

日本における気候変動予測研究の25年

渡部 雅浩（課題1）

気候システムを対象とする研究は、ルーツを気象学、海洋物理学、水文学などの複数分野に持ち、本来はその成り立ちや自然の変動を理解する地球科学の一分野です。しかし、20世紀後半から地球温暖化が顕在化するにつれ、気候変動という語に、人間活動に起因する気候の変化（climate change）が含まれるようになってきました。ここでいう気候変動研究は従って、自然の変動及び人為起源の変化に関する、メカニズム解明、要因分析、将来予測、影響評価、適応可能性などの幅広い課題を扱う広範なテーマを含みます。こうした研究から、気候システムの安定化及び温暖化問題の解決に貢献する知見が得られることが期待されます。

過去20年以上にわたり、日本では文部科学省が継続的に気候変動予測研究の大型プログラムを進めてきました。それらを列記すると以下ようになります。

- 人・自然・地球共生プロジェクト
（以下、共生プロジェクト、2002～2006年度）
- 21世紀気候変動予測革新プログラム
（以下、革新プログラム、2007～2011年度）
- 気候変動リスク情報創生プログラム
（以下、創成プログラム、2012～2016年度）
- 統合的気候モデル高度化研究プログラム
（以下、統合プログラム、2017～2021年度）
- 気候変動予測先端研究プログラム
（以下、先端プログラム、2022～2026年度）

共生プロジェクトは、地球シミュレータの建設に合わせて始まった最初の大規模研究で、その後5年ごとに具体的な目標を更新しながら発展を見せています。各プログラムでは、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）への貢献をうたっており、そのために国際的な研究プログラムとリンクして日本の研究プレゼンスを高めてきました。気候や地球システムの数値モデルを開発改良し、地球シミュレータを用いて国際的な気候シミュレーションの枠組みである結合モデル相互比較プロジェクト（CMIP）へ参画、データを広く公開してきました。また、地球温暖化対策計画（2016年）や気候変動適応法（2018年）などの国内における気候変動施策に対応して、日本の気候変動レポート（2020年、2025年）作成や気候変動予測データセット（2022年）といった我が国独自の成果もあげてきました。現在は先端プログラムを推進中で、それまでの4期20年にわたる文科省気候変動研究プログラムのレガシーを活用しつつ、「気候変動対応のための actionable climate science（行動に繋げる気候科学）の確立」を目指し、国内の多くの大学・研究機関が共同で研究を実施しています。

現在、世界各国はカーボンニュートラルの実現を目指していますが、その道は困難で、依然として大気中二酸化炭素濃度は増加を続けています。また、各地で熱波や豪雨、干ばつなどの極端気象が頻発して社会に被害をもたらすとともに、ここ3年の世界的な高温で産業革命前からの温暖化が+1.5℃を超える時期が早まることが懸念されています。こうした現実を前に、気候変動予測研究はますます重要になっています。

IPCC 貢献に向けた気候変動予測シミュレーションと 先端モデル開発

建部 洋晶（課題1・2）、廣田 渚郎（課題1）、鈴木 健太郎（課題1）、羽島 知洋（課題2）

前項の通り、私たちのプログラムではCMIPという国際プロジェクトを通じてIPCC貢献を行ってきました。IPCCは気候変動に関する最新の科学的知見を総合的に評価する国際機関であり、政策決定のための科学的根拠を提供する評価報告書を準定期的に公表しています。評価報告書で扱われる、過去から現在に至る気候変動の要因や将来予測に関する知見は、主として気候シミュレーション研究に基づいています。先端プログラムでは、2029年末発行予定の次期IPCC評価報告書へ貢献すべく、CMIPにおいて、地球気候システムの理解深化と将来予測の信頼性向上を目的とした気候モデルの予測技術開発を進めてきました。ここでは本プログラムで得られた開発成果を概観します。

まず、気候変動に関わる大気・海洋・陸域プロセスを改良し、新しい物理気候モデルMIROC7を開発しました。地球の気温は、太陽から受け取るエネルギーと赤外放射として放出するエネルギーの収支で決まり、水蒸気や雲、温室効果ガスなどの影響を受けて変化します。MIROC7では、最新の衛星観測データを活用して雲や降水・放射の表現を精緻化することにより、従来のMIROC6と比較して、放射エネルギー収支が大きく改善され（図1）、過去の地表面気温変化の再

現性も向上しました（図2）。一方、気候変動緩和策を議論するためには、人為起源の温室効果ガス排出量と、陸域や海洋による炭素吸収過程——すなわち、炭素循環——と気候変動とを直接的に結びつけることの可能な地球システムモデル（ESM）の活用が不可欠です。本プログラムでは、加速演算装置の実装された次世代大型計算機でのモデル運用も見据えたシミュレーション基盤の整備を進めつつ、さらに二酸化炭素に次ぐ温室効果を持つメタンの循環過程、永久凍土中に含まれる有機物分解とガス放出、生存環境変化に対する生理的適応を考慮した海洋生態系、林野火災による炭素排出など、物質循環に関わる新たな要素モデル開発とESMへの導入を推進してきました。これらの取り組みにより、人間活動や温室効果ガス排出が多様な経路を通じて気候に影響を及ぼすプロセスを、従来よりもより包括的にシミュレーションへ反映できるようになりました。

今後は、CMIP7に向けた開発された上記の物理気候モデル・ESMを併用し、気候変動に対する国内外社会の適応策・緩和策策定、排出削減目標の妥当性評価などに資する、科学的根拠に裏打ちされた高精度な気候変動予測情報の創出を進め、次期IPCC報告書へ貢献する予定です。



図1：地球気候システムの放射エネルギー収支の模式図。衛星観測、MIROC6、MIROC7の太陽入射と赤外放射エネルギーの数値(W/m²)を図中に示す。

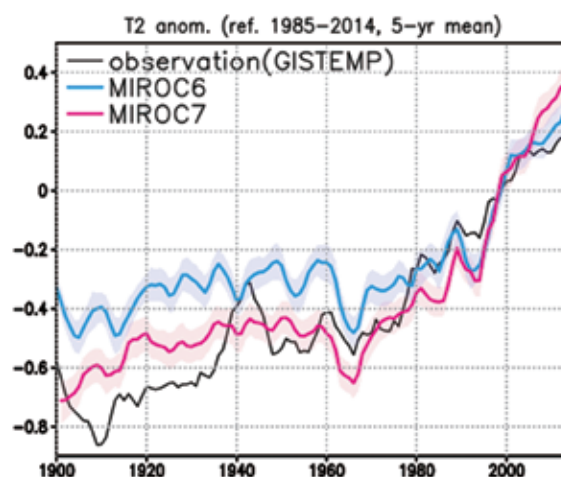


図2：1985～2014年を基準とした全球平均地表面気温の変動。黒線は観測値、青線と赤線はそれぞれMIROC6およびMIROC7による再現結果を示す。赤と青の陰影は自然変動に起因する各モデル結果のばらつき度合いを示す（メンバー数は3）。

全球及び日本域の高解像度気候予測アンサンブルシミュレーション

川瀬 宏明 (課題3)、田中 智大 (課題4)

日本域5km大規模アンサンブル計算による 極端気象の将来予測

地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース (d4PDF) (※) は、地域気候モデルの空間分解能が20kmと日本域の詳細な気象を再現するには不十分でした。そこでd4PDFの過去及び工業化前から2°C、4°C昇温した気候をそれぞれ732年間、5kmメッシュの地域気候モデルを用いた力学的ダウンスケーリング (高解像度化) を行いました。その結果、再現期間50年 (50年に一度程度) の24時間降水量の再現性が向上し、4°C昇温気候では九州や東海、北日本などを中心に増加すると予測されました (図3)。

新しく導入した高解像度の時間連続計算

d4PDFは特定の温暖化レベルをターゲットにした実験 (タイムスライス実験) でした。ただ、地球温暖化に伴う気候変化をより詳細に調べるためには、将来の毎年のデータが必要となります。そこで、過去に観測された海洋の変動とCMIP6で予測された6つの海面水温 (SST) の将来変化を用いることで、過去から現在、将来に至るシームレスな時間連続全

