecting dengue incidence in Davao, Philippines.
- 36) Y. CHUNG, D. YANG, A. GASPARRINI, AM VICEDO-CABRERA, CFS NG, Y. KIM, Y. HONDA and M. HASHIZUME: *Environ Health Perspective*, 126, 5, 057002,

- <https://doi.org/10.1289/EHP2546> (2018)
Changing Susceptibility to Non-Optimum Temperatures in Japan, 1972-2012: The Role of Climate, Demographic and Socioeconomic Factors.
- 37) 熊野直子、川嶋良純、箭内春樹、田村誠、横木裕宗、桑原祐史：沿岸域学会誌, 30(4), 89-100 (2018)
衛星画像と数値表層モデルを用いた海岸堤防抽出手法の提案.
- 38) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗：土木学会論文集 G (環境), 74(5), I_167-I_174 (2018)
複数気候モデルによる海面上昇に伴う浸水影響の不確実性評価
- 39) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：土木学会論文集 G (環境), 74(5), I_395-I_404 (2018)
フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果
- 40) Y. KINOSHITA, M. TANOUÉ, S. WATANABE and Y. HIRABAYASHI: Environmental Research Letters, 13, 014006, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9401> (2018)
Quantifying the effect of autonomous adaptation to global river flood projections.
- 41) 渡部哲史、内海信幸：土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.62, I_169-174 (2018)
大規模気候予測情報類型化に向けた d4PDF 日本域降水量の特徴の把握
- 42) 森下慧、田上雅浩、岡田将誌、脇岡靖明、平林由希子：土木学会論文集 B1(水工学), 62, I_1225-1230 (2018)
灌漑による干ばつ時の穀物生産損失の低減効果とその費用に関する推計.
- 43) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, S. MUIS, P. J. WARD, H. C. WINSEMIUS, M. VERLAAN and S. KANAE: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 9, 1847-1862, <https://doi.org/10.1002/2017MS000943> (2017)
Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: Model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh.
- 44) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, Y. HIJIOKA, T. HASEGAWA, Y. HONDA and T. MASUI: Environmental Research Letters, 12, 6, 064010, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa72cc> (2017)
Cost of preventing workplace heat-related illness through worker breaks and the benefit of climate-change mitigation.
- 45) Y. GUO, A. GASPARRINI, B.G. ARMSTRONG, B. TAWATSUPA, A. TOBIAS, E. LAVIGNE, M.D.S.Z.S. COELHO, X. PAN, H. KIM, M. HASHIZUME, Y. HONDA, Y.L. GUO, C.F. WU, A. ZANOBETTI, J.D. SCHWARTZ, M.L. BELL, M. SCORTICHINI, P. MICHELOZZI, K. PUNNASIRI, S. LI, L. TIAN, S.D.O. GARCIA, X. SEPOSO, A. OVERCENCO, A. ZEKA, P. GOODMAN, T.N. DANG, D.V. DUNG, F. MAYVANEH, P.H.N. SALDIVA, G. WILLIAMS and S. TONG: Environmental Health Perspectives, 125, 8, 087006, <https://doi.org/10.1289/EHP1026> (2017)
Heat Wave and Mortality: A Multicountry, Multicommunity Study.
- 46) B. ARMSTRONG, M.L. BELL, M.D.S.Z.S. COELHO, Y.L. LEON GUO, Y. GUO, P. GOODMAN, M. HASHIZUME, Y. HONDA, H. KIM, E. LAVIGNE, P. MICHELOZZI, P. HILARIO NASCIMENTO SALDIVA, J. SCHWARTZ, M. SCORTICHINI, F. SERA, A. TOBIAS, S. TONG, C.F. WU, A. ZANOBETTI, A. ZEKA and A. GASPARRINI: Environmental Health Perspectives, 125, 10, 107009, <https://doi.org/10.1289/EHP1756> (2017)
Longer-Term Impact of High and Low Temperature on Mortality: An International Study to Clarify Length of Mortality Displacement.
- 47) T.N. DANG, D.Q. VAN, H. KUSAKA, X.T. SEPOSO and Y. HONDA: American Journal of Public Health, 108, 2, S137-S143, doi: 10.2105/AJPH.2017.304123 (2017)
Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City.
- 48) X.T. SEPOSO, T.N. DANG and Y. HONDA: Global Health Action, 10, 1, 1368969, <https://doi.org/10.1080/16549716.2017.1368969> (2017)
Exploring the effects of high temperature on mortality in four cities in the Philippines using various heat wave definitions in different mortality subgroups.
- 49) A. GASPARRINI, Y. GUO, F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, V. HUBER, S. TONG, M.D.S.Z.S. COELHO, P.H. NASCIMENTO SALDIVA, E. LAVIGNE, P.M. CORREA, N.V. ORTEGA, H. KAN, S. OSORIO, J. KYSELÝ, A. URBAN, J.J.K. JAAKKOLA, N.R.I. RYTI, M. PASCAL, P.G. GOODMAN,

- A. ZEKA, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, M. HURTADO-DIAZ, J.C. CRUZ, X. SEPOSO, H. KIM, A. TOBIAS, C. IÑIGUEZ, B. FORSBERG, D.O. ÅSTRÖM, M.S. RAGETTLI, Y.L. GUO, C.F. WU, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, M.L. BELL, T.N. DANG, D.D. VAN, C. HEAVISIDE, S. VARDOULAKIS, S. HAJAT, A. HAINES and B. ARMSTRONG: *The Lancet Planetary Health*, 1, 9, E360–E367, [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30156-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0) (2017)
- Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios.
- 50) S.E. KIM, M.L. BELL, M. HASHIZUME, Y. HONDA, H. KAN and H. KIM: *Environment International*, 110, 88–94, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.10.010> (2018)
- Associations between mortality and prolonged exposure to elevated particulate matter concentrations in East Asia.
- 51) Y. KIM, C.F.S. NG, Y. CHUNG, H. KIM, Y. HONDA, Y.L. GUO, Y.H. LIM, B.Y. CHEN, L.A. PAGE and M. HASHIZUME: *Environmental Health Perspectives*, 126, 3, 037002, <https://doi.org/10.1289/EHP2223> (2018)
- Air Pollution and Suicide in 10 Cities in Northeast Asia: A Time-Stratified Case-Crossover Analysis.
- 52) J.A. IGUCHI, X.T. SEPOSO and Y. HONDA: *BMC Public Health*, 18, 1, 629, doi: 10.1186/s12889-018-5532-4 (2018)
- Meteorological factors affecting dengue incidence in Davao, Philippines.
- 53) Y. CHUNG, D. YANG, A. GASPARRINI, A.M. VICEDO-CABRERA, C.F.S. NG, Y. KIM, Y. HONDA and M. HASHIZUME: *Environmental Health Perspectives*, 126, 5, 057002, doi: 10.1289/EHP2546 (2018)
- Changing Susceptibility to Non-Optimum Temperatures in Japan, 1972–2012: The Role of Climate, Demographic, and Socioeconomic Factors.
- 54) T. IIZUMI, Y.-H. SHIN, W.-S. KIM, M.-S. KIM, J.-W. CHOI: *International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM)* (2018)
- Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble
- 55) G. SAKURAI, M. OKADA, M. NISHIMORI AND M. YOKOZAWA: *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (2017)
- Benefits of seasonal forecasts of crop yields
- 56) W.-S. KIM, T. IIZUMI AND M. NISHIMORI: *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (2017)
- Detection of Meteorological Extreme Effect on Historical Crop Yield Anomaly
- 57) M. OKADA, T. IIZUMI, T. SAKAMOTO, M. KOTOKU, G. SAKURAI and M. NISHIMORI, *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (2017)
- The limit of irrigation adaption due to the inter-crop conflict of water use under changing climate and landuse
- 58) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、横木裕宗、桑原祐史：土木学会論文集 G(環境)，73(5)，I_361–I_367，(2017)
- 伊勢湾台風を事例とする高潮浸水被害額推計手法の検証
- 59) 四栗瑞樹・田村誠・熊野直子・増永英治・横木裕宗：土木学会論文集 G(環境)，73(5)，I_369–I_376，(2017)
- RCP・SSP シナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価
- 60) 熊野直子・土田晃次郎・田村誠・増永英治・桑原祐史・横木裕宗：土木学会論文集 B3(海洋開発)，73(2)，I_1007–I_1012，(2017)
- 日本における海面上昇への適応を目的とした防護費用の将来推計
- 61) T. IIZUMI, J. FURUYA, Z.-H. SHEN, W.-S. KIM, M. OKADA, S. FUJIMORI, T. HASEGAWA and M. NISHIMORI: *Scientific Reports*, 7, (2017)
- Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes.
- 62) T. IIZUMI, H. TAKIKAWA, Y. HIRABAYASHI, N. HANASAKI and M. NISHIMORI: *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)*, 122, (2017)
- Contributions of different bias - correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes
- 63) 熊野直子、土田晃次郎、田村誠、増永英治、桑原祐史、横木裕宗：土木学会論文集 B3(海洋開発)、73、2、6p、(2017)

日本における海面上昇への適応を目的とした防護費用の将来推計

- 64) O. NISHIURA, M. TAMURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, J. TAKAKURA and Y. HIJIOKA: Sustainability, 12(9), 12p. (2020)
An Assessment of Global Macroeconomic Impacts Caused by Sea Level Rise Using the Framework of Shared Socioeconomic Pathways and Representative Concentration Pathways
- 65) Y. CHUNG, H. NOH, Y. HONDA, M. HASHIZUME, M. L. BELL, Y. L. GUO and H. KIM: Am Journal of Epidemiology. 1-7 (2017)
Temporal Changes in Mortality Related to Extreme Temperatures for 15 Cities in Northeast Asia: Adaptation to Heat and Maladaptation to Cold.
- 66) X.T. SEPOSO, T.N. DANG and Y. HONDA: International Journal of Environmental Research and Public Health, 14, 4, 385 (2017)
How Does Ambient Air Temperature Affect Diabetes Mortality in Tropical Cities?
- 67) 渡部哲史, 鼎信次郎, 平林由希子: 土木学会論文集 B1(水工学) 、73、4、I_121-I_126 (2017)
クオンタイルマッピング型補正を用いた気候変化影響評価に関する考察
- 68) Y. KIM, A. GASPARRINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, C.F.S. Ng, B. ARMSTRONG: Environ Health Perspectives, accepted 14th Mar, (2017)
Heat-related mortality in Japan after the 2011 Fukushima disaster: An analysis of 2 potential influence of reduced electricity consumption
- 69) Y. GUO, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, B. TAWATSUPA, A. TOBIAS, E. LAVIGNE, M. S. COELHO, X. PAN, H. KIM, M. HASHIZUME, Y. HONDA, YL. GUO, CF. WU, A. ZANOBETTI, JD. SCHWARTZ, ML. BELL, A. OVERCENCO, K. PUNNASIRI, S. LI, L. TIAN, P. SALDIVA, G. WILLIAMS, and S. TONG: Environmental Health Perspectives Temperature, 124, 10, 1554-1559 (2016)
Variability and Mortality: A Multi-Country Study
- 70) M. TANOUE, Y. HIRABAYASHI and H. IKEUCHI: Scientific Reports, 6, 36201 (2016)
Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years.
- 71) Y. HIRABAYASHI, K. NAKANO, Y. ZHANG, S. WATANABE, M. TANOUE and S. KANAE: Scientific Reports, 6, 29723 (2016)
Contributions of natural and anthropogenic radiative forcing to mass loss of Northern Hemisphere mountain glaciers and quantifying their uncertainties.
- 72) X. T. SEPOSO, T. N. DANG and Y. HONDA: Glob Health Action 2016, 9: 31500 (2016)
Effect modification in the temperature extremes by mortality subgroups among the tropical cities of the Philippines
- 73) M. A. TRIGG, C. E. BIRCH, J. C. NEAL, P. D. BATES, A. SMITH, C. C. SAMPSON, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI, F. PAPPENBERGER and E. DUTRA: Environ. Res. Lett., 11, 094012 (2016)
The credibility challenge for global fluvial flood risk analysis.
- 74) 木村雄貴、田上雅浩、今田由紀子、平林由希子: 土木学会論文集 G(環境) , 72, 5, 1-6 (2016)
Event Attribution 実験を用いた 2012 年アマゾン川洪水の要因分析.
- 75) T. N. DANG, X. T. SEPOSO, N. H. DUC, T. B. THANG, D. AN DO, L. T. HANG, T. T. LONG, B. T. LOAN and Y. HONDA: Global Health Action, 9, doi:10.3402/gha.v9.28738, (2016)
Characterizing the relationship between temperature and mortality in tropical and subtropical cities: a distributed lag non-linear model analysis in Hue, Viet Nam.
- 76) T. IIZUMI and N. RAMANKUTTY: Environ. Res. Lett., 11, 034003 (2016)
Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change.
- 77) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, M. KIGUCHI, S. KOIRALA, T. NAGANO, A. KOTERA and S. KANAE: Environmental Research Letters, 10, 124011, (2015)
Modeling complex flow dynamics of fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta.
- 78) Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI, Q. LIU and S. LIU: Journal of Glaciology, 61, doi:10.3189/2015JoG14J188 (2015)
Glacier runoff and its impact in a highly glacierized catchment in the southeastern Tibetan Plateau: past and future trends.

- 79) T. SAKAI, T. IIZUMI, M. OKADA, M. NISHIMORI, T. GRÜN WALDB, J. PRUEGERC, A. CESCATTID, W. KORRESE, M. SCHMIDTF, A. CARRARAG, B. LOUBETH and E. CESCHIAI: Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf, doi:10.1016/j.jag.2015.09.011 (2015)
Varying applicability of four different satellite-derived soil moisture products to global gridded crop model evaluation.

<査読付論文に準ずる成果発表>

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) T. IIZUMI: in Adaptation to Climate Change in Agriculture - Research and Practices (eds. Iizumi, T., R. Hirata, and R. Matsuda), Springer Nature, 3-16. (2019)
Emerging adaptation to climate change in agriculture
- 2) T. IIZUMI and W. KIM: in Adaptation to Climate Change in Agriculture - Research and Practices (eds. Iizumi, T., R. Hirata, and R. Matsuda), Springer Nature, 97-110. (2019)
Recent improvements to global seasonal crop forecasting and related research
- 3) M. NISHIMORI: In "Nature, Culture, and Food in Monsoon Asia", S. Yokoyama et al. (Eds.), Springer Nature Singapore Pte Ltd., 15-24 (2020).
Global Warming and Agricultural Production in Asia
- 4) H. YOKOKI, M. TAMURA, M. YOTSUKURI, N. KUMANO and Y. KUWAHARA: CLIVAR Exchanges, 74, 36-39, (2018)
Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise
- 5) 西森基貴: 農業いばらき、2018年5月号、16-17 (2018)
気候変動・異常気象による農作物被害とその軽減技術
- 6) 本田 靖: 日本医師会雑誌, 第146巻・特別号(2), S191-S193 (2017)
地球温暖化④—熱波と超過死亡
- 7) 本田 靖: 労働の科学 72(4), 4-8 (2017)
気候変動の健康影響と適応策.
- 8) 田村誠、熊野直子: 沿岸域学会誌 29(4), 19-24, (2017)
海面上昇等による沿岸域の浸水影響と適応策
- 9) 田村誠、熊野直子: 沿岸域学会誌、29、4、19-24、(2017)
海面上昇等による沿岸域の浸水影響と適応策
- 10) M. TAMURA, N. KUMANO, H. YOKOKI, Y. KUWAHARA and K. YASUHARA: Proceedings of Hanoi Geoengineering 2016 on "Energy & Sustainability", Hanoi, Vietnam, October 21, 2016, 93-98 (2016)
Coastal adaptation to climate change in Vietnam and Japan: A socioeconomic analysis
- 11) M. TAMURA, K. YASUHARA, N. KUMANO, H. YOKOKI and Y. KUWAHARA: Proceedings of International Conference on "Building Sustainable Development Society: Vietnam-Japan Cooperation to Ensure the Sustainable Development", Institute for Northeast Asian Studies, Vietnam Academy of Social Sciences, Hanoi, Vietnam, September 28, 2016, 292-303, (2016)
Climate change and resilient adaptation in coastal areas, Vietnam
- 12) M. TAMURA, N. KUMANO, H. YOKOKI, Y. KUWAHARA and K. YASUHARA: Proceedings of Hanoi Geoengineering 2016 on "Energy & Sustainability", Hanoi, Vietnam, October 21, 2016, 93-98 (2016)
Coastal adaptation to climate change in Vietnam and Japan: A socioeconomic analysis
- 13) 西森基貴: JATAFF ジャーナル、4、5、68 (2016)
気候変動による食料生産変動の影響予測に向けて
- 14) 平林由希子: 環境研究、181 (2016)
温暖化による世界の氷河融解—海面上昇と水資源への影響—
- 15) N. KUMANO, M. TAMURA, H. YOKOKI and Y. KUWAHARA: Proceedings of Hanoi Geoengineering 2016 on "Energy & Sustainability", Hanoi, Vietnam, October 21, 2015, 30-36 (2016)
Coastal dike cost analyses based on socioeconomic scenarios in Vietnam
- 16) M. TAMURA, N. KUMANO, H. YOKOKI and K. YASUHARA: Proceedings of HANOIGEO 2015 on "Engineering geology in respond to climate change and sustainable development of

infrastructure” , November 27, 2015, 35-38 (2015)

Coastal adaptation and management to climate change in Vietnam: Some options and their costs

- 17) 田村誠、安原一哉、安島清武、Trinh Cong Van、Pham Van Song : 茨城大学人文学部紀要 (社会科学論集) 、60、49-61 (2015)
ベトナム・ソクチャン省沿岸域における気候変動への脆弱性とコミュニティ主導型適応策

(2) 主な口頭発表 (学会等)

- 1) 金元植・飯泉仁之直・趙在一・増富祐司 : 日本農業気象学会 2020 年全国大会 (2020) 誌上発表
干ばつによる全球穀物被害の検出と予測に関する試み
- 2) 飯泉仁之直、滝本貴弘、増富祐司 : 日本農業気象学会 2020 年全国大会 (2020) 誌上発表
農業応用向け全球・3 時間・0.5° ・バイアス補正再解析・季節予報接合気象外力データ」
- 3) W. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI : AgMIP-East Asia and Climate Smart Agriculture Symposium & The 6th Symposium on the Development and Application of Agricultural System Models in China (2019)
Toward Forecast Service of Global Crop Yields using APCC MME
- 4) 金元植、飯泉仁之直、西森基貴 : 気象研究所 応用気象研究部臨時コロキウム (2019)
Global Patterns of Crop Production Losses Associated with Droughts and Floods from 1984 to 2009
- 5) O. SASAKI, Y. HIRABAYASHI, K. FUJITA, A. SAKAI and S. KANAE : AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2019)
Future glacier volume and runoff changes over Central Europe using a full energy balance-based glacier model with debris effects
- 6) M. OKADA, T. IIZUMI and Y. HIJIOKA (2019) AGU Fall Meeting, December 9-13, Moscone Convention Center, San Francisco, USA (2019)
Future climate change decreases benefits from irrigation for global food production,
- 7) W. KIM, T. IIZUMI, Y. SHIN, J. CHOI, and K.-H. KIM : AGU Fall Meeting 2019, December 9-13, 2019, Moscone Convention Center, San Francisco, USA (2019)
Toward forecast service of global crop yields using APCC MME
- 8) N. KUMANO, M. TAMURA, T. INOUE and H. YOKOKI : 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, December 10 (2019)
Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam
- 9) 佐々木織江、藤田耕司、平林由希子、鼎信次郎 : 水文・水資源学会 2019 年度総会・研究発表会、千葉、9 月 (2019)
中央ヨーロッパを対象とした熱収支氷河モデルによる氷河流出量の将来予測
- 10) 田上雅浩、平林由希子 : 水文・水資源学会 2019 年度総会・研究発表会、千葉、9 月 (2019)
河川堤防防護による全球規模での適応費用便益分析
- 11) 熊野直子、田村誠、横木裕宗 : 第 27 回地球環境シンポジウム、富山国際会議場、8 月 (2019)
海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討
- 12) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、横木裕宗 : 第 27 回地球環境シンポジウム、富山国際会議場、8 月 (2019)
海面上昇による浸水影響及び防護策による適応効果評価」
- 13) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、桑原祐史 : 第 27 回地球環境シンポジウム、富山国際会議場、8 月 (2019)
全球堤防データを用いた浸水被害額推計に関する基礎的検討-東京湾および伊勢湾を対象として-
- 14) 西浦理、藤森真一郎、田村誠 : 第 27 回地球環境シンポジウム、富山国際会議場、8 月 (2019)
全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価
- 15) S. KANAE, O. SASAKI, K. FUJITA and Y. HIRABAYASHI : 16th annual meeting, Singapore, 28 July-2 August (2019)
Glacier Runoff Simulation Under Climate Change by an Energy Balance Model for Individual Glaciers on a Continental-scale, Asia Oceania Geosciences Society
- 16) 飯泉仁之直 : 日本農業気象学会 2019 年全国大会, 3 月 (2019)
収量予測を高度化するために開発された全球に適用可能な栽培暦推定モデル

- 17) W.-S. KIM, T. IIZUMI AND M. NISHIMORI: 3rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology/12th Fire and Forest Meteorology Symposium/Fourth Conference on Biogeosciences, (2018)
Worldwide Drought Vulnerability Maps for Staple Crops
- 18) T. IIZUMI, T. NAKAEGAWA, W.-S. KIM and M. NISHIMORI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting (2018)
Climate extremes and global crop production”
- 19) G. SAKURAI, T. DOI, M. OKADA, M. NISHIMORI and M. YOKOZAWA: EGU General Assembly (2018)
Potential benefits of changing the planting date to account for seasonal weather forecasts
- 20) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: EGU General Assembly (2018)
Vulnerability of Global Crop Production Systems to Drought Extremes
- 21) M. TAMURA: 4th National Institute for Environmental Studies (NIES) Forum, Hanoi, Vietnam, January 23 (2019)
Coastal adaptation mixing gray and green infrastructures to climate change in Vietnam”
- 22) R. TAGUCHI, M. TANOUE, D. YAMAZAKI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Development of the estimation method of river flood business interruption loss at the global scale
- 23) M. TANOUE, R. TAGUCHI, S. NAKATA, S. WATANABE, S. FUJIMORI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Estimation of gross domestic production loss due to flood impacts: case study for Thailand flood in 2011
- 24) O. SASAKI, K. FUJITA, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Seasonal glacier runoff including the debris effects over Central Europe
- 25) M. WATANABE, Y. YANAGAWA, Y. HIRABAYASHI, S. WATANABE and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Differences in observed climate data affect the spread of projecting future glacier mass changes
- 26) M. TAMURA, N. KUMANO, T. INOUE and H. YOKOKI: Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, November 10 (2018)
Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam”
- 27) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：第26回地球環境シンポジウム、長崎大学、9月(2018)
フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果
- 28) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗、第26回地球環境シンポジウム、長崎大学、9月(2018)
複数気候モデルによる海面上昇に伴う浸水影響の不確実性評価
- 29) M. TANOUE, R. TAGUCHI and Y. HIRABAYASHI: Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, 17-18 September (2018)
Estimating indirect losses due to river flooding: case study for Thailand flood in 2011
- 30) 田口諒、田上雅浩、平林由希子：水文・水資源学会2018年度総会・研究発表会、三重、9月12-14日(2018)
全球へ適用可能な洪水による営業停止損失推計手法の構築
- 31) 田上雅浩、田口諒、平林由希子：水文・水資源学会2018年度総会・研究発表会、三重、9月12-14日(2018)
損失と被害の定量化のための全球河川氾濫モデルのダウンスケーリング手法の検討
- 32) Y. HONDA: Climate Change and Health Symposium, Miami, USA, April (2018) (Invited speech)
Heat-related excess mortality and its prevention system.

- 33) T. N. DANG and Y. HONDA: The 5th International Climate Change Adaptation conference, Cape Town, South Africa, June (2018)
Chronological trend of autonomous adaptation to heat-related mortality in Japan.
- 34) Y. HONDA: The 30th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Ottawa, Canada, August (2018)
Climate change impact on heat-related mortality - ISI-MIP context.
- 35) F. SERA, A. VICEDO-CABRERA, M. HASHIZUME, Y. HONDA, J. SCHWARTZ, A. ZANOBETTI and A. GASPARRINI: A Longitudinal Analysis. The 30th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Ottawa, Canada, August (2018)
Air Conditioning and Heat-Related Mortality in U.S. and Japan:
- 36) Y. HONDA and M. HASHIZUME: 第77回日本公衆衛生学会総会, 郡山, 10月 (2018)
Area difference in cold-related excess mortality is related to temperature distribution
- 37) 本田靖: 第83回日本健康学会総会, 前橋, 11月 (2018)
熱中症救急搬送と気温との関連
- 38) Y. HONDA: The First Heat Health Forum of Global Heat Health Information Network, Hongkong, China, December (2018)
Prevention of heat-related excess mortality --- Intervention
- 39) S. KANAE, O. SASAKI, K. FUJITA and Y. HIRABAYASHI: 16th annual meeting, Singapore, 28 July- 2 August (2019) (口頭)
Glacier Runoff Simulation Under Climate Change by an Energy Balance Model for Individual Glaciers on a Continental-scale, Asia Oceania Geosciences Society
- 40) H. IKEUCHI, D. EILANDER, J. HOCK, F. BAART, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI, H. WINSEMIUS and P. WARD: EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria, 8-13 April (2018) (口頭)
Application of a nesting approach for improved flood inundation simulation for estuaries and deltas in the framework of global flood modelling
- 41) DOTTORI, F., W. SZEWCZYK, J. C. CISCAR, F. ZHAO, L. ALFIERI, Y. HIRABAYASHI, A. BIANCHI, I. MONGELLI, K. FRIELER, R. BETTS and L. FEYEN: EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria, 8-13 April (2018)
Global human and economic losses from river floods at global warming of 1.5°C, 2°C and 3 °C
- 42) Y. HONDA: Heat-related excess mortality and its prevention system. Climate and Health Symposium, Miami, USA, April 2018.
- 43) 池内寛明、平林由希子、山崎大: 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2018年大会、千葉(2018年)
全球河川モデルによる沿岸域氾濫シミュレーションにネスティング手法の導入が及ぼす影響の評価
- 44) 飯泉仁之直、日本農業気象学会75周年記念大会 (2018)
食料生産の広域でのモニタリングやモデリング, 予測は今後, どこに向かうか?
- 45) T. IIZUMI, Y.-H. SHIN, W.-S. KIM, M.-S. KIM and J.-W. CHOI: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM) (2018)
Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble
- 46) G. SAKURAI, M. OKADA, M. NISHIMORI and M. YOKOZAWA: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
Benefits of seasonal forecasts of crop yields
- 47) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
Detection of Meteorological Extreme Effect on Historical Crop Yield Anomaly
- 48) M. OKADA, T. IIZUMI, T. SAKAMOTO, M. KOTOKU, G. SAKURAI and M. NISHIMORI: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
The limit of irrigation adaption due to the inter-crop conflict of water use under changing climate and landuse
- 49) Y. HONDA: 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)

- 50) M. TAMURA, N. KUMANO, M. YOTSUKURI, Y. KUWAHARA and H. YOKOKI: 2017 AGU Fall Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, December 12 (2017)
Global cost analysis on adaptation to sea level rise based on RCP/SSP scenarios
- 51) G. SAKURAI, M. OKADA, M. NISHIMORI and M. YOKOZAWA: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
Benefits of seasonal forecasts of crop yields
- 52) 飯泉仁之直、塩竈秀夫、今田由紀子、花崎直太、金元植、沈志宏、西森基貴：日本気象学会 2017 年度秋季大会 (2017)
気候モデルによる大規模アンサンブルデータを用いた作物収量への気候変動影響の検出
- 53) 本田靖、橋爪真弘：第 82 回日本健康学会総会，沖縄，11 月 (2017)
救急搬送数と気象変数との関連について
- 54) Y. HONDA: ISI-MIP cross-sctoral Workshoop, Potsdam, Germany, October (2017)
Climate change impact on heat-related mortality
- 55) Y. HIRABAYASHI: Seventh International Conference on Flood Management, Leeds, UK, 5-7 September, 2017. (口頭)
Global projection of river flood risk considering autonomous adaptation
- 56) Y. HONDA, T.N. DANG and X.T. SEPOSO. The 21st International Congress of Biometeorology, Durham, UK, September (2017)
Short-term specific humidity effect on mortality in Japan.
- 57) Y. CHUNG, D. YANG, A. GASPARRINI, A. VICEDO-CABRERA, CFS NG, Y. KIM, Y. HONDA and M. HASHIZUME: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, September (2017)
Changing susceptibility to temperature over time and the associated climate, demographic and socio-economic factors in Japan for 1972 - 2012.
- 58) Y. HONDA: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, September (2017) (Invited speech)
Six years after Fukushima disaster - lessons learned
- 59) T.N. DANG, D.Q. VAN, X.T. SEPOSO, H. KUSAKA and Y. HONDA: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, September (2017)
Comparing heat-mortality relation between central area and outer area within a mega city of Vietnam.
- 60) 田上雅浩，平林由希子，池内寛明：水文・水資源学会 2017 年度総会・研究発表会、北見、9 月 19-21 日 (2017)
過去 50 年以上にわたる全球での洪水脆弱性の長期変動
- 61) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、横木裕宗、桑原祐史：第 25 回地球環境シンポジウム，神戸大学，9 月 (2017)
伊勢湾台風を事例とする高潮浸水被害額推計手法の検証
- 62) 四栗瑞樹、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗：
第 25 回地球環境シンポジウム，神戸大学，9 月 (2017)
RCP・SSP シナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価
- 63) 田村誠：第 3 回日本語の歴史的典籍国際研究集会，国文学研究資料館，立川，7 月 (2017)
気候変動適応学と歴史学、国文学との共働可能性
- 64) H. YOKOKI, M. TAMURA and Y. KUWAHARA: International WCRP/IOC Conference 2017
“Regional Sea Level Changes and Coastal Impacts”, Columbia University, USA, July 12 (2017)
Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise
- 65) 熊野直子、土田晃次郎、田村誠、増永英治、桑原祐史、横木裕宗：第 42 回海洋開発シンポジウム，仙台国際センター，6 月 (2017)
日本における海面上昇への適応を目的とした防護費用の将来推計
- 66) T. IIZUMI, T. NAKAEGAWA, W.-S. KIM and M. NISHIMORI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting (2017)
Climate extremes and global crop production
- 67) 西森基貴、第 67 回気候影響・利用研究会 (2017)
近年の気候変動・異常気象とその農業への影響

