

終了成果報告資料 環境問題対応型研究（一般課題）

- 課題番号 【2-2202】
- 体系的番号 JPMEERF20222002
- 課題名 「**極端気象の将来変化に関する物理的理解に基づく予測不確実性を低減した情報伝達**」
- 課題代表名 高薮 縁
- 課題代表機関名 東京大学

- 研究実施期間 令和4（2022）年度 ～ 令和5（2023）年度
- 研究体制

サブ1－1	高薮 縁	東京大学大気海洋研究所
	芳村 圭	東京大学生産技術研究所
サブ1－2	中村 尚	東京大学先端科学技術研究センター
サブ2	堀之内 武	北海道大学地球環境科学研究所
サブ3	仲江川 敏之	気象庁気象研究所
サブ4	塩竈 秀夫	国立環境研究所

1. はじめに（研究背景等）

- 気候変動という不確実性の下で、安全で持続可能な社会を担保するためには、より定量的な温暖化影響評価情報に基づく適応策の最適化が必要である。特に、すでに世界の各地で顕在化している極端気象についての社会の脆弱性に対する不安が大きい。甚大な被害をもたらした2018年の西日本豪雨と続く猛暑とは、気候変動影響の深刻さを顕在化し社会に大きなショックを与えた。
- 以降、日本は毎年のように大規模な洪水や猛暑に悩まされている。IPCCの第6次評価報告書においても、世界の多くの地域で猛暑や豪雨の増加が報告されているが、それらの仕組みの物理的理解は不十分で、世界の最先端モデル群による比較実験CMIP6をもってしても、将来変化予測にはばらつきが伴い不確実性が大きい。
- 本課題のチームでは、前期推進費課題(2-1904)「気候変動影響評価のための日本域の異常天候ストーリーラインの構築」を実施した。そこでは日本域の異常天候についてCMIP6モデル群から将来予測のばらつきを代表できる5モデルを統計的に選択すると共に、異常天候の将来変化に関してどのようなことが起こりうるかを説明する「ストーリーライン」を構築し、地球温暖化影響評価研究（S-18）に情報提供してきた。

2. 研究開発目的

- 地域の極端現象の発現には、気温・海面水温や水蒸気量など熱力学的状態の変化と、循環や大気波動などグローバルな力学的変化との双方が作用する。研究代表者らが2019-2021年度に実施した推進費「ストーリーライン」研究課題では、**日本の社会に大きな影響を及ぼす豪雨や猛暑などの異常天候の将来変化について**、海面水温や大気上層循環等の大規模場の遠隔影響を解析し、最新のCMIP6モデル群のばらつきによる不確実性の度合も含めて評価し、地球温暖化影響評価研究（S-18）に情報提供した。
- **本課題では次のステップとして、不確実性を低減した情報提供を目指す。**そのため、CMIP5,CMIP6気候モデルデータ、全球再解析データ、衛星観測データ等を利用し、まず、気候変動に伴う海面水温・気温上昇が、直接または大気循環の変化による遠隔影響を介し、日本域やアジア域の**極端現象をいかに変化させるかを物理的に解釈し定量化**する。さらに、**その知見に基づきCMIP6モデル群のもつ将来変化の幅について定量的に制約を課し、将来予測の不確実性を低減**する。得られた知見を水文モデル等の影響評価研究グループと共有し、気候変動影響を社会により密接な情報として伝達する。
- 以上の目標を達成するため、本提案は以下の**4つのサブ課題で構成**する。（サブ1）極端気象に関する予測不確実性低減と水文研究への連携。（サブ2）成層圏と対流圏上層ジェットの遠隔影響に関する予測不確実性低減。（サブ3）アジアモンスーン・熱帯域の温暖化予測不確実性の低減を踏まえた東アジアでの気候変化予測。（サブ4）トップダウンアプローチによる予測不確実性低減と影響評価・適応研究への連携研究。影響評価研究への情報伝達はサブ4が、特に水文モデル研究への情報伝達はサブ1が担う。さらにサブ1は4サブ課題を総括し、環境政策等に貢献する情報を抽出する。

3. 研究目標及び研究計画

- 本課題では、不確実性を含む極端気象の将来予測について物理的合理性を考慮した解析をすることで、不確実性を低減したより精緻で信頼性の高い知見を抽出する手法を開発し、その結果を、水文モデル研究を含む気候変動影響評価研究に情報提供することで、よりの確な適応策の実施に貢献することを目標とする。
- 具体的には、気候変動に伴う豪雨や熱波などの極端現象の分布や特性の変化について予測の不確実性を低減した情報を得るため、CMIP5,CMIP6気候モデルデータおよび全球再解析データ、衛星観測データ等を利用し、地域的な極端気象とグローバルな熱力学的状態や大気循環の変化との相互関係の物理的な理解を深め、あり得る将来変化の範囲をより定量的に求める解析手法を開発する。その結果をサブテーマ1の水文モデル研究者やサブテーマ4のメンバーが参加する影響評価研究課題（推進費S-18）の影響評価研究者と共有し、社会に密着した情報伝達を可能にすることを目指す。
- アウトプットとして、推進費S-18にCMIP6モデルによる複数の極端気象に関するCMIP6の不確実性低減情報を渡すと共に、2年間の計画実施中に、国際誌に16報以上の学術論文を発表、国民との対話の機会を毎年持つことを目標とする。アウトカムとして、地域気候変動適応計画策定マニュアルp.4における「気候変動影響評価と見直し」の項目に資すること、CMIP6の不確実性を低減した結果を河川や陸面状態に関する将来予測情報として社会に発信することで気候変動の影響について一般市民がより身近なものとして捉えることを可能にし、気候変動緩和策、適応策に対する理解と積極的な行動を促すことに貢献する。

