

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

公募区分： 環境問題対応型研究（一般課題）

研究予定期間： 令和4（2022）年度 ～ 令和5（2023）年度

課題番号： 【2-2202】

体系的番号： （JPMEERF20222002）

研究課題： 「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」

Research Title： 「Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings」

研究代表者： 高薮 縁

研究代表機関： 東京大学

研究分担機関： 北海道大学、東京学芸大学、国土交通省気象庁気象研究所、東京都立大学、国立研究開発法人国立環境研究所

研究協力機関： 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、一般財団法人気象業務支援センター、富山大学、三重大学、University of California San Diego、国土交通省気象庁、立正大学、国立研究開発法人海洋研究開発機構

研究領域： 気候変動領域

キーワード： 地球温暖化、気候変動影響評価、極端気象の将来変化、不確実性の低減、水災害リスク評価

令和6（2024）年5月

目次

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書	1
I. 成果の概要	4
1. はじめに（研究背景等）	8
2. 研究開発目的	8
3. 研究目標	8
4. 研究開発内容	10
5. 研究成果	11
5-1. 成果の概要	11
5-2. 研究目標の達成状況	13
6. 研究成果の発表状況の概要	18
6-1. 成果の件数	18
6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果	18
7. 国際共同研究等の状況	19
8. 研究者略歴	20
II. 成果の詳細	21
II-1 サブテーマ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」	21
[サブテーマ1要旨]	21
1. サブテーマ1研究開発目的	21
2. サブテーマ1研究目標	22
3. サブテーマ1研究開発内容	22
4. サブテーマ1結果及び考察	23
5. サブテーマ1研究目標の達成状況	34
II-2 サブテーマ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」	36
[サブテーマ2要旨]	36
1. サブテーマ2研究開発目的	36
2. サブテーマ2研究目標	36
3. サブテーマ2研究開発内容	36
4. サブテーマ2結果及び考察	37
5. サブテーマ2研究目標の達成状況	48
II-3 サブテーマ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」	50
[サブテーマ3要旨]	50
1. サブテーマ3研究開発目的	50
2. サブテーマ3研究目標	51
3. サブテーマ3研究開発内容	51
4. サブテーマ3結果及び考察	52
5. サブテーマ3研究目標の達成状況	65
II-4 サブテーマ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」	66
[サブテーマ4要旨]	66
1. サブテーマ4研究開発目的	66
2. サブテーマ4研究目標	67
3. サブテーマ4研究開発内容	67

4. サブテーマ4結果及び考察.....	68
5. サブテーマ4研究目標の達成状況.....	77
Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細.....	80
(1) 成果の件数	80
(2) 誌上発表.....	80
(3) 口頭発表.....	84
(4) 知的財産権.....	94
(5) 「国民との科学・技術対話」の実施	94
(6) マスメディア等への公表・報道等.....	96
(7) 研究成果による受賞.....	99
(8) その他の成果発表.....	99

別紙 公募審査・中間評価結果への対応

I. 成果の概要
 <課題情報>

公 募 区 分：	環境問題対応型研究（一般課題）
研究実施期間：	令和4（2022）年度 ～ 令和5（2023）年度
課題番号：	【2-2202】
研究課題：	「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」
研究代表者：	高薮 縁（東京大学 大気海洋研究所、教授）
重点課題（主）：	【重点課題⑨】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
重点課題（副）：	【重点課題⑧】気候変動への適応に係る研究・技術開発
行政要請研究テーマ（行政ニーズ）：	（2－5）地域特性に応じた適応の優先度と限界等を考慮した適応策立案手法の開発
研究領域：	気候変動領域

<キーワード>

地球温暖化
気候変動影響評価
極端気象の将来変化
不確実性の低減
水災害リスク評価

<研究体制>

サブテーマ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」

<サブテーマ1リーダー及び研究分担者>

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
東京大学	大気海洋研究所	教授	高薮 縁	
東京大学	大気海洋研究所	特任助教	横山 千恵	2022年度
東京大学	生産技術研究所	教授	芳村 圭	
東京大学	生産技術研究所	特任准教授	吉兼 隆生	
東京大学	先端科学技術研究センター	教授	中村 尚	