- 68) O. SASAKI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Remotely sensed global distribution of debris thermal resistance on glaciers
- 69) S. WATANABE, N. UTSUMI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Projections of the duration of low-precipitation season in the Chao Phraya river basin based on the output from CMIP5 GCMs
- 70) M. Watanabe, S. Watanabe, Y. Hirabayashi, S. Yoshikawa, S. Kanae: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Uncertainty from climate forcing of glacier projection for High Mountain Asia
- 71) M. M. G. D. MADAKUMBURA, S. WATANABE, M. TANOUE, Y. IMADA and Y. HIRABAYASHI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Influence of global warming on Eurasian snow cover teleconnection to the Indian monsoon rainfall using a large ensemble AGCM experiment
- 72) 本田靖: 日本地理学会 2017 年春季学術大会シンポジウム S16, つくば, 2017 年 3 月 (招待講演)
「暑熱分野における気候変動影響と適応技術の社会実装」(2017) 温暖化の健康影響 – 評価法の精緻化と対応策の構築
- 73) 飯泉仁之直: 日本農業気象学会 2017 年全国大会 (2017)
主要穀物の栽培暦についてのグローバルデータセットの開発
- 74) M. OKADA, T. IIZUMI, G. SAKURAI and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
Effectiveness of irrigation adaption depending on change in available water resources under changing climate and landuse
- 75) O. SASAKI, O. NOGUCHI, Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE, 12-16 December, San Francisco, USA (2017)
Global-scale analysis of satellite-derived debris distribution on glaciers, AGU Fall meeting,
- 76) M. WATANBE, Y. HIRABAYASHI, S. YOSHIKAWA and S. KANAE, AGU Fall meeting, 12-16 Dec, San Francisco, USA
Uncertainty of glacier runoff projection from precipitation data for High Mountain Asia
- 77) W.-S. KIM, T. IIZUMI, and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
The relationship between standardized precipitation index and historical crop yield in the world
- 78) T. IIZUMI, W.-S. KIM, S. ZHIHONG and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
Modeling global yield growth of major crops under multiple socioeconomic pathways
- 79) 本田靖: 第 31 回日本国際保健医療学会, 久留米 (2016)
熱関連死亡の将来予測と適応策
- 80) Y. HONDA: Dasan Conference, Jeju, Korea (2016)
New aspect of climate change impact on heat-related mortality
- 81) 本田靖: 第 81 回日本民族衛生学会総会 (2016)
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 –
- 82) Y. HONDA: Heat-related mortality: CWB-APCC Workshop on Climate Service for Health, Taipei, Taiwan (2016)
Impact of climate change and adaptation
- 83) 岡田将誌、飯泉仁之直、櫻井玄、西森基貴: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
気候・水資源制約下での農業適応策としての灌漑面積拡大の有効性
- 84) 飯泉仁之直、西森基貴: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2016)
気象外力データセット間の気温・降水極端指標の再現性の差異
- 85) A. GASPARRINI, Y. GUO, F. SERA, S. KHARE, C. HEAVISIDE, A. TOBIAS, M. HASHIZUME, E. LAVIGNE, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, DO. ASTROM, B. FORSBERG, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, XT. SEPOSO, YL. GUO, CF. WU, H. KAN, TN. DANG, DV. DUNG, MDSZS. COELHO, P. HILARIO N. SALDIVA, S. TONG, Y. HONDA, H. KIM, S. VARDOULAKIS, S. HAJAT and B. ARMSTRONG: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental

- Epidemiology, Rome, Italy, September (2016)
 Projections of temperature-attributed mortality under climate change scenarios: an analysis of 395 locations in 15 countries.
- 86) Y. GUO, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, B. TAWATSUPA, A. TOBIAS, E. LAVIGNE, MDSZS. COELHO, X. PAN, H. KIM, M. HASHIZUME, Y. HONDA, YL. GUO, CF. WU, A. ZANOBETTI, JD. SCHWARTZ, ML. BELL, AV. OVERCENCO, K. PUNNASIRI, S. LI, L. TIAN, P. SALDIVA, G. WILLIAMS and S. TONG: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy (2016)
 The association between temperature variability and mortality: an international collaborative study.
- 87) Y. HONDA, XT. SEPOSO, TN. DANG, M. HASHIZUME and H. KIM: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy (2016)
 Negative risk of cold on lag 0 day in distributed lag pattern can be due to preceding mortality peak before the temperature trough”
- 88) W.-S. KIM: ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) (2016) Annual International Meeting, Orlando, Florida (2016)
 Agro-Meteorological Nowcaster (AMEN) for the monitoring and forecasting of evapotranspiration
- 89) Y. HONDA: 10th ASIAHORCs General Meeting and 8th Joint Symposium, Muntinpula, the Philippines (2016)
 Heat-related mortality: Impact and adaptation
- 90) Y. HONDA, X.T. SEPOSO and T.N. DANG: Conference of International Society for Environmental Epidemiology and International Society of Exposure Science Asia Chapter, Sapporo, Japan (2016)
 Difference between the cold effect and the heat effect in evaluating the short-term weather-mortality relation
- 91) Z. SHEN, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: 14th Pacific Regional Science Conference Organization (PRSCO 2016), Bangkok, Thailand (2016)
 Cost benefit analysis of agricultural policy to improve food productivity and environmental efficiency: a model simulation study in Songyuan city, China
- 92) G. SAKURAI, M. NISHIMORI, M. OKADA, T. IIZUMI and M. YOKOZAWA: Adaptation Futures 2016, Rotterdam, The Netherlands (2016)
 Future possible crop yield scenarios under multiple SSP and RCP scenarios
- 93) Y. HONDA: Adaptation Futures, Rotterdam, the Netherlands (2016)
 Is adaptation to a warming world effective? - Difficulty in implementing heat-health warning system even in developed countries.
- 94) 川嶋良純、熊野直子、田村誠、桑原祐史：日本リモートセンシング学会 第60回（平成28年度春季）、101-102（2016）
 全球DSMを使用した堤防抽出方法の提案と氾濫シミュレーションへの展開
- 95) 櫻井玄、横沢正幸：日本農業気象学会2016年全国大会（2016）
 広域作物モデルにおける誤差の空間相関の取り扱いが予測に及ぼす影響
- 96) 飯泉仁之直：日本農業気象学会2016年全国大会（2016）
 過去30年間の気候変化が世界の主要穀物の収量変動に与えた影響
- 97) 渡辺恵、平林由希子、渡部哲史、吉川沙耶花、鼎信次郎：水文・水資源学会2016年度総会・研究発表会 福島 9月15-17日（2016）
 GCMに起因する氷河モデルを用いた氷河面積予測差
- 98) 森下慧、田上雅浩、平林由希子、飯泉仁之直：水文・水資源学会2016年度総会・研究発表会、福島9月15-17日（2016）
 自然災害指標を用いた自然災害が穀物収量に与える影響の定量化
- 99) 池内寛明、平林由希子、山崎大：水文・水資源学会2016年度総会・研究発表会 福島9月15-17日（2016）
 メガデルタ地域における高潮・河川洪水複合水害モデリング
- 100) M. M. G. D. MADAKUMBURA, S. WATANABE, M. TANOUÉ and Y. HIRABAYASHI: 水文・水資源学会2016年度総会・研究発表会、福島、9月15-17日（2016）
 Analyzing a relation between Eurasian snow cover and Indian Monsoon rainfall using a large ensemble data set

- 101) Y. HIRABAYASHI: Global Flood Partnership Conference, Joint Research Center, Ispra, Italy, 29 June-1 July (2016)
Spatio-temporal characteristics of vulnerability of flood at the global scale
- 102) S. NAKATA, Y. HIRABAYASHI, S. FUJIMORI and S. WATANABE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
A CGE analysis of economic costs of flood considering indirect loss: A case study of 2011 Thailand flooding disaster
- 103) O. SASAKI, O. NOGUCHI, Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI AND S. KANAE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
Development of a high resolution map of debris on glaciers including whole Himalaya Alpine region derived from multi-temporal ASTER images
- 104) H. IKEUCHI, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
Representation of the impact of Cyclone Sidr on fluvial flooding in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta
- 105) M. TANOUE, H. IKEUCHI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, San Francisco, USA. 14-18 December (2015)
Spatiotemporal characteristics of flood protection level
- 106) Y. KINOSHITA, M. TANOUE, S. WATANABE and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December (2015)
Proposal of global flood vulnerability scenarios for evaluating future potential flood losses
- 107) R. HOCK, B. MARZEION, A. BLISS, R. GIESEN, Y. HIRABAYASHI, M. HUSS, V. RADIC and A. SLANGEN: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December (2015)
GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass balance models and projections
- 108) W.-S. KIM: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2015)
Why we need to estimate the sampling uncertainty of eddy covariance flux measurement?
- 109) 本田靖: 第80回日本民族衛生学会 (2015)
気温と死亡との関連を評価するモデルにおける交絡
- 110) 飯泉仁之直: 日本気象学会 2015年度秋季大会 (2015)
世界の主要穀物の収量変動変化に対する気候変化影響の同定と評価
- 111) 西森基貴: 日本気象学会 2015年度秋季大会 (2015)
経験的統計ダウンスケーリング手法 (ESD) 結果の不確実性について—南米および日本への適用と学習・検証期間の影響—
- 112) M. TAMURA: 2015 International Conference on Climate Change Adaptation for Energy and Industrial Sectors, GIS NTU Convention Center, Taipei, Taiwan (2015)
Impacts of climate change and mitigation/adaptation of renewable energy in Japan
- 113) 池内寛明、平林由希子、山崎大、木口雅司、Sujan Koirala、鼎信次郎: 水文・水資源学会 2015年度総会・研究発表会 (2015)
海水準上昇を伴う河川洪水氾濫解析における背水効果の分析
- 114) 木村雄貴、平林由希子、木下陽平: 水文・水資源学会 2015年度総会・研究発表会 (2015)
温暖化ハイエイタス期の洪水頻度の変化
- 115) T. IIZUMI: MARCO Symposium 2015 “Next Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia”, Tsukuba, Japan (2015)
Global risk assessment of climate-induced food production shocks: from Seasonal scale to the end of this century
- 116) M. TANOUE, S. WATANABE, T. TSUNEKAWA, N. HANASAKI and Y. HIRABAYASHI: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
Impact of terrestrial glacier meltwater on water availability
- 117) 木村雄貴、田上雅浩、今田由紀子、平林由希子: 第24回地球環境シンポジウム, 東京, 8月31日-9月2日 (2015)
Event Attribution 実験を用いた 2012年アマゾン川洪水の要因分析

- 118) S. WATANABE, H. KIM, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: IUGG, Prague, Czech, 22 June - 2 July (2015)
A multi-model ensemble method preserving variability in various temporal scales for climate change impact assessment
- 119) M. WATANABE, S. KOIRALA, Y. HIRABAYASHI, A. YANAGAWA and S. KANAE: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
A model estimate of glacier melts responses to climate change in high mountain Asia
- 120) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, M. KIGUCHI, S. KOIRALA and S. KANAE: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
Future fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta

7. 研究者略歴

研究代表者：平林 由希子

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）

現在、芝浦工業大学大学院理工学研究科教授

研究分担者

1) 西森 基貴

筑波大学地球科学研究科単位取得、博士（理学）

現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域影響予測ユニット長

2) 飯泉仁之直

筑波大学生命環境科学研究科修了、博士（理学）、現在、国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター気候変動対応研究領域影響予測ユニット主任研究員

3) 本田 靖

東京大学医学部保健学科および医学科卒業、東京大学より博士（医学）

現在、国立大学法人筑波大学教授

4) 横木 裕宗

東京大学大学院工学系研究科修了、博士（工学）、

現在、国立大学法人 茨城大学 大学院理工学研究科（工学野）教授

II. 成果の詳細

II-1 気候変動適応策の総合的な費用便益分析と水関連災害の適応策の費用便益分析

芝浦工業大学 大学院理工学研究科	平林 由希子
東京大学 大学院工学系研究科	渡部 哲史（平成27年～平成29年度）

<研究協力者>

芝浦工業大学 大学院理工学研究科	田上 雅浩
大学院理工学研究科	佐々木 織江（令和元年度）
東京大学 大学院工学系研究科	木下 陽平（平成27年～平成28年度）
生産技術研究所	Haireti Alifu（平成29年度）

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：93,969千円（研究経費は間接経費を含む）
 （平成27年度：21,305千円、平成28年度：18,656千円、平成29年度：18,656千円、平成30年度：17,676千円、令和元年度：17,676千円）

[要旨]

プロジェクト全体で用いることが可能な社会経済データを整備し、それと気候変動のシナリオとを組み合わせて、自律的適応を考慮した洪水経済被害額と洪水死者数を全球規模で推計した。また、既往の文献やレポートから適応策に関する単価費用と想定される防護レベルをまとめたデータベースを構築し、全球規模で適応費用便益分析を実施した。本研究の成果により、全球規模で必要となる適応費用はじめ、適応策を実施しても被害が残る地域が同定された。また、他のセクターから収集した適応費用や適応しても残る被害について積算し、気候変動によるコストが高いホットスポットを抽出した。

[キーワード]

気候変動、河川洪水、費用便益分析、影響評価

1. はじめに

2013年11月に開催された国連気候変動枠組条約第19回締約国会議（COP19）では、カンクン適応枠組みの下に、将来の気候変動の悪影響に関する損失と被害（loss and damage）を定量化するワルシャワ国際メカニズムの設立が合意された。このように、国際社会の中で適応策の具体的な実施とそれに向けての課題への検討が重要視されている。日本では、地球温暖化対策計画に基づく緩和策と適応計画策定に基づく適応策への国際的な取組が進められているが、他国と協力して具体的な適応策を進めるためには、より広域を対象とした適応策の費用・便益に関する知見、および適応レベルに応じた残余損失などの定量的な情報が必要となる。しかしながら、最新のIPCC第5次報告書においても、地球規模の適応策に関する記述は単純な仮定に基づく沿岸洪水の適応費用が示されただけで、定量的な損失被害額と適応費用便益に基づく実施可能な適応策オプションの提案などは全く行われていない。また、緩和策における温室効果ガスの削減目標に対応するような適応策の投資目標といったものも存在しない。

2. 研究開発目的

サブテーマ（1）では、水関連災害（洪水や渇水）に着目し、既存の災害リスク対策などの被害軽減の効果も考慮した地球規模の適応費用の便益を分析する。まず、地球規模の洪水被害モデルを開発し、気候変動による洪水被害の変化を算出し、適応策オプションによる洪水被害の軽減額（便益）と適応費用の計算を算定する。同時に、洪水や干ばつなどの水関連災害の頻度・強度変化について算定し、サブテーマ3-(2)へ情報を提供する。また、各サブテーマから得られる適応費用と便益について統合的な分析を行うことで、地球規模の緩和策と比較できるグローバルな適応策の費用便益に関する知見を創出する。

3. 研究開発方法

(1) 全球規模での洪水災害脆弱性の長期変動に関する研究

過去の災害情報データベースと全球河川氾濫モデルにより算定されたモデル暴露とを比較し、河川洪水災害が脆弱な地域とその長期変動を推計した。本手法は、全球河川氾濫モデルによる洪水氾濫シミュレーションの計算結果とグリッドベースの人口・GDPデータを用いて算定された暴露人口・暴露財に、実際の洪水災害脆弱性係数を乗じることで求められる。ここでは、人（財）に対する災害脆弱性を死亡率（損失率）と定義した。死亡率は実際の洪水災害死者数をモデルによる各国の総洪水暴露人口で割ることで、損失率は実際の洪水災害被害額をモデルによる各国の総暴露 GDP で割ることにより求められる。過去における全球スケールでの洪水災害脆弱性係数の長期変動に関する知見が不足しているため、全球洪水氾濫モデルと災害被害データベースを用いて死亡率と損失率の算定を行った。実際の洪水死者数と洪水被害額は、災害被害データベースの値（EM-DAT）を用いた。計算期間は1960年から2013年まで、国ごとに算定を行った。

(2) 自律的適応を考慮した河川洪水死者数と経済被害額の将来予測

将来の洪水被害リスクを推定するためには洪水規模、洪水の影響下にある人口や資産の分布に加えて脆弱性のモデル化が必要である。このような災害被害を抑制するための対策である適応策には、気候変動など環境の変化に対し自覚的な対策である計画的適応と、生態系や人間システムの変化によって引き起こされる自律的適応に分類することが出来る。本課題では過去の社会経済発展による脆弱性の改善は自律的適応の結果であると仮定し、洪水損失率と死亡率についてそれぞれ推定した過去洪水脆弱性データを基に、社会経済の発展度を反映した将来の洪水脆弱性シナリオを作成した。また、11の全球気候モデルの出力を用いて2006年から2100年まで全球河川氾濫モデルのシミュレーションを実施し、SSPシナリオから得られる国別の将来の人口・GDP分布と浸水域を重ね合わせることで、社会経済シナリオと放射強制力シナリオの組み合わせ毎に、自律的適応の影響を考慮した場合の将来の全球規模での洪水被害額と洪水死者数を計算した。社会経済シナリオにはIIASAが作成したSSPシナリオ、放射強制力シナリオにはRCP2.6, 4.5, 6.0, 8.5の4つを用いた。

(3) 河川洪水災害に伴う全球規模での適応費用の推計

水関連災害に関する適応費用については、適応単価費用と防護レベルに関する情報を文献や報告書から収集し、適応単価費用を推計するためのデータベースの構築を行った。具体的には、国際協力機構（152件）、国土交通省（91件）、United States Army Corps of Engineers (USACE) digital library（27件）、その他（5件）のデータを抽出した。国土交通省とUSACEはそれぞれ日本とアメリカを、JICAは低・中所得国のうち19カ国をカバーしている。

経済的に実施可能、すなわち適応費用便益で便益が費用を上回る場所までの適応レベルを決定するために、全球河川氾濫モデルによるシミュレーションを実施し、適応の有無による洪水被害額を求めた。全球河川氾濫シミュレーションは、サブテーマ2で開発されたS14 databaseによる5 GCMs×4 RCPsの気象外力データを陸面過程モデルに入力し、出力された日々の流出量を用いて計算を行った。得られた河川貯水量を高解像度の標高データ（DEM）に分配し、全球1km×1kmの高解像度の氾濫マップを作成した。この氾濫マップに、全球の財分布（人口分布に1人あたりのGDPを重ねたもの）と全球浸水深一被害関数を適用し、洪水の現在の防護データが得られるサブナショナル単位ごとに過去と将来の洪水被害額を求めた。

被害額の推計には、全球規模での防護シナリオとあわせて、適応レベルごとの洪水被害額も算定した。これにより、適応をした場合としなかった場合における洪水被害額の差を求め、適応によって将来生じる洪水の被害期待減少額を算定した。複数の適応レベルごとに、適応による便益（洪水被害額の期待減少額）と適応レベルに応じた適応費用との差が最大となる適応レベルをサブナショナルレベルごとに決定した。適応費用は防護基準を増加させる際に発生する建設費用と維持費用を含む。建築費用は単価費用モデルから算定した単価費用に建設距離を乗じた値とした。建設費用は2020-2050年までの30年間の間に毎年同じ費用が発生し、その後2051年から建設費用の1%にあたる維持費用が発生すると想定した。建設費用と維持費用との合計値を評価対象期間で除し、年間あたりの適応費用をサブナショナル単位で算定した。防護基準は建設期間中に徐々に増加し、2051年には想定する将来の防護基準になると仮定した。便益の算定は、防護基準を増加させた場合の被害額を2020年から2100年まで算定し求めた年平均被害額から、防護基準を現在のままにした場合の年平均被害額からの差分として求めた。評価対象期間は2020-2100年まで、割引率は5%として費用便益分析を行った。同時に、過去レベルを超える追加的な洪水被害のうち、適応しても防ぎきれない被害を残余被害とし、本研究ではこの残余被害の評価も併せて行った。費用便益分析は各国のサブナショナル単位で評価を行った。

(4) 主要セクターにおける統合解析

グローバルな適応策の効果について、地域的な違いを評価するため、サブテーマ3で対象とする水関連災害、穀物生産、健康、沿岸地域セクターおよび、テーマ2から提供を受けた生物多様性に関する評価を含めた統合解析を実施した。まず、地域ごとに、気候変動の悪影響がどのセクターにおいて大きくなるのかを整理するため、国ごとに適応費用や影響に関する情報を整備した。河川洪水、穀物生産、沿岸地域セクターについては、それぞれのセクターで算定された適応費用と、適応しても残る被害（残余被害）を整備し、国ごとに年平均の総費用（適応費用＋残余被害）を算定した。平均の対象となる評価期間は、最も評価期間の長い河川洪水分野に合わせて2020—2100年とした。総費用を絶対値のまま評価すると、国ごとの社会経済発展による影響を強く受けるため、GDPに対する割合として総費用を整理した。健康分野については、評価が可能な適応策の費用（たとえば予防接種や水分補給など生活習慣の啓蒙活動など）が他のセクターの適応費用と比べて非常に小さい金額となることから、残余被害のみを算定した。

最終的に、各セクターについて、各国における残余被害のGDPに対する割合が0.01%を超えた場合にホットスポットとした。生態分野については、多様性を示す指標が現在と比較し40%以上減少する地域をホットスポットとした。また、総費用と緩和費用とのバランスを評価するために、AIM/CGEによるGDPの出力から緩和費用を推計した。AIM/CGEによりRCP×SSPごとに17地域のGDPが算定される。それぞれのSSPごとにベースライン・シナリオがあり、そこからのGDPの差を緩和費用として総費用と比較した。

4. 結果及び考察

(1) 全球規模での洪水災害脆弱性の長期変動に関する研究

1960年から2013年までにおける死亡率と損失率について、世界銀行による所得別の長期変動を示す(図4.1.1a, c)。年ごとの変動が大きいため11年移動平均として示す。まず、死亡率については、期間中すべての所得レベルにおいて有意に減少した。死亡率は1980年までに大きく減少し、その後一定の値を示した。死亡率は所得レベルが高いほど低かった。高所得レベルにおける損失率は減少傾向を示したが、それ以外の所得レベルでは逆U字型の変動パターンを示した。例えば、低所得レベルでは1990年代後半に高く、その後2000年代に低くなった。この理由は、洪水氾濫域における経済発展に伴う財の増加と洪水対策の進展とのバランスが反映されているためであると考えられる。すなわち、洪水対策が十分達成されていない地域において、経済発展に伴い暴露される財が増加すると脆弱性が増加し、その後、洪水対策が進むことで脆弱性が減少していることが示唆される。この逆U字型の脆弱性の変動パターンは自然災害の経済影響に関する既往研究において指摘されていたが、実データで確認できたのは本研究が初めてである。

次に、死亡率と損失率が所得レベルとどのような関係性を示すのかを明らかにするため、これら脆弱性と1人あたりGDPとの関係を調べた。図4.1.1c-dに1人あたりGDPと死亡率または損失率との関係を示す。その結果、20,000 US\$以下では高い死亡率と損失率を示す国が見られたが、20,000 US\$以上では全体的に死亡率と損失率は低い傾向を示した。

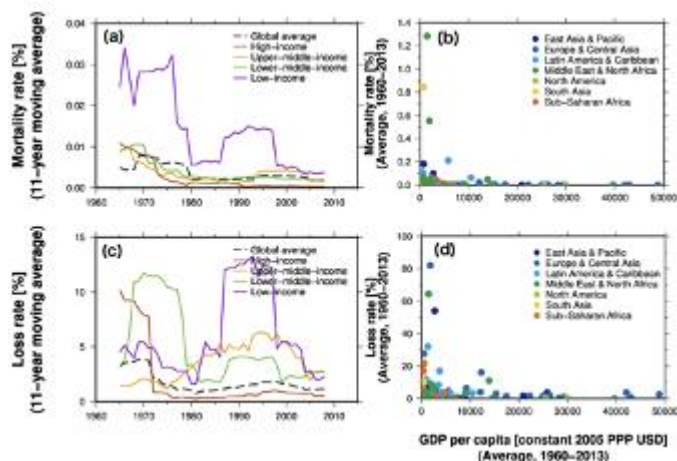


図4.1.1 洪水災害による死亡率(a)と損失率(b)の長期変動(11年移動平均値)。所得レベルごとに示す。1人あたりGDPと死亡率(c)または損失率(d)との関係。地域ごとに示す。

(2) 自律的適応を考慮した河川洪水死者数と経済被害額の将来予測

自律的適応による脆弱性減少の効果を組み込んだ将来全球洪水被害の研究では、全球年間洪水被害額における現在(1991-2005年)を基準にした将来(2081-2100年)での将来洪水災害リスクは、

楽観的シナリオ (SSP1+RCP2.6)、悲観的シナリオ (SSP3+RCP8.5) とともに約 8.8 倍に増大するという結果が得られた。楽観的シナリオと悲観的シナリオの両方で洪水被害額の増加量が同程度になるのは、楽観的シナリオでは悲観的シナリオに比べて自律的適応による被害額減少量が大きいものの経済発展による曝露財の増加も大きく、双方の影響が相殺されてしまうためである。一方、洪水死者数ポテンシャルについては楽観的シナリオでは自律的適応の効果が人口増加の影響を大きく上回り、現在に比べて将来は 57%減少するという推計が得られた。悲観的シナリオでは将来の洪水死者数ポテンシャルは現在と同程度と推計された。将来の洪水被害額の変化を国別で見たとき (図 4.1.2)、東南アジア、中央アフリカの多くの国ではいずれのシナリオにおいても将来は現在と比べて 50 倍以上に増大すると推計された。一方、北米やヨーロッパ諸国は他の地域に比べて比較的被害額増加は小さく、経済発展の小さい SSP3 シナリオでは現在と将来とで洪水被害額に大きな変化は見られなかった。

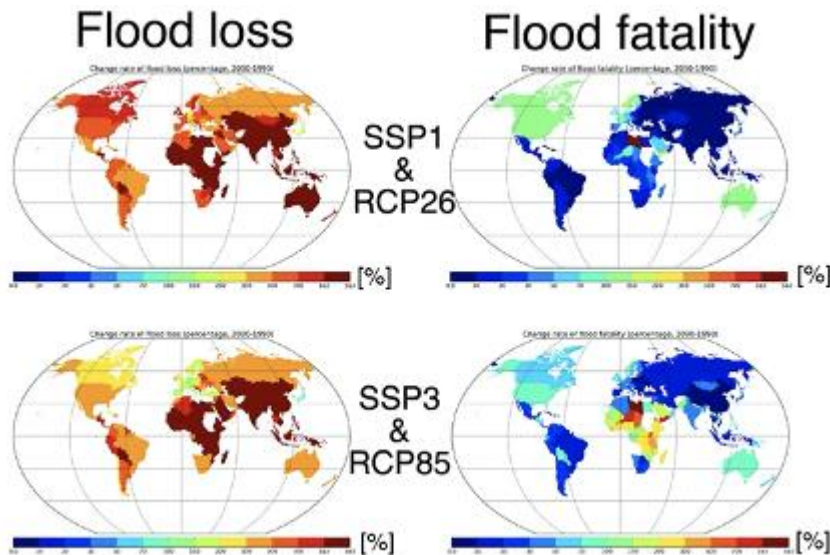


図 4.1.2 将来 (2081-2100) における国別洪水リスク (金銭及び人的被害) の、現在 (1981-2000) に対する増減の割合。上段が SSP1 と RCP2.6 の組み合わせ、下段が SSP3 と RCP8.5 の組み合わせ。

また、全球洪水被害を産業革命前 (1851-1900) からの全球気温上昇の関数とした場合の図を図 4.1.3 に示す。この図では洪水死者数と被害額の SSP1 (青線) と SSP3 (赤線) について気候モデル (GCM) のアンサンブル平均と 95%信頼区間を示している。また、自律的適応の効果が無い場合 (黒と灰線) についても同様に示している。この図の洪水死者数では、SSP1 において自律的適応を考慮しないと温度上昇に伴い死者数も増加していくのに対し、自律的適応を考慮すると温度が上昇するにつれて洪水死者数が減少していくという結果になった。これは自律的適応の効果を考慮する事の重要性を示している。自律的適応により洪水死者数ポテンシャルは 62-68%減少すると推計された。洪水被害額については、いずれのシナリオにおいても温度上昇とともに被害額も増加していく、自律的適応を考慮すると洪水被害額の増加が抑制されるという結果になった。被害額では自律的適応により 26-36%減少すると推計された。

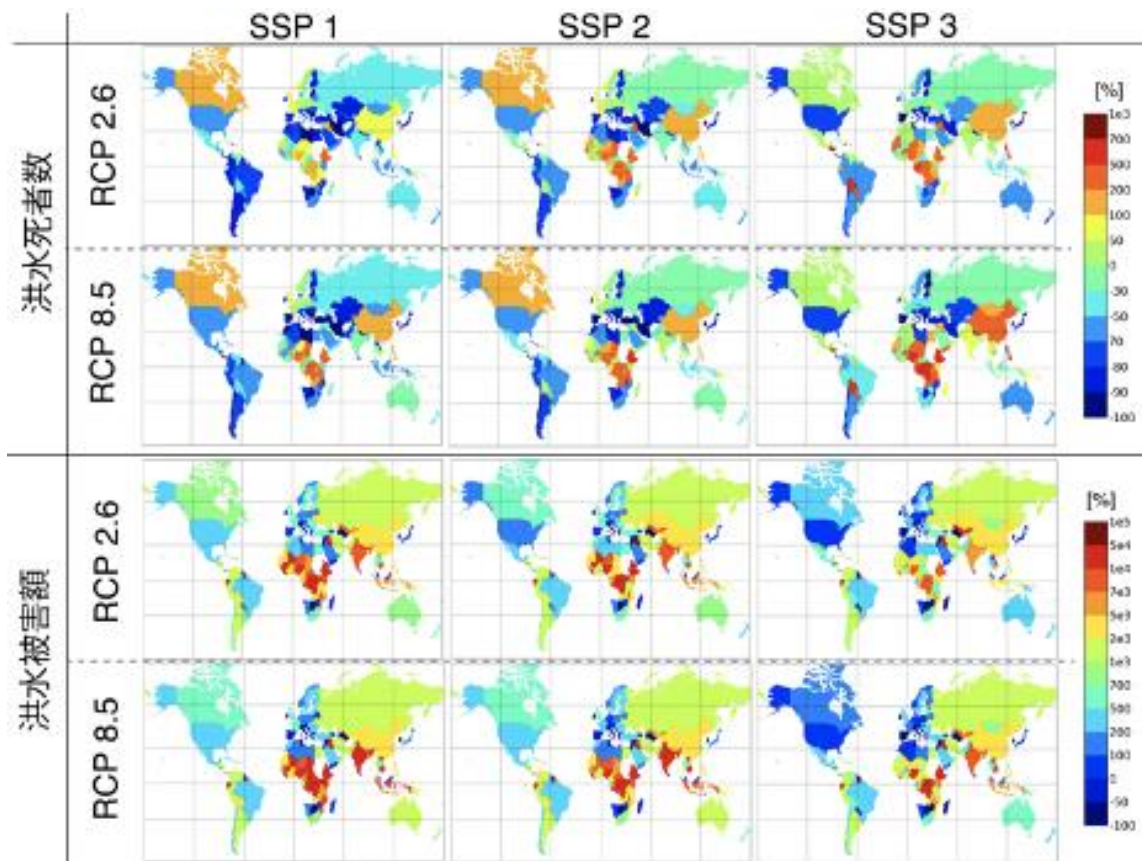


図 4.1.3 現在（1991-2005）に対する将来（2081-2100）の洪水死者数、被害額の変化率。

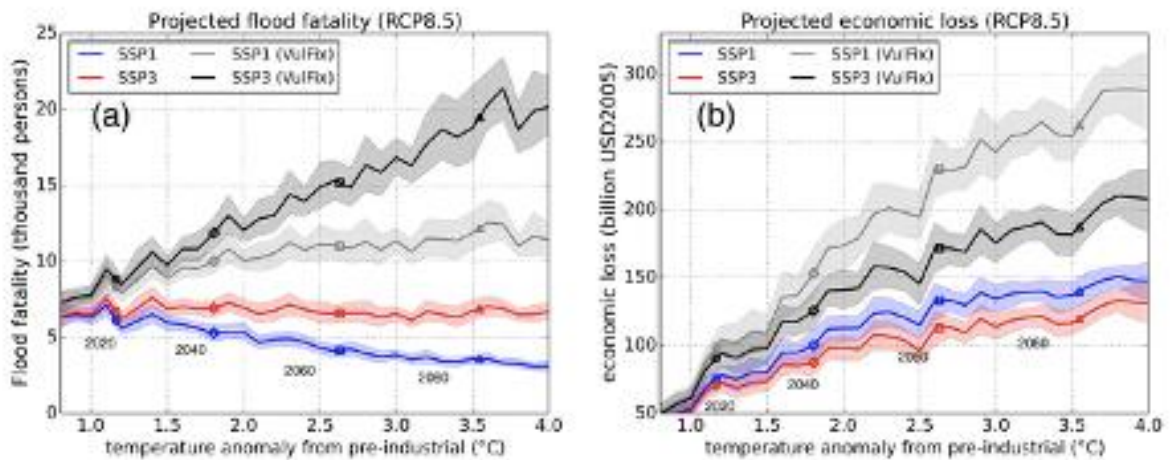


図 4.1.4 全球温度上昇に対する洪水死者数 (a) と被害額 (b)。

費用便益比を固定した場合の気候変動適応コスト推計については、まず河川洪水対策による費用便益比の文献調査の結果、堤防のようなハードウェア対策を行った場合、費用便益比はおおよそ2-10の幅になることが分かった。そこでこの範囲で費用便益比を変化させ、費用便益比の幅に応じた気候変動適応コストを算定した結果、いずれの社会経済、放射強制力シナリオにおいても将来の気候変動適応コストはおおよそ110~551億ドルになると推計された。また、自立的適応による被害軽減額と気候変動適応で削減する額の比は、SSP1とSSP2で1:1、SSP3で6:4となることが分かった。