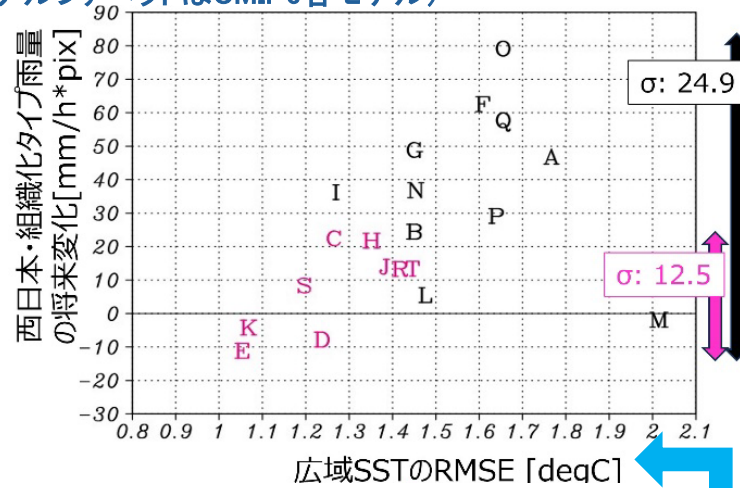
4. 研究開発内容

研究目標達成のため、各サブテーマは以下の研究開発に取り組み、情報交換をして総括した。

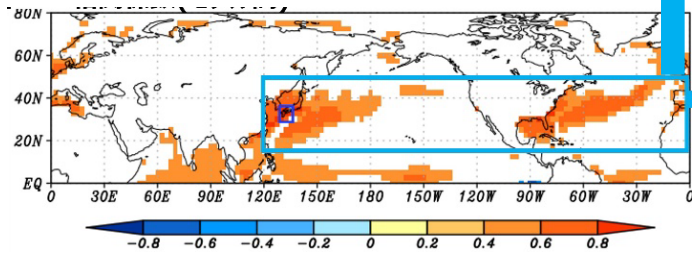
- サブ1-1では、世界の気候モデル実験CMIP6において西日本の大雨の将来変化予測のばらつきをもたらす大規模環境場の違いを調べ、物理的考察に基づき不確実性の低減に資する情報を抽出した。また、長期再解析気象データ、衛星降雨観測データを用い、全球の海陸の降雨強度が大規模環境場（上空の水蒸気量、大気安定性）にいかに関与するかを定量化し、その手法でCMIP6での降雨強度と環境場との関係性を評価した。また、梅雨期の九州豪雨の階層構造、秋雨期の広域豪雨をもたらす大規模擾乱構造の特徴を求め、豪雨発生メカニズムの物理的理解を深めた。
- サブ1-1ではまた、気候モデル用のダウンスケーリング・バイアス補正手法を開発した。さらに本手法を実施したCMIP6モデルの出力データのダウンスケーリング・バイアス補正值を水文モデルに適用し、観測と比較しながらパフォーマンスを評価した。観測値との比較やオリジナルCMIP6モデルとの将来変化の特性を調査することにより、本手法の信頼性向上や課題を明確にできた。
- サブ1-2では、日本に極端気象をもたらす遠隔影響パターンや日本付近のストームトラック活動の温暖化による変化をCMIP6データやd4PDFを用いて解析し、その信頼性をモデル間の一致度や現在気候の再現性と関連付けて評価した。
- サブ2では、CMIP6などの気候モデルの出力を用い、上部対流圏から成層圏にかけての温度場や大規模循環の変化が東アジアの降水と極端現象に及ぼす影響のメカニズムを体系化した。各種観測データを用いた現在気候における気候モデルの特性の評価と合わせて、現実的にあり得る気候変動の幅を評価した。
- サブ3では、温暖化トレンドが顕在化した1980年代以降の観測や再解析の気候とその変動や長期変化についてメカニズムを理解し、CMIP6マルチモデルアンサンブルによる予測(ストーリーライン)の幅を絞る事に取り組んだ。
- サブ4では、全球平均気温など全球スケール現象の予測不確実性低減の影響が、日本やアジア太平洋域における様々な気候変数や重要な極端現象指数の不確実性低減にどのように波及するのかを調べた。

梅雨期の広域豪雨の予測不確実性低減

(Yokoyama et al. in prep.)

西日本・組織化タイプ雨量の将来変化と広域SST分布の関係
(アルファベットはCMIP6各モデル)

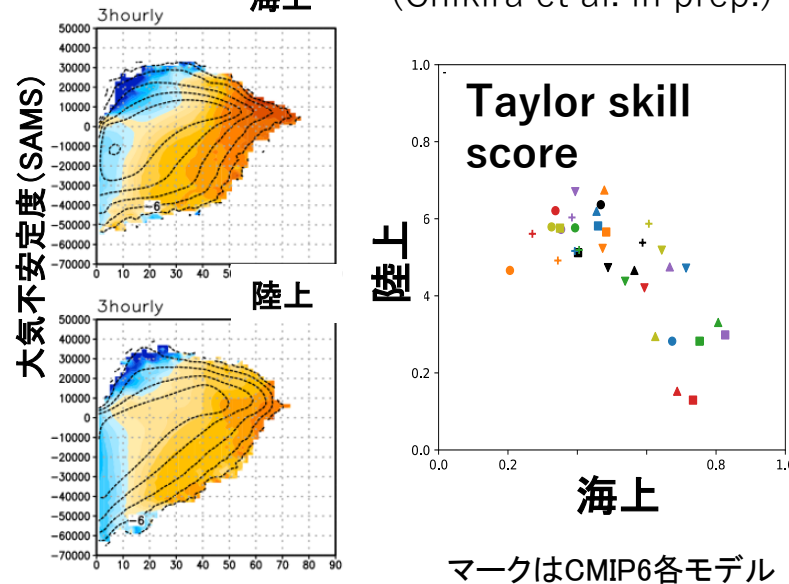
各地点SSTの西日本SSTとの相関



- 西日本の広域豪雨の将来変化予測は、亜熱帯ジェットを介して、CMIP6モデルの広域海面水温の再現性に依存することを発見
- この観点から、西日本広域豪雨の予測不確実性を低減できることを示唆

CMIP6モデルの極端降水のパフォーマンス評価

(Chikira et al. in prep.)