球大規模アンサンブル計算を実現しました (図4a)。これをd4PDFv2と呼びます。さらに、20kmと5kmメッシュの地域気候モデルを用いて高解像度することで、地域詳細な時間連続気候予測データを作成しました。5kmメッシュの地域気候モデルで計算された日本の積雪深の変化を見ると、将来、積雪深は減少するものの、その減少速度は近未来に大きいことが分かります。また、21世紀後半にかけて、予測のばらつきの幅が大きくなっています。これは気温上昇のばらつきの幅が21世紀後半に大きいことに加え、SSTの将来変化の違いで、冬型の気圧配置の強弱が異なり、降水量の予測にばらつきが生じたためと考えられます。d4PDFv2は今後、新たな気候変動予測情報として活用されることが期待されます。

※ d4PDF (地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベース / database for Policy Decision-making for Future climate change)

2015年、本プログラムの前々身となる創生プログラムの時代に公開を開始。その後も統合プログラム・先端プログラムにかけて様々なデータの追加・更新を行っている。本稿事例はその最新の取り組み。

データ統合・解析システム (DIAS) (<https://diasjp.net/>) から利用可能。

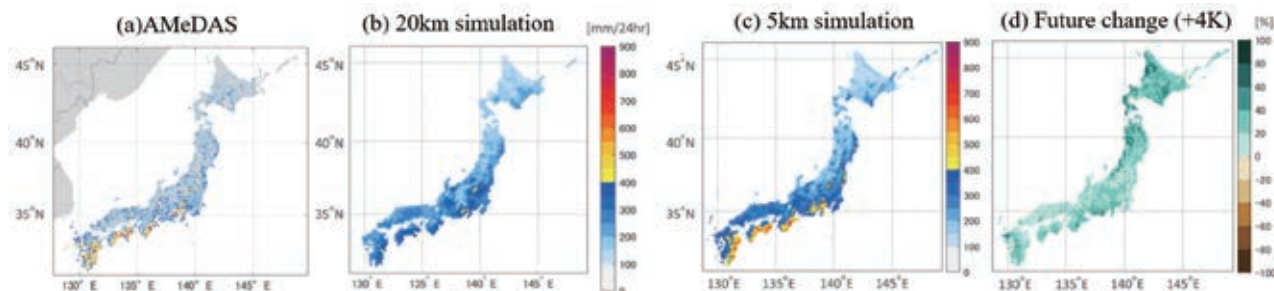


図3：50年に一度程度の24時間降水量の再現性と将来変化。(a) アメダス、(b) 20km計算、(c) 5km計算。(d) 5km計算における変化率 (%)。

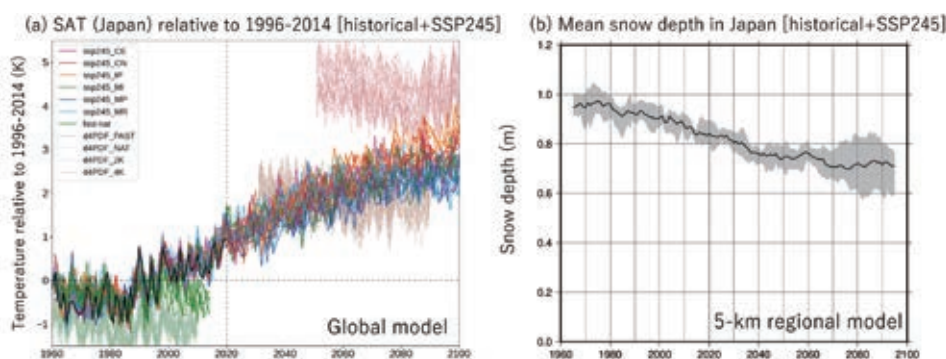


図4：(a) d4PDFv2の全球モデルで計算された日本域の平均気温の将来変化。太線はd4PDFv2、細線はd4PDF、黒線は15測候所の平均 (観測)。(b) 5km地域気候モデルで計算された日本域の平均積雪深の将来変化。陰影は6実験の最大値と最小値、黒線は平均。

極端現象と気候変動の関係を明らかにする イベント・アトリビューション研究の最前線

今田 由紀子（課題1）、川瀬 宏明（課題3）、田中 智大（課題4）

近年、世界各地で熱波・豪雨・干ばつなどの極端現象が頻発し、その背後で進行する地球温暖化との関連性が注目を集めています。しかし、個々の極端現象と地球温暖化の因果関係を科学的に示すことは一昔前まで不可能であると考えられていました。本来、極端現象の主要因は大気に内在する偶発的な「ゆらぎ」であり、地球温暖化がなかったとしても発生し得るため、温暖化の影響を「ゆらぎ」成分からいかに分離するかがこの問題における最大の課題でした。

この課題に挑むため、我々は約15年前からイベント・アトリビューション（Event Attribution, 以下EA）と呼ばれる研究に取り組んできました。この手法では、気候モデルの中に温暖化が進みつつある現在の気候と、温暖化がなかったと仮定した仮想の世界を作り出し、それぞれの気候で偶然発生する極端現象の特徴を比較します。日本で発生する局所的な極端現象は細かい地形の影響と地球規模の自然変動の両方の影響を強く受けますので、両者を適切に表現可能なモデルを用いて温暖化の影響を評価する必要があります。日本では、本プログラムに参加するグローバル気候と地域気候の専門家が連携することで、日本に特化したEAを実現してきました。

先端プログラムでは、領域課題1～4が連携して、「アクションナブルEA」（行動につながるEA）の実現を目標に掲げ、これまでに確立したEA手法を様々な形で発展させています。気候シミュレーションを高解像度化し、日本の都道府県スケールの極端高温や線状降水帯の発生確率を対象としたEAが可能になりました（図5）。さらに浸水や高潮などの水災害の情報に焼き直すことで、地球温暖化がもたらすリスクに対する国民の実感と行動を促す情報を提供しています。実感を促す上でもう一つ重要となるのが、極端現象の発生後、間を空けずにEAの情報を発信することです。大規模な数値計算を必要とする従来のEA手法は迅速化には向きませんので、我々は、これまでに蓄積した大規模シミュレーションの結果や観測の情報をもとに、統計数学を利用した関係式を導いて極端現象の発生確率を求める新しいEA手法を開発しました（図6）。我々がこれまでに開発したEA手法は全7種類に上ります。これらの手法を活用して、地球温暖化やその他の自然の変動が実際に発生する極端現象に与える影響を様々な角度から分析していきます。

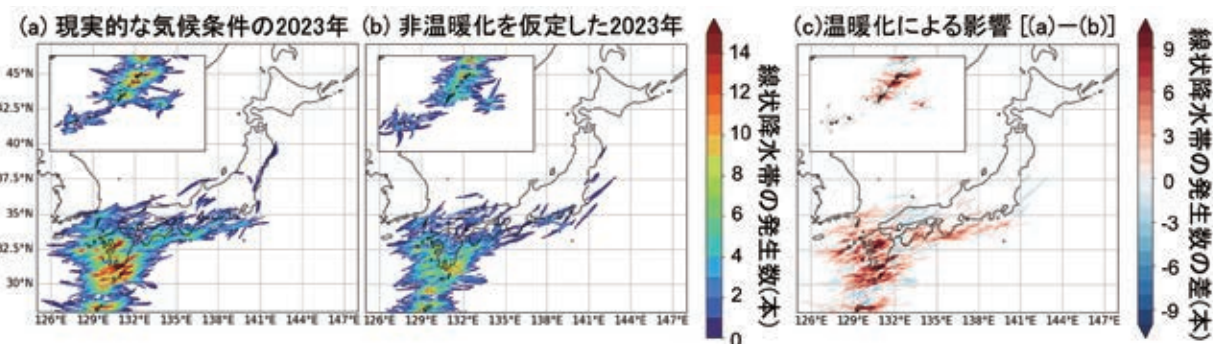


図5：令和5年6月1日から7月10日にかけての線状降水帯の発生数

(a) 実際の（温暖化がある）2023年の気候条件下での線状降水帯の発生数、(b) 温暖化がなかったと仮定した2023年の気候条件下での線状降水帯の発生数、(c) 温暖化の影響。(a) から (b) を引いたもの。