さらに、バイアス補正した気象外力を陸面モデル・河川モデルに与えることで誤差の少ない浸水データを新たに作成し、洪水による営業停止損失を世界で初めて全球を対象に算定した。過去の洪水による営業停止損失は年平均は全球約44億ドルであり、年最大浸水深から算定した資産への年平均洪水被害の約18%に相当することが判明した。

(3) 河川洪水災害に伴う全球規模での適応費用の推計

河川洪水について、適応した場合としない場合における被害、適応費用、便益、残余被害を表 4.1.1 に示す。ここでの便益とは気候変動によって増加した被害が適応によって軽減された額であり、残余被害とは、気候変動によって現在よりも増加する被害、すなわち十分に適応することができなかった被害と定義する。気候変動に対して全く適応をしなかった場合は、全球で 353～988 億ドルの被害が現在よりも増加すると予測された。この被害の増加分は、年間 87～153 億ドル適応策に投資することで、年平均で 103～257 億ドルにまで減らすことができる。一部の地域では、適応に投資した金額以上の便益（＝被害の軽減）を得ることができるため、適応のシナリオによっては現在レベルよりも河川洪水の被害が減ることも見られた。その結果、463～1463 億ドルの便益が期待される。

表 4.1.1 適応の有無による便益、適応費用、残余被害の全球積算値。

	便益 (B) [億ドル/年]	適応費用 (C) [億ドル/年]	残余被害 [億ドル/年]	B-C [億ドル/年]
適応なし				
RCP8.5/SSP5	0	0	988	0
RCP6.0/SSP3	0	0	353	0
RCP4.5/SSP2	0	0	443	0
RCP2.6/SSP1	0	0	543	0
適応あり				
RCP8.5/SSP5	1463	153	257	1310
RCP6.0/SSP3	463	87	131	376
RCP4.5/SSP2	845	122	103	723
RCP2.6/SSP1	941	142	167	799

上記の結果は、河川洪水分野については適応により大きな便益が期待されることを示すものであるが、その一方、全球規模で見た場合、適応しても残余被害がゼロにならない地域があることも明らかとなった。これはつまり、河川洪水については気候変動による被害の増加に対して適応に限界がある地域があることを意味する。図 4.1.5 には、極端なシナリオ下において適応した後の残余被害の分布を示す。残余被害はサブナショナル GDP に対する割合として示す。その結果、残余被害は中国やインドなどのアジア域をはじめ、オーストラリア、ロシア、ヨーロッパ、アフリカ中央部、北アメリカ、ラテンアメリカと全球の広い地域で、0.05%以上の残余被害が見られた。これらの中でも、アジア、オーストラリア、ラテンアメリカの地域では、ハード的な防護対策が実施されると設定した期間における被害が 8 割以上を占める。ハードな防護対策は建設するまでの期間がかかるため、これらの地域では、早めの対策かそれ以外のソフト対策を検討する必要があることが示唆された。

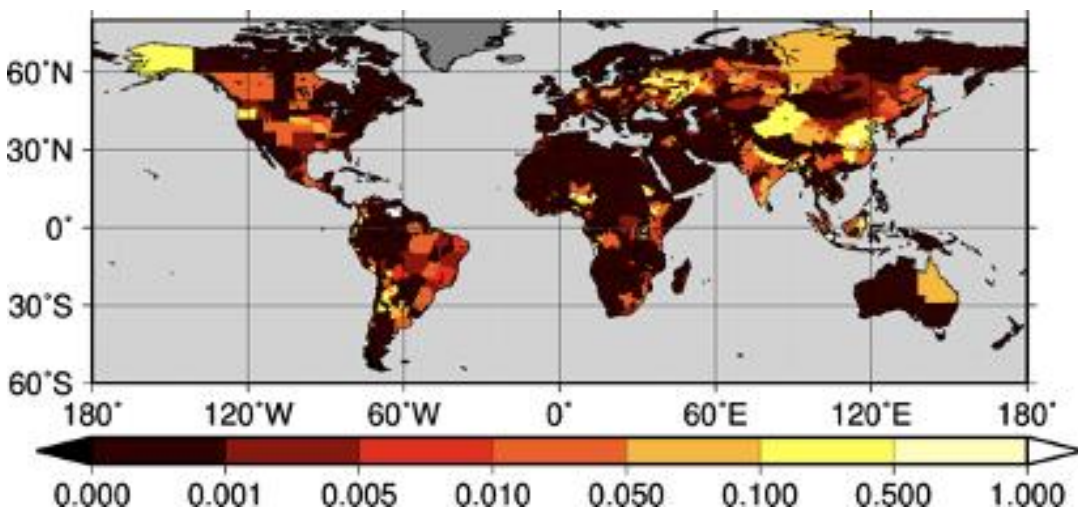


図 4.1.5 極端なシナリオ (RCP8.5/SSP5) における GDP に対する残余被害 (適応策を実施しても、現在レベルを超えて発生する将来の追加的な被害) の割合。

(4) 主要セクターにおける統合解析

セクターごとの解析結果を踏まえ、最も温暖化が進むシナリオ (RCP8.5/SSP5) において、既存の適応策では適応しきれずに残る被害 (残余被害、または生物多様性の減少率) が大きくなる地域を図 4.1.6 に示した。全球を 7 地域に分類し、河川洪水、穀物生産、健康被害、沿岸地域、及び生態系という 5 つの項目について、生態系以外の気候変動による悪影響が国 GDP の 0.01% を超える地域に青色のアイコンを配置した。生態系は生物多様性の観点から評価を行った。適切に適応策が実施された場合でも、河川洪水が増加するアジア・オセアニア、南アジア、南アフリカでは河川洪水による残余被害が大きくなった。穀物収量への温暖化の影響が大きい北アメリカ、ラテンアメリカ、沿岸洪水による被害が増加するアジア・オセアニアにおいても、それぞれ大きな残余被害が発生すると予測される。健康被害については、全地域において熱関連死亡等の深刻な被害が予測され、7 地域すべてがホットスポットと同定された。また、生態系への被害が深刻となるのは、ヨーロッパ・ロシア、中東・北アフリカ、南アフリカ、ラテンアメリカであり、現在と比較し、生物多様性が大きく損なわれると予想される。

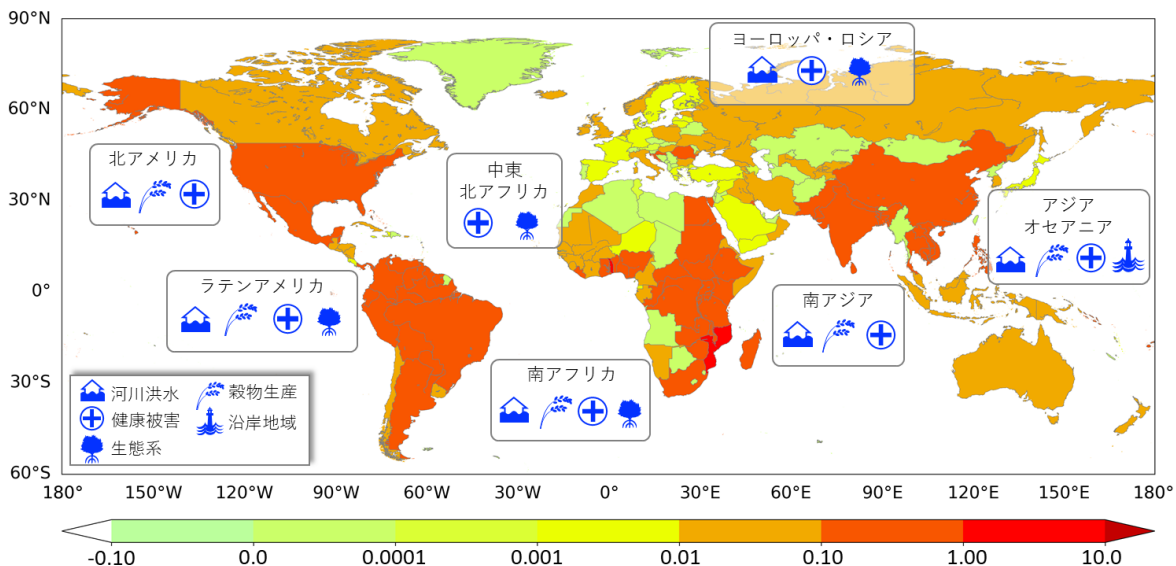


図 4.1.6 各セクターにおいて適応策を実施しても気候変動による被害が増加する地域 (アイコン) と極端シナリオ (RCP8.5/SSP3) における河川洪水、穀物生産、及び沿岸地域分野の総費用 (適応費用+適応後の被害増加額) の合計 (GDP に対する割合 [%])。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

水関連災害に関しては、様々な気候シナリオ・社会シナリオ下における河川洪水の適応費用とその便益、残余被害についてが明らかとなり、全球規模での適応費用便益分析が可能となった。特に、適応を実施することが難しい地域を同定し、残余被害額を定量的に評価することが可能となった。4つの気候シナリオ（RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5）および5つの社会経済シナリオ

（SSP1-5）の組み合わせにおける、洪水による死者数と経済被害、適応費用、適応しきれなかった残余の被害額が全球で算定された。これに伴い、全球規模の過去洪水被害に対する脆弱性の洪水脆弱性変化の特徴や、国の経済発展に対応した経済合理性のある適応シナリオモデルなど、既存の世界の類似研究では、これまで考慮されていなかった要素を組み込んだ、より現実に即した洪水リスクの将来予測を実現する全球モデルの枠組みを構築した。また、洪水による営業停止損失を世界で初めて全球を対象に算定する手法も構築した。洪水による死者数と経済被害額の予測値は、S-14-5(1)に提供して気候変動による被害の統合的な解析に活用された。

また、サブテーマ3の各セクターおよび生態系分野の適応費用と残余被害を統合的に解析することで、極端シナリオ下における気候影響の経済的なホットスポット、すなわち適応費用および残余被害が大きい地域の特長と、適応後も被害の増分が予想される、いわゆる適応限界が大きい地域を世界で初めて示すことに成功した。

(2) 環境政策への貢献

水関連災害に関しては、これまで気候変動による災害被害研究では自律的適応の効果が考慮されておらず、適応コストを過大推定している恐れがあった。本課題により、自律的適応を考慮した被害額を推計したことにより、将来予想される被害額のうち、どのくらいまでが自律的適応により減災でき、今後追加的な費用が必要となるかを提示できた。これは、今後の災害マネジメントと気候変動適応策を策定するために重要な科学的定量的情報である。

本課題で示された様々なシナリオ下における河川洪水の被害および適応費用分析や、主要セクターについて統合的に適応の限界の地域が示されたことは、今後の国際的な気候政策をリードする重要な科学的知見として位置付けられる。本課題の成果は IPCC の 1.5°C 特別報告書や海洋・雪氷圏特別報告書に引用されており、現在進行中の IPCC の報告書にも引用される可能性が高い。将来の緩和策達成目標や適応策を決定するための重要な判断材料となり、環境政策への貢献が大きい。

<行政が既に活用した成果>

該当なし

<行政が活用することが見込まれる成果>

本研究の成果の一部は IPCC の 1.5 度特別報告書および海洋・雪氷圏特別報告書において引用されており、今後の IPCC 報告書等にも引用が期待される、洪水被害および適応に関する成果が得られた。

6. 国際共同研究等の状況

1) Global Flood Partnership

GFP は、全球を対象とした洪水のモニタリング・モデリング・リアルタイム予測・予測情報の現業活用・リスク評価に取り組んでいるコミュニティで

(<http://portal.gdacs.org/Global-Flood-Partnership>)、世界銀行・国連食糧計画・赤十字といった国際機関、各国の気象機関や河川管理事務所といった実務機関、再保険会社や Google といった民間企業など、研究者以外にも洪水リスクの軽減に関心がある多様な関係者が任意で参加している。研究代表者の平林を含む、S-14-3(1)の洪水氾濫モデルの開発グループも参画しており、本パートナーシップならびに S-14-3 の成果の 1 つは、Environmental Research Letters に掲載された。

2) GlacierMIP

GlacierMIP は全球の山岳氷河モデルを対象としたモデル相互比較プロジェクトである

(<http://www.climate-cryosphere.org/>)。規定の境界条件、外力データなどを用いて全球の氷河の収支を算定し、モデル間で比較することで、次世代のモデル開発や不確実性の低減に取り組む。日本以外にも、アメリカ、ドイツ、ニュージーランド、オランダ、スウェーデン、カナダ、イギリス、オーストラリアの研究者らが参画している。S-14-3(1)の水資源影

響評価の要素モデルの1つである、全球氷河モデルもこの国際プロジェクトに参画している。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) M. TANOUE, R. TAGUCHI, S. NAKATA, S. WATANABE, S. FUJIMORI and Y. HIRABAYASHI: Water Resource Research, 56, e2019WR026092 (2020)
Estimation of direct and indirect economic losses caused by a flood with long-lasting inundation: a case study of the 2011 Thailand flood
- 2) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, N. HANASAKI, T. HASEGAWA, Y. HIRABAYASHI, Y. HONDA, T. IIZUMI, N. KUMANO, C. PARK, Z. SHEN, K. TAKAHASHI, M. TAMURA, M. TANOUE, K. TSUCHIDA, H. YOKOKI, Q. ZHOU, T. OKI and Y. HIJIOKA: Nat. Clim. Change., 9, pp.737-741 (2019).
Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways
- 3) S. KOIRALA, H. KIM, Y. HIRABAYASHI, S. KANAE and T. OKI: Water Resources Research, 55, 402- 425 (2018)
Sensitivity of global hydrological simulations to groundwater capillary flux parameterizations
- 4) C. MORA, D. SPIRANDELLI, E. C. FRANKLIN, J. LYNHAM, M. B. KANTAR, W. MILES, C. Z. SMITH, K. FREEL, J. MOY, L. V. LOUIS, E. W. BARBA, K. BETTINGER, A. G. FRAZIER, J. F. COLBURN IX, N. HANASAKI, E. HAWKINS, Y. HIRABAYASHI, W. KNORR, C. M. LITTLE, K. EMANUEL, J. SHEFFIELD, J. A. PATZ and C. L. HUNHTER: Nature Climate Change, 8, 1062 (2018)
Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by GHG emissions
- 5) X. ZHOU, J. POLCHER, T. YANG, Y. HIRABAYASHI and T. NGUYEN-QUANG: Hydrology and Earth System Sciences, 22 (2018)
Understanding the water cycle over the upper Tarim basin: retrospect the estimated discharge bias to atmospheric variables and model structure
- 6) F. DOTTORI, W. SZEWCZYK, J-C. CISCAR, F. ZHAO, L. ALFIERI, Y. HIRABAYASHI, A. BIANCHI, I. MONGELLI, K. FRIELER, R. BETTS and L. FEYEN: Nature Climate Change, 8, 781 (2018)
Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming
- 7) A. HAIRETI, Y. HIRABAYASHI, B. JOHNSON and J-F. VUILLAUME, A. KONDOH and M. URAI: Remote Sensing, 10(18), 1166 (2018)
Inventory of glaciers in the Shaksgam Valley of the Chinese Karakoram Mountains, 1970-2014
- 8) W. H. LIM, D. YAMAZAKI, S. KOIRALA, Y. HIRABAYASHI, S. KANAE, S. J. DADSON, J. W. HALL and F. SUN: Earth' s Future, 6, doi:10.1002/2017EF000671(2018)
Long-term changes in global socioeconomic benefits of flood defenses and residual risk abased on CMIP5 climate models
- 9) Y. KINOSHITA, M. TANOUE, S. WATANABE and Y. HIRABAYASHI: Environ. Res. Lett., 13, 014006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9401> (2018)
Quantifying the effect of autonomous adaptation to global river flood projections
- 10) 渡部哲史、内海信幸：土木学会論文集B1(水工学)、Vol.62, I_169-174 (2018)
大規模気候予測情報類型化に向けたd4PDF日本域降水量の特徴の把握
- 11) 森下慧、田上雅浩、岡田将誌、肱岡靖明、平林由希子：土木学会論文集B1(水工学)、62, I_1225-1230
灌漑による干ばつ時の穀物生産損失の低減効果とその費用に関する推計
- 12) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, S. MUIS, P. J. WARD, H. C. WINSEMIUS, M. VERLAAN and S. KANAE: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 9, 1847-1862, 10.1002/2017ms000943 (2017)

- Compound simulation of fluvial floods and storm surges in a global coupled river-coast flood model: Model development and its application to 2007 Cyclone Sidr in Bangladesh
- 13) T. IIZUMI, H. TAKIKAWA, Y. HIRABAYASHI, N. HANASAKI and M. NISHIMORI: Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 122, (2017)
Contributions of different bias - correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes
- 14) 渡部哲史、鼎信次郎、平林由希子: 土木学会論文集 B1(水工学) 、73、4、I_121-I_126 (2017)
クオンタイルマッピング型補正を用いた気候変化影響評価に関する考察
- 15) M. TANOUE, Y. HIRABAYASHI and H. IKEUCHI: Scientific Reports, 6, 36201 (2016)
Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years
- 16) Y. HIRABAYASHI, K. NAKANO, Y. ZHANG, S. WATANABE, M. TANOUE and S. KANAE: Scientific Reports, 6, 29723 (2016)
Contributions of natural and anthropogenic radiative forcing to mass loss of Northern Hemisphere mountain glaciers and quantifying their uncertainties
- 17) M. A. TRIGG, C. E. BIRCH, J. C. NEAL, P. D. BATES, A. SMITH, C. C. SAMPSON, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI, F. PAPPENBERGER and E. DUTRA: Environ. Res. Lett., 11, 094012 (2016)
The credibility challenge for global fluvial flood risk analysis
- 18) 木村雄貴、田上雅浩、今田由紀子、平林由希子: 土木学会論文集, 72, 5, I_1-I_6 (2016)
Event Attribution 実験を用いた 2012 年アマゾン川洪水の要因分析
- 19) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, M. KIGUCHI, S. KOIRALA, T. NAGANO, A. KOTERA AND S. KANAE: Environmental Research Letters, 10, 124011, (2015)
Modeling complex flow dynamics of fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges-Brahmaputra-Meghna delta
- 20) Y. Zhang, Y. Hirabayashi, Q. Liu and S. Liu: Journal of Glaciology, 61, doi:10.3189/2015JoG14J188 (2015)
Glacier runoff and its impact in a highly glacierized catchment in the southeastern Tibetan Plateau: past and future trends

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) 平林由希子: 環境研究、181、(2016)
温暖化による世界の氷河融解—海面上昇と水資源への影響—

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) 佐々木織江、藤田耕司、平林由希子、鼎信次郎: 水文・水資源学会 2019 年度総会・研究発表会、千葉、(2019)
中央ヨーロッパを対象とした熱収支氷河モデルによる氷河流出量の将来予測
- 2) O. SASAKI, Y. HIRABAYASHI, K. FUJITA, A. SAKAI and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C., (2019)
Future glacier volume and runoff changes over Central Europe using a full energy balance-based glacier model with debris effects
- 3) 田上雅浩、平林由希子: 水文・水資源学会 2019 年度総会・研究発表会、千葉、9 月(2019)
河川堤防防護による全球規模での適応費用便益分析
- 4) S. KANAE, O. SASAKI, K. FUJITA and Y. HIRABAYASHI: Asia Oceania Geosciences Society, 16th annual meeting, Singapore, (2019)
Glacier Runoff Simulation Under Climate Change by an Energy Balance Model for Individual Glaciers on a Continental-scale
- 5) K. KAKINUMA, M. J. PUMA, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Population displacement and flood in the world
- 6) R. TAGUCHI, M. TANOUE, D. YAMAZAKI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, Washington D.C. (2018)
Development of the estimation method of river flood business interruption loss at

the global scale

- 7) M. TANOUE, R. TAGUCHI, S. NAKATA, S. WATANABE, S. FUJIMORI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, Washington D.C. (2018).
Estimation of gross domestic production loss due to flood impacts: case study for Thailand flood in 2011
- 8) O. SASAKI, K. FUJITA, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C., 10-14 December (2018)
Seasonal glacier runoff including the debris effects over Central Europe
- 9) M. WATANABE, Y. YANAGAWA, Y. HIRABAYASHI, S. WATANABE and S. KANAE: AGU Fall meeting, Washington D.C. (2018)
Differences in observed climate data affect the spread of projecting future glacier mass changes
- 10) M. TANOUE, R. Taguchi and Y. Hirabayashi: Symposium of Strategic Research on Global Mitigation and Local Adaptation to Climate Change Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia (2018)
Estimating indirect losses due to river flooding: case study for Thailand flood in 2011
- 11) 田口諒、田上雅浩、平林由希子：水文・水資源学会 2018 年度総会・研究発表会，三重，9 月 12-14 日 (2018)
全球へ適用可能な洪水による営業停止損失推計手法の構築
- 12) 田上雅浩、田口諒、平林由希子：水文・水資源学会 2018 年度総会・研究発表会，三重，9 月 12-14 日 (2018)
損失と被害の定量化のための全球河川氾濫モデルのダウンスケーリング手法の検討
- 13) H. IKEUCHI, D. EILANDER, J. HOCK, F. BAART, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI, H. WINSEMIUS and P. WARD: EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria (2018)
Application of a nesting approach for improved flood inundation simulation for estuaries and deltas in the framework of global flood modelling
- 14) DOTTORI, F., W. SZEWCZYK, J. C. CISCAR, F. ZHAO, L. ALFIERI, Y. HIRABAYASHI, A. BIANCHI, I. MONGELLI, K. FRIELER, R. BETTS and L. FEYEN: EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria, 8-13 April (2018)
Global human and economic losses from river floods at global warming of 1.5°C, 2°C and 3 °C
- 15) 池内寛明、平林由希子、山崎大：日本地球惑星科学連合(JpGU) 2018 年大会，千葉 (2018)
全球河川モデルによる沿岸域氾濫シミュレーションにネスティング手法の導入が及ぼす影響の評価
- 16) Y. Hirabayashi: Seventh International Conference on Flood Management, Leeds, UK (2017)
Global projection of river flood risk considering autonomous adaptation
- 17) O. SASAKI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE:
Remotely sensed global distribution of debris thermal resistance on glaciers, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May, 2017
- 18) S. WATANABE, N. UTSUMI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Projections of the duration of low-precipitation season in the Chao Phraya river basin based on the output from CMIP5 GCMs
- 19) M. WATANABE, S. WATANABE, Y. HIRABAYASHI, S. YOSHIKAWA and S. KANAE, JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Uncertainty from climate forcing of glacier projection for High Mountain Asia
- 20) M. M. G. D. MADAKUMBURA, S. WATANABE, M. TANOUE, Y. IMADA and Y. HIRABAYASHI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Makuhari Messe, Japan, 20-25 May (2017)
Influence of global warming on Eurasian snow cover teleconnection to the Indian monsoon rainfall using a large ensemble AGCM experiment
- 21) 田上雅浩、平林由希子、池内寛明：水文・水資源学会 2017 年度総会・研究発表会，北見，9 月 19-21 日 (2017)
過去 50 年以上にわたる全球での洪水脆弱性の長期変動
- 22) O. SASAKI, O. NOGUCHI, Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: AGU Fall meeting, 12-

- 16 Dec, San Francisco, USA (2016)
Global-scale analysis of satellite-derived debris distribution on glaciers
- 23) M. WATANABE, Y. HIRABAYASHI, S. YOSHIKAWA and S. KANAE: AGU Fall meeting, 12-16 Dec, San Francisco, USA (2016)
Uncertainty of glacier runoff projection from precipitation data for High Mountain Asia
- 24) 渡辺恵、平林由希子、渡部哲史、吉川沙耶花、鼎信次郎：水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会，福島，9 月 15-17 日 (2016)
GCM に起因する氷河モデルを用いた氷河面積予測差
- 25) 森下慧、田上雅浩、平林由希子、飯泉仁之直：水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会，福島，9 月 15-17 日 (2016)
自然災害指標を用いた自然災害が穀物収量に与える影響の定量化
- 26) 池内寛明、平林由希子、山崎大：水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会，福島，9 月 15-17 日 (2016)
メガデルタ地域における高潮・河川洪水複合水害モデリング
- 27) M. M. G. D. MADAKUMBURA, S. WATANABE, M. TANOUE and Y. HIRABAYASHI: 水文・水資源学会 2016 年度総会・研究発表会，福島 (2016)
Analyzing a relation between Eurasian snow cover and Indian Monsoon rainfall using a large ensemble data set
- 28) Y. HIRABAYASHI: Global Flood Partnership 2016 Conference, Joint Research Center, Ispra, Italy (2016)
Spatio-temporal characteristics of vulnerability of flood at the global scale
- 29) S. NAKATA, Y. HIRABAYASHI, S. FUJIMORI and S. WATANABE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
A CGE analysis of economic costs of flood considering indirect loss: A case study of 2011 Thailand flooding disaster
- 30) O. SASAKI, O. NOGUCHI, Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
Development of a high resolution map of debris on glaciers including whole Himalaya Alpine region derived from multi-temporal ASTER images
- 31) H. IKEUCHI, D. YAMAZAKI, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo Metropolitan University, Tokyo, Japan, 2-4 March (2016)
Representation of the impact of Cyclone Sidr on fluvial flooding in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta
- 32) M. TANOUE, H. IKEUCHI and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, San Francisco, USA. 14-18 December (2015)
Spatiotemporal characteristics of flood protection level
- 33) Y. KINOSHITA, M. TANOUE, S. WATANABE and Y. HIRABAYASHI: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 14-18 December (2015)
Proposal of global flood vulnerability scenarios for evaluating future potential flood losses
- 34) R. HOCK, B. MARZEION, A. BLISS, R. GIESEN, Y. HIRABAYASHI, M. HUSS, V. RADIC and A. SLANGEN: AGU Fall meeting, San Francisco, USA (2015)
GlacierMIP - A model intercomparison of global-scale glacier mass balance models and projections
- 35) 木村雄貴、田上雅浩、今田由紀子、平林由希子：第 24 回地球環境シンポジウム，東京 (2015)
Event Attribution 実験を用いた 2012 年アマゾン川洪水の要因分析
- 36) O. SASAKI, O. NOGUCHI, Y. ZHANG, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: AGU Fall meeting, San Francisco, USA (2015)
Global-scale analysis of satellite-derived debris distribution on glacier
- 37) 池内寛明、平林由希子、山崎大、木口雅司、Sujan Koirala、鼎信次郎：水文・水資源学会 2015 年度総会・研究発表会 (2015)
海水準上昇を伴う河川洪水氾濫解析における背水効果の分析
- 38) 木村雄貴、平林由希子、木下陽平：水文・水資源学会 2015 年度総会・研究発表会 (2015)
温暖化ハイエイタス期の洪水頻度の変化

- 39) M. TANOUE, S. WATANABE, T. TSUNEKAWA, N. HANASAKI, and Y. HIRABAYASHI: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
Impact of terrestrial glacier meltwater on water availability
- 40) S. WATANABE, H. KIM, Y. HIRABAYASHI and S. KANAE: IUGG, Prague, Czech (2015)
A multi-model ensemble method preserving variability in various temporal scales for climate change impact assessment
- 41) M. WATANABE, S. KOIRALA, Y. HIRABAYASHI, A. YANAGAWA and S. KANAE: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
A model estimate of glacier melts responses to climate change in high mountain Asia
- 42) H. IKEUCHI, Y. HIRABAYASHI, D. YAMAZAKI, M. KIGUCHI, S. KOIRALA, and S. KANAE: Asia Oceania Geosciences Society, 12th annual meeting, together with the 7th Asia Pacific Association of Hydrology and Water Resources Conference, Singapore (2015)
Future fluvial floods exacerbated by sea level rise in the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) SPEED 研究会（主催：SPEED 研究会事務局、2017 年 6 月 22 日、アルカディア市ヶ谷、観客約 30 名）にて講演
- 2) SDGs 研究会（主催：JFE エンジニアリング株式会社、2017 年 6 月 27 日、品川プリンスホテル N タワー、観客約 50 名）にて講演
- 3) 日本地球化学会市民講演会（2017 年 9 月 15 日、東京工業大学、観客約 150 名）にて講演
- 4) 一般公開シンポジウム「気候変動の影響の適応への道筋」（主催：S-14、2017 年 6 月 9 日、東京大学生産技術研究所 An 棟コンベンションホール、観客約 100 名）にて講演
- 5) 芝浦工業大学オープンキャンパス（2018 年 8 月 5、18-19 日、観客約 1200 名）にて成果紹介
- 6) 河川技術セミナー（主催：建設コンサルタンツ協会、2018 年 11 月 21 日、ウイックあいち、観客約 120 名）にて講演
- 7) 第 15 回ちかすいネット（主催：ちかすいネット幹事会、2018 年 12 月 1 日、日本工営株式会社九段オフィス大会議室、観客約 80 名）にて講演
- 8) 一般公開シンポジウム「気候変動影響研究と対策の最前線」（主催：S-14、2018 年 5 月 8 日、京都市国際交流会館イベントホール、観客約 100 名）にて講演
- 9) 東京都立豊多摩高等学校における特別授業「地球温暖化と風水災害について」（2019 年 7 月 19 日、聴講者約 20 名）
- 10) 令和元年度「水の日」記念行事「水を考えるつどい」（主催：国土交通省、2019 年 8 月 1 日、新宿パークタワーホール、観客約 100 名）にてパネルディスカッション
- 11) 日本学術会議公開シンポジウム「Future Earth 時代における地球表層システム科学と防災・減災研究」（主催：日本学術会議、2019 年 8 月 7 日、日本学術会議講堂、観客約 80 名）にて成果紹介
- 12) 芝浦工業大学オープンキャンパス（2019 年 7 月 27-28 日、8 月 17-18 日、観客約 1500 名）にて成果紹介
- 13) 第 10 回白亜会（主催：芝浦工業大学卒業生の会、2019 年 9 月 28 日、観客約 70 名）にて成果紹介
- 14) Gen Re セミナー（主催：Gen Re Japan Service Co.、2019 年 0 月 9 日、観客約 100 名）にて成果紹介
- 15) 芝浦工業大学付属柏高校の研究室見学（2019 年 10 月 31 日、観客約 80 名）にて成果紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 国立環境研究所・東京大学・東京工業大学・農研機構・筑波大学・海洋研究開発機構・弘前大学共同プレスリリース（平成 31 年 2 月 28 日、「気候変動による影響の連鎖の可視化に成功—地球温暖化問題の全体像を人々が理解することに貢献—」）*業界紙 3 紙（ウェブ掲載含む）に掲載。