自由大気水蒸気量(FPW)

(左図)衛星観測による降水強度の環境場依存性。(色が降水強度ログ表現)。(右図)左図に基づく降水強度環境場依存性のCMIP6モデルパフォーマンス。

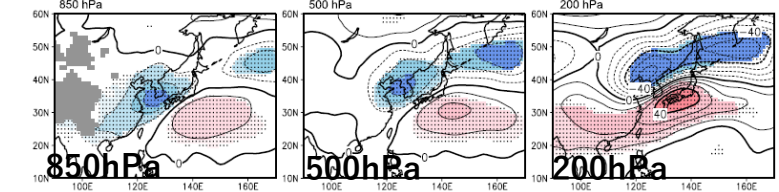
- 衛星観測による降水強度について、自由大気水蒸気量と大気不安定度に対する統計的関係を抽出
- 上に基づきモデルの極端降水の表現の客観的評価手法を開発
- 海陸双方で高スコアを持つCMIP6モデルは存在しない。海陸差をもたらすキーメカニズムの解明が必要

秋雨期と梅雨期の広域豪雨の大規模場の比較

梅雨/西日本

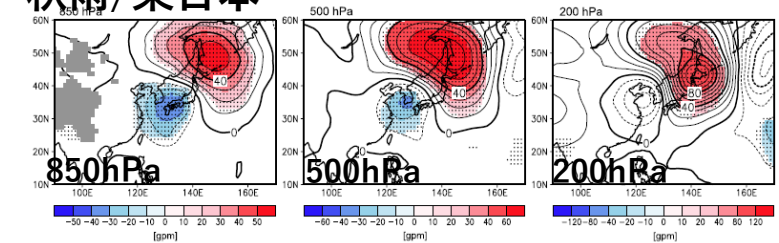
(Narita and Takayabu 2024)

(a) Baiu / WJPN



秋雨/東日本

(b) Akisame / EJPN

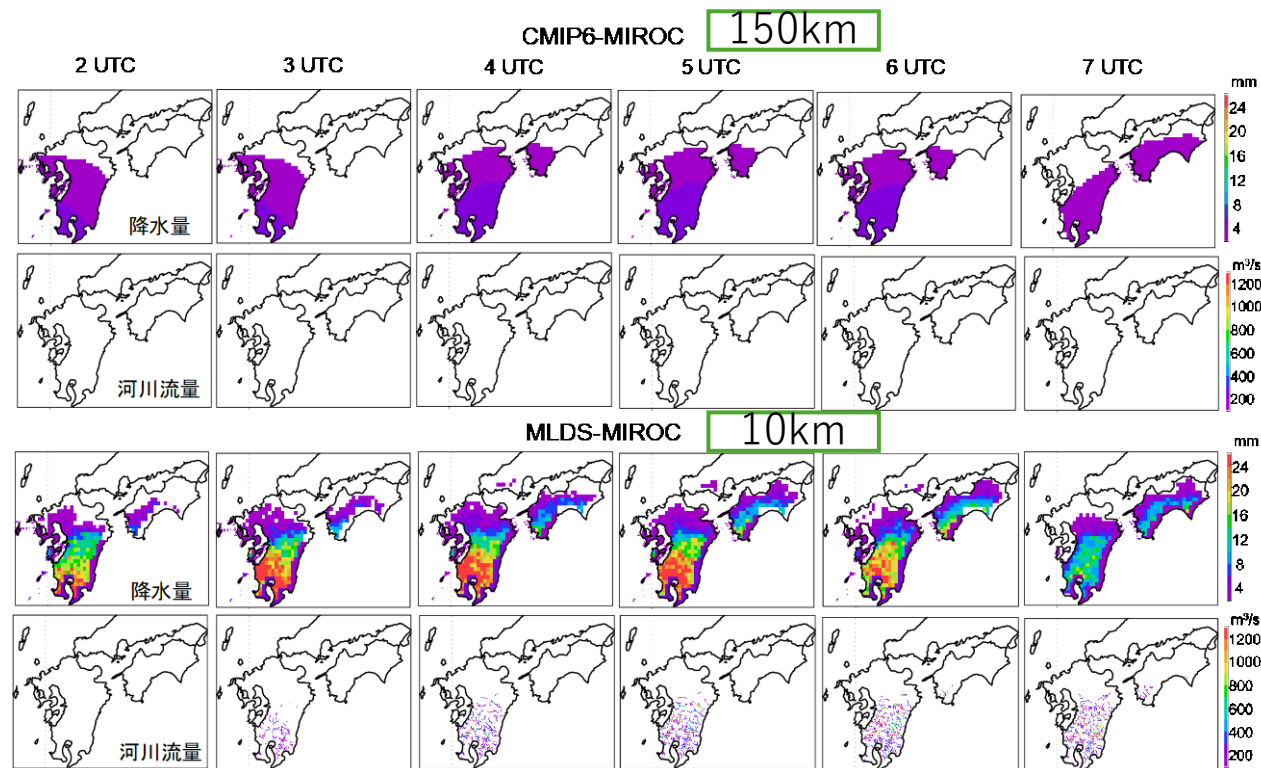


(図)広域豪雨をもたらす大気擾乱の高度偏差(気圧配置にあたる分布)

- 秋雨期の広域豪雨は、梅雨とは異なる気候場と大気擾乱との重ね合わせで発生することを示した
- 秋雨期の気候場：東方にシフトした亜熱帯高気圧と大陸上の高気圧に挟まれ、東日本に向けた北向き水蒸気輸送が卓越。
- 秋雨期の広域豪雨の擾乱構造：北東-南西方向の双極子構造をもつ擾乱の気圧配置により、東日本への水蒸気輸送が強化。