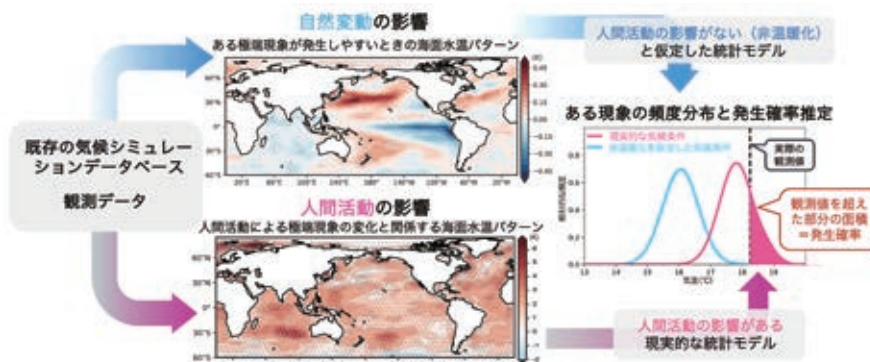


図6：迅速なイベント・アトリビューションを実現する統計的手法の概念図

極端現象とハザード予測

佐山 敬洋（課題4）、竹見 哲也（課題4）、藤見 俊夫（課題4）

（1）温暖化による極端降水の強まり

地球温暖化が進むにつれて、日本では極端降水がより発生しやすく、強まりやすい環境へと変化しています。Nayak and Takemi (2025) では、観測データと気候モデルを組み合わせて、日本各地における湿潤日や極端降水日の特徴を分析し、気温1℃上昇につき大気中の水蒸気量が約7～8%増えるという、クラウドジウス・クラペイロン関係に整合した降水強度の増加率を確認しました。また、最も強い豪雨が生じる気温帯は、必ずしも年間で最も高温の日ではなく、やや低い気温帯で最大となるという特徴を発見しました。これは、過度に気温が高いと大気が乾燥し、降水を強める条件が十分に満たされにくくなるためです。さらに将来気候では、この「豪雨が強まりやすい気温帯」が現在よりも2～4℃高い領域へとシフトすることが示され、温暖化によって極端降水が今後さらに強まる可能性が高いことを示唆しています。

（2）全国の河川洪水への影響

極端降水の強まりを踏まえ、先端プログラム領域課題4では、高解像度のアンサンブル気候情報（d4PDF 5km）（p.4 参照）を用いて全国規模の洪水ハザード評価を行いました。降雨流出氾濫（RRI）モデルを全国の河川に適用し、将来の流量極値を解析した結果、多くの流域でピーク流量が増大し、地域によっては温暖化に伴う洪水流量が1.4倍を上回ることが確認されました。洪水をもたらす降雨の成因については、台風によるものと、梅雨や秋雨など台風以外のものに分類して解析しています。現在気候では台風が全体の約7割を占めていますが、将来気候では台風による洪水の割合が減少し、非台風起因の洪水が全国的に増加する傾向が見られます。特に北陸や東北部、関東以北の太平洋側ではその傾向が顕著です。一方で、台風の発生頻度は減少するものの、個々の台風の強度は増加する可能性があり、強い台風による洪水や高潮のリスクにも引き続き注意が必要です。

（3）人口・資産・産業の将来状況を想定した高潮氾濫リスク

将来の人口・資産・産業立地を考慮した高潮氾濫リスクの統合評価にも取り組みました。海面水位上昇や高潮偏差

の変化に加え、将来の社会条件をメッシュレベルで推計し、高潮氾濫モデルと組み合わせることで、ハザードと曝露の両面から将来リスクを評価できる体系を構築しました。大阪湾の試算では、温暖化に伴う高潮水位の上昇によって浸水面積が拡大する一方、人口減少により曝露が低下する地域も見られるなど、将来の災害リスクは物理的な変化だけでは決まることが示されています。

■ 引用文献

Nayak and Takemi (2025) <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22287-6>

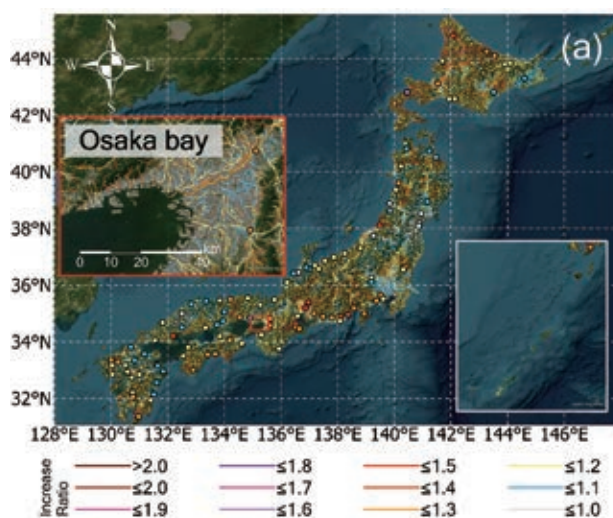


図7：再現期間100年に対応する洪水流量の2℃上昇時の推定増加率

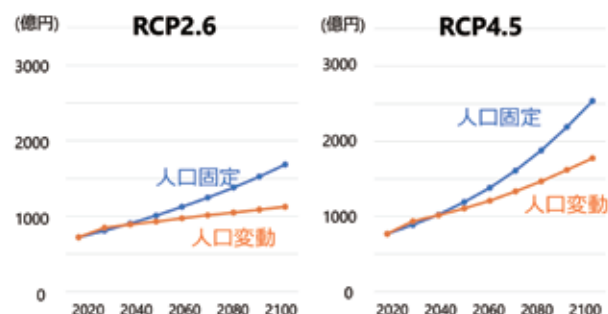


図8：大阪湾の高潮氾濫による期待被害額
（青：人口固定、オレンジ：人口変化を考慮）

炭素循環を含む地球システム予測

羽島 知洋（課題2）、Irina Melnikova（課題2）、建部 洋晶（課題1・2）

今後あるべき気候変動緩和策を議論するためには、温室効果ガス排出をはじめとする人間活動と気候変動との関係を理解し、その上で、今後の見通しを得るための予測が必要です。先端プログラムでは新たな地球システムモデルの開発を行い、IPCC第7次報告書に密接に関わる国際研究プロジェクトCMIP7 Assessment Fast Trackに向けた準備を進めました。地球システムモデルには炭素循環も含まれるため、従来の予測のように大気CO₂濃度をモデルに与える必要はなく、人為CO₂排出量を与え、モデル内で計算された大気CO₂濃度に基づき将来の気候変動を予測できます。特にCMIP7のフェーズでは、今後の人為CO₂排出削減の在り方を議論していく上で「人為CO₂排出量に基づく気候変動シミュレーションがより重要になる」という結論を様々な国際議論を経て導き出し、CMIP7の実験規約に反映しました（Sanderson et al. 2024, Hajima et al. 2025、図9）。先端プログラムではさらに、この炭素循環に関わるものとして、メタン循環や永久凍土に凍結されている炭素の分解・放出など多くのモデリングにも取り組み、地球システムモデルへ新たに導入しました（p.3参照）。

これらの地球システムモデルでは、気候変動に関わる様々な物理的・化学的・生物学的現象とその相互作用が予測で考慮されます。その特性を活かし、人為CO₂排出量に応じた将来気候の違いを調べ、我々が今後とりうる選択肢を探ることが可能です（p.8に関連記事）。特に、人間のCO₂排出—炭素循環—気候を繋ぐことのできる地球システムモデルは、残余カーボンバジェット（特定の温暖化緩和目標を超えないための人為CO₂排出量の累積値）の推定を可能にしましたが、さらに観測情報を組み合わせることにより、その推定値の不確実性を低減することに成功しました（Melnikova et al. 2025）。また、このような知見に基づいて、+1.5℃～2.0℃に気候安定化するための排出経路の探索や、人為CO₂除去（Carbon Dioxide Removal）のポテンシャル評価など、今後より重要となるであろう科学的課題を、他国との共同研究なども通じて調べました。