東京大学	先端科学技術研究センター	准教授	小坂 優	
東京大学	先端科学技術研究センター	助教	岡島 悟	

＜サブテーマ 1 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
宇宙航空研究開発機構	第一宇宙技術部門地球観測研究センター	主任研究開発員	横山 千恵（2023年度）
東京大学	大気海洋研究所	特任研究員	千喜良 稔（2022年度～2023年9月）
東京大学	大気海洋研究所	特任研究員	辻 宏樹（2022年度～2023年9月）
気象業務支援センター	研究推進部	システムエンジニア	釜堀 弘隆
富山大学	学術研究部	准教授	濱田 篤
三重大学	生物資源学研究科	准教授	西井 和晃
東京大学	先端科学技術研究センター	特任准教授	宮坂 貴文
University of California San Diego	Scripps Institution of Oceanography	Postdoctoral Scholar	宮本 歩

サブテーマ 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」

＜サブテーマ 2 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
北海道大学	地球環境科学研究院	教授	堀之内 武	
北海道大学	地球環境科学研究院	准教授	河谷 芳雄	
東京学芸大学	教育学部	准教授	佐藤 尚毅	

サブテーマ 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」

＜サブテーマ 3 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
気象庁気象研究所	応用気象研究部	室長	仲江川 敏之	
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	主任研究官	遠藤 洋和	

気象庁気象研究所	全球大気海洋研究部	主任研究官	高谷 祐平	
東京都立大学	都市環境科学研究科	助教	高橋 洋	

＜サブテーマ3 研究協力者＞

機関名	部署名	役職名	氏名
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	客員研究員	尾瀬 智昭
気象庁気象研究所	気候・環境研究部	客員研究員	鬼頭 昭雄
気象庁気象研究所	応用気象研究部	主任研究官	村崎 万代
気象庁	大気海洋部気候情報課	気候情報調整官	平井 雅之
気象庁	大気海洋部気候情報課	情報係員	瀬崎 歩美
気象庁	大気海洋部気候情報課	予報官	前田 修平
気象庁	大気海洋部気候情報課	予報官	佐藤 均（2022年度）
気象庁	大気海洋部気候情報課	情報係長	若松 俊哉（2022年度）
気象庁	大気海洋部気候情報課	予報官	伊藤 明（2023年度）
気象庁	大気海洋部気候情報課	情報係長	南 敦（2023年度）
立正大学	地球環境科学部	助教	神澤 望
海洋研究開発機構	付加価値情報創生部門	特任研究員	伊東 瑠衣

サブテーマ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」

＜サブテーマ4 リーダー及び研究分担者＞

機関名	部署名	役職名	氏名	参画期間
国立環境研究所	地球システム領域	室長	塩竈 秀夫	
国立環境研究所	地球システム領域	上級主席研究員	江守 正多	
国立環境研究所	地球システム領域	主任研究員	廣田 渚郎	
国立環境研究所	社会システム領域	副領域長	高橋 潔	
国立環境研究所	気候変動適応センター	主任研究員	石崎 紀子	

国立環境研究所	地球システム領域	主任研究員	林 未知也	2022年5月～2023年度
---------	----------	-------	-------	----------------

＜研究経費（間接経費を含む）＞

年度	直接経費	間接経費	経費合計
2022	31,549千円	8,451千円	40,000千円
2023	31,549千円	8,451千円	40,000千円
合計	63,098千円	16,902千円	80,000千円

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。

本課題チームでは、前総合研究推進費課題「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。

一方、IPCC第6次評価報告書に用いられた世界の気候モデル比較実験CMIP6において、地球温暖化物質増加に対する気候感度が高すぎるのではないかという問題（ホットモデル）が生起し、将来変化予測において、この問題の調査と対処も必要となった。

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いも含めて評価し、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