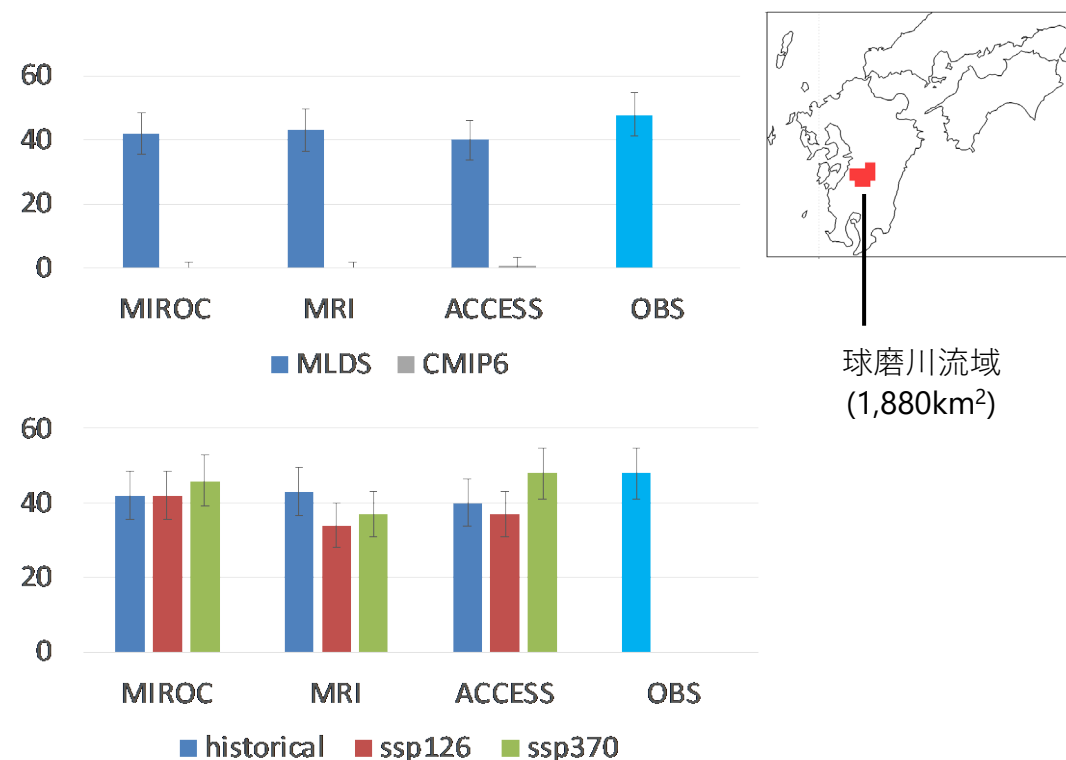
5. 結果及び考察(2/6) サブ1-1B 機械学習ダウンスケーリングによる気候予測データを用いた河川流量予測

熱帯性擾乱通過時の降水量と河川流量の時間変化



- 機械学習ダウンスケーリングを全球気候モデル(CMIP6)に適用し、150kmから10kmの高解像度化を実現
- ダウンスケーリングにより熱帯性擾乱通過時の降水とそれに対応する河川流量分布の時間変化特性が再現

球磨川流域(横石)における7月の1,200m³/s以上の頻度(30年間)



複数モデル、複数シナリオのダウンスケーリング推定値を陸面モデル(ILS)に適用し、球磨川流域の河川流量を評価。

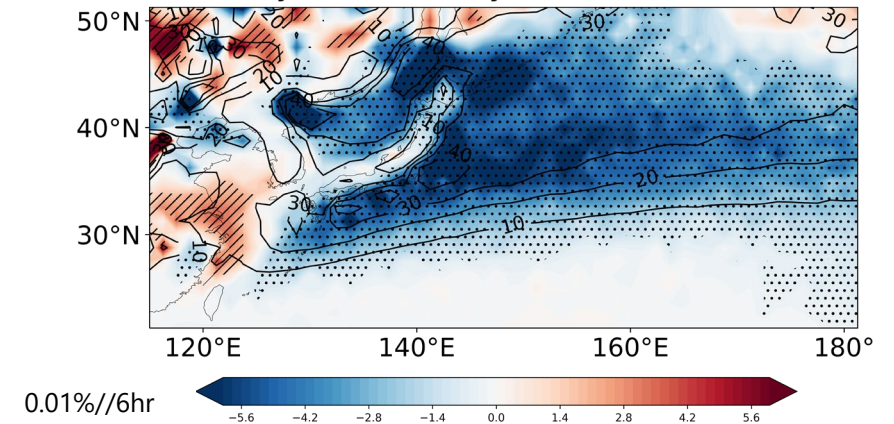
- ✓ ダウンスケーリングにより1,200m³/s (99パーセントに相当) 以上の頻度が大きく改善。historicalでは観測と統計的に差がないことを示した。
- ✓ 一方で、温暖化シナリオ (ssp126, ssp370) による気候変化特性はモデル間でも統計的に差が見られない→アンサンブル実験の必要性を示唆。

本手法を利用したバイアス補正と高解像度化により、極端降水イベントによる洪水リスク推定が可能に

5. 結果及び考察(3/6) サブ1-2: 大気海洋相互作用を伴う極端気象に関する予測とその不確実性

東京大学先端科学技術研究センター

d4PDF 4度昇温実験と現在気候実験
の2-4月の低気圧存在頻度の差



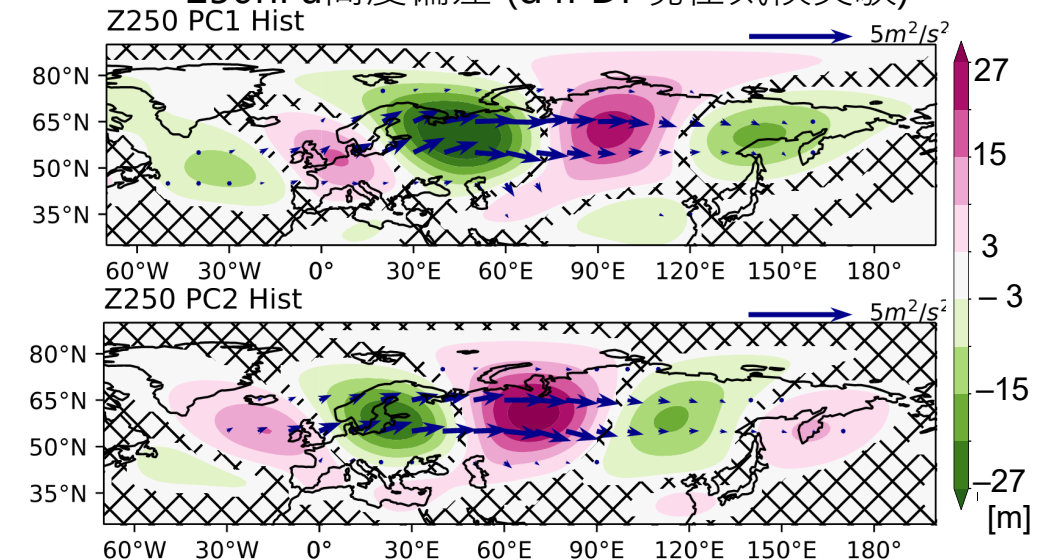
➤ 春季の「南岸低気圧」活動の予測可能性と将来変化

- ✓ 本州南岸の春の低気圧存在頻度は春に極大を示す
- ✓ d4PDFの大アンサンブルを用いた解析
 - 大気内部変動成分が支配的(分散の>93%), 海面水温・海氷から活動を予測するのは難しい
 - 温暖化時には春の南岸低気圧頻度が有意に低下