また、地球システムモデルと観測データ同化技術を組み合わせることにより、人間活動に由来する長期的な炭素循環変動だけでなく、気候システムに内在する自然変動起因の数年規模の炭素循環変動も考慮可能な、新たな予測システムを構築しました。同システムから創出された、過去数十年間の炭素循環再現データ（図10）や数年先までの予測情報は、国際的な評価報告書Global Carbon Budgetなどでも活用

され、第1回Global Stocktakeの決定文章採択時に参照された科学的根拠の一つとなっています（p.11参照）。このように、長期的な将来予測に留まらず、パリ協定の目標達成に向けた取り組みの検証といった場面においても、本プログラムの研究開発成果が最大限活用されるようになっています。

■ 参考文献

Sanderson et al. (2024) <https://doi.org/10.5194/gmd-17-8141-2024>
Hajima et al. (2025) <https://doi.org/10.5194/bg-22-1447-2025>
Melnikova et al. (2025) <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2025.101526>

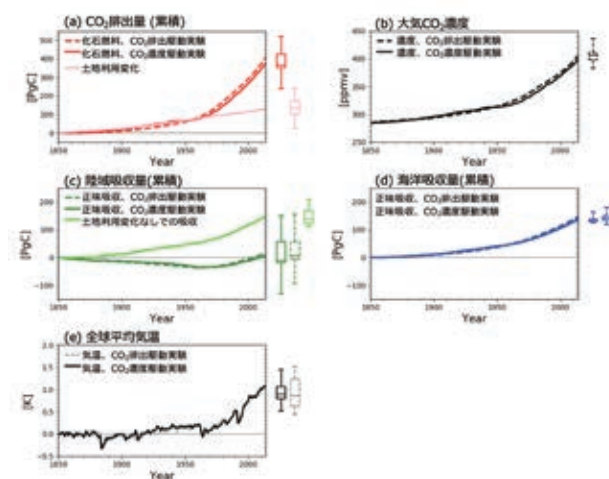


図9：世界で開発されている複数地球システムモデル（12モデル）の統合分析の結果。今後推定される人為CO₂排出量に基づく気候変動予測（破線）では、従来型予測（実線）では考慮できなかった炭素循環（CO₂濃度）の予測不確実性（黒の箱ひげ図）も、その予測結果にきちんと反映されるようになる。

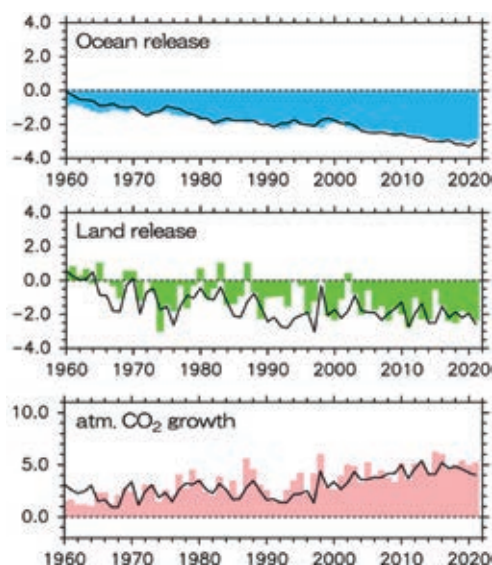


図10：地球システムモデルにデータ同化システムを組み込むことにより可能となった、精緻な過去の炭素収支変動の再現結果。上から、海洋、陸域、人間活動による放出量（単位はPgC/yr、正の値が大気への放出）。

地球システムのティッピングポイントとオーバーシュートシナリオ

横畠 徳太（課題2）、草原 和弥（課題2）、Irina Melnikova（課題2）、立入 郁（課題2）、渡辺 真吾（課題2）

世界平均気温が上昇を続け、社会に様々な問題が生じています。気温上昇が続くことによって近年懸念されていることが「ティッピングポイント」を超えてしまうことです。ティッピングポイントとは、地球システムの要素が、自己永続的・急激・不可逆な変化を引き起こす閾値として定義されます（Global Tipping Point Report 2023）。そのような変化が起こり得る地球システムの要素を「ティッピングエレメント」と呼ぶこともあります。

世界最大の熱帯雨林であるアマゾン、多種多様な生態系を擁しますが、気候変動に伴う乾燥化によって、多くの植物が枯れて死んでしまう（枯死してしまう）ティッピングポイントがあるのではないかと懸念されています。これに関連して、私たちは最新の地球システムモデルによる長期予測の分析を行ったところ、気候変動を止める取り組みが実施されない場合には、多くのモデルで21世紀中にアマゾン熱帯雨林の枯死が始まってしまうことがわかりました（図11）。

一方、極域にも様々なティッピングエレメントがあり、北極・南極海の海氷や、グリーンランド・南極の氷床が、近年加速度的に減少していることが報告されています。これに関連して、私たちは近年の南極海氷の急減のメカニズムについ

て、海氷海洋モデルによる分析を行いました。南極海氷の急激な減少をもたらしている主要因は、海氷縁での大気-海洋相互作用による強い温度上昇であり、暖められた表層水が海氷を融解することで、海氷の急減をもたらしていることがわかりました（図12）。

このように、地球温暖化に伴い大きな地球システムの変化が生じてしまうことが懸念されています。このようなリスクを回避するために考えられているのが「オーバーシュートシナリオ（地球の平均気温がパリ目標の気温を超えてしまった後に、気温を低下させることによって目標を達成するシナリオ）」です。地球の気温を低下させるためには、空気中の二酸化炭素濃度を下げる必要があります。このようなシナリオを実現することは容易なことではありませんが、地球温暖化の問題を回避するための方法として、様々な観点から科学的に検討することが重要な課題だと考えられています。

■ 引用文献

Global Tipping Point Report 2023 <https://report-2023.global-tipping-points.org/>

Melnikova et al. (2025) <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02606-5>

Kusahara and Tatebe (2025) <https://doi.org/10.1029/2025GL115256>

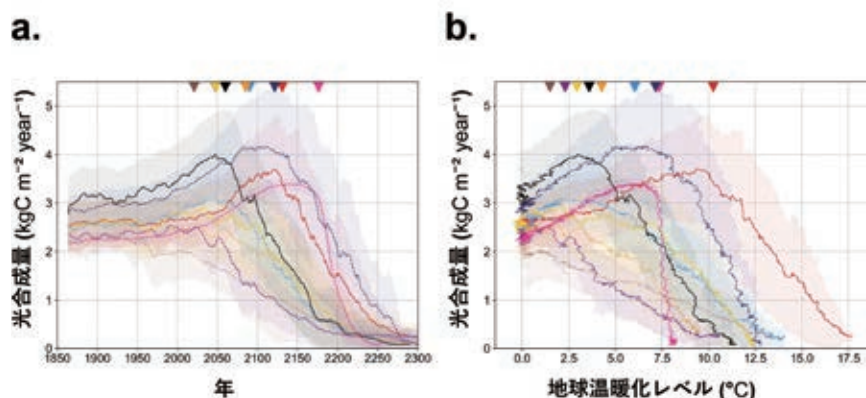


図11：地球システムモデルによるアマゾン枯死域における平均光合成量の変化。(a) 1850年から2300年までの変化、(b) 1850年～1899年の平均からの全球地表気温変化（単位は℃）に対する変化を示す。曲線の色は、世界で開発された異なるモデルの結果を示し、パネル上部の逆三角形は、それぞれのモデルにおいてアマゾン熱帯雨林の枯死が開始する時期を示す。Melnikova et al. (2025) の図を改変して作成。