全体目標	本提案課題では、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、よりの確か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公表、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。
--	---

サブテーマ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」 (1-1：極端降水に関する予測不確実性低減と水文研究への連携) (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)
サブテーマ1実施機関	東京大学
サブテーマ1目標	<1-1>局地的な極端降水の将来変化がグローバルスケールの環境要因の変化にいかに関係するかについて物理的な理解を深めるとともに定量化を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する解析手法を開発する。さらに、CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いて水文モデルを走らせることにより、社会生活により密着した情報の伝達に貢献する。 <1-2>日本に極端気象をもたらす大気擾乱は、熱帯などの大気海洋結合変動から遠隔に影響を受け、また近海での大気海洋相互作用による変調を受ける。温暖化に伴いこれらがどう変わるかを予測の不確実性ととともに評価し、その低減に資する知見を得る。 サブテーマ1は、影響評価研究課題（推進費S-18）に極端降水、熱波に関するCMIP6の不確実性低減情報、水文モデル実験情報を渡す。国際誌に7報以上の論文発表、国民との対話を行う。マニュアルの「気候変動影響評価と見直し」に資する。

サブテーマ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」
サブテーマ2実施機関	北海道大学、東京学芸大学
サブテーマ2目標	地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、またその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価し、低減を図る。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、2報以上の学術論文として発表する。

サブテーマ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」
サブテーマ3実施機関	気象研究所、東京都立大学
サブテーマ3目標	モデル予測の妥当性を判断する際の一つの根拠になる長期観測データ解析から得られる知見、具体的には、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調べ、そのメカ

	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)の幅を絞ることができるかどうかを調べる。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、4報以上の学術論文として発表する。
サブテーマ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」
サブテーマ4 実施機関	国立環境研究所
サブテーマ4 目標	日本やアジア太平洋域における影響評価研究の入力データとなる様々な気候変数や重要な極端現象指数などの予測不確実性に対して、全球平均気温などの全球スケール現象の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査する。その上で、影響評価研究で利用される共通気候シナリオの信頼性を評価し、サブ1と協力して気候変動に伴う極端現象の不確実性低減情報のまとめと影響評価・適応研究への情報提供を行う。国際誌に3報以上の学術論文として発表し、国民との対話の機会を毎年もつ。

4. 研究開発内容

サブテーマ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）にいかに依存するかを定量化し、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。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。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。

サブテーマ1-2では、日本の夏冬に極端気象や極端天候をもたらす大気循環変動の気候モデル実験における再現性評価や将来変化の解析を行った。日本の南岸を通る移動性低気圧活動について、特徴的な季節性に着目しつつ地球温暖化に伴う変化とそのメカニズムを調査した。冬季の「西太平洋パターン」の季節予測可能性について、特に北太平洋十年規模変動に伴う中緯度海面水温偏差からの影響を評価した。カリフォルニア沖の下層雲が日本周辺を含む太平洋広域に与える影響を気候モデル実験で定量化し、CMIP6モデルにおける再現性を評価した。夏季のユーラシア極前線ジェット上の波列状テレコネクションの構造などの力学特性や地球温暖化に伴う変化を調査した。

サブテーマ2では、地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、及びその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価して低減を図ることを目的として研究を実施した。

サブテーマ3では、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を、アジアモンスーン・熱帯域での気候変化がどの程度、どのようにして影響するか調査した。具体的には、21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンの近年出現状況と要因分析、東アジア夏季モンスーン降水の将来変化におけるユーラシア大陸昇温の影響、北半球の積雪による地上気温への影響の評価、日本の猛暑と大規模循環場の要因分析を行い、不確実性の要因解明と低減を試みた。

サブテーマ4では、影響評価モデルにおいて入力データとして用いられる様々な気候変数や重要な極端現象指数の予測不確実性に対して、全球平均気温の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査した。加えて、経済影響評価の不確実性を低減する手法を開発したほか、日本近海の海洋熱波の変化に関する解析を行った。これらの研究成果に関して、影響評価・適応研究者へ情報提供した。