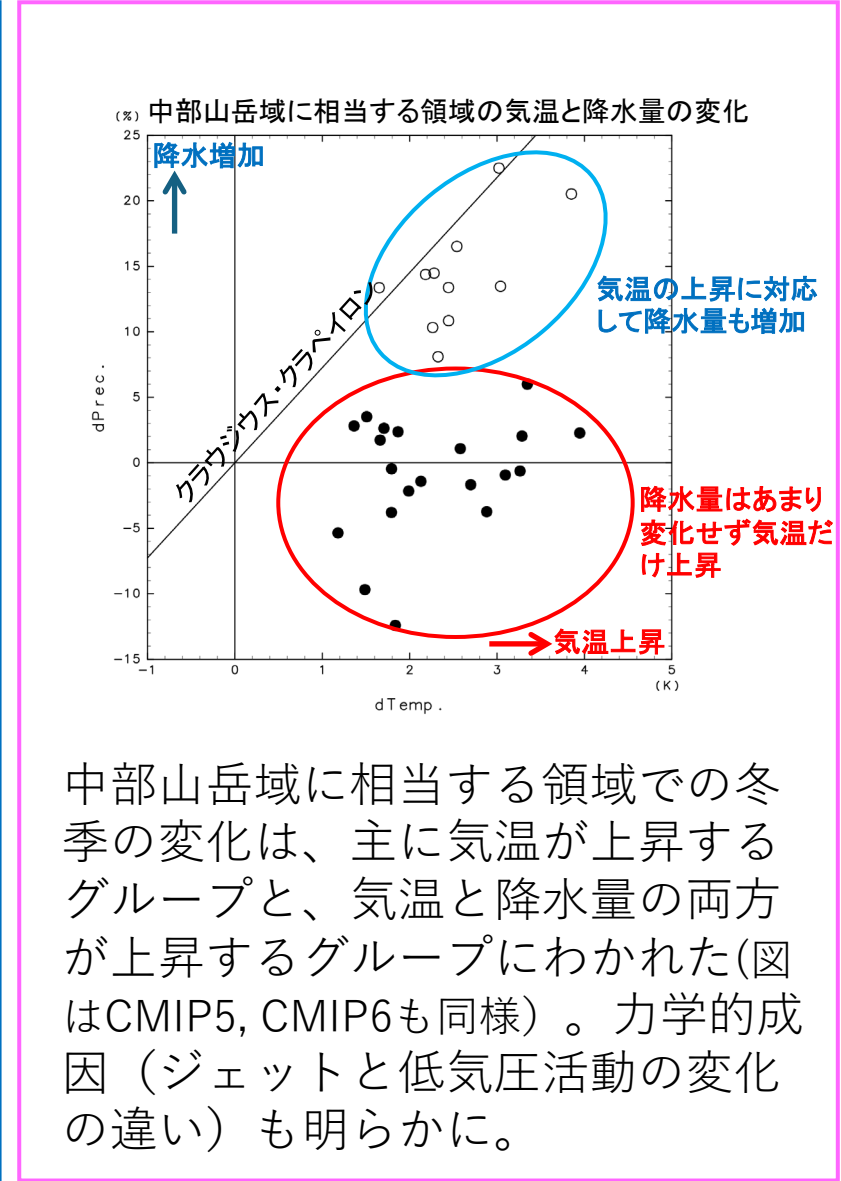
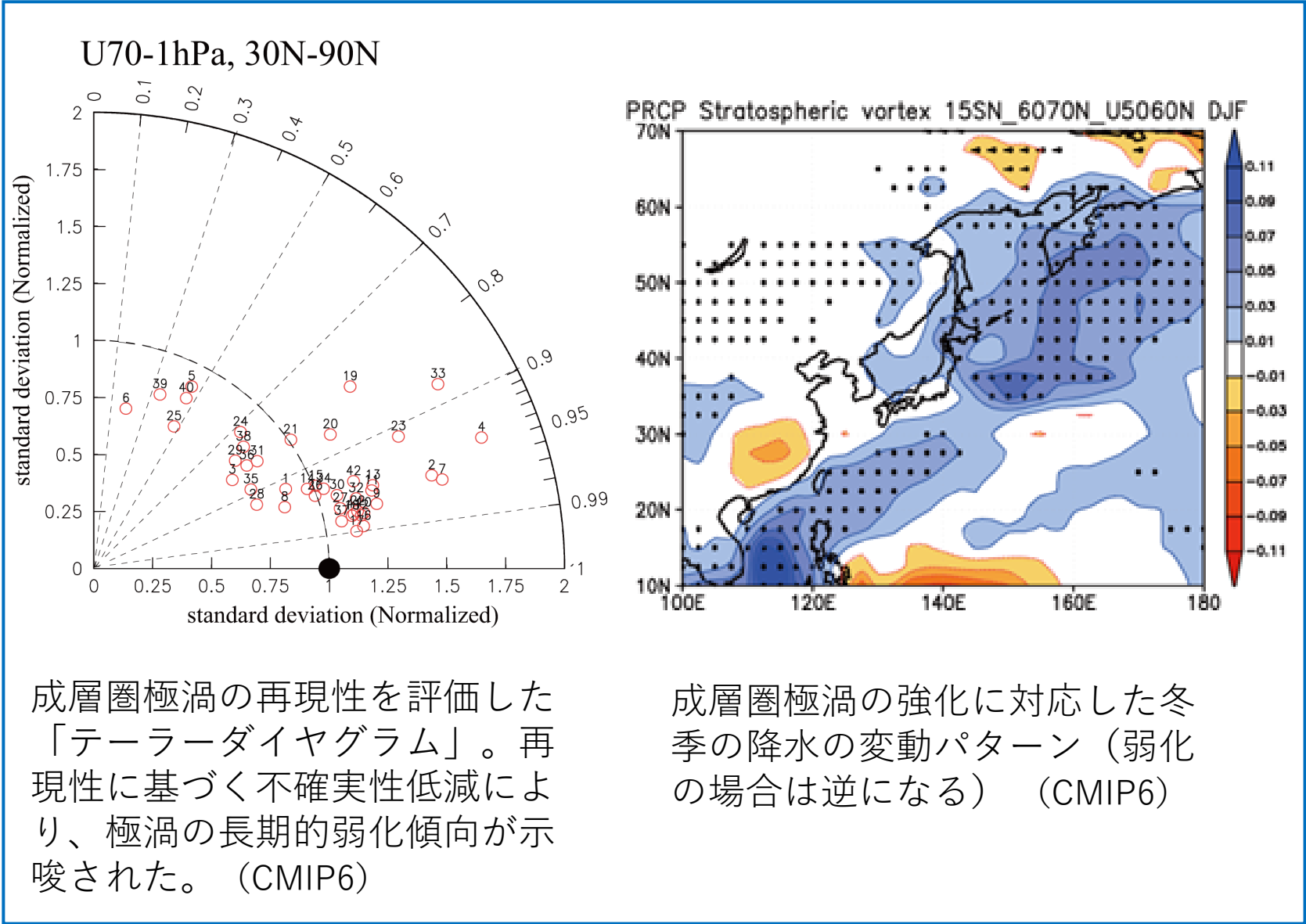
➤ 夏季のユーラシア極前線ジェット上のテレコネクションの力学特性と将来変化