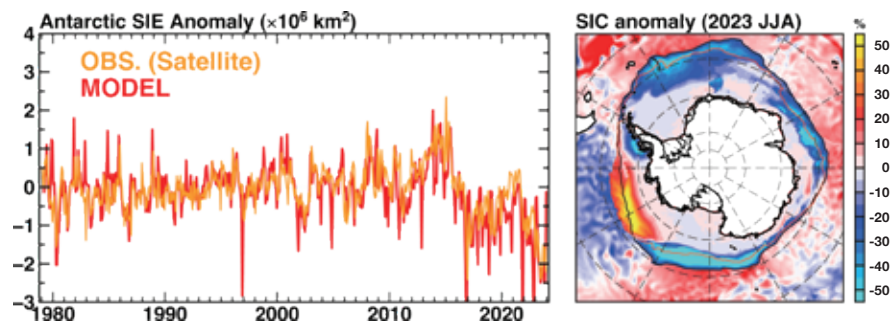


図12：南大洋における海氷の変化。左図は南大洋全体の海水面積（SIE, Sea-Ice Extent）偏差、右図はモデルで再現した2023年の海水氷密度（SIC, Sea-Ice Concentration）偏差を示す。2016年を境に海水面積が大幅に減少していることが分かる。右図では、海水氷縁より北側に表層水温偏差（暖色：正、寒色：負）を重ねており、海水氷偏差と表層水温偏差が対応して変化している様子が確認できる。図は Kusahara and Tatebe (2025) を改変して作成。

全球規模の気候変動の要因理解と予測

小坂 優（課題1）、小倉 知夫（課題1）

気候モデルは気候予測に不可欠ですが、予測には不確実性があります。観測データと気候モデルを組み合わせた過去の変動の要因理解は、予測の信頼性確保と不確実性低減に有用です。先端プログラムで実施したそのような研究を2つ紹介します。

2022～23年に観測された全球エネルギー吸収急増の要因

地球に入射する正味太陽放射と地球から射出される赤外放射の差である全球エネルギー非平衡（EEI）は地球温暖化と密接に関連します。2022～23年にかけてEEIは著しく増加しました（図13）。これは2023～24年の記録的に高い全球平均気温や世界各地で頻発した極端現象の一因になったと考えられます。

CMIP6データの解析から、極端に大きなEEI事例は先行して多年ラニーニャを伴うことが分かりました（図13）。また多年ラニーニャは単年ラニーニャに比べてより大きなEEI増加を衰退期に伴うことも分かりました。従って2020～23年にかけて3年続いたラニーニャ現象が人為起源影響に重畳し、EEI急増をもたらした主因だったと示唆されます。地球温暖化に伴って多年ラニーニャの頻度が増す可能性が指摘されており（Geng et al. 2023）、2023～24年に観測されたような急激な全球気温上昇も頻発する可能性が示唆されます。

極端降水量の予測の不確実性低減

地球温暖化が進むことで強い雨はより強くなり、水害が深刻化すると考えられています。しかし、どれほど雨が強くなるかについては、複数の気候モデルの間で予測の結果が大きくばらつきます。このような不確実性（ばらつき）があることで、気候変動への対策を決定することが難しくなります。従って、気候予測の不確実性を理解し低減することは、科学的に重要であるだけでなく、国民の生活と安全にも寄与します。本プログラムでは、気候モデルの出力と観測データの比較により、気候予測の不確実性を低減する手法を開発しました。その結果、極端降水量の将来変化について、予測の不確実性を従来と比べて大幅に低減することに成功しました（図14）。これにより、水害対策に関わる政策決定者へ、極端降水についてより精度の高い情報を提供できるようになりました。今後は、この分析手法を様々な気候変数に適用することで予測の不確実性をさらに低減し、政策決定者と次期IPCC報告書に科学的な知見を提供していきたいと考えています。

■ 引用文献

Geng et al. (2023) <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06236-9>
Shiogama et al. (2025) <https://doi.org/10.1038/s41467-025-60385-1>
Tsuchida et al. (2026) *in press*

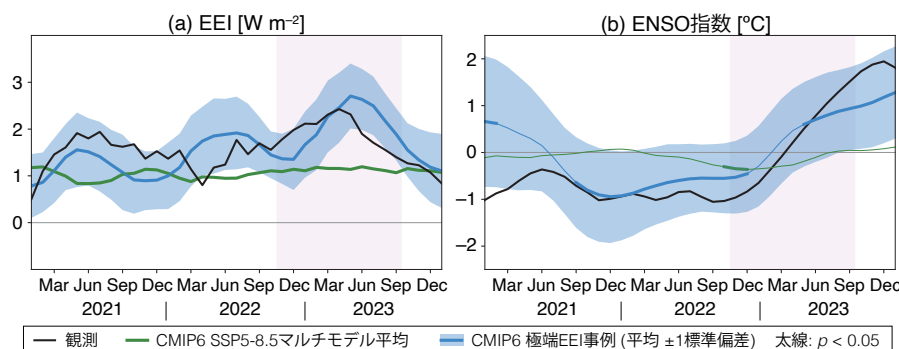


図13：(a) EEI変動と(b) エルニーニョ・南方振動指数。黒線は2021年1月から2024年1月までの観測値、青線と陰影はCMIP6モデルによる高排出シナリオ実験のうち、紫の影で示した期間に極端に大きなEEIを示す事例群に基づく。EEIの平均的な季節サイクルは除去してある。Tsuchida et al. (2026) の図を改変。

極端降水量変化の予測不確実性の減少率

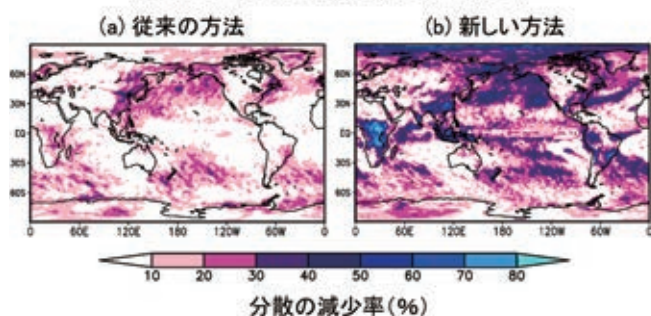


図14：21世紀後半までの年最大日降水量（年間で最も強い雨）の将来変化予測について、複数の気候モデル間のばらつき（不確実性）の減少率を示す。(a) が先行研究に基づく従来の方法で、(b) が新しく開発された方法。(a) よりも (b) の方が大幅に分散を低減できていることが分かる。Shiogama et al. (2025) の図を改変。

国際コミュニティへの貢献 (1) IPCC 評価報告書へのかかわり

渡部 雅浩（課題1）

IPCCは、世界気象機関(WMO)と国連環境計画(UNEP)によって1988年に設立された国際組織で、気候変動に関する科学的知見を評価し、各国政府の政策決定のための基礎を提供することを目的としています。IPCC傘下には3つの作業部会(WG)が設置され、本成果集でまとめている気候変動予測研究は自然科学的理解を対象とするWG1の報告書に多くが反映されてきました。IPCCによる評価報告書は、WGごとに世界各国から選出される200名を超える科学者が共同執筆するもので、これまで第一評価報告書(First Assessment Report, FAR, 1990年出版)から第6次評価報告書(Sixth Assessment Report, AR6, 2021年出版)まで、5〜8年のサイクルで更新されてきました。

日本の気候変動研究コミュニティがIPCCに貢献するには、多くの優れた論文を公表して評価報告書で引用されることが重要ですが、それだけでなく、執筆者として直接報告書の作成にかかわることも不可欠です。過去のWG1評価報告書には、日本から継続的に7〜10名の科学者が執筆に携わりました。現在執筆が始まっている第7次評価報告書(Seventh Assessment Report, AR7, 2028年出版予定)にも7名が選出されていますが、そのうち6名は先端プログラムの関係者です。ほかに、先端プログラムではこれまで、IPCCのデータ管理に関わるタスクグループメンバーや報告書受諾に係る政府代表団メンバーなどを輩出してきました。

最新報告書であるWG1 AR6では、全体で13,487本の膨大な論文が引用されています(Chavelli and Connors 2022)。このうち半数以上が国際共著論文であり、気候変動研究を国際コミュニティとの強い連携のもとで進める必要

性を示しています。被引用論文数を指標として国別の貢献度を見ると、米国が突出していますが、日本の研究論文は956本(全体の7.1%)が引用されています(図15)。この割合は、全分野での2019〜2021年の日本の論文数シェア4.8%(科学技術・学術政策研究所 2023)に比べると明らかに大きな数字です。IPCC評価報告書における日本発の被引用論文956本のうち、先端プログラムで独自にカウントしたところでは400を超える論文が文科省の気候変動研究プログラムの成果でしたが、AR6は2013年以降に発表された論文を主に引用するため、これは先端プログラムだけでなく、その前身プログラムからの貢献が含まれます。言い換えれば、継続的な研究プログラムが重要であることを意味しています。