- 2) 芝浦工業大学・国立環境研究所共同プレスリリース（平成30年11月20日、「地球温暖化は多様な災害の増加と同時発生をもたらす 世界の多くの人に影響を与えると発表」）
- 3) Gen Re セミナーの講演を報道（令和元年10月30日、保険毎日新聞、「気候変動テーマに専門家が講演」）

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-2 気候変動による穀物生産への影響評価と適応策の費用便益分析

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構農業環境変動研究センター

気候変動対応研究領域 影響予測ユニット

西森基貴

飯泉仁之直・金元植

環境情報基盤研究領域 統計モデル解析ユニット

櫻井玄

<研究協力者>

気候変動対応研究領域 影響予測ユニット

沈志宏

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：63,000千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：13,000千円、平成28年度：13,000千円、平成29年度：13,000千円、平成30年度：12,000千円、令和元年度：12,000千円）

【要旨】

気候変動のシナリオとして5つの気候モデル、4つの排出量シナリオおよび3つの社会経済シナリオを想定し、窒素肥料の投入量の増加、改良品種とそれに付随する栽培管理手法の使用割合の増加を、穀物生産セクターの適応の費用と便益を推計した。穀物生産では気温上昇が大きいと収量低下が顕著になるため、適応のための生産コスト追加が経済的に見合わなくなり、生産者がそれ以上の適応コストを負担できなくなる（適応限界）。穀物生産ではこの適応限界のため、気温上昇に対する適応コストの増加は相対的に小さく、また残余被害が大きくなり、それは現在の干ばつ被害よりもかなり大きいことがわかった。

【キーワード】

気候変動影響、穀物生産、干ばつと洪水、適応コスト、残余被害

1. はじめに

人口増加と新興国の経済発展により、世界の食料需要は2050年には現在（2016年）の約1.6倍に達すると見込まれているいっぽう、温室効果ガスの排出削減や生物多様性の保全を考えると栽培面積の大幅な拡大は難しく、主に収量の増加を通じて、増大する食料需要に対応することが求められている。また世界の安定的な穀物生産を脅かす主な原因の一つとして挙げられる干ばつは、今後、気候変動によりその頻度と強度が増すと予測されている。干ばつによる生産被害を軽減するためには、干ばつによる穀物生産の被害量の評価とともに予測手法や対策技術の開発・普及が重要である。特に開発途上国では、GDPに占める農業生産の割合が高い国が多いことから、これらの国における干ばつ対策が急がれる。国際機関や先進国が干ばつ対策資金を開発途上国などに支援する際には、これまでの干ばつによる穀物生産被害やその地理的分布についての科学的な根拠が必要となる。しかしながら、これまでは特定の地域と国に限定された干ばつ被害が報告されているものの、過去の干ばつによる穀物生産被害を、全世界において同じ手法で評価した例はなかった。

当然ながら、食料生産への影響は干ばつによるものだけでなく多岐にわたる。このような適応技術のそれぞれについてコストを算出することは困難で、穀物生産の場合、開発と気候変動適応が区別できない場合が多い。開発などに伴う「技術水準」の変化により、穀物生産への気候影響がどのように緩和されてきたかは、依然として不明である。

2. 研究開発目的

世界の主要穀物（トウモロコシ、コメ、コムギ、ダイズ）の収量データを用い、まず降水量と穀物収量のデータを統計解析することにより、50kmメッシュの高解像度で、干ばつによる世界の穀物生産被害の地理的分布を明らかにする。次に、過去の気候変動と農業被害量・額の関係を明らかにするとともに、将来の穀物生産量の気候変動リスクと特定の適応策の便益・費用を全球規模で推計する。具体的には、全球作物モデルが出力する穀物収量と農業栽培技術水準との関係から、全球穀物生産に関する気候変動被害関数および適応関数を作成して、気候変動による適応コストと残余被害を定量化して示す。さらに、土壌データも用い、農地土壌に含まれる炭素量と穀物の干ばつ被害との関係を解析し、炭素貯留による干ばつ被害の軽減効果を推定する。

3. 研究開発方法

(1) 全球スケールで農業気象被害のデータベース化し、干ばつ被害については、過去（1984～2009年）の作物収量と規格化降水量指標（SPI）から推計することにより、干ばつ回数×減収量×収穫

面積×生産者価格の被害関数式を構築し、全球レベルでの気候変動被害額を算出した。また、作物の生理・生態的な生育過程を数式で表現した収量モデルと d4PDF 気候データベースを用いて、過去の（温暖化が起きている）実際の気候条件と、温暖化がなかったと仮定した気候条件のそれぞれについて、世界各地の穀物収量を 50km メッシュで推定した。

(2) 気候変動の影響を検出・評価するために専用に設計された気候データベース（d4PDF）と作物の生理・生態的な生育過程を数式で表現した数値収量モデルを用いて、気候変動が世界各地の主要穀物の収量に及ぼす影響を 50km メッシュの高解像度で予測した。予測の条件に、経済発展に伴い開発途上国で普及するであろう既存の増収技術と、気候変動への対処として簡易に取り組める対策技術、すなわち窒素肥料の投入量の増加、改良品種とそれに付随する栽培管理手法の使用割合の増加、を考慮した。技術進歩は IPCC で使用されている社会経済シナリオに沿うと仮定した。なお、気候変動の定量的定義は IPCC で使用されている 4 つの「排出量シナリオ（RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5）」に基づいており、これらはそれぞれ産業革命以前（1850-1900 年）から今世紀末（2091-2100 年）までの気温上昇が 1.8°C、2.7°C、3.2°C、4.9°C に対応する。

(3) 主要 4 穀物を対象に、各国の農業統計資料による生産コストと平年収量、先行研究による各国一人あたり国内総生産および IMF（国際通貨基金）による消費者物価指数・為替レートを用いた適応コスト関数を作成し、適応コストを計算した。

(4) 予想される気候変動を想定した予測収量と、気候変動が無いと仮定した場合の収量の差（減収分）をコスト換算したものを「気候変動の総コスト」とし、そこから(3)の「適応コスト」を差し引いたものを「残余被害」として定義した。

(5) 干ばつ被害の受けやすさを表す指標として、「干ばつ耐性ギャップ」を定義した。本プロジェクトで開発した 50 km メッシュの全球作物収量データベース（うち 1992～2008 年）を解析し、主要穀物の干ばつ年の収量データを抽出し、平年収量に対する割合で表したものを、各メッシュの「干ばつ耐性（%）」とした。次に、気候条件が同じ地域のなかで、最も大きい干ばつ耐性（%）を「その気候条件の干ばつ年の潜在的な実現可能レベル a（%）」と仮定し、残りのメッシュについて、a と干ばつ耐性（%）の差を「干ばつ耐性ギャップ（ポイント）」として、世界地図上に示しました（図 1 左）。干ばつ耐性ギャップは、与えられた気候条件の中で、干ばつ耐性を向上できる余地があるか調べるのに有効である。

4. 結果及び考察

(1) 穀物分野の現在の状況、観測された影響：

まず、干ばつによる世界の主要穀物（トウモロコシ、コメ、ダイズ、コムギ）の生産被害の地理的分布を 50km メッシュの高解像度で定量化した（図 4.2.1）。これによると、過去 27 年間

（1983-2009 年）に 1 回以上の干ばつ被害を受けた穀物の栽培面積は、トウモロコシ 1.24 億ヘクタール（世界の収穫面積の 82%）、コメ 1.02 億ヘクタール（同 62%）、ダイズ 0.67 億ヘクタール（同 91%）およびコムギ 1.61 億ヘクタール（同 75%）であった。また、1 回の干ばつによる穀物収量減少率は、27 年間の平均で、コムギ 8%（ヘクタールあたり 0.29 トン）、トウモロコシ 7%（同 0.24 トン）、コメ 3%（同 0.13 トン）、ダイズ 7%（同 0.15 トン）であった。まとめると、過去 27 年間（1983-2009 年）における主要 4 穀物の干ばつによる総生産被害額は約 1660 億ドル（年間 62 億ドル）に上る。

ここで、干ばつによる穀物の収量減少率は、開発途上国のうち乾燥地域に位置する国で特に大きく、また、減少率には、各国の経済状況が関係しており、一人あたり GDP の増加に伴って減少率が小さくなることが分かった。さらに本研究で明らかにした平年降水量と収量減少率の関係式を利用することにより、月降水量だけで干ばつによる穀物収量減少率を簡単に見積もることが可能となった。

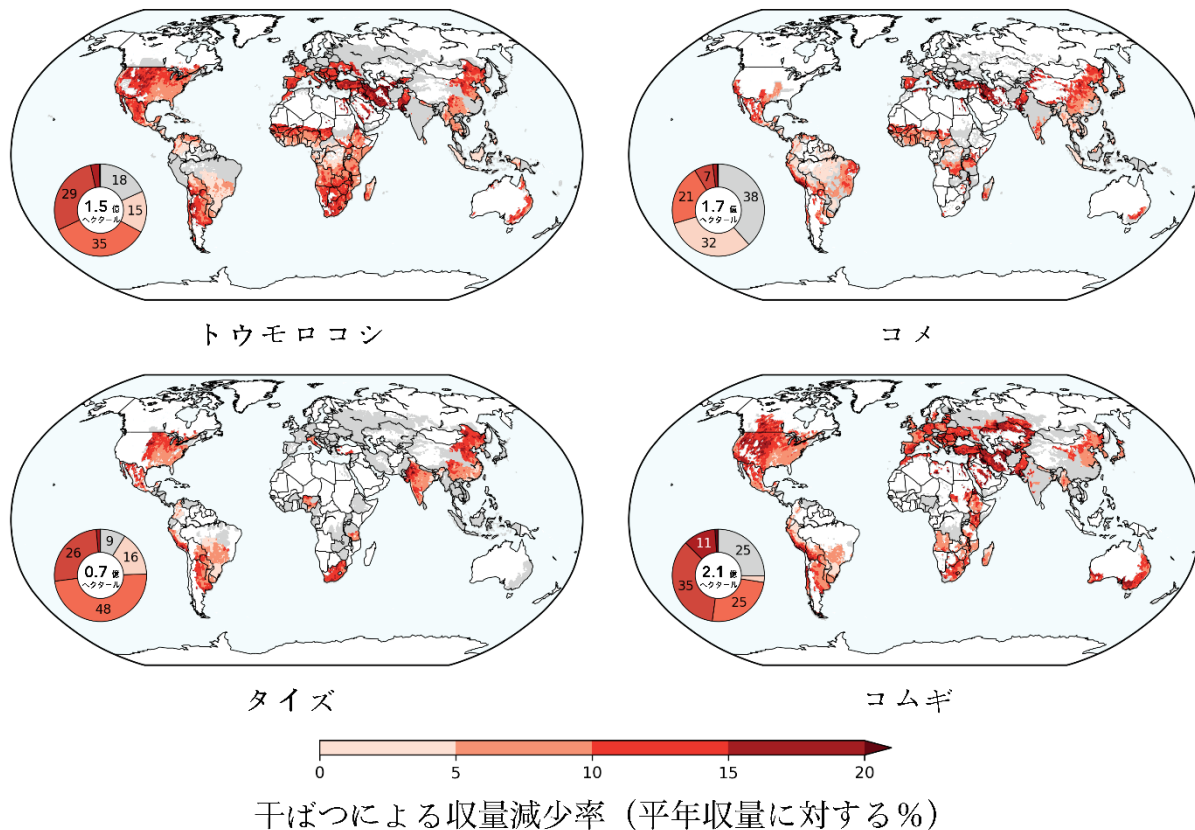


図 4.2.1 過去 27 年間 (1983-2009 年) のデータから計算された、干ばつによる収量減少率の平均値。赤い色が濃いほど干ばつによる収量減少率が大きい。白色は作物が作られていないかデータがない地域、灰色は干ばつによる収量への影響が認められなかった地域。円グラフはそれぞれの収量減少率に区分された面積割合、円グラフの中心の数字はそれぞれの穀物の 2000 年の収穫面積である。

次に、CAMA モデルで 1981 年から 2013 年までに再現された、全球におけるグリッド毎の日別氾濫面積を用いて、その標準偏差 (σ) をグリッド毎に求めた。年毎の生育期間中において、 3σ 以上の大きな氾濫面積があった場合を洪水年と定義し、洪水年に対応して実際に収量低下が生じていることを地域・作物別に明らかに示した (図 4.2.2)。これらの結果から、アメリカのミシシッピ川流域、中国の黒竜江流域やブラジルとアルゼンチンのパラナ川流域で洪水による穀物の被害が認められた。

さらに、気候変動の影響を検出・評価するために専用に設計された気候データベース d4PDF を利用し、過去の (温暖化が起こっている) 実際の気候条件と、温暖化がなかったと仮定した気候条件のそれぞれについて、過去 30 年間 (1981-2010 年) の気候変動による収量影響を 50km メッシュで推計し、国別および全世界で集計した。収量を推定する際の条件として、窒素肥料や改良品種の使用、灌漑といったこれまでの増収技術の普及と、播種日の変更など気候変動への簡易な適応技術の導入を考慮している。また d4PDF 気候データベースでは 100 通りの計算例 (アンサンブル) が利用できるため、それぞれのアンサンブルについて収量影響と被害額を推定し、その平均値を算出した。その結果、過去 30 年間 (1981-2010 年) 世界の平均収量に対する過去の気候変動の影響は、トウモロコシでは -4.1% 、コムギでは -1.8% 、大豆では -4.5% と見積もられた。コメについては世界平均収量に有意な収量影響は検出されなかった。有意な収量影響が見られた 3 穀物を生産被害額に換算すると、世界全体で年間 424 億ドルに上ると推定された (図 4.2.3)。

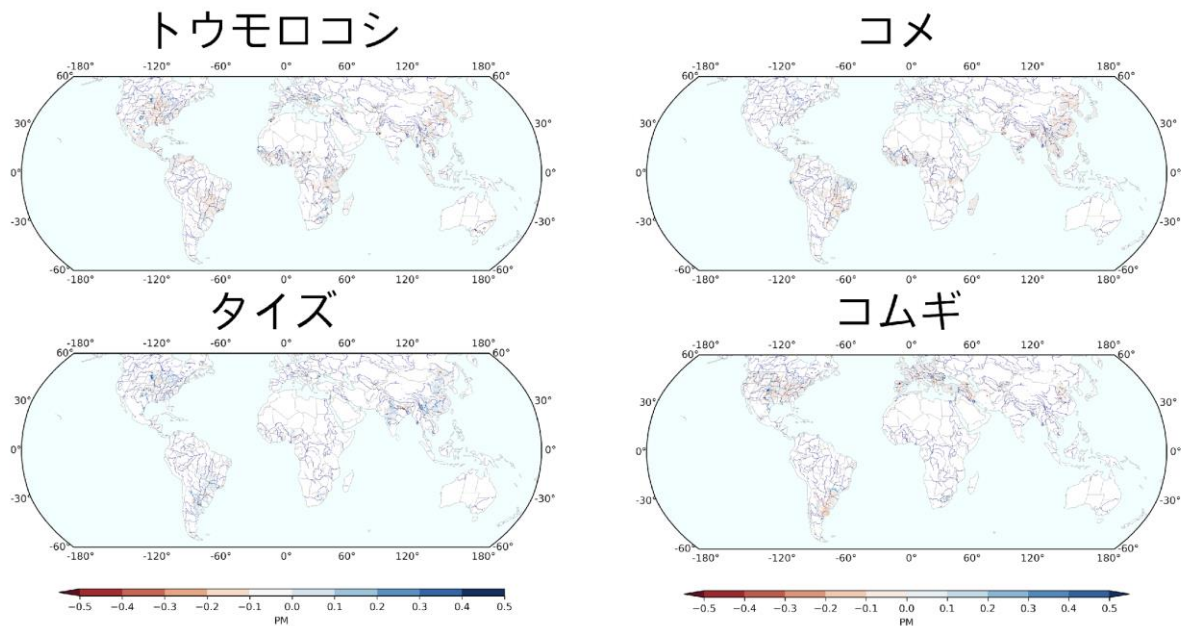


図 4.2.2 過去 32 年間（1982-2013 年）のデータから計算された、洪水による収量減少率の平均値。赤い色が濃いほど洪水による収量減少率が大きい。白色は作物が作られていないかデータがない地域。

(2) 将来予測される影響：

生産量予測に当たり、増収技術としては、窒素肥料の投入量の増加、改良品種とそれに付随する栽培管理手法の使用割合の増加を考慮し、改良品種は従来品種よりも高温や低温、乾燥に強く、窒素肥料の利用効率が高いものの、あくまで現在の気候を想定しており、将来の気候変動は想定していない。

世界の主要穀物の将来変化について、特にトウモロコシやダイズは今世紀末までの気温上昇が 1.8°C 未満でも収量の伸びが停滞することを明らかにした。トウモロコシとダイズの今世紀末時点での収量増加は、産業革命以前から今世紀末までの気温上昇が 1.8°C に留まった場合でも抑制され、気温の上昇が大きいほど収量増加が低くなることが分かった。一方、コメとコムギについては、気温上昇が 3.2°C を超えると収量増加が停滞し始めるものの、それ以下の気温上昇ではあまり影響がないことが示された（図 4.2.4）。ここでのこれらの増収技術は 2000 年頃に先進国で導入済みのもので、将来、開発途上国においては社会経済発展に応じて導入が進むと仮定しているが、先進国では、これらの増収技術の導入割合は現状と同じとしている。また先進国など既に収量が高い地域で必要とされる、超多収性品種などの革新的な増収技術は、本予測には含まれていない。さらに本予測では、「国内総生産（GDP）に応じて農業研究開発支出が増加し、その累積額から技術の陳腐化を差し引いた額に応じて改良品種の使用割合が増加すると仮定している。つまり、一人当たり GDP の増加と一人当たり農地面積の減少に応じて窒素投入量が増加し、 $200\text{kg}/\text{ha}$ （ダイズは $50\text{kg}/\text{ha}$ ）で頭打ちになる。ただし、収穫面積と灌漑割合は 2010 年の水準から変化しない、との仮定も置いている。

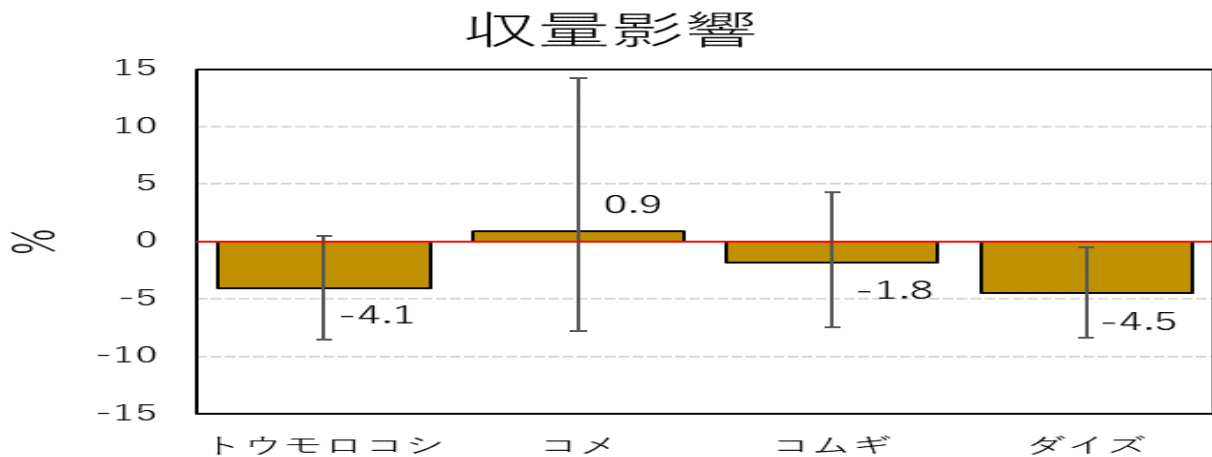


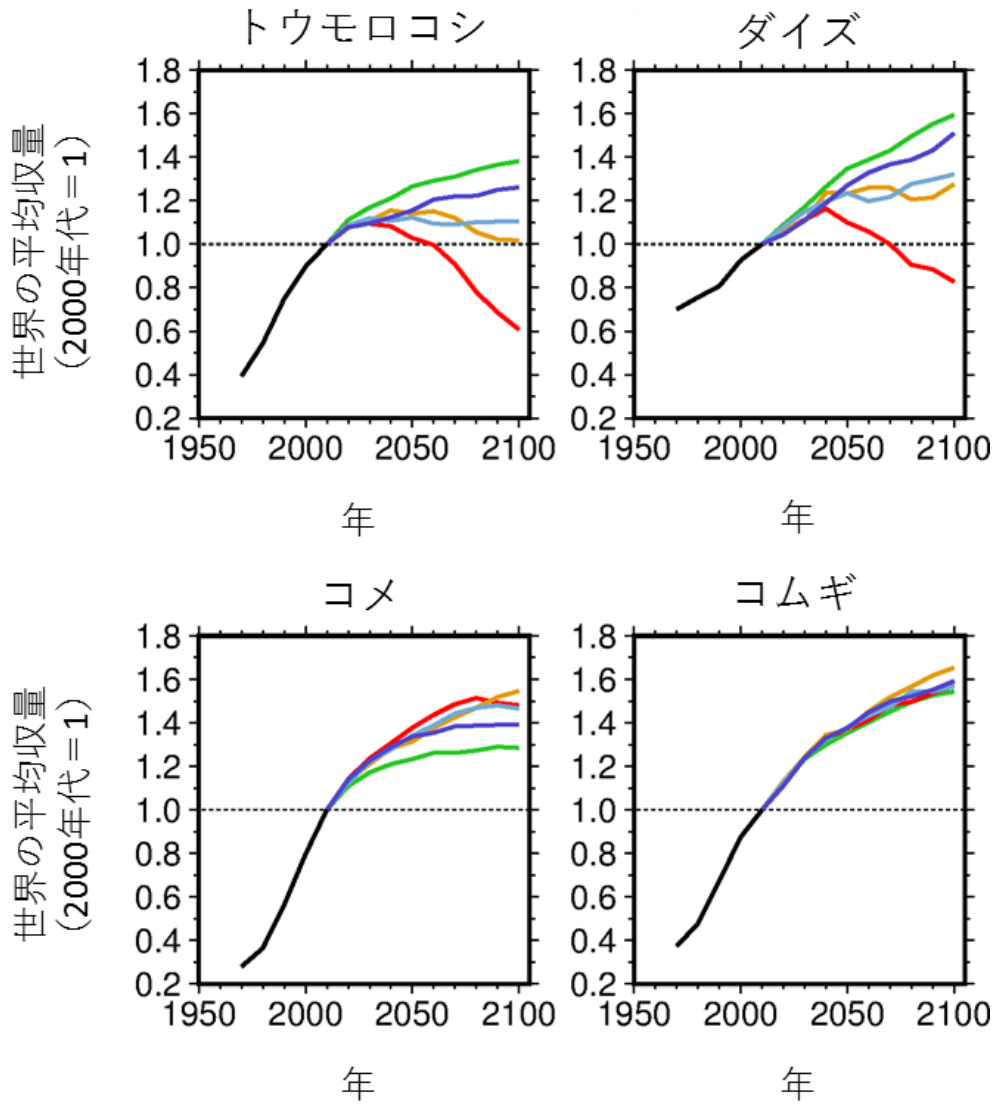
図 4.2.3 過去 30 年間（1981-2010 年）の温暖化による年あたりの世界全体の（左）収量変動および（右）被害額。温暖化がなかったと仮定した気候条件での収量と、それに対する温暖化を含む現実の気候条件下での収量の増減（%）（左図の収量影響）を 50km メッシュで計算して国別集計し、収穫面積と生産者価格を乗じて世界全体で合計したものが右図の生産額影響である。

(3) 適応オプションとその費用：

まず、作物・河川結合モデル CROVER 等を用い、気候変動下で穀物収量を増収させるために必要な灌漑面積は、2050 年までに現行の灌漑面積を毎年 1.23%の割合で増加させた 411 万 ha であることがわかった。

次に 3(3)で示した方法により、気候変動影響がない水準まで穀物収量を回復するために必要な適応コストの推定を行った。異なる気候モデルや社会経済シナリオ、生産コストモデルからなる複数のシナリオの平均では、気温上昇を 2℃で安定化するシナリオ（RCP2.6）と気候変動が著しく進行するシナリオ（RCP8.5）のいずれでも適応コストの額はほぼ同じで、4 穀物を合計した年間の適応コストは世界全体で今世紀半ば（2041-2050 年）には 680-700 億ドル、今世紀末（2091-2100 年）には 910-940 億ドルと推計された（図 4.2.5a）。

世界全体で見ると、最も生産被害が大きい農業気象災害は干ばつであることが知られており、(1)で示したように、4 穀物の干ばつ被害は世界全体では過去 27 年間（1983-2009 年）の累積値で 1660 億ドルと報告されている。これは非干ばつ年も含めて期間平均すると年間 60 億ドルの生産被害に相当する。また、簡略化のため、干ばつの頻度を 10 年に 1 回と仮定すると、干ばつ年の平均被害額は 600 億ドルである。つまり、それを上回る額の適応コストが気温上昇を 2℃で安定化する場合（RCP2.6）であっても必要と示唆された。



これまでの気温上昇 (+0.6°C)
 — で固定し、将来の気候変動はない。増収技術が普及。

— RCP2.6, +1.8°C
 — RCP4.5, +2.7°C ※
 — RCP6.0, +3.2°C
 — RCP8.5, +4.9°C

— これまでの収量の推移 (シミュレーション)

※産業革命以前 (1850-1900年) に対する今世紀末 (2091-2100年) の世界の平均気温の上昇。気候変動が進行し、増収技術と簡易な適応技術が普及。

図 4.2.4 主要穀物の世界平均収量予測値の推移。黒線は収量モデルにより再現した過去 50 年間 (1961-2010 年) の世界の平均収量の推移、青～緑色の線はそれぞれの排出シナリオのもとでの収量予測値の推移で、いずれも 2000 年代値を基準 (1.0) とした相対値。気温上昇はそれぞれの排出シナリオのもとで予測される今世紀末 (2091-2100 年) の気温上昇、また過去の収量の再現値・予測値はいずれも、10 年間ごとに平均値を計算し、それをつないだ線グラフとして示す。

(4) 気候変動の総コストと残余被害：

穀物生産では、気候変動（主に気温上昇）の悪影響が大きいと作物の生理的な限界により、生産者が資材などを追加投入して適応しようとしても収量低下を防ぐことが困難になる。このため、費用便益比の観点から適応コストの支出が見合わなくなり、気候変動の進行が著しい場合には適応コストに代わって残余被害が増加する。(3)で示したように、年間の適応コストは気温上昇に伴い徐々に増加し、4穀物を合計すると世界全体では+1.5°Cで530億ドル、+2°Cで610億ドル、+3°Cで780億ドルと推定された(図4.2.5a)。一方、穀物生産における年間の残余被害は気温上昇に伴い急速に増加し、4穀物を合計すると世界全体では+1.5°Cで100億ドル、+2°Cで190億ドル、+3°Cで500億ドルに達すると推計された(図4.2.5b)。

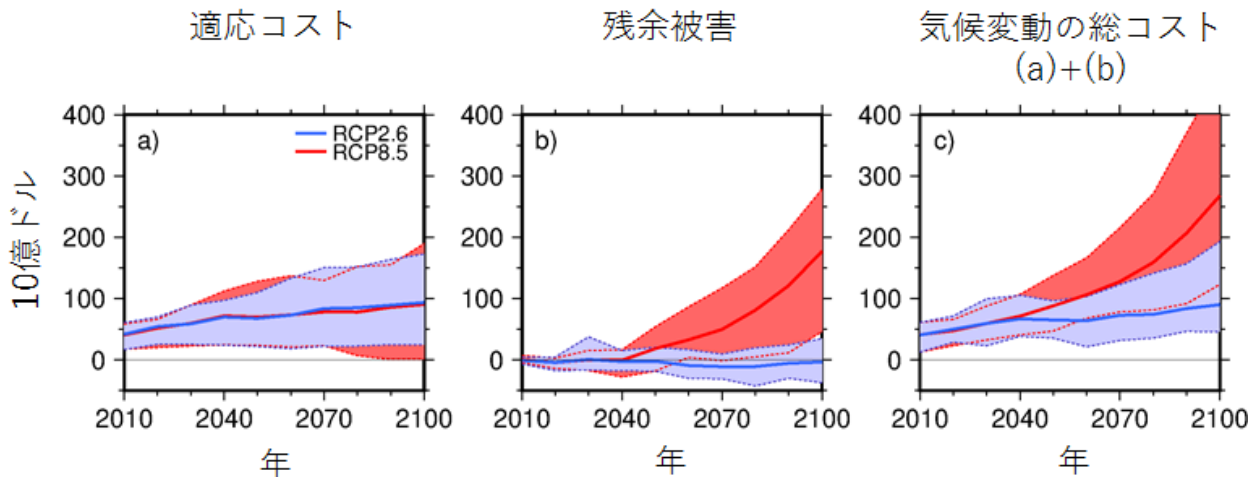


図 4.2.5 RCP2.6 と RCP8.5 排出シナリオにおける世界全体での4穀物合計の適応コスト (a)、残余被害 (b)、気候変動の総コスト (c)。それぞれの排出シナリオについて、異なる50のシナリオ（気候モデル5種類×社会経済シナリオ5種類×生産コストモデル2種類）を考慮した。太線は50シナリオの平均値、陰影と破線は90%信頼区間を示す。

気候変動の総コストに占める適応コストの割合は、+1.5°Cでは84%だが、+2°Cでは76%、+3°Cでは61%に低下する(図4.2.6bの緑色の線)。一方で、残余被害の割合は+1.5°Cでは16%だが、+2°Cでは24%、+3°Cでは39%に上昇する(図4.2.6bのピンク色の線)。これらの結果から、気候変動を安定化した場合、気候変動の悪影響の大部分は生産者の漸進的な適応により吸収することが可能と示唆される。一方、気候変動が著しく進行した場合、生産者の適応コストも増加するうえ、そのみでは気候変動の悪影響を吸収することはできず、大きな残余被害が生じると示唆される。

上記の残余被害を相対化するために現在気候の極端気象による穀物生産被害と比較する。世界全体で見ると、最も生産被害が大きい農業気象災害は干ばつであることが知られており、(1)で示したように、4穀物の干ばつ被害は世界全体では過去27年間(1983-2009年)の累積値で1660億ドルと報告されている。これは非干ばつ年も含めて期間平均すると年間60億ドルの生産被害に相当する。また、簡略化のため、干ばつの頻度を10年に1回と仮定すると、干ばつ年の平均被害額は600億ドルである。気候変動の残余被害は+1.5°C(100億ドル)と+2°C(190億ドル)ではそれよりも小さいが、+3°C(500億ドル)では現在の干ばつ年の平均被害額に匹敵する大きさになる可能性がある。