- ✓ 夏季大気循環の経年変動としての極前線ジェット気流の蛇行
- ✓ d4PDFの大アンサンブルにおいて...
 - 大気内部変動成分が圧倒的(分散の>98%)
 - 温暖化すると、全体としては対流圏内で循環偏差が弱体化
↑ 対流圏界面高度上昇・対流圏静的安定度上昇
 - 温暖化に伴って極東・オホーツク海域ではやや強化
→ 特に晩冬にオホーツク海高気圧への影響も強化

極前線ジェットテレコネクションに伴う
250hPa高度偏差 (d4PDF現在気候実験)

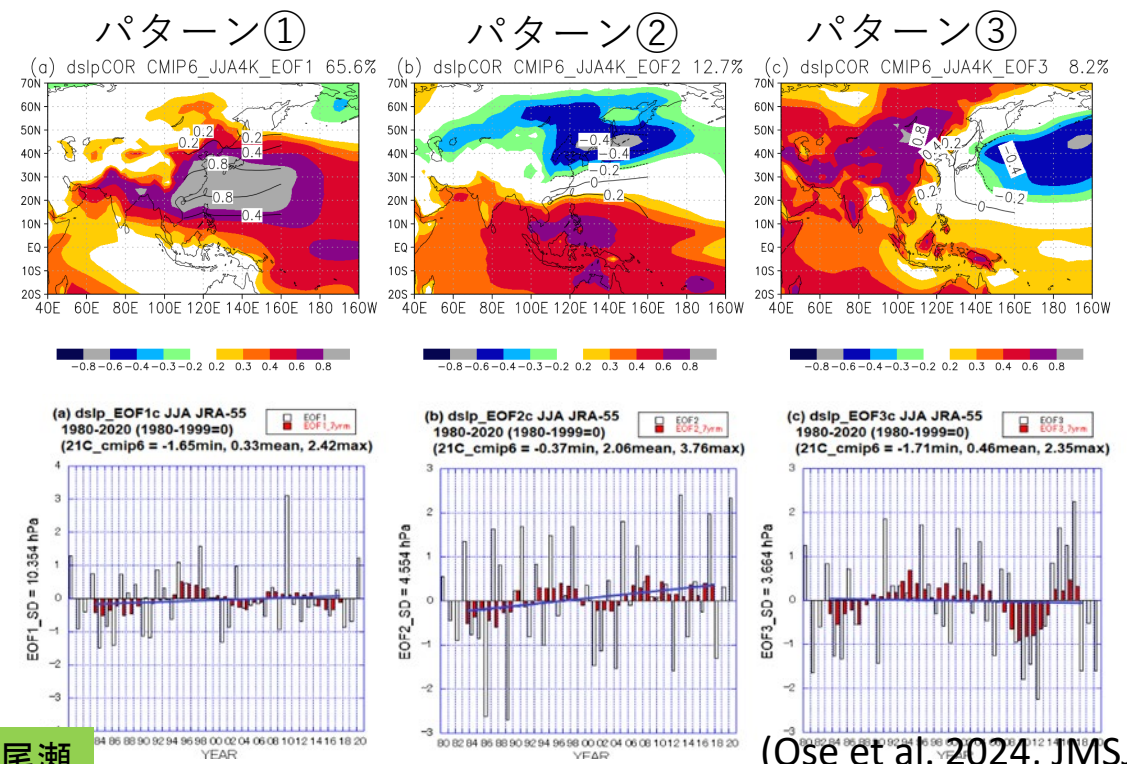


5. 結果及び考察(4/6) サブ2 「成層圏と対流圏上層ジェット」の遠隔影響に関する予測不確実性低減
堀之内武・河谷芳雄（北大）・佐藤尚毅（学芸大）



5. 結果及び考察(5/6) サブ3 極端気象の将来変化に関する物理的理解に基づく予測不確実性を低減した情報伝達
アジアモンスーン・熱帯域の温暖化予測不確実性の低減を踏まえた東アジアでの気候 変化予測