IPCCの評価報告書は、各国政府、さらには次節で触れるCOPのような温暖化対策の国際交渉の場において最も信頼できる科学的エビデンスを提供してきました。そこに対する貢献は、日本の気候変動研究のレベルの高さを示すだけでなく、世界的なカーボンニュートラルへの流れに日本が貢献してゆく上で重要です。報告書で引用される論文だけでなく、執筆者を多く出してゆくためにも、文科省の気候変動予測研究プログラムの継続が望まれます。

■引用文献

Chavelli and Connors (2022) doi:10.5281/zenodo.7615825
科学技術・学術政策研究所(2023) https://www.nistep.go.jp/sti_indicator/2023//RM328_42.html

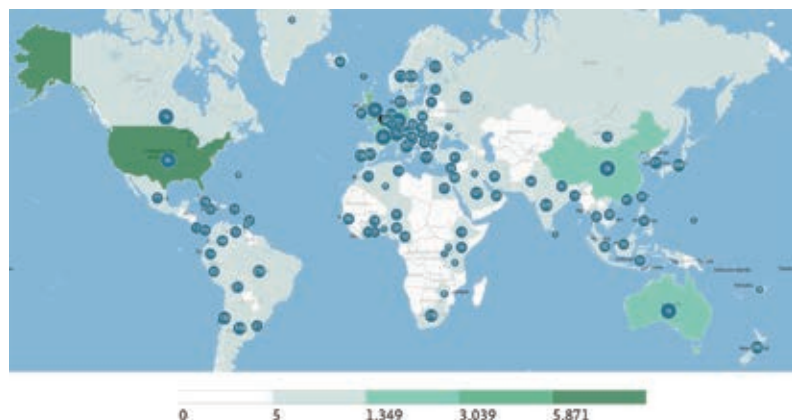


図15: (左) IPCC WG1 AR6における国ごとの被引用論文数 (Chavelli and Connors 2022より)、(右) AR6の日本人執筆者の顔ぶれ(第1回執筆者会合、筆者撮影)。

国際コミュニティへの貢献 (2) 世界気候研究計画への貢献

河宮 未知生 (課題2)

世界気候研究計画 (WCRP) は、気候科学に関する世界的な枠組みで、研究の方向性等を示すことで国際研究コミュニティの活動推進役を担っています (WCRP, 2025)。WCRPは、方向性検討の場としての“Digital Earths”等6つのLighthouse Activity (LHA) と呼ばれる活動単位と、そうした方向性に沿った研究を推進するCLIVAR等6つのコアプロジェクト (CP)、そして人材育成を担う「WCRPアカデミー」で構成され、それぞれ運営委員会や作業部会等が設置されています。先端プログラムからは、WCRP全体の運営委員会をはじめ、2つのLHA、2つのCPに計6人のメンバーが貢献しています。また別項で説明されているCMIPもWCRPの活動の一環です。CMIP7を始めるにあたり、実験遂行に関わる取り決めに検討するための9つのタスクチーム

が事前に設置されました。先端プログラムからは、このうち2つ、出力変数の統一と実験デザインに関わるタスクチームにそれぞれ1名ずつがメンバーに加わりました。さらに、2026年3月には“CMIP Community Workshop”が京都で開催され、CMIPに関心をもつ研究者らが世界から一堂に会しました。当該ワークショップの開催に際しては、先端プログラム参画者15名ほどで現地組織委員会を結成して運営にあたったほか、多くの参画者が発表を行っています。

■引用文献

World Climate Research Programme (WCRP), 2025. WCRP Science and Implementation Plan, First Edition. Publication 01/2025.

国際コミュニティへの貢献 (3) 国連気候変動枠組み条約への貢献

河宮 未知生 (課題2)

国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) は、温室効果ガスの大気中濃度の安定化を目的とした国際的な枠組みで、198の国と地域が参加しています。その目的達成のために年間を通じて様々な会合が開催されますが、なかでも締約国会議 (COP) は最大の会議です。先端プログラムが発足した2022年には、エジプトで開催されたCOP27のサイドイベントとしてJAMSTEC主催のセミナー「温室効果気体排出抑制とその影響：現状と将来展望」を企画し、先端プログラムの計画や前身の統合プログラムの成果の紹介を行いました (図16)。現地とオンラインを合わせ延べ150人近い聴講者を得ることができました。また2024年のアゼルバイジャンでのCOP29では、Earth Information Dayセッションにおける「緩和に資する観測」の分科会で課題2参画者が話題提供と議論の進行役を担当するなど存在感を示しました。また、各国の温室効果ガス削減目標の総計緩和目標との整合性を検討するGlobal Stocktakeにおいては、国際プロジェクトGlobal Carbon Project (GCP) が毎年公表するデータ論文Global Carbon Budget (GCB) が重要資料として扱われていますが、この資料においても先端プログラムで開発した地球システムモデルによる予測データが継続的に採用されています (Friedlingstein, 2023, 2025)。

■引用文献

Friedlingstein, P., et al., Earth Syst. Sci. Data, 15, 5301–5369, <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>, 2023.
Friedlingstein, P., et al., Earth Syst. Sci. Data, 17, 965–1039, <https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025>, 2025.



図16：COP27サイドイベントでのセミナーの様子。領域課題2代表者が趣旨説明をしているところ。

国内における貢献 (1) 社会への気候変動予測情報の提供

仲江川 敏之 (課題3)

1) 気候予測データセット2022

先端プログラムでは複数の気候予測プログラムとともに、科学的に解明すべき課題に取り組むため、気候モデルによる数値実験を行ってきました。具体的には、日本域の解像度2kmの力学的ダウンスケーリング、現在気候100メンバー・将来気候90メンバーという大規模アンサンブル実験、20世紀中ごろから今世紀末までの150年連続実験などが挙げられます。

一方、前節で取り上げた国連気候変動枠組み条約 (UNFCCC) や、日本での気候変動適応法、地球温暖化対策推進法等を背景に、気候変動対策に関する取組が官民両面で進んでいます。国においては河川整備基本方針や土地改良事業計画の策定、地方公共団体においては地域気候変動適応計画の策定や実施、民間企業においては「環境・社会・ガバナンス」を考慮したESG投資の拡大や、国際的なサステナビリティ開示基準による気候変動関連の情報開示等の取組が活発化しています。

これらの取組には気候変動予測データが必須です。そこで、官民の取組を促進するため、我が国の気候変動適応に資する予測情報を「気候予測データセット2022」としてまとめ、① 気候予測データセット ② 解説書 (予測結果の概要、データ利用ガイダンス) を整備し (文部科学省・気象庁、2022)、データ統合・解析システム (DIAS) と連携してユーザーに提供しています。

2) 日本の気候変動2025

文部科学省と気象庁は、日本の気候変動について、最新の観測結果や科学的知見を取り入れた「日本の気候変動2025—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—」を、2025年3月に5年ぶりとなる後継版として公表しました。本報告書は、様々な分野における日本の気候変動対策の効果的な推進に役立てることを目的としています。

本報告書では、「日本の気候変動2020」に新たな科学的知見と最新の観測データを反映し、主に次の新情報が加わっています。1) 極端な大雨の発生頻度や強度の変化、2) 極端な高温の発生頻度や強度の変化、3) 海洋の地球温暖化の進行具合を示す溶存酸素量の長期変化。

本報告書の将来気候予測は、これまでの気候予測プログラムで実施され、「気候予測データセット2022」に収録されているデータに基づいています。また、p.5でご紹介しているイベント・アトリビューション (EA) の成果も盛り込まれています。この他にも、先端プログラムを始めとする文部科学

省のプログラムで得られた最先端の科学的成果が反映されています。

■ 引用文献・関連文献

文部科学省・気象庁 (2022) 気候予測データセット2022, <https://diasjp.net/ds2022/>

文部科学省・気象庁 (2025) 日本の気候変動2025—大気と陸・海洋に関する観測・予測評価報告書—, <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ccj/index.html>