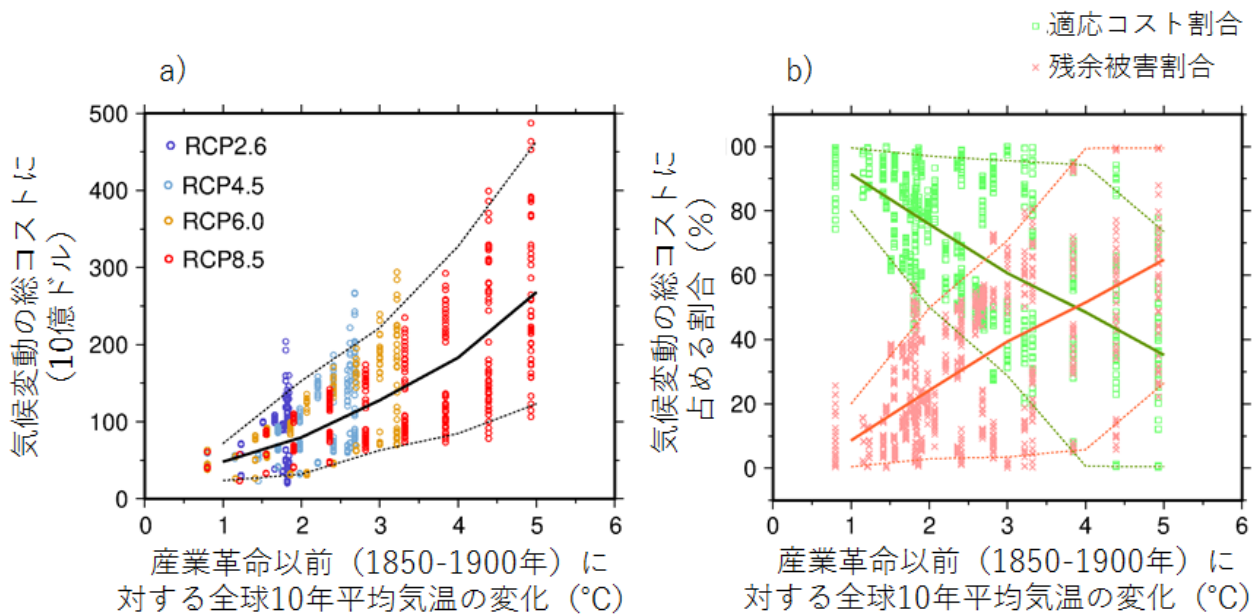


図 4.2.6 (a) 気温上昇に伴う気候変動の総コスト（適応コスト+残余被害）、および (b) 気候変動の総コストに占める適応コストと残余被害のそれぞれの割合。200 シナリオから得られた結果を示す（排出シナリオ 4 種類×気候モデル 5 種類×社会経済シナリオ 5 種類×生産コストモデル 2 種類×10 期間）。左右のそれぞれのパネルにおいて、太線はシナリオの平均、破線は 90%信頼区間を表す。

(5) 緩和と適応のバランス：

干ばつ耐性ギャップ（この値が大きいほど干ばつ被害が小さいことを示す）は、与えられた気候条件の中で、干ばつ耐性を向上できる余地があるか調べるのに有効である。「干ばつ耐性ギャップ」と土壌炭素量との関係を調べたところ、乾燥地域の農地では表層土壌中の炭素量が少ないほど干ばつ耐性ギャップが大きく、炭素量の増加に伴いギャップが小さくなり、炭素量が 4~9 キログラム/平方メートル以上ではギャップの値がほぼ一定となることが明らかになった（図 4.2.7）。

この結果から、土壌中の炭素量がもともと少ない乾燥地域の農地では、干ばつ耐性ギャップが大きく、農地管理により炭素量を増やすことで、干ばつによる収量低下を抑えられる（=干ばつ耐性ギャップを減らせる）と推定された。いっぽう湿潤地域では、乾燥地域で見られたような干ばつ耐性ギャップと土壌炭素量の関係は見られなかった。干ばつ被害の軽減効果が見込める最大水準まで土壌炭素量を増やすと仮定すると、農地に追加で蓄えられる炭素量は世界全体で 48.7 億トンに上る。この土壌炭素量は、世界の 2016 年の年間 CO₂ 排出量の 55%に相当し、世界の平均気温の上昇を 0.011°C（不確実性：0.008-0.014°C）抑制できると見積もられた。

なお、上記の規模で農地土壌への炭素貯留が実現した場合、干ばつ年の世界の穀物生産額は、現状に比べ 16%まで増加可能と試算された。また土壌炭素管理が特に効果的な地域としては、干ばつ年の生産額の増加の観点からは中東・北アフリカが、また土壌の炭素量増加の観点からは、東南アジア・オセアニアと示唆された。

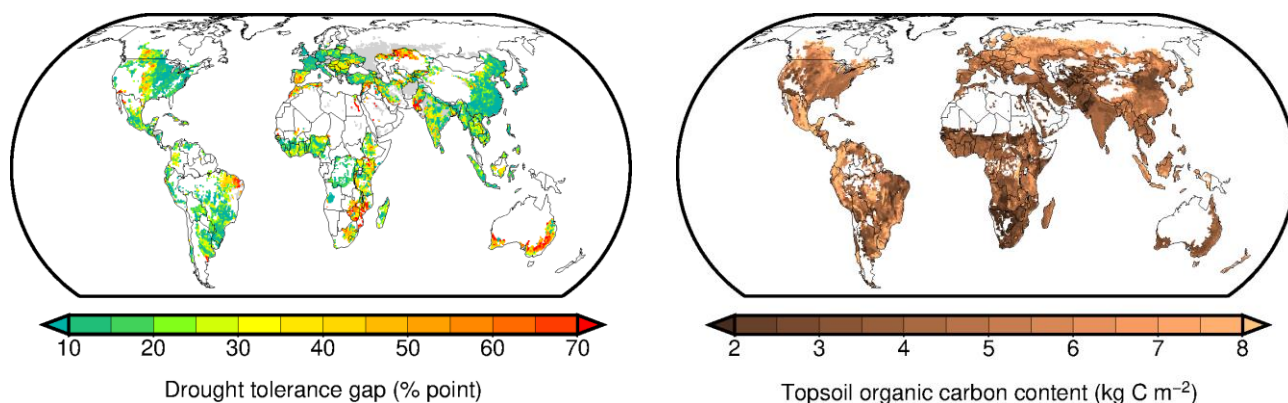


図 4.2.7 干ばつ耐性ギャップと表層土壌の炭素量。(左) 干ばつ年に(潜在的に)実現可能な穀物生産レベルと各メッシュの干ばつ耐性(干ばつ年の収量/平年の収量%)の差(干ばつ耐性ギャップ)。赤色の地域は干ばつ耐性が低く、土壌炭素貯留など栽培管理により干ばつ被害をさらに軽減できる余地が大きい地域を示しているいっぽう、緑色の地域は干ばつ耐性が既に高く、干ばつ被害をさらに軽減できる余地が小さい地域を示す。(右) 穀物が生産されている農地の表層土壌(土壌表面から深さ 30cm)に含まれる平均の炭素量。大部分のメッシュでは炭素量は 8 キログラム/平方メートル以下であるが、一部それ以上の炭素量の地点もある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

干ばつによる穀物の収量減少率は、開発途上国のうち乾燥地域に位置する国で特に大きく、また、減少率には、各国の経済状況が関係しており、一人あたり GDP の増加に伴って減少率が小さくなること、および本研究で明らかにした平年降水量と収量減少率の関係式を利用することにより、月降水量だけで干ばつによる穀物収量減少率を簡単に見積もることが可能となった。

農業分野における気候変動への適応については、これまで農業者が、過去にも異常気象等への対応で行ってきた簡易な対策技術、すなわち窒素肥料の投入量の増加、改良品種とそれに付随する栽培管理手法の使用割合の増加を、気候変動への本格的な対応と分離することで、より現実に近い将来予測と適応コストの算出を可能とした。また温室効果ガス排出シナリオおよび共通社会経済シナリオの適切な組み合わせにより、例えば現状での最悪シナリオ(RCP8.5/SSP3)および最良シナリオ(RCP2.6/SSP1)を想定した場合の、適応コスト及び残余被害の定量的評価を行った。

(2) 環境政策への貢献

今後、気候変動の下で継続的に収量を増加させるためには、従来の増収技術(施肥管理や高収量品種の利用)の開発途上国での一層の普及に加えて、高温耐性品種や灌漑・排水設備の整備といった、より積極的な気候変動への適応技術の開発・普及を加速していく必要があることを示した。また本成果から、世界の乾燥・半乾燥地域における農地土壌の炭素貯留が、温暖化の緩和、食料安全保障、土壌保全、といった複数の SDGs の達成に同時に寄与できることが、具体的な数値とともに示されました。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第1ならびに第2作業部会の第5次評価報告書、1.5°C特別報告書および陸域特別報告書に多数の論文が引用されている。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. IIZUMI and T. SAKAI: Scientific Data 7, 97, <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0433-7> (2020)
“The global dataset of historical yields for major crops 1981-2016”
- 2) T. IIZUMI and R. WAGAI: Scientific Reports, 9, 19744 (2019)
“Leveraging drought risk reduction for sustainable food, soil and climate via soil organic carbon sequestration”
- 3) W. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: J. Appl. Meteorol. Climatol. 58, 1233-1244 (2019)
“Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009”
- 4) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, N. HANASAKI, T. HASEGAWA, Y. HIRABAYASHI, Y. HONDA, T. IIZUMI, N. KUMANO, C. PARK, Z. SHEN, K. TAKAHASHI, M. TAMURA, M. TANOUE, K. TSUCHIDA, H. YOKOI, Q. ZHOU, T. OKI and Y. HIJIOKA: Nature Climate Change, 9, 737-741 (2019)
“Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways”
- 5) M. OKADA, T. IIZUMI, T. SAKAMOTO, M. KOTOKU, G. SAKURAI, Y. HIJIOKA and M. NISHIMORI: Earth's Future, 6, 1207-1220 (2018)
“Varying benefits of irrigation expansion for crop production under a changing climate and competitive water use among crops”
- 6) T. IIZUMI, H. SHIOGAMA, Y. IMADA, N. HANASAKI, H. TAKIKAWA and M. NISHIMORI (2018) International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.5818.
“Crop production losses associated with anthropogenic climate change for 1981-2010 compared with preindustrial levels.”
- 7) T. YOKOHATA, K. TANAKA, K. NISHINA, K. TAKAHASHI, S. EMORI, M. KIGUCHI, Y. ISERI, Y. HONDA, M. OKADA, Y. MASAKI, A. YAMAMOTO, M. SHIGEMITSU, M. YOSHIMORI, T. SUEYOSHI, K. IWASE, N. HANASAKI, A. ITO, G. SAKURAI, T. IIZUMI, M. NISHIMORI, W.-H. LIM, C. MIYAZAKI, A. OKAMOTO, S. KANAE and T. OKI: Earth's Future, DOI:10.1029/2018EF000945. (2019)
“Visualizing the interconnections among climate risks”
- 8) T. IIZUMI, W.-S. KIM and M. NISHIMORI: Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 11, 99-112. (2019)
“Modeling the global sowing and harvesting windows of major crops around the year 2000”
- 9) T. IIZUMI, M. KOTOKU, W. KIM, P. C. WEST, J. S. GERBER and M. E. BROWN: PLoS ONE 13(9): e0203809 (2018)
“Uncertainties of potentials and recent changes in global yields of major crops resulting from census- and satellite-based yield datasets at multiple resolutions”
- 10) T. IIZUMI, J. FURUYA, Z.-H. SHEN, W.-S. KIM, M. OKADA, S. FUJIMORI, T. HASEGAWA and M. NISHIMORI: Scientific Reports, 7, (2017)
“Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes”
- 11) T. IIZUMI, H. TAKIKAWA, Y. HIRABAYASHI, N. HANASAKI and M. NISHIMORI: Journal of Geophysical Research (Atmospheres), 122, (2017)
“Contributions of different bias-correction methods and reference meteorological forcing data sets to uncertainty in projected temperature and precipitation extremes”
- 12) T. IIZUMI and N. RAMANKUTTY: Environ. Res. Lett., 11, 034003 (2016)
“Changes in yield variability of major crops for 1981-2010 explained by climate change”
- 13) T. SAKAI, T. IIZUMI, M. OKADA, M. NISHIMORI, T. GRUNWALDB, J. PRUEGER, A. CESCATTID, W. KORRESE, M. SCHMIDT, A. CARRARAG, B. LOUBETH and E. CESCHIAI: Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf, doi: 10.1016/j.jag.2015.09.011 (2015)

“Varying applicability of four different satellite-derived soil moisture products to global gridded crop model evaluation”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) T. IIZUMI: in Adaptation to Climate Change in Agriculture – Research and Practices (eds. Iizumi, T., R. Hirata, and R. Matsuda), Springer Nature, 3-16 (2019)
“Emerging adaptation to climate change in agriculture”
- 2) T. IIZUMI and W. KIM (2019): in Adaptation to Climate Change in Agriculture – Research and Practices (eds. Iizumi, T., R. Hirata, and R. Matsuda), Springer Nature, 97-110.
“Recent improvements to global seasonal crop forecasting and related research”
- 3) M. NISHIMORI: In “Nature, Culture, and Food in Monsoon Asia, S. Yokoyama et al. (Eds.), Springer Nature Singapore Pte Ltd., 15-24 (2020)
“Global Warming and Agricultural Production in Asia.”
- 4) 西森基貴、農業いばらき、2018年5月号、16-17 (2018)
「気候変動・異常気象による農作物被害とその軽減技術」
- 5) 西森基貴、JATAFF ジャーナル、4, 5, 68 (2016)
「気候変動による食料生産変動の影響予測に向けて」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 金元植・飯泉仁之直・趙在一・増富祐司：日本農業気象学会 2020 年全国大会（2020）
「干ばつによる全球穀物被害の検出と予測に関する試み」（誌上発表）
- 2) 飯泉仁之直・滝本貴弘・増富祐司：日本農業気象学会 2020 年全国大会（2020）
「農業応用向け全球・3 時間・0.5° ・バイアス補正再解析・季節予報接合気象外力データ」（誌上発表）
- 3) W. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: AgMIP-East Asia and Climate Smart Agriculture Symposium & The 6th Symposium on the Development and Application of Agricultural System Models in China (2019)
“Toward Forecast Service of Global Crop Yields using APCC MME”
- 4) 金元植・飯泉仁之直・西森基貴：気象研究所 応用気象研究部臨時コロキウム（2019）
“Global Patterns of Crop Production Losses Associated with Droughts and Floods from 1984 to 2009”
- 5) 飯泉仁之直、日本農業気象学会 2019 年全国大会（2019）
「収量予測を高度化するために開発された全球に適用可能な栽培暦推定モデル」
- 6) 飯泉仁之直、日本気象学会 2018 年度秋季大会（2018）
「日別気象データを用いて推定された主要作物の全球栽培暦」
- 7) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: 3rd Conference on Agricultural and Forest Meteorology/12th Fire and Forest Meteorology Symposium/Fourth Conference on Biogeosciences, (2018)
“Worldwide Drought Vulnerability Maps for Staple Crops”
- 8) T. IIZUMI, T. NAKAEGAWA, W.-S. KIM and M. NISHIMORI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 14th Annual Meeting (2018)
“Climate extremes and global crop production”
- 9) G. SAKURAI, T. DOI, M. OKADA, M. NISHIMORI and M. YOKOZAWA: EGU General Assembly (2018)
“Potential benefits of changing the planting date to account for seasonal weather forecasts”
- 10) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: EGU General Assembly (2018)
“Vulnerability of Global Crop Production Systems to Drought Extremes”
- 11) 飯泉仁之直、日本農業気象学会 75 周年記念大会（2018）
「食料生産の広域でのモニタリングやモデリング、予測は今後、どこに向かうか？」
- 12) T. IIZUMI, Y.-H. SHIN, W.-S. KIM, M.-S. KIM and J.-W. CHOI: International Symposium on Agricultural Meteorology (ISAM) (2018)
“Global crop yield forecasting using seasonal climate information from a multi-model ensemble”
- 13) G. SAKURAI, M. OKADA, M. NISHIMORI and M. YOKOZAWA: American Geophysical Union (AGU)

- Fall Meeting (2017)
 “Benefits of seasonal forecasts of crop yields”
- 14) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
 “Detection of Meteorological Extreme Effect on Historical Crop Yield Anomaly”
 - 15) M. OKADA, T. IIZUMI, T. SAKAMOTO, M. KOTOKU, G. SAKURAI and M. NISHIMORI: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting (2017)
 “The limit of irrigation adaption due to the inter-crop conflict of water use under changing climate and landuse”
 - 16) 飯泉仁之直、塩竈秀夫、今田由紀子、花崎直太、金元植、沈志宏、西森基貴：日本気象学会 2017 年度秋季大会 (2017)
 「気候モデルによる大規模アンサンブルデータを用いた作物収量への気候変動影響の検出」
 - 17) 西森基貴、第 67 回気候影響・利用研究会 (2017)
 「近年の気候変動・異常気象とその農業への影響」
 - 18) 飯泉仁之直：日本農業気象学会 2017 年全国大会 (2017)
 「主要穀物の栽培暦についての全球データセットの開発」
 - 19) T. IIZUMI, W.-S. KIM, S. ZHIHONG and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
 “Modeling global yield growth of major crops under multiple socioeconomic pathways”
 - 20) W.-S. KIM, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
 “The relationship between standardized precipitation index and historical crop yield in the world”
 - 21) M. OKADA, T. IIZUMI, G. SAKURAI and M. NISHIMORI: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
 “Effectiveness of irrigation adaption depending on change in available water resources under changing climate and landuse” (DEC)
 - 22) 飯泉仁之直、西森基貴：日本気象学会 2016 年度秋季大会
 「気象外力データセット間の気温・降水極端指標の再現性の差異」
 - 23) 岡田将誌、飯泉仁之直・櫻井玄・西森基貴：日本気象学会 2016 年度秋季大会
 「気候・水資源制約下での農業適応策としての灌漑面積拡大の有効性」
 - 24) W.-S. KIM: ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) 2016 Annual International Meeting, Orlando, Florida (2016)
 “Agro-Meteorological Nowcaster (AMEN) for the monitoring and forecasting of evapotranspiration”
 - 25) Z. SHEN, T. IIZUMI and M. NISHIMORI: 14th Pacific Regional Science Conference Organization (PRSCO 2016), Bangkok, Thailand (2016)
 “Cost benefit analysis of agricultural policy to improve food productivity and environmental efficiency: a model simulation study in Songyuan city, China”
 - 26) G. SAKURAI, M. NISHIMORI, M. OKADA, T. IIZUMI and M. YOKOZAWA: Adaptation Futures 2016, Rotterdam, The Netherlands (2016)
 “Future possible crop yield scenarios under multiple SSP and RCP scenarios”
 - 27) 飯泉仁之直：日本農業気象学会 2016 年全国大会 (2016)
 「過去 30 年間の気候変化が世界の主要穀物の収量変動に与えた影響」
 - 28) 櫻井玄・横沢正幸：日本農業気象学会 2016 年全国大会 (2016)
 「広域作物モデルにおける誤差の空間相関の取り扱いが予測に及ぼす影響」
 - 29) 西森基貴：日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「経験的統計ダウンスケーリング手法 (ESD) 結果の不確実性について—南米および日本への適用と学習・検証期間の影響—」
 - 30) 飯泉仁之直：日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「世界の主要穀物の収量変動変化に対する気候変化影響の同定と評価」
 - 31) W.-S. KIM: AGU Fall Meeting, San Francisco, USA (2015)
 “Why we need to estimate the sampling uncertainty of eddy covariance flux measurement?”
 - 32) T. IIZUMI: MARCO Symposium 2015 “Next Challenges of Agro-Environmental Research in Monsoon Asia” (2015)

“Global risk assessment of climate-induced food production shocks: from Seasonal scale to the end of this century”

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 西森基貴：：G 空間 EXPO2018 「地理学で読み解く食の愉しみ」（2018）
気候変動は世界の食を変えるのか？

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 農研機構プレスリリース（令和2年2月6日、「世界の乾燥地域では、農地土壌の炭素量増加により穀物生産の干ばつ被害が軽減」）
- 2) 農研機構プレスリリース（令和元年7月1日、「干ばつによる世界の穀物生産被害をマップ化
- 干ばつに対する国際的な支援や対策に役立ちます」）*全国紙（毎日）ほか業界紙（ウェブ掲載含む）に掲載
- 3) 農研機構・国立環境研究所・気象庁気象研究所共同プレスリリース（平成30年12月11日、「地球温暖化による穀物生産被害は過去30年間で平均すると世界全体で年間424億ドルと推定」）*全国紙3紙（朝日、毎日、日経）、地方紙7紙、業界紙13紙（ウェブ掲載含む）に掲載
- 4) 国立環境研究所・東京大学・東京工業大学・農研機構・筑波大学・海洋研究開発機構・弘前大学共同プレスリリース（平成31年2月28日、「気候変動による影響の連鎖の可視化に成功ー地球温暖化問題の全体像を人々が理解することに貢献ー」）*業界紙3紙（ウェブ掲載含む）に掲載
- 5) 農研機構・国際農林水産業研究センター・国立環境研究所共同プレスリリース（平成29年8月28日、「温暖化の進行で世界の穀物収量の伸びは鈍化するー新たな将来予測の結果、世界の増加する食料需要を満たすためには、気候変動に適応した穀物生産技術がますます重要にー」）*全国紙2紙（読売、毎日）、地方紙17紙、業界紙11紙（ウェブ掲載含む）に掲載。
- 6) 農研機構プレスリリース（平成28年3月28日、「過去30年間に穀物収量が不安定化した地域と気候要因の寄与を明らかに」）

(6) その他

- 1) 櫻井玄：農業環境技術研究所若手研究者奨励賞（2016年1月）
「農業生態系のモデル化と数理統計手法を用いた農業環境応答機構の解明」

8. 引用文献

特に記載すべき事項はない。

II-3 気候変動による健康への影響評価と適応策の費用便益分析

筑波大学体育系
東京大学大学院医学系研究科

本田 靖
橋爪 真弘

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：39,620千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：8,058千円、平成28年度：8,058千円、平成29年度：8,058千円、平成30年度：7,723千円、令和元年度：7,723千円）

【要旨】

気候変動による健康への影響評価に関しては、2014年に発表された世界保健機関（＝WHO）の報告書で熱関連超過死亡、マラリア、デング熱、下痢性疾患、低栄養、沿岸洪水の将来予測が報告されて以降、包括的な研究発表は行われていなかった。本サブプロジェクトでは、そのWHO報告書で用いられた方法を応用して、RCPsとSSPsごとの影響評価を行い、2018年に発表した。この研究では、単位二酸化炭素排出量あたりの生涯調整生存年数をhealth damage factor（＝健康障害係数）として求めた。SSP1、SSP2、SSP3について、2000年～2100年における健康障害係数はそれぞれ 1.3×10^{-6} 、 1.5×10^{-6} 、 2.0×10^{-6} であった。また、内訳としては小児に大きな影響の及ぶ低栄養、マラリアへの影響が大きかった。これ以外には包括的な報告は未だに出版されていない。

なお、費用便益分析としては、サブテーマ5の中に他のセクタと共に含まれる形での報告がなされている。

上記の包括的将来予測以外に、今後の評価・費用便益分析に向けて重要な知見を以下に列挙する。(1) 全球の熱関連超過死亡の予測には、各地域においてリスクが最低となる気温を推定することが不可欠であり、我々の発見した84パーセンタイル仮説（その地域の日最高気温の84パーセンタイル値でリスク最低となる日最高気温を推定できる）が全球予測に有用であったが、この仮説が概ね熱帯地域でも適用可能であることが示された

(2) 同レベルの高気温でも、夏の初期にはリスクが高く、後半はリスクが低下することが国際的な共同研究で明らかになり、同様の傾向は日本の47都道府県における熱中症救急搬送者数の研究でも明らかとなった。

(3) しかしながら、台風15号の影響を千葉県と東京都で比較した研究において、台風通過直後に起こった気温の上昇によって、大規模な停電が起きた千葉県では通常よりもはるかに多くの熱中症救急搬送者数が認められたのに対し、東京都では例年と大きな相違が見られなかった。今後は、このような複合災害を想定した適応策が必要であることが示された。

【キーワード】

熱関連超過死亡、マラリア、デング熱、下痢性疾患、低栄養、沿岸洪水、障害調整生存年

1. はじめに

気候変動による健康への包括的な影響評価に関しては、世界保健機関（＝WHO）により、McMichaelらが中心になって行われた研究が端緒である。この研究は、Global burden of diseasesの一つとして他の影響と共に2004年に発表され¹⁾、その研究が主としてIPCC第4次報告書に取り込まれることとなった。その後、WHO主導で次の評価研究が行われ、2014年に世界保健機関（＝WHO）の報告書が発表された²⁾。この報告書では主な影響として熱関連超過死亡、マラリア、デング熱、下痢性疾患、低栄養、沿岸洪水が選ばれ、その将来予測が報告された。2004年の報告の際には全球の影響評価に用いることのできるモデルがないことから含まれなかった熱関連超過死亡であるが、本田らのモデルによって全球評価が可能となり、2014年の報告ではマラリア、デング熱、下痢性疾患、低栄養、沿岸洪水とともに熱関連超過死亡が含まれることとなった。この2014年報告書で用いられたシナリオは、SRES A1Bであり、IPCC第5次報告書で採用されたRCPs、SSPsではなかったが、S-14開始までに、新たなシナリオを用いた健康影響の将来影響評価は行われておらず、その実施が望まれていた。

2. 研究開発目的

本サブプロジェクトでは、シナリオとしてRCPs、SSPsを用い、上記WHO2014年報告書で用いられた各健康影響の推定方法を適用して将来予測を行うことを第一の目的とし、その結果を、マルチセクタの費用便益分析を行うサブテーマ5に供給することとした。

さらに、上記WHO2014年報告書を発展させる方向での研究として、熱関連超過死亡に関する国際

共同研究を行った。

3. 研究開発方法

熱関連超過死亡：気温と死亡との関連は、図 3-3-1 のように、ある気温（至適気温）で死亡リスクが最低となり、その両端では徐々にリスクが高くなるという V 字型を示す。気温が至適気温を超えた日のリスクと至適気温でのリスクの差をとれば、それが熱関連超過死亡である。環境研究総合推進費 S-8 などによって、この図のようなリスク関数を推計し、また至適気温がその地域の気温分布の 84 パーセンタイル値で推測できること、しかし至適気温自体が温暖化に伴って上昇していることを明らかにしてきた³⁾。この方法を用いて、新たに RCP&SSP の枠組みで将来予測を行った。なお、我々の共同研究により、この仮説は年較差の非常に小さいベトナムやフィリピンなどでも概ね使用できることが明らかになっている。

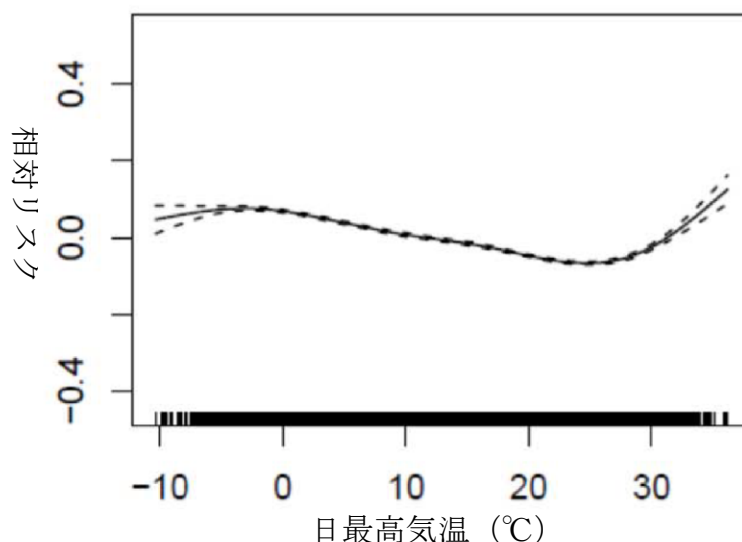


図 3.3.1 気温と死亡との関連（1972-2008 年、東京、65 歳以上）

気候シナリオについては、S-14-3 で統一的な予測を行うために、S-14-3(2)の飯泉氏が、ISI-MIP2b をもとにしてバイアス補正した気候シナリオを開発たものを用いた。

MIROC-ESM-CHEM を追加した、表 3.3.1 に示す条件で、8 つの気候モデルを用いて、熱ストレスによる健康影響評価を行った。

表 3.3.1. 将来気候シナリオ

項目	内容
気候モデル	GFDL-ESM2M、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR、MIROC5、MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MRI-CGCM3、NorESM1-M
将来	RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0、RCP8.5 2006 年～2100 年の日別値
historical	1981～2005 年
空間解像度	0.5°グリッド
形式	NetCDF4

なお、現在気候シナリオは、表 3.3.2 に示すものを用いた。

表 3.3.2. 現在気候シナリオ

項目	内容
データ期間	1958～2013 年の日別値
空間解像度	0.5°グリッド
形式	NetCDF4

熱ストレスによる超過死亡者数の推計には総死亡者数が必要となる。0.5° グリッドごとの死亡者数については公開データが存在しないことから、様々なデータや手法を用いて推計することとなる。

以下に、0.5° グリッドごとの死亡者数を推計するために利用したデータについて表 4.3.3 に示す。

表 3.3.3 0.5° グリッドごとの死亡者数を求めるために収集したデータ

機関	データ	出典等
NASA (SEDAC)	GPWv3 : 2000 年における 2.5'グリッドごとの人口	http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v3
NASA (SEDAC)	National Identifier : 2000 年における 2.5'グリッドごとの国番号(GPW)	http://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/gpw-v3
NCAR	SSP ごと、0.125°グリッドごとの人口 (2010~2100、10年ごと)	https://www2.cgd.ucar.edu/sections/tss/iam/spatial-population-scenarios
ウィーン大学	SSP ごと、国別の死亡率 (CRUDE DEATH RATE) (5年ごと)	http://www.oeaw.ac.at/fileadmin/subsites/Institute/VID/dataexplorer/index

ここで、0.5° グリッドの死亡者数の作成手順については以下の通りである。

- 1 GPWv3 の 2.5' の人口データを 0.125° グリッドに集計 (NCAR の 0.125° グリッドと合わせるため)
- 2 National Identifier grid の 2.5' の国番号を 0.125° グリッドに割付 (仮定：0.125° グリッドにおいて、最も大きな面積を占める国がそのグリッドを代表)
- 3 0.125° グリッドにおける人口 (①) と国番号 (②) をもとに、国別の死亡率を乗じ、0.125° グリッドにおける、死亡数 (全年齢階級の総数) を推計 (仮定：死亡率が設定されていない国については、世界平均の死亡率で代替した)
- 4 気候モデルと同様の 0.5° グリッドに変換

SSP1~SSP5 のために計算した死亡者数を表 3.3.4 に示す。

表 3.3.4. SSP ごとの死亡者数 (単位：人)

	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
2005	55,054,518	55,054,518	55,054,518	55,054,518	55,054,518
2010	55,702,527	56,965,855	57,838,011	57,128,720	55,698,725
2020	55,194,868	61,341,313	69,252,852	65,065,955	55,145,592
2030	57,723,510	68,655,070	82,258,466	75,121,722	57,823,174
2040	62,998,198	78,103,142	97,170,988	87,265,984	62,940,738
2050	68,851,969	87,452,352	111,667,263	99,814,451	68,799,463
2060	74,918,758	95,721,666	123,764,526	111,180,815	74,954,332
2070	79,878,414	101,682,471	132,840,105	119,573,128	79,609,101
2080	83,532,302	105,342,803	138,839,310	125,006,779	83,465,521
2090	85,090,055	105,874,073	143,049,686	127,012,314	85,019,641
2100	81,922,808	104,091,400	148,296,779	126,275,977	82,152,089

熱関連超過死亡は、リスクが最低となる至適気温を超えて、至適気温での死亡リスクよりも高いリスクによって生じるが、その相対リスクは図 3.3.2 に示すものを用いた。