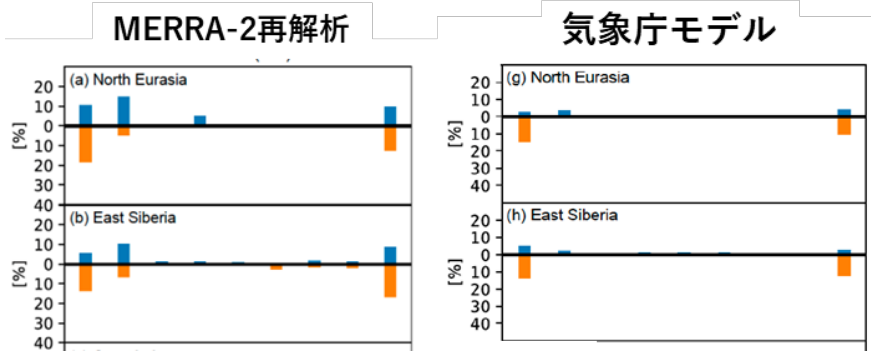
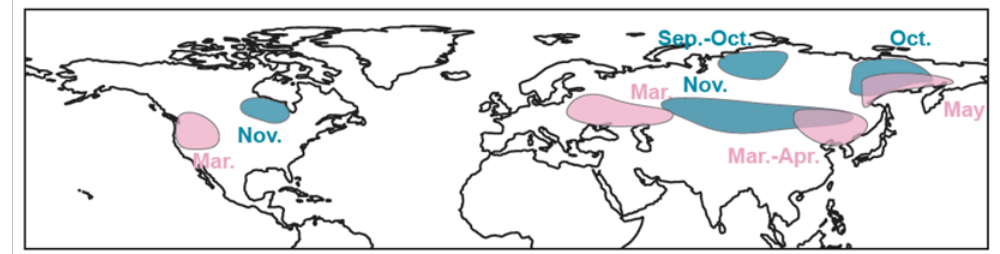
①近年(1980-2020年)(横軸)における海面気圧変化パターン出現(縦軸)の年々変動・長期変動・トレンドを経験的直交関数(EOF)を用いて調査。第2の EOF パターンは、ほぼすべての CMIP6 モデルで将来出現が予測される、**ロバスト**な SLP パターンで、スコアは**近年の増加傾向と一致**する。第1,3EOFパターンは、ばらつきの大きい不確実なパターンで、スコアは、小さなアンサンブル平均将来変化と一致している。



(Ose et al. 2024, JMSJ)

②再解析及び季節内予測モデルの温暖化に伴う積雪影響の理解を進めるために、積雪域と陸面気温の因果関係の強さを新しい因果解析手法 (Liang-Kleeman information flow)で評価した。その結果、積雪による地上気温への影響 (右図、青棒グラフ) を気象庁モデルは過小評価していることがわかった。積雪過程を改善することが、雪-アルベドフィードバックの正確な再現に必要なと考えられる。温暖化予測においても、こうしたプロセスベースの評価が予測不確実性の低減に必要である。

積雪が地上気温に影響を及ぼす領域・季節



規格化した information flow

青：積雪域 橙：2m気温

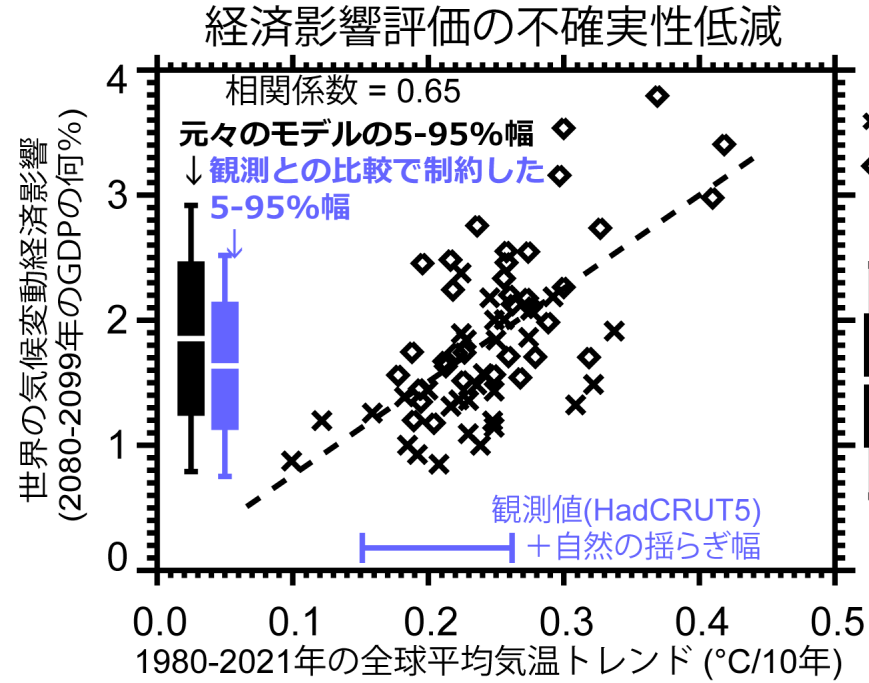
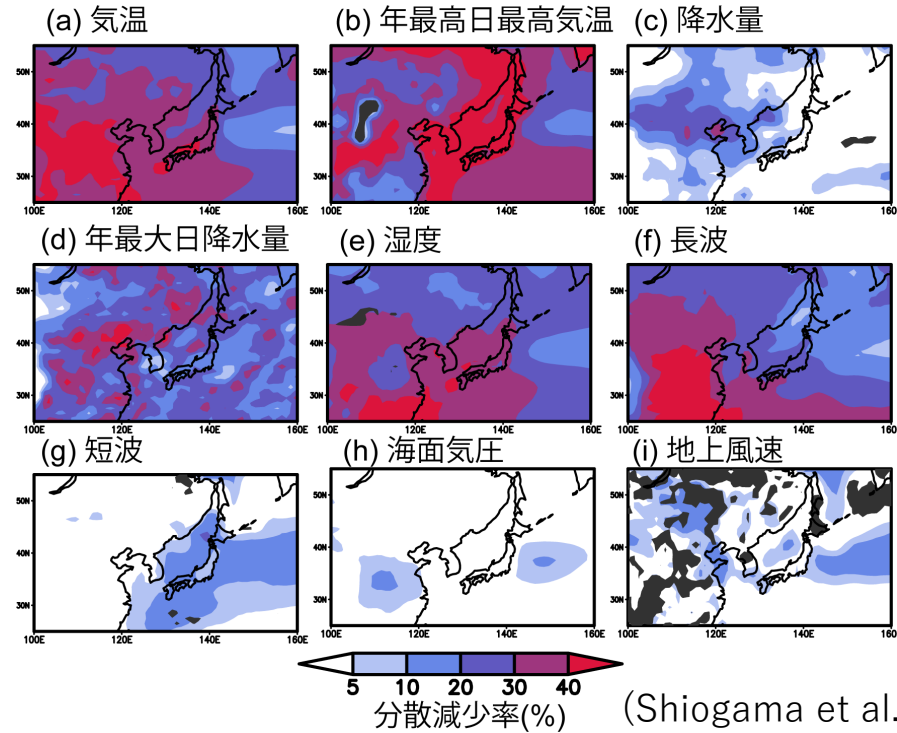
↓ ↓