図17: 気候予測データセット2022関係図 (文科省・気象庁、2022) タイムスライズ実験は過去・将来共に20年の実験、連続実験は1951年から2100年までの実験、d4PDFシリーズは大規模アンサンブル実験。

▼は力学的ダウンスケーリングのネスティング関係、DDSは力学的ダウンスケーリング、SDSは統計的ダウンスケーリング (バイアス補正を含む)、解析はバイアス補正や台風トラек、低気圧の抽出等、データを解析したことを示す。



図18: (左)「日本の気候変動2025」本編と詳細編、(右) 都道府県別リーフレット

国内における貢献 (2) 研究成果の社会実装

森 信人 (課題4)

先端プログラムと、そこに至るまでの過去の研究プログラムによる気候変動に伴う風水害リスクの予測結果、またそれに関連する知見は、治水、都市浸水、砂防そして海岸保全等の水害に関わる社会基盤インフラ整備の適応政策に活用され、現実の社会実装につながっています(石井・森、2022)。

予測研究の成果が風水害に関する政策に取り入れられて、インフラ整備等の社会実装につながるまでにはいくつかの段階があります。図19に、水害に関する社会実装のプロセスを簡略化して示します。各地域、流域もしくは海岸区分の整備計画のアップデート(気候変動適応計画)を進めていくためには、中央省庁で委員会・検討会等を開催して国全体の基本方針を検討し、その内容を提言もしくは報告書の形で取りまとめることが必要となります。このような委員会・検討会の場合、研究者が専門家として加わるとともに、データの解析等は建設コンサルタントが担当することが一般的です。委員会・検討会では、気候変動予測データの解析方針や解析結果を議論するとともに、現状の整備方針を踏まえて将来変化の特性を考慮する方針が議論されます。このため、気候変動予測だけでなく、対象とする事業に精通した専門性が必要となります。表1に示すように、2020年前後の統合プログラムのフェーズにおいては中央省庁の水害に関わる提言や委員会が数多く検討されました。そして2022年以降の先端プログラムでは、国全体の方針をもとに地方や都道府県(以下、「地域」と言います)の基本計画や整備計画が策定される

フェーズとなっています。このような継続的な貢献の中で、先端プログラムでは地域毎の基本計画・整備計画に関する委員会等35件に参画研究者が委員として参加しています。

地域毎の基本計画・整備計画の策定においても検討委員会・部会が設置されますが、ここでも研究者が専門家として参加し、d4PDF(p.4参照)や先端プログラムで作成された気候予測データや解析方法について紹介・助言を行うことで、最新の研究成果が社会実装され、私たちの実生活・実社会へ役立てられていくよう牽引する役割を務めています。また、検討委員会・部会でのデータの解析等は建設コンサルタントが担いますが、こういった実務を担う方々へ向けた積極的な情報交換や啓発もまた重要です。領域課題3・4では、建設および環境コンサルタントや損害保険会社等の技術者を対象としたテクニカルな内容のユーザーワークショップを毎年1回開催しており、累計500名以上の参加者を集めています。

これらに加えて、たとえば損害保険会社など民間企業での気候リスク評価等、気候変動に関わるデータの社会での活用先は幅広く、様々な分野で活用されるように各所で情報交換を行い、研究成果の社会実装を展開しています。

■引用文献

石井正好・森信人(2022) 地球温暖化対策に資するアンサンブル気候予測データベースの開発と気候変動リスク評価研究成果の社会実装. https://doi.org/10.24761/tenki.69.8_413

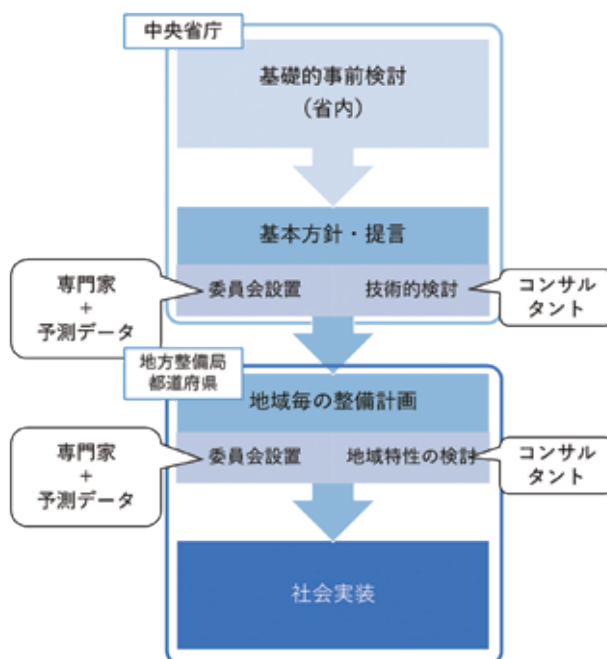


図19：風水害に関わる気候変動適応計画策定の流れ

表1：水害に関わる提言および委員会等

2019年	国土交通省	気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会 「気候変動を踏まえた治水計画のあり方」提言
2020年	農林水産省・国土交通省	気候変動を踏まえた海岸保全のあり方検討委員会 「気候変動を踏まえた海岸保全のあり方」提言
2020年	国土交通省	気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会 「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方」提言
2020年	国土交通省	気候変動を踏まえた都市浸水対策に関する検討会 「気候変動を踏まえた下水道による都市浸水対策の推進について」
2020年	国土交通省	気候変動を踏まえた砂防技術検討会 「気候変動を踏まえた砂防技術検討会令和5年度版とりまとめ」
2023年	国土交通省	気候関連情報開示における物理的リスク評価に関する懇談会
2024年	農林水産省	農業農村整備における気候変動対策に関する検討会
2022～2025年	気象庁	気候変動に関する懇談会／評価検討部会
2022年以降 (2025年11月現在)	都道府県	地域毎の基本計画・整備計画に関する委員会等 北海道、青森県、岩手県、茨城県、千葉県、東京都、神奈川県、静岡県、 愛知県、三重県、石川県、滋賀県、京都府、京都市、大阪府、奈良県、 兵庫県、和歌山県、広島県、鳥取県、島根県、徳島県、愛媛県、高知県、 福岡県、沖縄県、関西広域連合

国内における貢献 (3) 公開シンポジウム等アウトリーチイベント

星川 右子（課題2）、河宮 未知生（課題2）

年度	開催日	題名	現地会場	参加者総数	YouTube再生*
公開シンポジウム					
令和4	2023年1月12日	気候変動で日本はどうか ～気候予測データセット2022の公表～	あり（55名）	496名	748回
令和5	2023年12月25日	教科書では分からない気候変動 ～最近の異常気象から長期対策の必要性まで～	なし	533名	1428回
令和6	2024年10月20日	昨日の豪雨は温暖化のサイン？ ～気候変動を科学する～	あり（19名）	245名	1287回
令和7	2025年8月20日	なぜ森は燃えるのか？ ～気候変動と林野火災のリアル～	なし	457名	940回
研究成果報告会					
令和4	開催なし				
令和5	2024年3月5日	令和5年度研究成果報告会	あり（27名）	260名	492回
令和6	2025年2月13日	令和6年度研究成果報告会	あり（21名）	347名	867回
令和7	2026年1月26日	令和7年度研究成果報告会	あり（24名）	400名	未公開**

* YouTube再生回数について

当日を含まない開催後の動画再生回数。2025年11月末時点。

ライブ配信アーカイブをそのまま掲載している回は総再生回数から当日再生回数を減算した。（シンポジウムR4年度－220件、R6年度－58件、成果報告会R5年度－74件）

**2026年1月時点

1

気候変動予測と気候予測シミュレーション技術の高度化(全球気候モデル)

実施責任者・課題代表：渡部 雅浩（東京大学大気海洋研究所 教授）

代表機関／東京大学大気海洋研究所 参画機関／海洋研究開発機構、国立環境研究所、気象業務支援センター

課 題	代 表 者
(i) 気候シミュレーション技術の高度化研究	
a 気候・炭素循環予測技術の高度化と予測情報の創出	建部 洋晶 海洋研究開発機構 センター長代理
b モデルと衛星データの融合研究による気候変化プロセスの理解	鈴木健太郎 東京大学大気海洋研究所 教授
c 陸域環境変化の理解と予測	芳村 圭 東京大学生産技術研究所 教授
(ii) 地球システム変動の要因分析と予測	
a 温暖化レベルの理解と予測不確実性の低減	小倉 知夫 国立環境研究所 室長
b 過去から将来の気候変動のメカニズム理解	小坂 優 東京大学先端科学技術研究センター 准教授
c イベント・アトリビューション研究の深化と発展	今田由紀子 気象業務支援センター 研究員