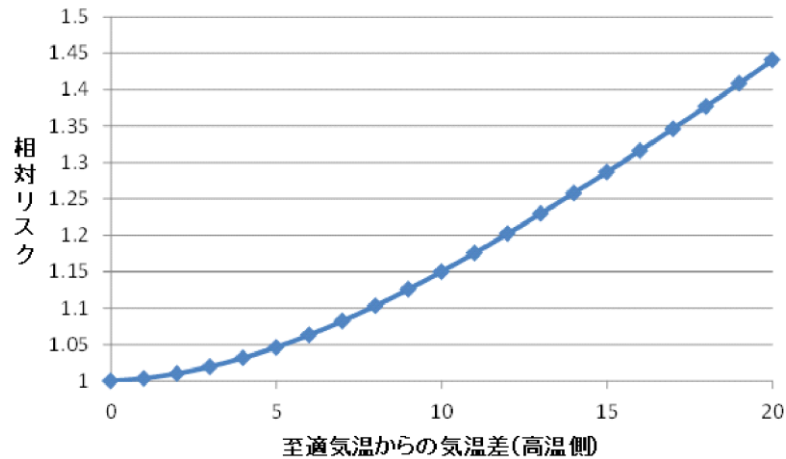


図 3.3.2. 熱関連超過死亡のリスク。

なお、台風と高温の複合影響を評価するための研究では、消防庁の救急搬送データを用いた解析を行った。

マラリア：基本は WHO 報告書でなされたウメオ大学の将来推計方法⁴⁾である。新たなマラリア流行地図が得られたので、気温、降水量、GDP を予測変数としたロジスティック回帰曲線を用いた推定式のパラメータを再推定した。その推定式に基づき、RCP&SSP の枠組みでグリッドごとにその場所が流行地であるかどうかを推測した。更に、参考までに、そのグリッドが含まれる国の現時点でのマラリア死亡率を用いて将来の死亡数を推計した。当然ながら将来は治療法、予防法も改善されることが予測されるが、ある程度は GDP でそのことが表現されている（GDP が高いほど流行地である確率が低下する）し、対策を行わなかった場合がどの程度かを評価しておくことで対策の便益が評価できるはずである。

低栄養：国立環境研究所の長谷川らは、2014 年の WHO 報告書から発展させ、RCP&SSP ベースの将来予測を行った。2016 年の論文では、社会の不平等を考慮すべく GINI 係数を導入しているし、低栄養による健康影響を CGE (= computable general equilibrium) モデルを用いて経済的な評価を行った。不確実性考慮のために、6 種類の全球穀物モデル、5 種類の全球気候モデルによって相違を観察した。

4. 結果及び考察

気候変動による健康影響の総合的評価

この研究は、IPCC 第 5 次報告書出版後、初めて行われた SSP ごとの気候変動による包括的な健康影響評価である⁶⁾。Health damage factor として生涯調整生存年 (= Disability-adjusted Life Years, DALYs) を用いて、熱関連超過死亡、低栄養、下痢性疾患、マラリア、デング熱、沿岸洪水についての影響を推計した。

図 4.3.1 に、基礎となる健康影響の東南アジアにおける死亡率を示す。ここでは熱関連超過死亡で適応を仮定していないこともあり、最も高い死亡率を示す。次いで低栄養や下痢性疾患の影響が大きいことが明らかとなった。

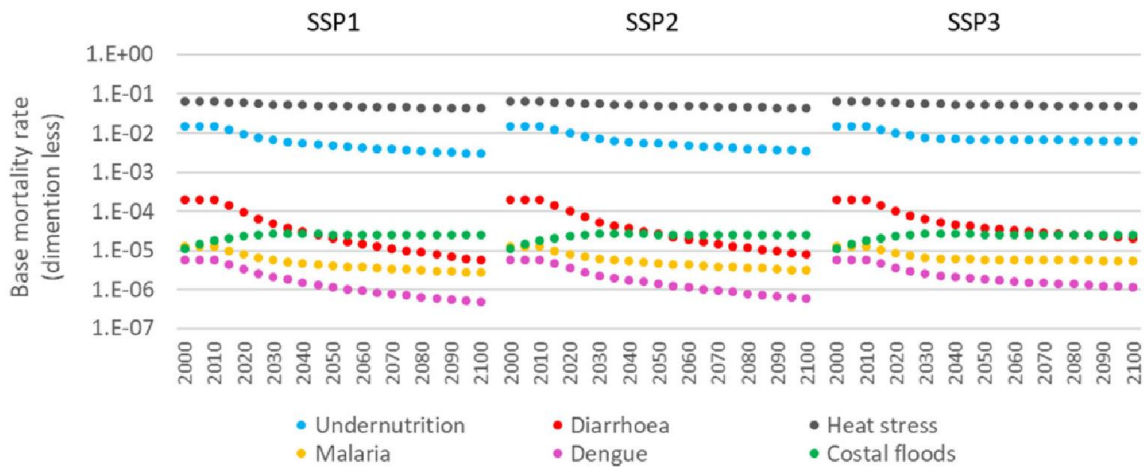


図 4.3.1. SSP ごとに見た健康影響の死亡率（東南アジア、2000年～2100年）。

図 4.3.2 には CO₂ 排出 1kg あたりの DALY を示す。死亡率と異なり、熱関連超過死亡の影響が小さいのは、熱関連超過死亡を 65 歳以上に限定しており、高齢者の場合には死亡から DALY に変換する際の係数が小さいことによる。それに対して、低栄養、下痢性疾患、マラリア、デング熱は、5 歳以下を想定しているため、DALY は大きくなる。

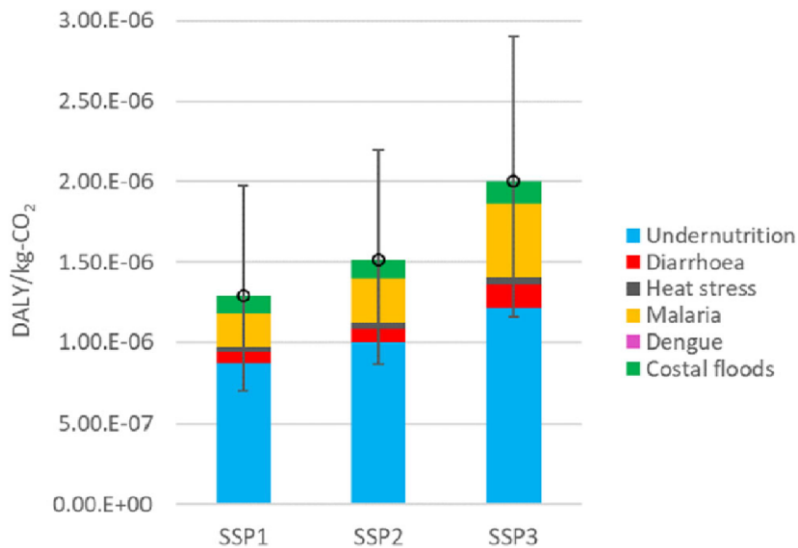


図 4.3.2. CO₂ 排出 1kg あたりの各健康影響の DALY。

図 4.3.3 は、その影響を経年的に示したものである。どの SSP でも、2020 年近辺で影響が最も大きくなっている。その後、経済発展によって影響は小さくなる。

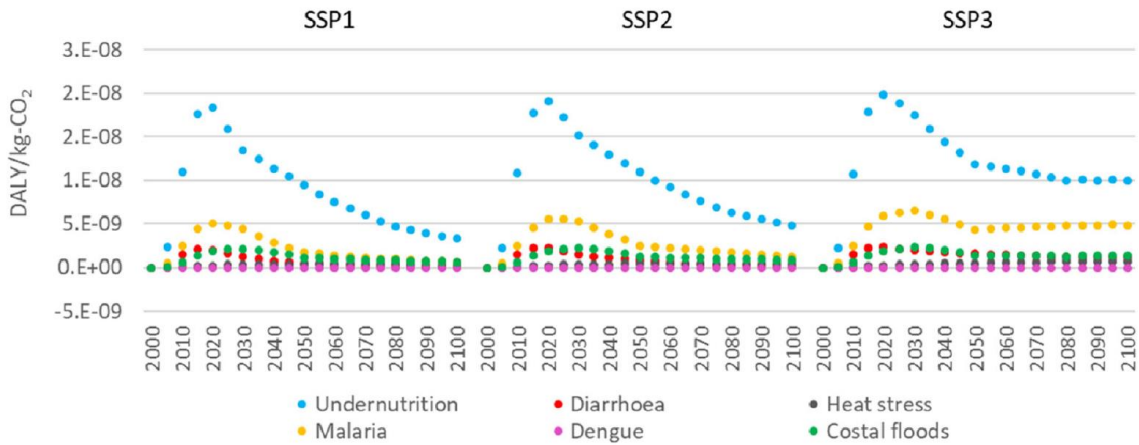


図 4.3.3. CO2 排出 1kg あたりの各健康影響の DALY (2000 年～2100 年)。

熱関連超過死亡

熱関連超過死亡の、RCP と SSP で表されるシナリオごとの将来予測を複数の大気循環モデルを用いて行った結果を示す。図 4.3.4～図 4.3.6 は、MIROC-ESM-CHEM の例 (SSP1, SSP3, SSP5 のみ示す) である。いずれの場合でも、RCP8.5 では影響が非常に大きく、RCP2.6 に押さえることで大きな死亡数減少が期待できることがわかる。

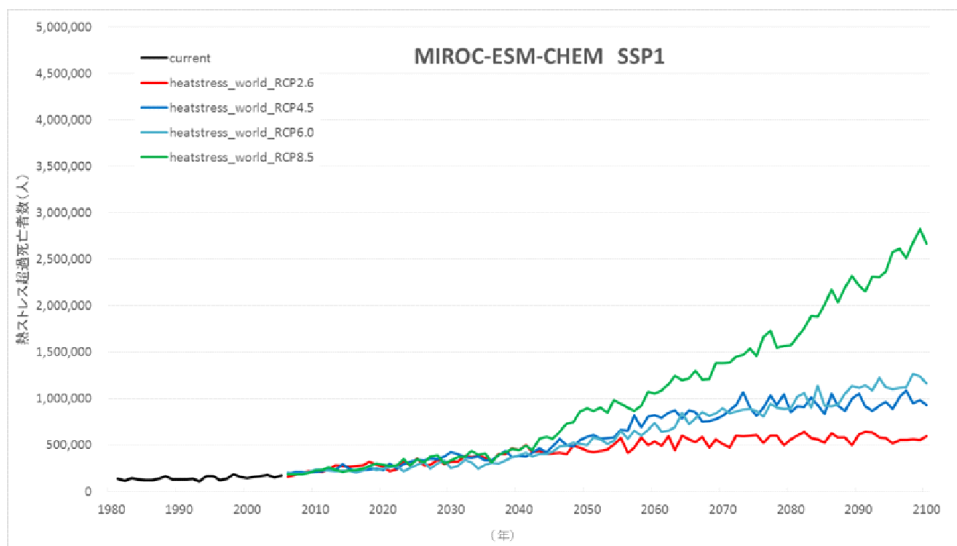


図 4.3.4. 熱関連超過死亡数の将来推計 (MIROC-ESM-CHEM, SSP1)。

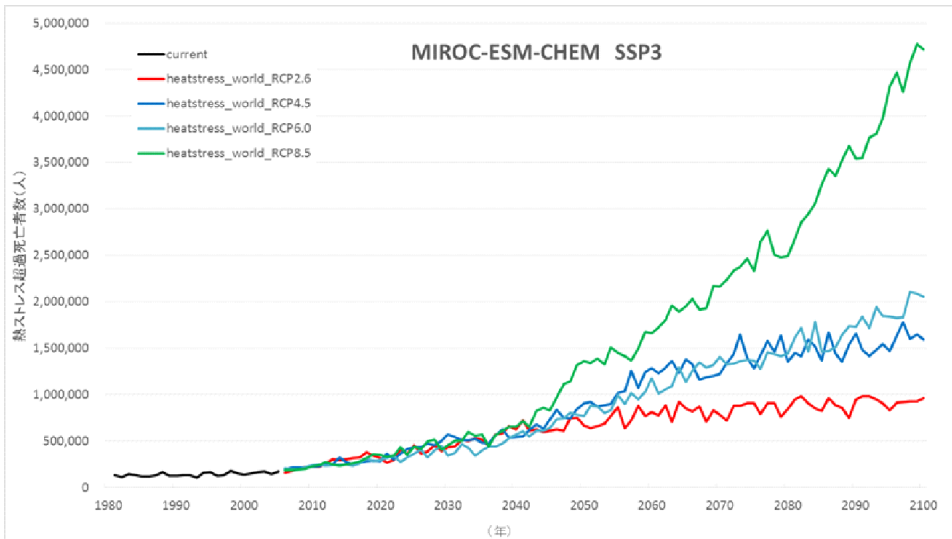


図 4. 3. 5. 熱関連超過死亡数の将来推計（MIROC-ESM-CHEM, SSP3）。

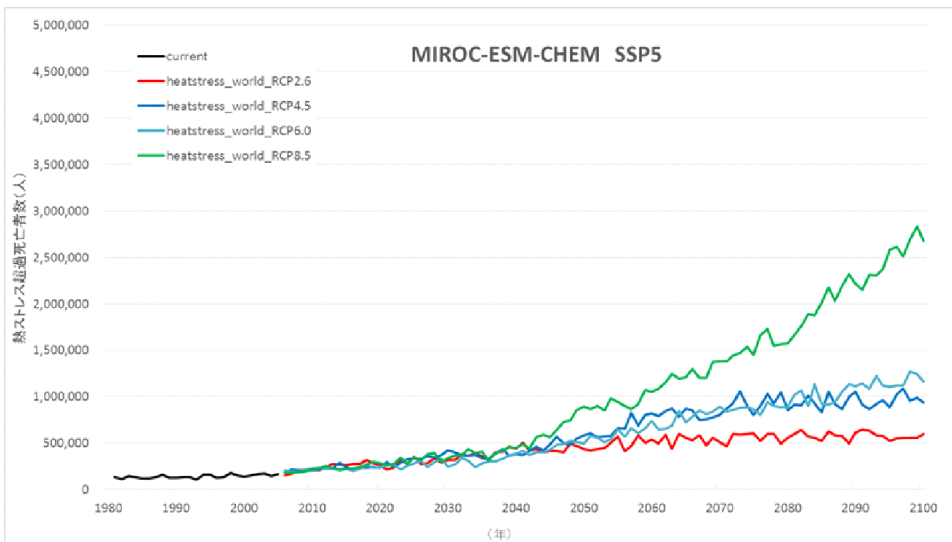


図 4. 3. 6. 熱関連超過死亡数の将来推計（MIROC-ESM-CHEM, SSP5）。

上記の将来予測では、適応の影響を組み込んでいない。その理由は、最近の研究で二種類の適応、すなわち至適気温の高温側への移動と、同じ高温に対するリスクの低下の、双方とも起こりつつあることが、我々の国際共同研究で明らかとなってきたものの、国による相違も大きく、将来予測可能なモデル構築ができていないためである。一方で、我々の研究から明らかになってきたことも多いので、以下に列挙する。

(1) 夏期の前半と後半のリスク変化

通常我々も体験するように、同じ暑さでも夏期の最初は不快感が強く、後半には慣れてくる。このことが死亡リスクについても言えることを明らかにした⁷⁾。図 4. 3. 7 はいくつかの国での状況を示している。なお、このことは、消防庁の熱中症救急搬送データを用いた解析でも明らかになっている。

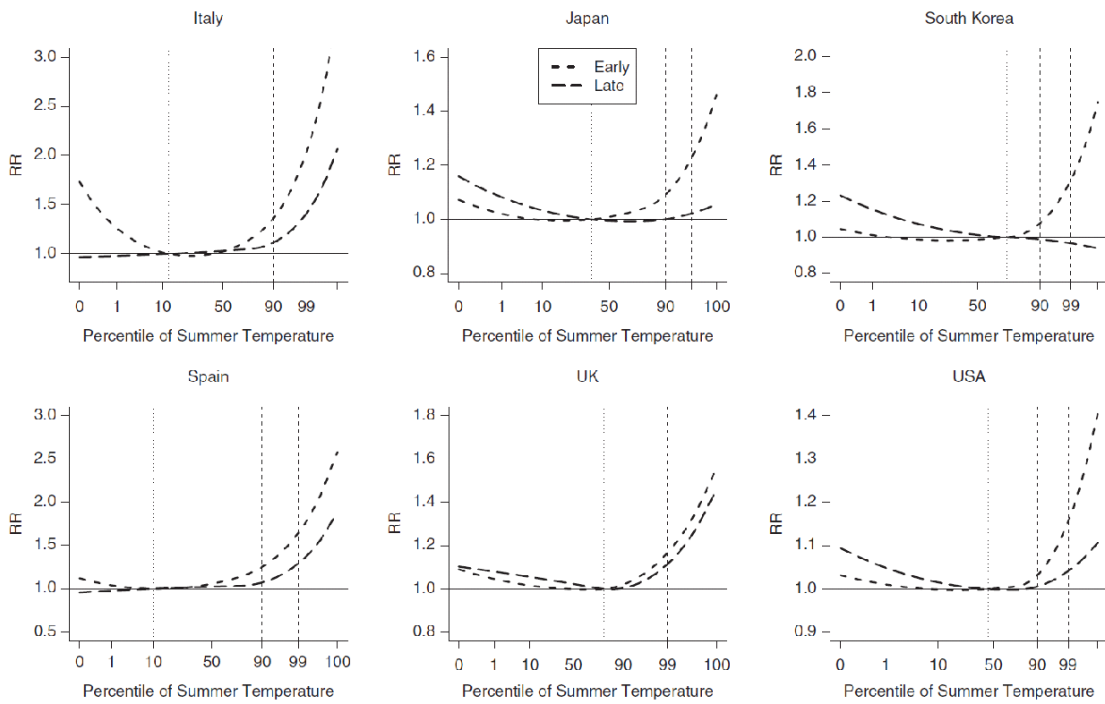


図 4.3.7. 気温と死亡との関連（夏期の前半と後半の比較）。

(2) 湿度の影響

図 4.3.8 に、気温の影響を制御したモデルでの湿度のリスクを示す⁸⁾。ばらつきはあるものの、湿度の増加によって死亡リスクはやや低下するようである。このことは、一般の暑さに対する感覚、すなわち高湿度で不快感が増すことと相反するが、高湿度の方が体内の水分喪失が少ないことが死亡リスクを低下させていることをうかがわせる。

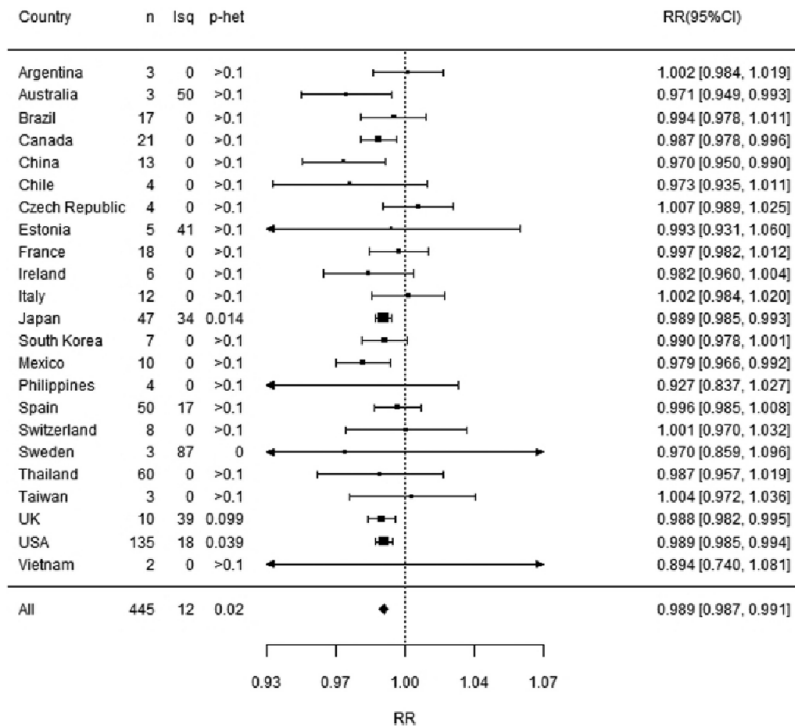


図 4.3.8. 各国の湿度のリスク（気温は制御されている）。

マラリア

マラリア死亡数について、SSP1 と SSP3 の場合の 2030 年代、2050 年代、2090 年代それぞれを推計した。図 4.3.9 は、ガーナの例である。SSP1 の場合には、RCP8.5 でもっとも影響が大きいものの、いずれにしても 2090 年代になればマラリア死亡数は減少してることがわかる。SSP3 の場合

には、特に気温上昇の大きな RCP4.5 以上で年次と共にマラリア死亡数が上昇する。このことは、一見、SSP1 の世界を目指せば特に対策を取らなくてもマラリアによる死亡を減少させることができることを意味しているようにみえる。しかしながら、やはり気温上昇が大きいほど影響も大きいし、現在できるマラリア対策を先延ばしすることは公衆衛生の観点から容認できるものではない。

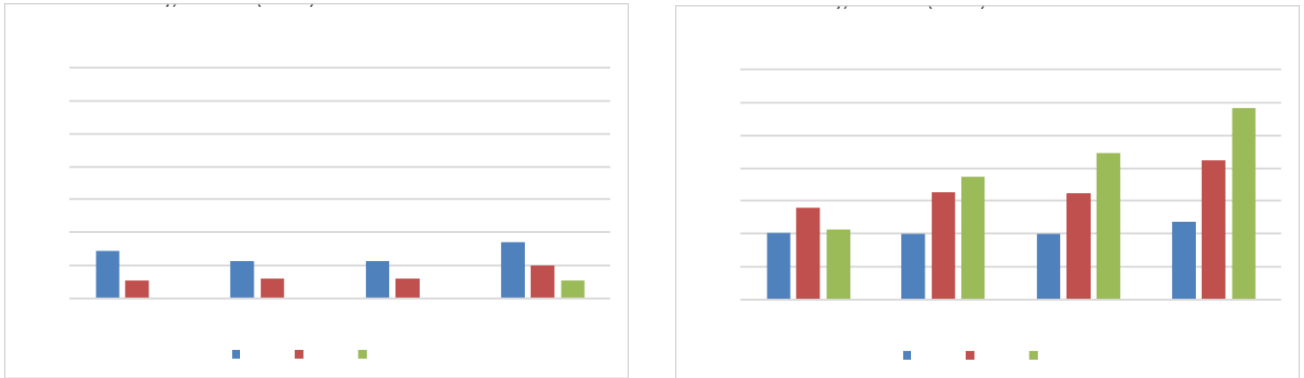


図 4.3.9. マラリア死亡数の将来予測（左：SSP1、右：SSP3）

複合災害

図 4.3.10 に、2019 年 7 月～9 月の千葉県と東京都の日最高気温および熱中症救急搬送者数の推移を示す。矢印は台風 15 号の通過した日を示している。両者ともに 7 月から 9 月にかけて暑熱順化が起こっていることがわかるとともに、台風後の高気温による搬送者数の増加が認められる。しかし、東京都ではその増加は大きくないが、千葉県では非常に大きい。この相違は、台風による大規模停電が千葉県を襲ったのに対し、東京都ではその影響が軽微だったことによる。

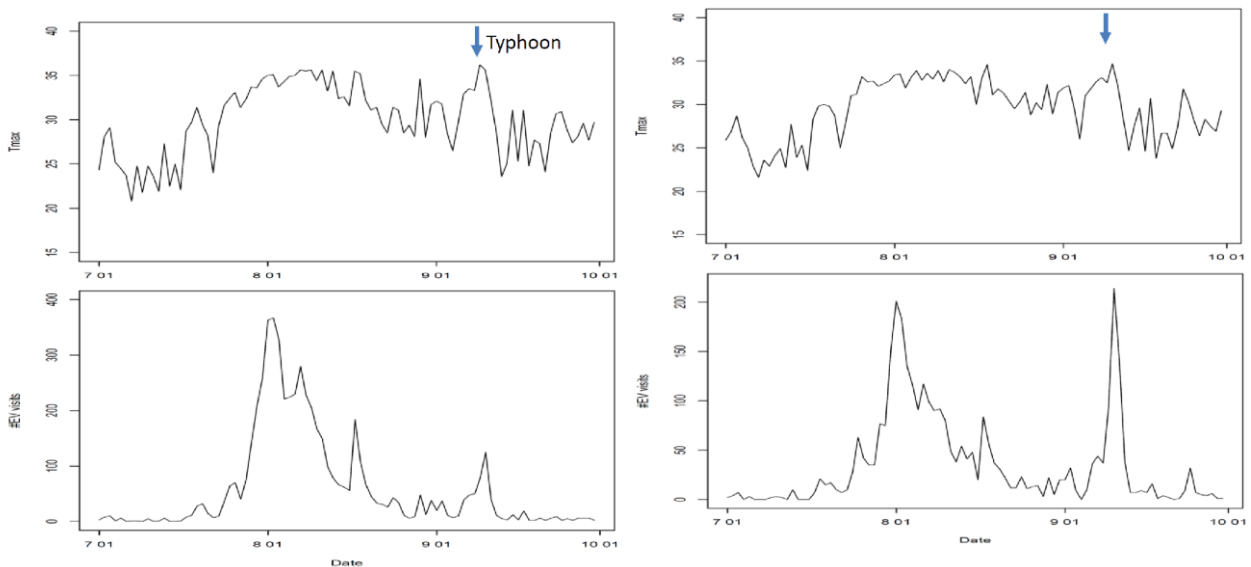


図 4.3.10. 日最高気温および熱中症救急搬送者数の推移（2019 年 7 月～9 月）。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで、亜熱帯までの知見しか得られていなかったが、我々の共同研究により、熱帯地域でも全球予測のためのモデルが適用可能であることが示された。また、湿度の影響についても、多くの国を対象にした量的な評価を行い、高湿度でややリスクが低いことが明らかとなったが、将来予測のためのモデルとして気温のみを用いること、すなわち湿度を考慮しないことに関して、大きな問題にはならないことも明らかにした。

熱関連超過死亡の将来予測を行うに当たり、適応の影響を取り入れることは重要である。我々

の研究では、その量的評価を行い、温暖化によって至適気温が高温側に移動すること、エアコンの普及などによって同じ高温でもリスクが低くなってきていることなどを明らかにした。しかし、現時点ではまだ将来予測のためのモデル構築には至っていない。

停電の影響で、熱関連超過死亡が増加することは、ニューヨークでの例に関する報告があったものの、熱中症に関する報告はこれまでなく、我が国のデータでそのことが示されたことは、今後の適応研究に大きな影響を与えることが考えられる。

(2) 環境政策への貢献

熱関連超過死亡について、同じレベルの高気温でも夏の初めのリスクが大きいこと、同様に熱中症搬送者数についても夏の初めにリスクが大きいことは、熱中症対策を季節が始まる前から行うべきことを示している。更に、本来はリスクが低下している9月であっても、複合災害により停電が起こると熱中症の救急搬送者数が急増することは、今後の適応策において、個別の政策のみでなく、複合災害を想定した総合的な政策が必要であることを示している。すなわち、これまでの熱関連超過死亡に対する適応策として、水分補給とエアコンの適切な使用を進めていたが、電柱を用いた配電を行っている我が国は、台風によって送電が不可能になるというリスクがあるため、たとえば長期的には電線を地中に埋設するなどの強靱化や、太陽光発電などで地域の電源を独立して確保するなどの方策をすすめることができる。また、洪水の影響を受けやすい地域であれば、エアコンの室外機を地面に置くのではなく、高い位置に設置することで多少の洪水であればエアコンの使用が可能になる。これら以外にも、気候変動による様々な影響について、複合災害を防ぐという観点が必要であることを示したことは環境政策への大きな貢献と考えられる。

<行政が既に活用した成果>

特になし

<行政が活用することが見込まれる成果>

上記環境政策への貢献で述べたように、複合災害を念頭において地方の適応計画を策定していくことが見込まれる。

なお、直接的な気候変動の影響でないために、ここでは報告していないが、費用便益分析の際に重要となるであろう co-benefit に関して、大気汚染の原因となる浮遊粒子状物質は、化石燃料の燃焼によって生じるため、緩和策によって大気汚染レベルが低下することによる健康への便益が大きいことが明らかになってきている。我々の共同研究は、その緩和策の影響を組み込んだ費用便益分析に向け、国際的な枠組みの共同研究によって浮遊粒子状物質のリスクを明らかにした。この成果は、今後の健康影響将来予測に組み込まれ、IPCC の報告書にも盛り込まれることになると期待される。

6. 国際共同研究等の状況

1) Multi-City Multi-Country (MCC) Collaborative Research Network (<http://mccstudy.lshtm.ac.uk/>)

MCC ネットワークは、気象と健康の関連に関する疫学研究を行う国際的な研究チームである。参加研究者の所属は我々日本のほかに、米国、カナダ、ブラジル、英国、アイルランド、スウェーデン、スペイン、フィンランド、イタリア、中国、韓国、台湾、フィリピン、ベトナムなど44カ国が含まれる。この研究の成果の一つ、Lancet に掲載された論文は、本田、橋爪も共著者の一人として国際環境疫学会の2016年度最優秀論文賞を受賞した。直接の気候変動影響ではないが、今後の共便益研究で重要となる大気汚染の短期影響についても、本田、橋爪が共著者として参加し、New England Journal of Medicine に掲載された論文は、同誌の Notable Articles of 2019 の一つに選ばれた。