2m気温 積雪域

(Takaya et al. 2023, Clim Dyn)

高谷

5. 結果及び考察 (6/6) サブ4 様々な気候変数・極端現象指標の不確実性低減



世界の経済影響の不確実性低減。横軸は、各気候モデルの1980–2021年の全球平均気温トレンド(°C/10年)。縦軸は将来の気候変動による世界の経済影響(%)。×と◇は、それぞれCMIP5(31モデル)とCMIP6(36モデル)の気候モデル。黒い破線は回帰直線。青い横棒は、観測データの5-95%幅。黒い箱ひげ図は元々の不確実性幅(右端の凡例参照)。青い箱ひげ図は、観測された過去の気温トレンドとの比較に基づいて制約された不確実性幅。

CMIP5、6モデル群の全球平均気温変化の不確実性低減に伴う9変数・指標の分散減少率(%)。黒陰影は、不確実性低減手法が適用できない場所。

右図は推進費2-2002との共同研究

- 全球平均温上昇が極端に大きいモデル(ホットモデル)の気温変化予測は信頼性が低い(IPCC AR6-WG1)。
- 全球平均気温変化予測の不確実性低減が、様々な気候変数、極端現象指標や経済影響評価の不確実性低減に結びつく。
- 逆に言えば、ホットモデルを含む共通気候シナリオを用いる **ISIMIP3b (世界規模の影響評価)** は、**不確実性を過大評価**。
 - IPCC第7次報告書では、ISIMIP3bの影響評価結果は不確実性を低減してから使う必要がある。
- 日本の共通気候シナリオ **NIES2020** では、**ホットモデルを除外** (前課題の成果)。推進費 **S-18** 等の日本の影響評価研究では、**不確実性幅を過大評価するリスクを減らせた**。
 - 影響評価報告書2025で共通気候シナリオの科学的妥当性を示す際に重要な根拠になるだろう。

6. 目標の達成状況と環境政策等への貢献

(1) 達成状況 自己評価 A+ (目標を上回る成果をあげた+)

○地域的な極端気象とグローバルな大気海洋の熱力学的状態・大気循環の変化との相互関係の物理的な理解について多くの研究成果を得、それを将来変化予測のばらつきの範囲の低減に繋げる知見とする目標を十分に達成した。

○CMIP6モデル実験データを高解像度化する方法を構築し、高解像度化したデータを用いて水文モデルを走らせ、社会により密着した将来変化の情報伝達を担うことができた。

○全球平均気温の不確実性低減手法を応用し、世界の多くの地域で気温以外にも降水量、放射量、湿度など様々な気候変数や、気温や降水量に関する極端現象指標の予測不確実性を低減できることを示した。影響評価研究者と共同で、世界全体の気候変動経済影響評価の不確実性を低減する手法を世界で初めて開発した。目標を上回る科学的成果を得た。

○推進費S-18会合への参加や日本気象学会2023年秋季大会で主催した専門分科会での議論を通じて推進費S-18に複数の極端気象に関するCMIP6の不確実性低減情報を共有する目標を達成した。

○2年間の計画実施中に、国際誌に40報（目標は16報以上）の査読付き学術論文を発表し、国民との対話の機会を毎年持った。複数のメンバーにより期間中7つの国内外の受賞(*)があった。以上、目標を大きく上回って達成できた。

(*) 報告書記載の7つの受賞に加え、報告書提出後（2024.7.15）に研究代表者が海洋立国推進功労者内閣総理大臣表彰を受けた。

(2) 環境政策等への貢献

○最新の気候モデルアンサンブルCMIP6において、将来予測される世界平均気温上昇が非常に大きい「ホットモデル」が増加した問題がある。その妥当性について統計的に検討し、世界規模の影響評価においてホットモデルを含まないアンサンブルを利用するのが妥当であることを示した。さらに、影響評価研究者と共同で21世紀末の経済効果の上限を引き下げ、分散を31%削減できた。また、日本近海で観測史上最高の海面水温イベントが発生する可能性が増加していることにつき、その常態化を防ぐにはパリ協定の1.5℃目標達成が鍵であることも示した。

○これらの情報を国内外の影響評価・適応研究者に提供したことで、環境政策への定量的な貢献が期待できる。

7. 研究成果の発表状況

成果の種別	件数
査読付き論文（うち国際誌）：	4 3（4 0）
その他誌上発表（査読なし）：	1 0
口頭発表（学会等・査読なし）：	1 6 1
「国民との科学・技術対話」の実施：	3 3
マスコミ等への公表・報道等：	6 6
研究成果による受賞：	7 ^(*)

(*) 報告書記載の7つの受賞に加え、報告書提出後（2024.7.15）に研究代表者が海洋立国推進功労者内閣総理大臣表彰を受けた。

（参考）地域気候変動適応計画策定マニュアル p.4

気候変動影響評価と見直し

気候変動の将来の影響に備えていくためには、区域において、これまでどのような気候変化や気象現象の影響を受けてきたか、また、将来どのようなリスクがあるのかについて、最新の科学的知見を収集し、影響の大きさや区域における重要性等について評価（気候変動影響評価）し（手順編 STEP2～4）、それに基づいて地域適応計画を策定する必要があります。

気候変動影響に関する研究は、これまでも多くの研究機関等によって行われ、有用な知見が集積されていますが、分野によっては、適応策を実施するための情報が十分集まらないなど、今後の研究による新たな知見を待つ必要がある場合もあります。また、気候変動影響の将来予測などの科学的知見には、一定の不確実性が含まれており、今後、より精緻で信頼性の高い知見が出てくることも考えられます。

そのため、気候変動適応の取組においては、定期的にその時点の最新の科学的知見を収集して気候変動影響評価を行い、それに基づいて地域適応計画を見直すことで、適時的確な適応策を実施することができます。