2

カーボンバジェット評価に向けた気候予測シミュレーション技術の研究開発(物質循環モデル)

実施責任者・課題代表：河宮 未知生（海洋研究開発機構 変動海洋エコシステム高等研究所 研究部門 調査役、東北大学 教授）

代表機関／海洋研究開発機構 参画機関／国立環境研究所、電力中央研究所

課 題	代 表 者
(i) 階層的アプローチによる先端的地球システムモデリング	
a 生態系・物質循環プロセスの高度化	羽島 知洋 海洋研究開発機構 グループリーダー代理
b 気候モデルエミュレータによる知見統合	筒井 純一 電力中央研究所 首席研究員
(ii) 包括的な地球気候システム研究のための基盤構築	建部 洋晶 海洋研究開発機構 センター長代理
(iii) 地球-人間システムの相互作用および将来シナリオ分析	
a 地球-人間システムのフィードバック解析	立入 郁 海洋研究開発機構 グループリーダー
b 地球-人間システムの将来シナリオ分析	横畠 徳太 国立環境研究所 主席研究員
(iv) 領域課題間連携のための技術・事務支援	河宮未知生 海洋研究開発機構 調査役／東北大学 教授

3

日本域における気候変動予測の高度化

実施責任者・課題代表：辻野 博之（気象業務支援センター 研究推進部 第1研究推進室長）

代表機関／気象業務支援センター 参画機関／北海道大学、東北大学、海洋研究開発機構、名古屋大学

課 題	代 表 者
(i) 日本域気候変動の予測システム開発とメカニズム解明	辻野 博之 気象業務支援センター 室長
a 全球高解像度気候変動予測システム開発(全球班)	水田 亮 気象業務支援センター 研究員
b 日本域大気・陸面変動予測システム開発(領域班)	川瀬 宏明 気象業務支援センター 研究員
c 日本域海洋変動予測システム開発(海洋班)	中野 英之 気象業務支援センター 研究員
d 統合的解析による日本域気候変動メカニズム解明(解析班)	石川 洋一 海洋研究開発機構 部門長
(ii) 地域・流域の適応策推進に向けた気候変動予測情報の創出・極端現象メカニズムの解明	遠藤 洋和 気象業務支援センター 研究員
a 高解像度データセットと力学的・統計的情報を統合した予測手法の開発	山田 朋人 北海道大学大学院工学研究院 教授
b 近年の極端気象に影響を及ぼす気候気象要因の分析	山田 朋人 北海道大学大学院工学研究院 教授
c 地域・流域スケールにおけるリスク増大・最大規模を考慮した極端現象のメカニズム解明	坪木 和久 名古屋大学宇宙地球環境研究所 教授
(iii) 海外の脆弱地域における高精度気候予測データセットの創出	川瀬 宏明 気象業務支援センター 研究員
ワークス「プロダクツ利活用促進」	山崎 剛 東北大学大学院理学研究科 教授
	村田 昭彦 気象業務支援センター 研究員
	仲江川敏之 気象業務支援センター 研究員

4

ハザード統合予測モデルの開発

実施責任者・課題代表：森 信人（京都大学防災研究所 教授）

代表機関／京都大学 参画機関／東京大学、北海道大学、土木研究所ICHARM、農業・食品産業技術総合研究機構

課 題	代 表 者
(i) 統合ハザードモデル開発と全国規模の将来予測	佐山 敬洋 京都大学防災研究所 教授
(ii) 精緻なハザードモデル開発とメカニズムの解明	田中 賢治 京都大学防災研究所 教授
a 風水害・水資源に関するハザード評価	田中 賢治 京都大学防災研究所 教授
b 森林・沿岸生態系に関するハザード評価	藤井 賢彦 東京大学大気海洋研究所 教授
(iii) 激甚化する災害ハザードの温暖化要因の定量化	竹見 哲也 京都大学防災研究所 教授
(iv) アジア太平洋地域でのハザードおよびリスク評価と国際協力	立川 康人 京都大学大学院 工学研究科 教授
(v) ハザード・社会の将来変化に対応できる適応戦略	藤見 俊夫 京都大学防災研究所 准教授

PD・PO・アドバイザー

PD (プログラム・ディレクター) 木本 昌秀

東京大学 名誉教授

アドバイザー 住 明正

東京大学 名誉教授

PO (プログラム・オフィサー) 岩崎 俊樹

東北大学大学院 名誉教授・学術研究員

PO (プログラム・オフィサー) 中北 英一

京都大学 総長特別補佐・名誉教授 / 日本気象協会 常勤顧問

日本における気候変動予測研究のさらなる発展に向けて

今田 由紀子（課題1）、建部 洋晶（課題1・2）、辻野 博之（課題3）、森 信人（課題4）

2024年には、世界平均地表気温と大気中のCO₂濃度がともに観測史上最も高い値を記録し、産業革命前と比べた気温上昇幅はパリ協定の1.5℃目標を一時的に超えました。また、人為起源CO₂排出量の増加は続いており、気温の安定化目標を達成することはますます難しくなっています。さらに、社会に大きな影響を与える極端現象も目立つようになっており、防災・減災や水資源管理などに役立つ適応策と、排出削減などの緩和策の両方を支える、高い精度の予測情報への需要がこれまで以上に高まっています。

こうした背景を踏まえ、本プログラムで得られた成果を土台として、今後はまず、数年から数十年先までの気候を対象とした近未来予測の信頼性を高め、活用の幅を広げていきます。特に、国内外で増加しつつある未曾有の極端現象に備えるため、これまでの気候変動予測とEAで培った極端現象の分析手法を組み合わせ、極端現象の発生頻度や強度の変化をより正確に予測する研究を進めます。全球的な気候変動と地域スケールの極端現象をつなぐ一貫したメカニズムに基づく信頼性の高いリスク情報を提供することを目指し、気候・炭素循環変動予測システムの改良に取り組むとともに、d4PDFなど高解像度で多様な将来予測データセット

のさらなる活用と拡充を進めます。また、急速に発展しているAI気象予測技術を取り入れて日本域の予測データを充実させるほか、従来の力学的予測モデルを用いて高品質な参照データを創出します。これらの取り組みにより、本プログラムの進展とともに実現しつつある確率的な予測情報に基づく統合的なハザード評価を加速させ、豪雨雪や異常潮位など、我が国が直面する極端現象への具体的な適応策策定に貢献します。適応策のための研究開発と同時に、炭素排出削減の効果や緩和策の妥当性を検証するための予測研究も進めます。ここでは、気候システムの回復や安定化に関わる人為・自然それぞれの炭素吸収源をより深く理解し、実現可能で副作用の少ない緩和シナリオの設計に役立つ知見を生み出すことを目指します。

これらの取り組みによる成果を統合して、予測科学に革新をもたらす契機とするとともに、気候変動下での健康リスク、一次産業や金融の損失リスクなどのこれまで考慮されてこなかった課題も含めて評価できる次世代の予測エコシステムの構築を進めます。研究連携を広げることで、気候研究者と異分野の研究者・実務者の新たな協働のあり方を示し、社会の適応策・緩和策に直結する知識の創出を加速していきます。



文部科学省

MINISTRY OF EDUCATION,
CULTURE, SPORTS,
SCIENCE AND TECHNOLOGY-JAPAN

お問い合わせ



気候変動予測先端研究プログラム
MEXT-Program for The Advanced Studies
of Climate Change Projection (SENTAN)

文部科学省 研究開発局環境エネルギー課
〒100-8959 東京都千代田区霞が関三丁目2番2号
<https://www.mext.go.jp/>

気候変動予測先端研究プログラム事務局 海洋研究開発機構
〒236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町3173番25
e-mail : sentan-info@jamstec.go.jp