2) GRL

韓国の National Science Foundation による研究費で行われている研究で、気候変動と大気汚染が健康に与える影響に関する日本（本田）、台湾（国立台湾大学）、韓国（ソウル国立大学）の共同研究である。S-8、S-10 の時代からの共同研究であり、熱関連死亡の将来予測モデルは、この共同研究による広い気候区分の検討によって可能となったもので、その成果が2014年の世界保健機関の報告書第2章（本田が筆頭著者）として出版された。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) A. C. G. VARQUEZ, N. S. DARMANTO, Y. HONDA, T. IHARA and M. KANDA: Scientific Reports, 10:9304, doi:10.1038/s41598-020-66288-z (2020) “Future increase in elderly heat-related mortality of a rapidly growing Asian megacity”
- 2) C. MA, J. YANG, S. NAKAYAMA and Y. HONDA: Environment International, 127:125-133. doi: 10.1016/j.envint.2019.03.025 (2019).
“The association between temperature variability and cause-specific mortality: evidence from 47 Japanese prefectures during 1972-2015”
- 3) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, Y. HIJIOKA and Y. HONDA: Int J Biometeorol, doi: 10.1007/s00484-019-01692-3 (2019).
“Site-specific hourly resolution wet bulb globe temperature reconstruction from gridded daily resolution climate variables for planning climate change adaptation measures”
- 4) T. N. DANG, Y. HONDA, D. D. VAN, A. L. T. PHAM, C. CHU, C. HUANG and D. PHUNG: Int J Environ Res Pub Health, 432; doi:10.3390/ijerph16030432 (2019)
“Effects of Extreme Temperatures on Mortality and Hospitalization in Ho Chi Minh City, Vietnam”
- 5) W. H. HUANG, B. Y. CHEN, H. KIM, Y. HONDA and Y. L. GUO: Environ Res. 168:80-84. doi: 10.1016/j.envres.2018.09.017. (2019)
“Significant effects of exposure to relatively low level ozone on daily mortality in 17 cities from three Eastern Asian Countries”
- 6) L. TANG, Y. FURUSHIMA, Y. HONDA, T. HASEGAWA, N. ITSUBO: Int J Life Cycle Assess, <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1561-6>. (2018)
“Estimating human health damage factors related to CO2 emissions by considering updated climate-related relative risks”
- 7) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, T. HASEGAWA, Y. HONDA, N. HANASAKI, Y. HIJIOKA and T. MASUI: Earth's Future, doi:10.1029/2018EF000883 (2018)
“Limited Role of Working Time Shift in Offsetting the Increasing Occupational - Health Cost of Heat Exposure”
- 8) Y. GUO, A. GASPARRINI, S. LI, F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, M. S. Z. S. COELHO, P. H. N. SALDIVA, E. LAVIGNE, B. TAWATSUPA, K. PUNNASIRI, A. OVERCENCO, P. M. CORREA, N. V. ORTEGA, H. KAN, S. OSORIO, J. J. K. JAAKKOLA, N. R. I. RYTI, P. G. GOODMAN, A. ZEKA, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, X. SEPOSO, H. KIM, A. TOBIAS, C. ÍÑIGUEZ, B. FORSBERG, D. O. ÅSTRÖM, Y. L. GUO, B. Y. CHEN, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, T. N. DANG, D. D. VAN, M. L. BELL, B. ARMSTRONG, K. L. EBI and S. TONG: PLoS Med. 2018 Jul 31;15(7):e1002629. doi: 10.1371/journal.pmed.1002629. (2018)
“Quantifying excess deaths related to heatwaves under climate change scenarios: A multicountry time series modelling study”
- 9) A. M. VICEDO-CABRERA, Y. GUO, F. SERA, V. HUBER, C. F. SCHLEUSSNER, D. MITCHELL, S. TONG, M. S. Z. S. COELHO, P. H. N. SALDIVA, E. LAVIGNE, P. M. CORREA, N. V. ORTEGA, H. KAN, S. OSORIO, J. KYSELÝ, A. URBAN, J. J. K. JAAKKOLA, N. R. I. RYTI, M. PASCAL, P. G. GOODMAN, A. ZEKA, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, M. HURTADO-DIAZ, J. CRUZ, X. SEPOSO, H. KIM, A. TOBIAS, C. ÍÑIGUEZ, B. FORSBERG, D. O. ÅSTRÖM, M. S. RAGETTLI, M. RÖÖSLI, Y. L. GUO, C. F. WU, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, M. L. BELL, T. N. DANG, D. D. VAN, C. HEAVISIDE, S. VARDOLAKIS, S. HAJAT, A. HAINES, B. ARMSTRONG, K. L. EBI and A. GASPARRINI: Clim Change. 150(3-4):391-402. doi: 10.1007/s10584-018-2274-3. (2018)
“Temperature-mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios”
- 10) Y. CHUNG, D. YANG, A. GASPARRINI, A. M. VICEDO-CABRERA, C. F. S. NG, Y. KIM, Y. HONDA and M. HASHIZUME : The Role of Climate, Demographic, and Socioeconomic Factors. Environ Health Perspect. 2;126(5):057002. doi: 10.1289/EHP2546. (2018)

- “Changing Susceptibility to Non-Optimum Temperatures in Japan, 1972–2012”
- 11) J.A. IGUCHI, X.T. SEPOSO and Y. HONDA: 18(1):629. doi: 10.1186/s12889-018-5532-4. (2018)
“Meteorological factors affecting dengue incidence in Davao, Philippines. BMC Public Health”
 - 12) Y. KIM, C.F.S. NG, Y. CHUNG, H. KIM, Y. HONDA, Y. L. GUO, Y.H. LIM, B. Y. CHEN, L. A. PAGE and M. HASHIZUME: Environ Health Perspect. DOI:10.1289/EHP2223 (2018)
“Air Pollution and Suicide in 10 Cities in Northeast Asia: A Time-Stratified Case-Crossover Analysis”
 - 13) S.E. KIM, M.L. BELL, M. HASHIZUME, Y. HONDA, H. KAN and H. KIM: Environ Int. 110:88–94. (2018)
“Associations between MORTALITY and prolonged exposure to elevated particulate matter concentrations in East Asia.”
 - 14) A. GASPARRINI, Y. GUO, F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, V. HUBER, S. TONG, M. S. Z. S. COELHO, P. H. NASCIMENTO SALDIVA, E. LAVIGNE, P. M. CORREA, N. V. ORTEGA, X. KAN, S. OSORIO, J. KYSELÝ, A. URBAN, J.J.K. JAAKKOLA, N.R.I. RYTI, M. PASCAL, P.G. GOODMAN, A. ZEKA, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, M. HASHIZUME, Y. HONDA, M. HURTADO-DIAZ, J. C. CRUZ, X. SEPOSO, H. KIM, A. TOBIAS, C. IÑIGUEZ, B. FORSBERG, D.O. ÅSTRÖM, M.S. RAGETTLI, Y.L. GUO, C.F. WU, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, M.L. BELL, T.N. DANG, D.D. VAN, C. HEAVISIDE, S. VARDOULAKIS, S. HAJAT, A. HAINES and B. ARMSTRONG: Lancet Planet Health. 1(9):e360–e367. (2017)
“Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios”
 - 15) X.T. SEPOSO, T.N. DANG and Y. HONDA: Glob Health Action. 10(1):1368969. (2017)
“Exploring the effects of high temperature on mortality in four cities in the Philippines using various heat wave definitions in different mortality subgroups”
 - 16) T. N. DANG, D. Q. VAN, H. KUSAKA, X. T. SEPOSO and Y. HONDA: Am J Public Health. 26:e1–e7. (2017)
“Green Space and Deaths Attributable to the Urban Heat Island Effect in Ho Chi Minh City”
 - 17) B. ARMSTRONG, M.L. BELL, M. S. Z. S. COELHO, Y. L. LEON GUO, Y. GUO, P. GOODMAN, M. HASHIZUME, Y. HONDA, H. KIM, E. LAVIGNE, P. MICHELOZZI, P. H. NASCIMENTO SALDIVA, J. SCHWARTZ, M. SCORTICHINI, F. SERA, A. TOBIAS, S. TONG, C. F. WU, A. ZANOBETTI, A. ZEKA and A. GASPARRINI: Environ Health Perspect. 125(10):107009. (2017)
“Longer-Term Impact of High and Low Temperature on Mortality: An International Study to Clarify Length of Mortality Displacement”
 - 18) Y. GUO, A. GASPARRINI, B. G. ARMSTRONG, B. TAWATSUPA, A. TOBIAS, E. LAVIGNE, M. S. Z. S. COELHO, X. PAN, H. KIM, M. HASHIZUME, Y. HONDA, Y. L. GUO, C. F. WU, A. ZANOBETTI, J. D. SCHWARTZ, M. L. BELL, M. SCORTICHINI, P. MICHELOZZI, K. PUNNASIRI, S. LI, L. TIAN, S. D. O. GARCIA, X. SEPOSO, A. OVERCENCO, A. ZEKA, P. GOODMAN, T. N. DANG, D. V. DUNG, F. MAYVANEH, P. H. N. SALDIVA, G. WILLIAMS and S. TONG : A Multicountry, Multicommunity Study. Environ Health Perspect. 125(8):087006. (2017)
“Heat Wave and Mortality”
 - 19) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, Y. HIJIOKA, T. HASEGAWA, Y. HONDA and T. MASUI: Environ. Res. Lett. 12 064010. (2017)
“Cost of preventing workplace heat-related illness through worker breaks and the benefit of climate-change mitigation”
 - 20) X. T. SEPOSO, T. N. DANG and Y. HONDA: Int J Environ Res Public Health. 14(4). pii: E385. (2017)
“How Does Ambient Air Temperature Affect Diabetes Mortality in Tropical Cities? ”
 - 21) X. T. SEPOSO, T. N. DANG and Y. HONDA: Glob Health Action, 9: 31500 – <http://dx.doi.org/10.3402/gha.v9.31500> (2016)

“EFFECT MODIFICATION IN THE TEMPERATURE EXTREMES BY MORTALITY SUBGROUPS AMONG THE TROPICAL CITIES OF THE PHILIPPINES”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 本田 靖. 日本医師会雑誌, 第 146 巻・特別号(2), S191-S193. (2017)
「地球温暖化④－熱波と超過死亡.」
- 2) 本田 靖. 労働の科学, 72(4), 4-8. (2017)
「気候変動の健康影響と適応策」
- 3) K. YAMASHITA and Y. HONDA In: Akhtar R & Palagiano C eds., Climate Change and Air Pollution, Springer Cham pp. 309-326. ISBN-10: 3319613456 (2017)
“Climate Change and Air Pollution in East Asia: Taking Transboundary Air Pollution into Account.”
- 4) 本田 靖: In 日本呼吸器学会大気・室内環境関連疾患予防と対策の手引き 2019 作成委員会編 大気室内環境関連疾患予防と対策の手引き 2019, pp.2-5, 2019. ISBN978-4-7792-2201-6.
「地球温暖化.」
- 5) Y. HONDA and D. ONOZUKA In: Akhtar R et al. eds. Extreme Weather Events and Human Health, Springer, Cham, pp. 131-144, 2020.
“Heat-Related Mortality/Morbidity in East Asia.”

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 本田靖：第 84 回日本健康学会総会，長崎，11 月 2019.
「2018 年の熱波による熱中症患者数の推計」
- 2) Y. CHUNG, Y. KIM, K. SIM, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, F. SERA, D. YANG, C. NG, Y. HONDA and M. HASHIZUME: 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Suicide risk associated with season and temperature in Japan, 1972-2015; the role of climate, demographic, and socioeconomic factors”
- 3) C. NG, A. TOBIAS, X. QUEROL, A. SHIMIZU, Y. HONDA, M. HASHIZUME and A. GASPARRINI: 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Contribution of Asian Dust to suspended particulate matter and its association with daily mortality in Southern Japan”
- 4) S. KIM, Y. KIM, Y. HONDA, M. HASHIZUME, Y. HIJIOKA and H. KIM: 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Temperature and Assault Deaths: Their Relationship and Implications of Climate Change”
- 5) A. VICEDO-CABRERA et al., on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Heat-related mortality impacts attributed to climate change: a global study over historical period”
- 6) A. TOBIAS, M. HASHIZUME, C. F. S. NG, T. N. DANG, Y. HONDA, F. SERA, B. ARMSTRONG and A. GASPARRINI: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Geographical variability of the minimum mortality temperature: A multi-country analysis”
- 7) H. M. CHOI, W. LEE, M. CHOI, J. JANG, C. KANG and H. KIM: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Modifiers of temperature variability-related mortality: A multi-country study”
- 8) F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, C. LIU, H. KAN and A. GASPARRINI: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.

“Socioeconomic and climatic factors modifying the short-term association between ambient particulate air pollution and mortality: a multi-country multi-city analysis”

- 9) F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, B. ARMSTRONG and A. GASPARRINI: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Extended two-stage designs for environmental research”
- 10) A. URBAN, F. NAPOLI, F. AQUAOTTA, H. L. CLOKE, J. KYSELÝ and F. PAPPENBERGER: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands.
“Evaluation of the ERA5-based UTCI on mortality data in Europe”
- 11) W. LEE, H. M. CHOI, M. CHOI, J. JANG, C. KANG and H. KIM: on behalf of the MCC Collaborative Research Network. 31st Conference of the International Society for Environmental Epidemiology. 25-28 August 2019, Utrecht, The Netherlands. oral
“Projections of diurnal temperature range and diurnal temperature range-related excess mortality under climate change: A multi-country study.”
- 12) Y. HONDA: The First Heat Health Forum of Global Heat Health Information Network, Hongkong, China, Dec, 2018.
“Prevention of heat-related excess mortality --- Intervention”
- 13) 本田靖: 熱中症救急搬送と気温との関連. 第83回日本健康学会総会, 前橋, 11月2018.
- 14) Y. HONDA and M. HASHIZUME: 第77回日本公衆衛生学会総会, 郡山, 10月, 2018.
“Area difference in cold-related excess mortality is related to temperature distribution”
- 15) F. SERA, A. M. VICEDO-CABRERA, M. HASHIZUME, Y. HONDA, J. D. SCHWARTZ, A. ZANOBETTI and A. GASPARRINI: The 30th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Ottawa, Canada, Aug, 2018.
“Air Conditioning and Heat-Related Mortality in U.S. and Japan: A Longitudinal Analysis”
- 16) Y. HONDA: The 30th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Ottawa, Canada, Aug, 2018.
“Climate change impact on heat-related mortality - ISI-MIP contest”
- 17) T. N. DANG and Y. HONDA: The 5th International Climate Change Adaptation conference, Cape Town, South Africa, June 2018.
“Chronological trend of autonomous adaptation to heat-related mortality in Japan”
- 18) Y. HONDA: Climate Change and Health Symposium, Miami, USA, Apr 2018.
“Heat-related excess mortality and its prevention system”
- 19) Y. HONDA: International Forum on Climate Change and Health under the Belt and Road Initiative, Guanzhou, China, December 2017.
“Climate Change Impact on Health - from S-14 Project”
- 20) 本田靖, 橋爪真弘: 第82回日本健康学会総会, 沖縄, 11月, 2017
「救急搬送数と気象変数との関連について」
- 21) Y. HONDA, K. TAKAHASHI and M. YOSHIKAWA: Impacts World 2017, Potsdam, Germany, Oct, 2017.
“Climate change impact on heat-related mortality”
- 22) T. N. DANG, D. Q. VAN, X. T. SEPOSO, H. KUSAKA and Y. HONDA: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, Sept, 2017.
“Comparing heat-mortality relation between central area and outer area within a mega city of Vietnam”
- 23) Y. HONDA: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, Sept, 2017.
“Six years after Fukushima disaster - lessons learned”
- 24) Y. CHUNG, D. YANG, A. GASPARRINI, A. M. VICEDO-CABRERA, C. F. S. NG, Y. KIM, Y. HONDA, M. HASHIZUME: The 29th Annual Scientific Conference of the International Society of Environmental Epidemiology, Sydney, Australia, Sept, 2017.

- “Changing susceptibility to temperature over time and the associated climate, demographic and socio-economic factors in Japan for 1972 - 2012”
- 25) Y. HONDA, T. N. DANG and X. T. SEPOSO: The 21st International Congress of Biometeorology, Durham, UK, Sept, 2017.
“Short-term specific humidity effect on mortality in Japan”
- 26) 本田 靖: 第81回日本民族衛生学会総会, 東京, 11月, 2016
「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 -」
- 27) Y. HONDA: Dasan Conference, Jeju, Korea, November, 2016
“New aspect of climate change impact on heat-related mortality”
- 28) Y. HONDA: CWB-APCC Workshop on Climate Service for Health, Taipei, Taiwan, October, 2016
“Heat-related mortality: Impact of climate change and Adaptation”
- 29) Y. HONDA: 10th ASIAHORCs General Meeting and 8th Joint Symposium, Muntinlupa, the Philippines, September, 2016
“Heat-related mortality: Impact and adaptation”
- 30) C. F. S. NG*, X. T. SEPOSO, T. N. DANG, Y. KIM, W. R. WAN MAHIYUDDIN, M. SAHANI, Y. HONDA and M. HASHIZUME: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Heat waves and mortality in tropical climate: a multi-city analysis in Southeast Asia”
- 31) X. SEPOSO, T. N. DANG, C. F. S. NG, W. R. WAN MAHIYUDDIN, M. SAHANI, M. HASHIZUME and Y. HONDA: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Estimating the Effects of Mean, Inter-, and Intra-day temperature variations on mortality among 7 Tropical and Subtropical Cities of Southeast Asian Countries”
- 32) T. N. DANG, D. Q. VAN, X. T. SEPOSO, H. KUSAKA and Y. HONDA: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Attributable deaths due to urban heat island effect in a mega city of Vietnam: an application of dynamic downscaling weather model”
- 33) Y. HONDA, X. SEPOSO, D. T. NGOC, M. HASHIZUME and H. KIM: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Negative risk of cold on lag 0 day in distributed lag pattern can be due to preceding mortality peak before the temperature trough”
- 34) Y. KIM, C. F. S. NG, H. KIM, Y. HONDA, Y. L. GUO, Y.-H. LIM, B.-Y. CHEN and M. HASHIZUME: Air Pollution and Suicide in Seoul, Tokyo, and Taipei: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“A Time-Stratified Case-Crossover Analysis”
- 35) S. E. KIM, H. KIM, M. BELL, M. HASHIZUME, Y. HONDA and H. KAN: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Associating respiratory mortality with prolonged high PM10 events in Northeast Asia”
- 36) A. GASPARRINI, Y. GUO, F. SERA, S. KHARE, C. HEAVISIDE, A. TOBIAS, M. HASHIZUME, E. LAVIGNE, A. ZANOBETTI, J. SCHWARTZ, D. O. ASTROM, B. FORSBERG, P. MICHELOZZI, M. SCORTICHINI, X. T. SEPOSO, Y. L. GUO, C. F. WU, H. KAN, TN. DANG, D. V. DUNG, M. D. S. Z. S. COELHO, P. HILARIO, N. SALDIVA, S. TONG, Y. HONDA, H. KIM, S. VARDOLAKIS, S. HAJAT and B. ARMSTRONG: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
“Projections of temperature-attributed mortality under climate change scenarios: an analysis of 395 locations in 15 countries”
- 37) Y. GUO, A. GASPARRINI, B. ARMSTRONG, B. TAWATSUPA, A. TOBIAS, E. LAVIGNE, M. D. S. Z. S. COELHO, X. PAN, H. KIM, M. HASHIZUME, Y. HONDA, Y. L. GUO, C. F. WU, A. ZANOBETTI, J. D. SCHWARTZ, M. L. BELL, A. V. OVERCENCO, K. PUNNASIRI, S. LI, L.

TIAN, P. SALDIVA, G. WILLIAMS and S. TONG: Twenty-Eighth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology, Rome, Italy, September, 2016
 “The association between temperature variability and mortality: an international collaborative study”

- 38) Y. HONDA, X. T. SEPOSO, T. N. DANG: Conference of International Society for Environmental Epidemiology and International Society of Exposure Science Asia Chapter 2016, Sapporo, Japan, June, 2016.
 “Difference between the cold effect and the heat effect in evaluating the short-term weather-mortality relation”

(3) 知的財産権

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 本田 靖. 都鄙を考慮した熱関連死亡リスク. 環境省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」一般公開シンポジウム「都市と気候変動問題」, 東京, 6月, 2016.
- 2) 本田 靖. 気候変動と健康-サバイバルの方法- 一般公開教育講座(主催: 日本健康学会、2017年11月22日、群馬県前橋市 前橋テルサ、観客約20名)にて講演。一般の方がどのような適応策を取れば良いかについてわかりやすく説明した。

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 下野新聞(ウェブサイト「気候変貌(中)」)
<https://www.shimotsuke.co.jp/articles/-/181637>

(6) その他

筑波大学 2019年 BEST FACULTY MEMBER (地球温暖化研究の顕著な業績による)

8. 引用文献

- 1) A. MCMICHAEL, D. CAMPBELL-LENDRUM, S. KOVATS et al.: Climate change. Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease due to Selected Major Risk Factors, Vol. 2, M. Ezzati, A. Lopez, A. Rodgers and C. Murray, Eds., World Health Organization, Geneva, World Health Organization, 2004.
- 2) S. HALES, S. KOVATS, S. LLOYD, D. CAMPBELL-LENDRUM: Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s. Geneva: World Health Organization, 2014.
- 3) Y. HONDA, M. KONDO, G. MCGREGOR et al.: Heat-related mortality risk model for climate change impact projection. Environ Health Prev Med. 19:56-63, 2014.
- 4) A. BÉGUIN, S. HALES, J. ROCKLÖV, C. ANGSTROM, V. LOUIS, R. SAUERBORN: The opposing effects of climate change and socio-economic development on the global distribution of malaria. Glob Environ Chang. 21: 1209-14, 2011.
- 5) T. HASEGAWA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, T. YOKOHATA, T. MASUI: Economic implications of climate change impacts on human health through undernourishment. Climatic Change 136:189-202, 2016.
- 6) L. TANG, Y. FUKUSHIMA, Y. HONDA, T. HASEGAWA, N. ITSUBO: Estimating human health damage factors related to CO2 emissions by considering updated climate-related relative risks. The International Journal of Life Cycle Assessment 24, 1118-1128, 2019.
- 7) A. GASPARRINI et al.: Changes in Susceptibility to Heat During the Summer: A Multicountry Analysis. Am J Epidemiol 183, 1027-1036. 2016.
- 8) B. ARMSTRONG et al.: The Role of Humidity in Associations of High Temperature with Mortality: A Multiauthor, Multicity Study. Environmental Health Perspectives, 127(10):109001, 2019.

II-4 気候変動に伴う沿岸地域の脆弱性評価と適応策の費用便益分析

茨城大学

理工学研究科(工学野)
 広域水圏環境科学教育研究センター
 地球変動適応科学研究機関

横木 裕宗
 桑原 祐史
 田村 誠

<研究協力者>

愛媛大学

農学研究科

熊野 直子

平成27～令和元年度研究経費（累計額）：53,028千円（研究経費は間接経費を含む）

（平成27年度：10,822千円、平成28年度：10,822千円、平成29年度：10,822千円、平成30年度：10,281千円、令和元年度：10,281千円）

[要旨]

本研究は、世界の沿岸域を対象とした気候変動による複合影響の把握と適応策にかかる費用便益の提示を目指した。全球規模の海面上昇に伴う浸水影響、不確実性評価、防護費用データベース構築、適応効果評価、その防護費用と費用便益を提示し、一連の分析枠組みが確立された。

地球温暖化に伴う海面上昇で河口域や低地などが浸水した場合の被害額は、今世紀末に世界全体で約4,820億ドルになるが、高さ1mの堤防を整備すると費用は最大2,030億ドルかかるが、被害額は6～7割に抑えられるという試算を得た。沿岸域における気候変動の影響に関する経済損失評価は既に幾つかの先行研究があるものの、適応策の経済評価はまだまだ少なく、本研究で解析した資料は貴重であろう。さらに、S-14-1のLCA班やS-14-5の経済評価班にもデータを提供し、総合的な解析にも活用される。

これらの成果は、14本の査読付き論文(うち英文4本)などで発表された。IPCC(2019)SROCC報告書第4章にもTamura et al.(2019)が複数引用され、今後のIPCC報告書等にも貢献可能な知見が得られた。

[キーワード]

気候変動適応、海面上昇、防護、順応、適応効果評価

1. はじめに

2013年11月に開催された国連気候変動枠組条約第19回締約国会議(COP19)では、カンクン適応枠組みの下に、将来の気候変動の悪影響に関する損失を定量化するワルシャワ国際メカニズムの設立が合意された。このように、国際社会の中で適応策の具体的な実施とそれに向けての課題検討が重要視されている。日本では、地球温暖化対策計画に基づく緩和策と適応計画策定に基づく適応策への国際的な取組が進められているが、具体的な適応策の実施には、より広域を対象とした適応策の費用・便益に関する知見、および適応レベルに応じた残余損失などの定量的な情報が必要となる。しかしながら、最新のIPCC第5次報告書においても、地球規模の適応策に関連した記述は単純な仮定に基づく沿岸洪水の適応費用のみで、定量的な損失被害額と適応費用便益に基づく実施可能な適応策オプションの提案などは全く行われていない。

将来の経済的制約の下での気候変動による被害対策では、気候変動の影響そのものを緩和する緩和策と発現した影響に適応する適応策とのバランスが重要である。しかしながら、地球規模の温室効果ガスの削減目標に対応するような、地球規模の適応策の投資目標やその効果などの定量的な数字は現時点では存在せず、国際社会から具体的かつ定量的な適応策の費用便益に関する科学的な情報が求められている。

2. 研究開発目的

気候変動リスクに対処するためには、緩和策と適応策それぞれの長短を的確に捉え、限られた資源でリスクを最小限に抑え込んでいく総合的な戦略が必要である。しかし、2014年に発行されたIPCC第5次報告書でも適応策の費用便益に関する確信度の高い研究の記述は少なかった。

沿岸域において気候変動は、海面上昇や高潮偏差の増大、降雨変化等による浸水影響を及ぼす。世界の平均海面水位は、1901-2010年に約19cm上昇した(IPCC, 2014)。今後の温室効果ガス濃度経路(RCPシナリオ)によって異なるが、21世紀末には1986-2005年と比較して海面水位が26-82cm

上昇すると予想されている (IPCC, 2014)。こうした状況から、本研究は世界の沿岸域を対象とした気候変動による複合影響の把握と適応策にかかる費用便益の提示を目指す。

3. 研究開発方法

本研究は、世界の沿岸域を対象とした気候変動による複合影響の把握と適応策にかかる費用便益の提示を目指した。この5年間で沿岸地域に関しては、1)海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価、2)防護費用データベースの構築と適応効果評価、3)堤防データ抽出プロセスの開発、などを実施し、一連の分析枠組みが確立された。これらの成果は14本の査読付き論文(英文4、和文10)などへ発表され、IPCC(2019)SROCC報告書にも引用された。

図3.4.1に本研究の概要を示す。第一に、海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価を行なう。海面水位は、満潮・干潮、また大潮・小潮といった潮汐でも変動しており、これらに将来の気候変動に伴う海面上昇が加わると予想されている。浸水計算には、大気・海洋循環結合モデル(GCM)による海面水位変化と潮汐の空間分布を考慮し、陸地と海底地形はETOPO1のデータを用いた(Amante and Eakins, 2009)。陸域では標高値、海域では水深値を持った1分間隔の全球のグリッドデータを、2.5分グリッドデータに重み付け平均化して、モデル上の陸域と海域の判定に用いた。潮汐は、Egbert and Erofeeva(2002)によるTPX07.2の潮位データから主要四分潮を重ね、大潮の満潮時に近い平均最高潮位(MHHWL)を想定した。今回の推計には高潮などの一時的だが局地的に甚大な浸水影響は考慮せず、海面上昇に加えて潮汐による恒常的な浸水影響のみを考慮している(潮汐での水位が3m以上になる箇所も含まれる)。第二に、防護費用データベースを構築し、適応効果評価を行なう。世界各国の防護費用データベースを構築し、防護費用を推計した。そして、浸水可能性のある海岸線に対して、適応策として一律50cm、ないしは1mの堤防の嵩上げを行った場合の浸水影響を試算した。これにより適応の有無による浸水影響とその費用を算出し、費用便益分析を実施する。

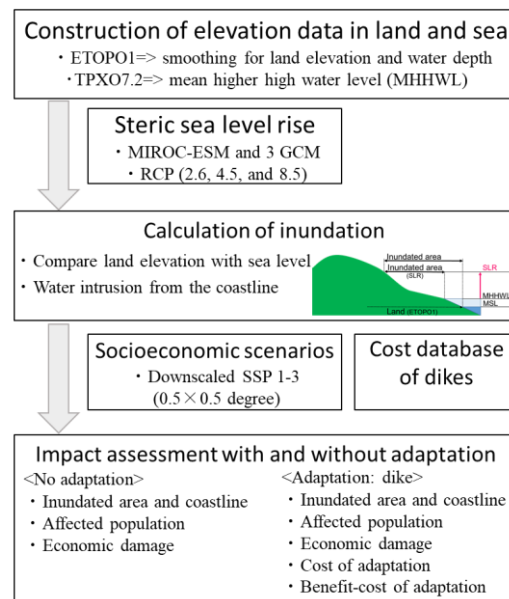


図 3.4.1 研究手法の概要

4. 結果及び考察

(1) 海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価

海面上昇と潮汐の両方を考慮した場合、MIROC-ESMによれば21世紀末にはRCP4.5で約39万km²、RCP8.5で約42万km²が世界全体の潜在的浸水域になると推計される。このうち、海面上昇による潜在的浸水域は21世紀末のRCP4.5で約14万km²、RCP8.5で約16万km²である。ここで、潜在的浸水域とは護岸などの海岸・港湾構造物を考慮せずに海水面の変化と標高を比較して算出したものであり、実際の浸水域ではなく「もし構造物がなければ」浸水する可能性がある領域を示している。これは全球で一律の精度を持った堤防分布情報が得られないためである。総じて見れば潮汐変動が海面上昇よりも浸水影響が大きく、現在のところは堤防などで防護される地域も存在する。地域別には中国の長江デルタ、メコンデルタ、カナダ、バングラデシュの低地、アマゾン河口等に潜在的に大きな浸水リスクがあると推計される。これらの潜在的浸水域は海面上昇と潮汐を含めた場合で陸地面積の約0.3%だが、沿岸域の人口密度が内陸域よりも高いことは問題をいっそう複雑にしている。RCP8.5での2100年の浸水影響人口は約6,300万人(SSP1)~1.06億人(SSP3)と推計され、これ

は 2100 年の推計総人口の約 1%に上る。図 4.4.1 は気温変化と潜在的浸水域、影響人口との関係を示している。

これまで GCM のうちの一つである MIROC-ESM の海面水位予測による浸水影響を評価してきたが、次にそれ以外の複数の GCM を用いた不確実性評価を行った。図 4.4.2 上は RCP8.5 における 8 個の GCM の潜在的浸水域を示している。結合モデル相互比較プロジェクト (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5: CMIP5) へ提供された GCM から 8 個を選択した。2100 年の最大値が MIROC-ESM-CHEM の約 46 万 km² であり、最小値は NorESM1-M の約 35 万 km² であった。2100 年の平均値は RCP8.5 では約 29%、RCP2.6 では約 24%の幅があった。国別の内訳を見ると、どの GCM でも浸水域上位 10 カ国の構成は概ね同じで、それらが世界の 7 割以上の浸水域を占める。順位に若干の変動はあるものの、中国、カナダ、ベトナム、アメリカ、ブラジル、オーストラリア、インドネシア、インド、ロシア、パキスタンが浸水域上位 10 カ国を占めた。すなわち、潜在的浸水域の大きな国の構成は GCM によってあまり変わらず、陸地の標高などの地形条件が強く寄与する。図 4.4.2 下は、RCP8.5 における 8GCM の影響人口を示している。2100 年の最大値が MIROC-ESM-CHEM_SSP3 で約 97 百万人であり、最小値は NorESM1-M_SSP1 の約 50 百万人であった。平均値は、RCP8.5 では約 22%、RCP2.6 では約 15%の幅があった。四栗他 (2017) の推計と同様に、影響人口は RCP の違いよりも SSP の人口の相違が大きく寄与している。

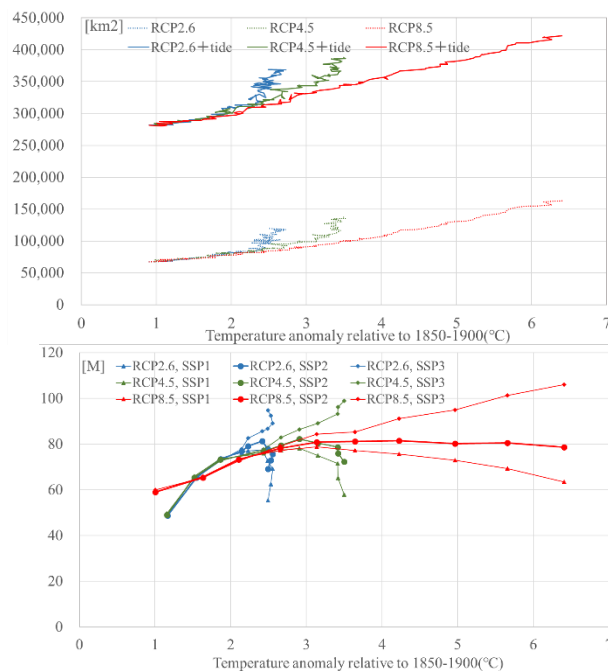


図 4.4.1 気温変化と潜在的浸水域、影響人口

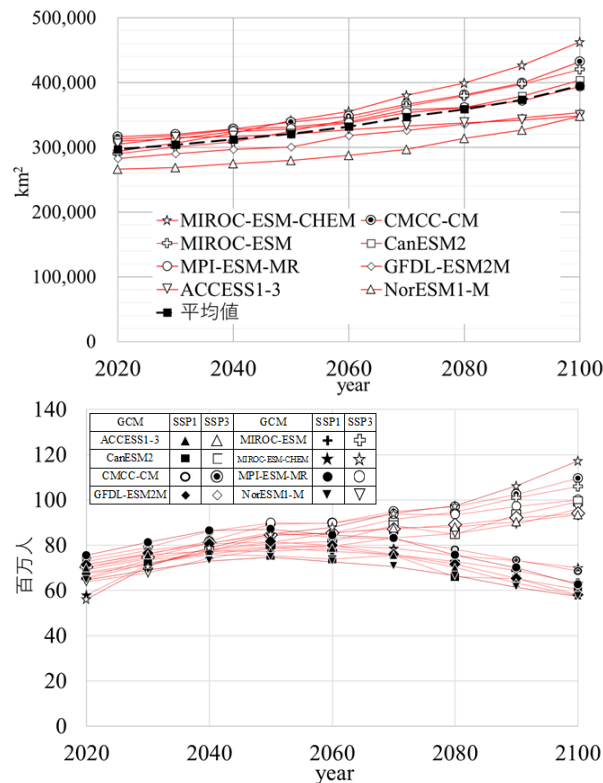


図 4.4.2 8GCM による潜在的浸水域、影響人口の相違(RCP8.5; 土田他, 2018)

(2) 防護費用データベースの構築と適応効果評価

前節は堤防や護岸が無いと仮定した場合の潜在的な浸水影響のみを評価してきたが、次に適応策を講じた場合の浸水影響、適応効果を評価する。沿岸域の適応策は、撤退、順応、防護の3つに大きく分類される。撤退は、非常に脆弱な地域から内陸部や高台などへ移ることである。順応は、浸水が起きても大きな被害にならないように生活様式や土地の利用方法を工夫することであり、高床式住居、遊水池などの土地利用の変更、ハザードマップ、保険などが含まれる。防護は、構造物による外力の保護、養浜を用いた海岸侵食対策、低緯度地域でのマングローブ植林などが含まれる。

はじめに、防護の一つとして、堤防嵩上げの効果に着目する。図 4.4.3、図 4.4.4、図 4.4.5 は堤防嵩上げの有無による浸水域、浸水面積、影響人口、被害額の違いを示している。ここでは、浸水可能性のある海岸線に対して、適応策として一律 50cm、ないしは 1m の堤防の嵩上げを行った場合の浸水影響を試算した。

沿岸域には主要な産業拠点や資産が集積しているため、陸地面積や人口の比率以上に大きな社会・経済影響が及ぶことが予想される。まず、全球での海面上昇等の浸水被害額を推計するために、過去の災害データ等から地域、国、経済水準などと浸水被害との相関を検証した。ここでは、EM-DAT の災害データベースのうち、Hydrological disasters に分類される 1980-2013 年までの世界 171 カ国の被害額と一人当たり GDP (2005 年基準実質)、影響人口を抽出した。水害被害額と国の経済の水準にはある程度の相関性と個別性がある。それゆえ、世界全体とともに世銀の区分に従い各国の経済水準を 3 段階(2005 年の一人当たり GDP ; Low: 4,125\$以下、Middle: 4,126-12,735\$, High: 12,736\$以上)に分けてそれぞれの重回帰分析から被害額推計式を導出した。適応無しシナリオにおいて、世界一律の推計式では 2100 年において約 1,500~4,000 億\$となり、3 つの経済水準別の推計式では 2100 年に約 1,700~4,800 億\$であった。被害額は RCP の違いよりも SSP の一人当たり GDP や人口の違いによる影響が大きく、また世界一律よりも 3 つの経済水準別の推計の方が先進国への影響が強調されるために総被害額が大きくなった。

適応有りシナリオにおける浸水域は、適応無しシナリオに比べて 2100 年時点において 50cm 嵩上げで約 2 割、1m 嵩上げで約 4 割軽減される。図 4.4.4、図 4.4.5 の影響人口、被害額は RCP の違いよりも SSP の違いに大きく左右される。同じ RCP、SSP で比較した場合、50cm の嵩上げで約 1-2 割、1m で約 2-3 割の浸水影響が軽減される。

次に、これらに掛かる追加的適応費用を算出する。そのため、世界各国の堤防、養浜、マングローブ植林に掛かる費用データベースを構築し、それぞれ費用推計を行った(図 4.4.6)。堤防は、アメリカ合衆国ではアメリカ軍・各州の報告書、日本では港湾空港技術研究所、ヨーロッパ各国では EU 報告書、新興国においては JICA 報告書などから費用データを収集した。堤防費用(1km あたりの

費用)は、20カ国455個から各国の施工終了年次の一人当たり実質GDPと比較し、近似式を推計した。同様に、世界各国の報告書等から養浜は20カ国134個、マングローブは14カ国89個の費用データを収集した。堤防・護岸は、同一国内でも立地や建設形式によって多様であるが、総じて国の経済水準が高くなると防護基準も上がり、防護費用も高くなる傾向にある。マングローブの植樹は堤防ほど材料費がかからないため、人件費に大きく依存すると考えられる。

追加的適応費用は、国別の浸水可能性がある海岸線長に国毎の堤防単価(図4.4.6)を乗じ、耐用年数30年として管理費用を加えた。後述の通り、世界の堤防分布情報は整備途上なため、浸水可能性がある海岸線の全てに1mの堤防を新設する場合と、同様の海岸線に既に堤防が存在するとしてそれら全てを1m嵩上げする場合、という2つの極端なシナリオを仮定した。図4.4.7は、世界の追加的適応費用である。全て新設と仮定した場合は全て嵩上げと仮定した場合よりも費用が4倍弱高くなる。堤防分布情報は整備中であるが、真値はこれらの範囲内にあると推察される。それでもなお、追加的適応費用は浸水被害額よりは概ね低くなる。図4.4.8の費用便益比(B/C)からも不確実性はあるものの多くの場合にB/Cが1を超え、全球規模では早期の防護策の実施に経済合理性があることが示された。

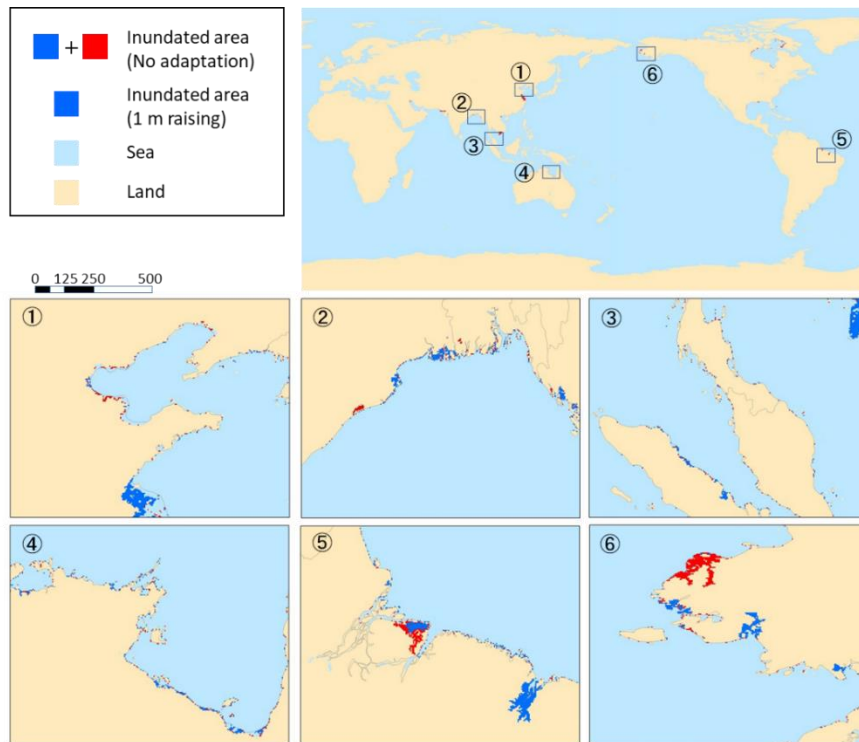


図 4.4.3 適応策の有無による浸水域の相違(Tamura et al., 2019)

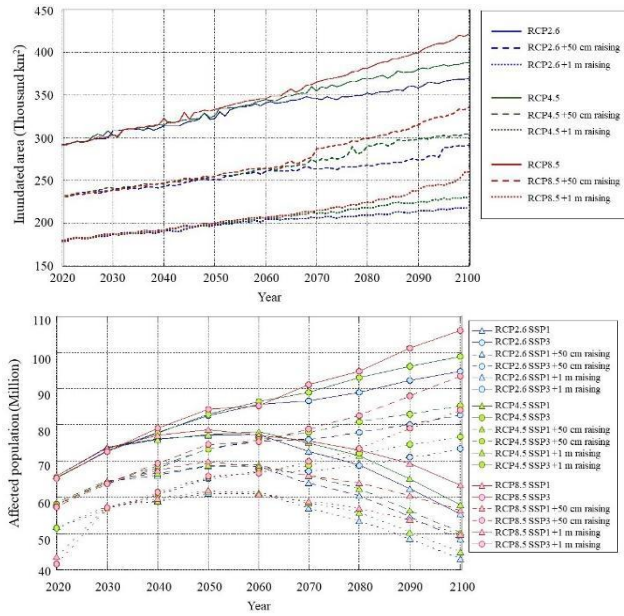


図 4.4.4 堤防高上げの有無による浸水面積、影響人口の比較 (Tamura et al., 2019)

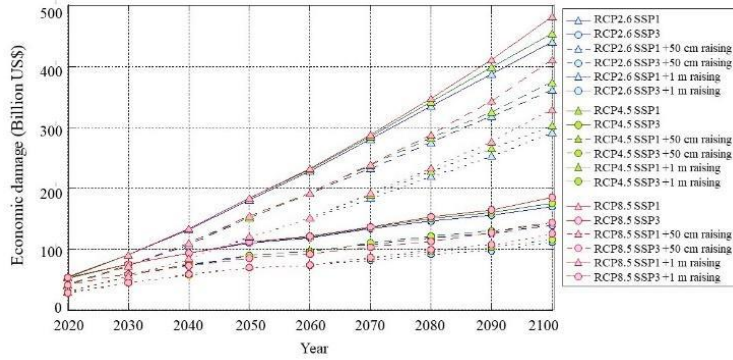


図 4.4.5 堤防高上げの有無による被害額の比較 (経済水準別の推計; Tamura et al., 2019)

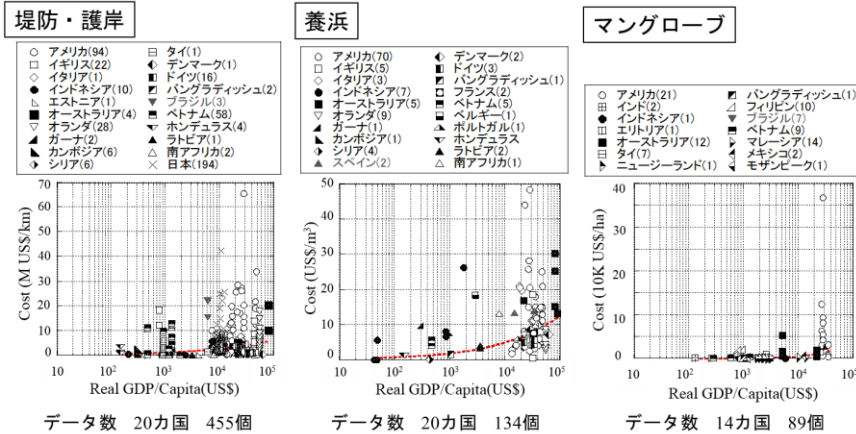


図 4.4.6 世界各国の防護費用 (熊野他, 2018)

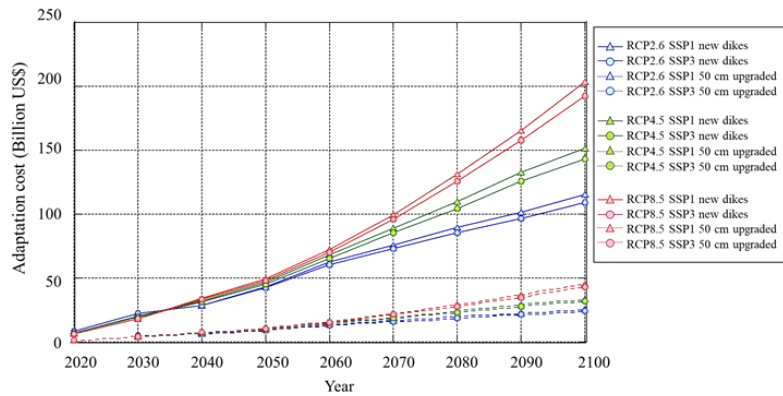


図 4.4.7 世界全体の追加的適応費用 (Tamura et al., 2019)

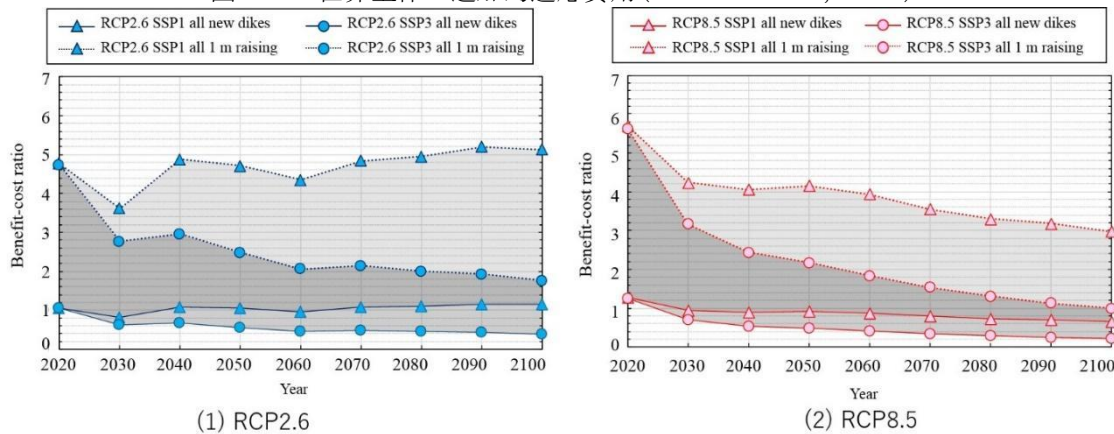


図 4.4.8 適応費用の B/C (Tamura et al., 2019)

(3) 堤防データ抽出プロセスの開発

沿岸域における気候変動に対する防護策を検討する上で、世界の既存堤防の設置場所を把握する必要がある。しかしながら、安全保障等の理由から我々がアクセス可能かつ一律の基準を満たす世界の堤防データベースは存在しない。そこで、リモセンデータ (ALOS World 3D や Google Earth 等) から全球の堤防を抽出するプロセスを開発した。数値表層モデル (DSM) から標高値や傾斜角を求め、ALOS World 3D や Google earth から堤防らしき場所を抽出する堤防抽出支援情報プログラムを作成し、その後判読キーに基づき Google Earth 等の画像データから目視で堤防を同定する方法である。

図 4.4.9 は、30m メッシュの ALOS 画像によって抽出した全球データ、および日本、ベトナムの堤防を抽出した結果を示している。日本国内では海岸統計などで堤防データがある程度公開されており、今回の抽出結果と比較して手法の妥当性や精度を検証した。その結果、日本では総じて約 8 割の精度で抽出可能であること、土地被覆の影響を受けにくい緩傾斜堤防が直立堤防よりも抽出しやすいこと、都市部などの複雑な土地被覆に存在する堤防の抽出は困難なこと、などを確認した。抽出手法の妥当性を確認でき、現在、全球の約 8 割の海岸堤防の抽出作業を終えた。既に S-14-2 グループなどへデータを提供し、研究連携が進んだ。



図 4.4.9 堤防データ抽出(全球、ベトナム、日本)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

沿岸地域に関しては、1)海面上昇と潮汐を考慮した将来の浸水影響評価、2)防護費用データベースの構築と適応効果評価、3)堤防データ抽出プロセスの開発、などを実施し、一連の分析枠組みが確立された。地球温暖化に伴う海面上昇で河口域や低地などが浸水した場合の被害額は、今世紀末に世界全体で約 4,820 億ドルになるが、高さ 1m の堤防を整備すると費用は最大 2,030 億ドルかかるが、被害額は 6~7 割に抑えられるという試算を得た。

沿岸域における気候変動の影響に関する経済損失評価は既に幾つかの先行研究があるものの、適応策の経済評価はまだまだ少なく、本研究で解析した資料は貴重であろう。さらに、S-14-1 の LCA 班や S-14-5 の経済評価班にもデータを提供し、総合的な解析にも活用される。これらの成果は、14 本の査読付き論文(うち英文 4 本)などで発表された。IPCC (2019) SROCC 報告書第 4 章にも Tamura et al. (2019) が複数引用され、今後の IPCC 報告書等にも貢献可能な知見が得られた。

(2) 環境政策への貢献

沿岸地域に関しては、海面上昇等に伴う全球規模の浸水影響、防護費用データベース構築、防護効果評価、その防護費用と費用便益を提示した。不確実性はあるものの全球規模では概ね費用便益比は 1 を超え、早期の防護策の実施に経済合理性があることが示された。今後の沿岸域での適応政策の判断材料となる。

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

沿岸分野では IPCC(2019)SROCC 報告書第 4 章に Tamura et al. (2019)が複数引用され、今後の IPCC 報告書等にも貢献可能な知見が得られた。

6. 国際共同研究等の状況

- 1) ベトナム社会科学院東北アジア研究所(INAS)が 2016 年 9 月に主催した国際シンポジウムにおいてベトナムの気候変動影響と適応策に関する招待講演を行い、現地新聞に掲載された。2018 年には当シンポジウムの原稿をまとめたベトナム語の書籍が出版された。
- 2) ベトナム・ソクチャン省の沿岸域における気候変動影響と適応策について、ホーチミン水資源大学、独越大学関係者との共同研究を行い、Tamura et al. (2018)として成果を公表した。
- 3) 2018 年 11 月 29-30 日とベルリン Global Climate Forum (GCF)で開催された沿岸分野のモデル相互比較プロジェクト (CoastMIP)のワークショップに参加し、沿岸影響評価モデルの不確実性の取扱等を議論した。2019 年 12 月のサンフランシスコにおける AGU2019 fall meeting でも CoastMIP グループでの議論を継続した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) O. NISHIURA, M. TAMURA, S. FUJIMORI, K. TAKAHASHI, J. TAKAKURA and Y. HIJIOKA: Sustainability, 12(9), 12p. (2020)
“An Assessment of Global Macroeconomic Impacts Caused by Sea Level Rise Using the Framework of Shared Socioeconomic Pathways and Representative Concentration Pathways,”
- 2) J. TAKAKURA, S. FUJIMORI, N. HANASAKI, T. HASEGAWA, Y. HIRABAYASHI, Y. HONDA, T. IIZUMI, N. KUMANO, C. PARK, Z. SHEN, K. TAKAHASHI, M. TAMURA, M. TANOUÉ, K. TSUCHIDA, H. YOKOKI, Q. ZHOU, T. OKI and Y. HIJIOKA: Nature Climate Change, 9, 737-741, (2019)
“Dependence of Economic Impacts of Climate Change on Anthropogenically Directed Pathways”
- 3) 熊野直子、田村誠、横木裕宗: 土木学会論文集 G (環境), 75(5), I_339-I_350, (2019)
「海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討」
- 4) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、横木裕宗: 土木学会論文集 G (環境), 75(5), I_331-I_337, (2019)
「海面上昇による浸水影響及び防護策による適応効果評価」
- 5) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、桑原祐史: 土木学会論文集 G (環境), 75(5), I_323-I_330, (2019)
「全球堤防データを用いた浸水被害額推計に関する基礎的検討-東京湾および伊勢湾を対象として-」
- 6) 西浦理、藤森真一郎、田村誠: 土木学会論文集 G (環境), 75(5), I_81-I_88, (2019)
「全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価」
- 7) M. TAMURA, N. KUMANO, M. YOTSUKURI and H. YOKOKI: Climatic Change, 152(3-4), 363-377, (2019)
“Global assessment of the effectiveness of adaptation in coastal areas based on RCP/SSP scenarios”
- 8) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗: 土木学会論文集 G (環境), 74(5), I_395-I_404, (2018)
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
- 9) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗: 土木学会論文集 G (環境), 74(5), I_167-I_174, (2018)
「複数気候モデルによる海面上昇に伴う浸水影響の不確実性評価」
- 10) 熊野直子、川嶋良純、箭内春樹、田村誠、横木裕宗、桑原祐史: 沿岸域学会誌, 30(4), 89-100, (2018)
「衛星画像と数値表層モデルを用いた海岸堤防抽出手法の提案」

- 11) M. TAMURA, K. YASUHARA, K. AJIMA, V. C. TRINH and S. V. PHAM: International Journal of Global Warming, 16(1), 102-117, (2018)
“Vulnerability to climate change and residents’ adaptations in coastal areas of Soc Trang province, Vietnam”
- 12) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、横木裕宗、桑原祐史: 土木学会論文集 G (環境), 73(5), I_361-I_367, (2017)
「伊勢湾台風を事例とする高潮浸水被害額推計手法の検証」
- 13) 四栗瑞樹、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗: 土木学会論文集 G (環境), 73(5), I_369-I_376, (2017)
「RCP・SSP シナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価」
- 14) 熊野直子、土田晃次郎、田村誠、増永英治、桑原祐史、横木裕宗: 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 73(2), I_1007-I_1012, (2017)
「日本における海面上昇への適応を目的とした防護費用の将来推計」

<その他誌上発表 (査読なし) >

- 1) H. YOKOKI, M. TAMURA, M. YOTSUKURI, N. KUMANO and Y. KUWAHARA: CLIVAR Exchanges, 74, 36-39, (2018)
“Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise”
 - 2) 田村誠、熊野直子: 沿岸域学会誌, 29(4), 19-24, (2017)
「海面上昇等による沿岸域の浸水影響と適応策」
 - 3) 田村誠、安原一哉、安島清武、Trinh Cong Van、Pham Van Song: 茨城大学人文学部紀要 (社会科学論集), 60, 49-61 (2015)
ベトナム・ソクチャン省沿岸域における気候変動への脆弱性とコミュニティ主導型適応策
 - 4) M. TAMURA, N. KUMANO, H. YOKOKI, Y. KUWAHARA and K. YASUHARA: Proceedings of Hanoi Geoengineering 2016 on “Energy & Sustainability”, Hanoi, Vietnam, October 21, 2016, 93-98 (2016)
“Coastal adaptation to climate change in Vietnam and Japan: A socioeconomic analysis”
 - 5) M. TAMURA, K. YASUHARA, N. KUMANO, H. YOKOKI and Y. KUWAHARA: Proceedings of International Conference on “Building Sustainable Development Society: Vietnam-Japan Cooperation to Ensure the Sustainable Development”, Institute for Northeast Asian Studies, Vietnam Academy of Social Sciences, Hanoi, Vietnam, September 28, 2016, 292-303, (2016)
“Climate change and resilient adaptation in coastal areas, Vietnam”
 - 6) N. KUMANO, M. TAMURA, H. YOKOKI and Y. KUWAHARA: Proceedings of Hanoi Geoengineering 2016 on “Energy & Sustainability”, Hanoi, Vietnam, October 21, 2016, 30-36, (2016)
“Coastal dike cost analyses based on socioeconomic scenarios in Vietnam”
 - 7) M. TAMURA, N. KUMANO, H. YOKOKI and K. YASUHARA: Proceedings of HANOIGE0 2015 on “Engineering geology in respond to climate change and sustainable development of infrastructure”, November 27, 2015, 35-38, (2015)
“Coastal adaptation and management to climate change in Vietnam: Some options and their costs”
- 1) 口頭発表 (学会等)
- 1) M. TAMURA, N. KUMANO and H. YOKOKI: International Workshop: Natural Resources, Human Resources, and Risk Management in the context of Climate Change, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam, January 10, 2020. (Outstanding poster presentation award)
“Assessment of the effectiveness of adaptation against global sea-level rise”
 - 2) N. KUMANO, M. TAMURA, T. INOUE and H. YOKOKI: 2019 AGU Fall Meeting, Moscone west, San Francisco, December 10, 2019
“Estimating the cost of coastal protection using mangrove forests against sea level rise in the Philippines and Vietnam”
 - 3) 熊野直子、田村誠、横木裕宗: 第 27 回地球環境シンポジウム, 富山国際会議場,

2019/8/29

「海面上昇に対するグリーンインフラによる適応効果と費用の検討」

- 4) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、横木裕宗：第 27 回地球環境シンポジウム，富山国際会議場，2019/8/29
「海面上昇による浸水影響及び防護策による適応効果評価」
- 5) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、桑原祐史：第 27 回地球環境シンポジウム，富山国際会議場，2019/8/29
「全球堤防データを用いた浸水被害額推計に関する基礎的検討-東京湾および伊勢湾を対象として-」
- 6) 西浦理、藤森真一郎、田村誠：第 27 回地球環境シンポジウム，富山国際会議場，2019/8/27
「全世界の波及的な効果を考慮した海面上昇によるマクロ経済影響評価」
- 7) M. TAMURA: 4th National Institute for Environmental Studies (NIES) Forum, Hanoi, Vietnam, January 23, 2019
“Coastal adaptation mixing gray and green infrastructures to climate change in Vietnam”
- 8) M. TAMURA, N. KUMANO, T. INOUE and H. YOKOKI: Hanoi Forum 2018, Hanoi, Vietnam, November 10, 2018
“Impact and cost assessment of coastal protection mixing green infrastructure against sea level rise in Vietnam”
- 9) 熊野直子、田村誠、井上智美、横木裕宗：第 26 回地球環境シンポジウム，長崎大学，2018/9/7
「フィリピン・ベトナムにおけるグリーンインフラの海面上昇への適応評価と費用効果」
- 10) 土田晃次郎、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗：第 26 回地球環境シンポジウム，長崎大学，2018/9/6
「複数気候モデルによる海面上昇に伴う浸水影響の不確実性評価」
- 11) M. TAMURA, N. KUMANO, M. YOTSUKURI, Y. KUWAHARA and H. YOKOKI: 2017 AGU Fall Meeting, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans, December 12, 2017
“Global cost analysis on adaptation to sea level rise based on RCP/SSP scenarios”
- 12) 箭内春樹、熊野直子、田村誠、横木裕宗、桑原祐史：第 25 回地球環境シンポジウム，神戸大学，2017/9/8
「伊勢湾台風を事例とする高潮浸水被害額推計手法の検証」
- 13) 四栗瑞樹、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗：第 25 回地球環境シンポジウム，神戸大学，2017/9/8
「RCP・SSP シナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価」
- 14) 田村誠：第 3 回日本語の歴史的典籍国際研究集会，国文学研究資料館，立川，2017/7/29
「気候変動適応学と歴史学、国文学との共働可能性」
- 15) H. YOKOKI, M. TAMURA and Y. KUWAHARA: International WCRP/IOC Conference 2017 “Regional Sea Level Changes and Coastal Impacts”, Columbia University, USA, July 12, 2017
“Global distribution of projected sea level changes using multiple climate models and economic assessment of sea level rise”
- 16) 熊野直子、土田晃次郎、田村誠、増永英治、桑原祐史、横木裕宗：第 42 回海洋開発シンポジウム，仙台国際センター，2017/6/26
「日本における海面上昇への適応を目的とした防護費用の将来推計」

(3) 知的財産権

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 毎日新聞朝刊（2019年9月26日「IPCC特別報告書発表 今世紀末海面1.1メートル上昇」）
- 2) 毎日新聞（2019年1月21日「+2℃の世界：温暖化に伴う海面上昇被害、世界で52兆円以上」）

茨城大など調査」)

- 3) 朝日新聞 (2015年12月17日、科学面、「海岸浸食：ベトナムで深刻化」)
- 4) The Gioi Vietnam (ベトナム現地新聞「世界とベトナム」) (2016年9月29日、「INAS国際シンポジウム：ベトナムにおける気候変動の沿岸影響と適応策」)
- 5) 朝日新聞 (2015年12月9日、朝刊1面および7面(東京版)/5面(大阪版)、「地球異変：海に沈む集落ベトナム」)

(6) その他

- 1) M. TAMURA, N. KUMANO and H. YOKOKI (2020) International Workshop: Natural Resources, Human Resources, and Risk Management in the context of Climate Change, Hanoi University of Natural Resources and Environment, Hanoi, Vietnam, January 10, 2020. “Assessment of the effectiveness of adaptation against global sea-level rise,” **(Outstanding poster presentation award)**

8. 引用文献

- 1) 四栗瑞樹、田村誠、熊野直子、増永英治、横木裕宗(2017)『土木学会論文集G(環境)』, 73(5), pp. I_369-I_376.
「RCP・SSPシナリオに基づく全球沿岸域での海面上昇による浸水影響評価」
- 2) C. AMANTE and B. W. EAKINS: NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24, 19p. (2009)
“ETOP01: 1 Arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis”
- 3) G. D. EGBERT and S. Y. EROFEEVA (2002) Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 19(2): 183-204.
“Efficient inverse modeling of Barotropic ocean tides”

III. 英文 Abstract

Global Cost-benefit Analysis of Climate Change Adaptation

Principal Investigator: Yukiko HIRABAYASHI

Institution: Shibaura Institute of Technology
3-7,5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, JAPAN
Tel: +81-3-5859-8353 / Fax: +81-3-5859-8401
E-mail: hyukiko@shibaura-it.ac.jp

Cooperated by: Institute for Agro-Environmental Sciences, National Agriculture and Food Research Organization, Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, Institute for Global Change Adaptation Science, Ibaraki University

[Abstract]

Key Words: Cost-benefit analysis, Climate change, adaptation, flood, crop yield, health, coastal region

Adaptation and mitigation funding require coordination as they are often competing uses for limited resources. The costs of decarbonizing economies and the costs of impacts on various sectors of the economy have been estimated at global scale to evaluate global mitigation cost. On the other hand, research and policy on adaptation has largely focused on the local aspects and there is no quantitative estimation of global adaptation cost. For example, adaptation cost of coastal flood increase under simple sea level rise scenario using globally uniform dike construction cost was the only global estimation of adaptation cost in the 5th assessment report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Hence, the main challenge of climate change related decision-making is to obtain scientific and quantitative information of global adaptation cost.

Here, we developed a global model-based framework to estimate economic damage of climate change and global adaptation cost of major sectors including river flood, crop production, and coastal flood. We also estimated economic damage of human health under climate change to evaluate benefit of mitigation. For the most extreme cases (the warmest climate, RCP8.5 and high economic growth and strong reliance on fossil fuels, SSP5), estimated global adaptation cost is 15.6 billion USD per year for river flood, 94 billion USD for crop production and 203 billion USD for coastal flood. For the human health sector, Disability Adjusted Life Years (DALY) for 1kg CO₂ emission is estimated for undernutrition, diarrhea, heat stress, Malaria, Dengue, and fatality of coastal flood

Integrated analysis of cost and benefit of adaptation among major sectors revealed that several regions showed increase of damage due to climate change even assuming ideal adaptation policy, indicating

potential limitation to adapt ongoing climate change. For example, increase of climate-related damage even under high adaptation is high in Asia, Australasia and South Africa where river and coastal flood will rapidly increase. In terms of crop production, increase of damage cannot be adapted in North America and Central and South America. There are high impacts of climate change on ecosystems in Europe, Russia, Middle East, Africa and Central America. Climate change impact on human health is very high in all analyzed regions.

As both mitigation and adaptation are seen to be of equal importance, the estimated global adaptation cost in major sectors as well as potential limit to adapt to climate change would be important scientific knowledge to make adequate adaptation and mitigation policy.