5. 研究成果

5-1. 成果の概要

<サブ1-1>

(a) 西日本の梅雨期の強雨の将来変化予測がCMIP6モデル間でばらついていることが、上空のジェット気流の変化のばらつきを介して全球規模の海面水温分布のばらつきと結びついていることを示し、不確実性低減についての示唆を与えた（成果番号：88 横山他、105 Yokoyama and Takayabu, 151 横山他）(b) 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係を数値化した（成果番号：124、128、152 千喜良他）、(c) 日本の梅雨期、秋雨期における広域豪雨をもたらす大規模環境場の違いを示した（成果番号：21 Narita and Takayabu, 125 成田、高薮）、(d) 2020年7月豪雨の構造を示した（成果番号：15 Tsuji and Takayabu, 123 辻、高薮）。(e) 機械学習を用いたダウンスケーリング手法の有効性を示した論文を国際誌に投稿した（成果番号：11 Yoshikane and Yoshimura, 2023）。(d) 水文モデルの開発と本ダウンスケーリング手法の詳細について、国内外の学会や研究集会で発表した。さらに、新聞・雑誌などのマスメディアに研究成果を広く公開した。

<サブ1-2>

サブテーマ1-2では、まず本州南岸を通る移動性低気圧頻度が春季に極大となるという特徴的がd4PDFで再現されていることを確認し、地球温暖化に伴う変調を調査した。春季に活動が最大となることは変わらないが、その極大が弱化するを見出し、その物理的メカニズムを明らかにした（成果番号：154 岡島・中村, 161 Okajima and Nakamura）。また冬季の「西太平洋パターン」と付随する寒気の南下の季節予測可能性について、日本の寒波事例である2022年2月を例に、大気大循環モデルの大規模アンサンブル実験を行って解析した。この事例に対し、北太平洋十年規模変動に伴う中緯度域の海面水温偏差の寄与が見出された一方、熱帯からの影響は小さかったことが分かった。現在気候のみでなく温暖化した気候下においても、冬季天候の季節予測に対する中緯度海面水温変動の重要性が示唆されたほか、その表現には高解像度モデルが必要であることも見出した（成果番号：92-99 西井他, 154-156 西井他）。気候モデルは一般に下層雲の再現を苦手としているが、特にカリフォルニア沖下層雲が日本周辺を含む太平洋域の気候に与える影響を評価した。大気海洋相互作用と大気・海洋循環変化を通してその影響は遙か遠くまで及び、例えばハワイ周辺のハリケーン活動を抑制し、また日本南岸を洗う黒潮を強化させることがわかった他、下層雲表現のCMIP6モデル間の大きなバラツキがこれら広域の気候の再現に影響している可能性が示唆された（成果番号：20 Miyamoto et al. 2023, 139 Nakamura et al., 169 Nakamura et al.）。このほか、夏季ユーラシア極前線ジェット上のテレコネクションの構造やシルクロードパターンとの関連などの力学特性や地球温暖化に伴う変化をd4PDFにもとづいて調査し、同テレコネクションの季節予測可能性が低いこと、また温暖化によってその対流圏内の循環偏差が全体として弱化する一方、極東域では循環偏差がやや強化され、対応してオホーツク海高気圧への影響が特に晩夏に強まる傾向が見出され、日本の夏季天候への強化が示唆された（成果番号：162 Kosaka and Sakai）。

<サブ2>

サブテーマ2では主に、日本・東アジアの降水に対する遠隔影響の研究を行った。Sato et al. (2023, 成果番号：29) では、中部日本における冬季（12～2月）の降水量の変動予測のモデル間の差異を解析した。CMIP5気候モデルにおいて、中部日本に対応する領域で予測された冬季（12～2月）の地上気温と降水量の変化を調べたところ、どのモデルも地上気温の上昇を予測している一方で、降水量に関しては、増加を予測するモデルと、ほとんど増加しないか、減少すると予測するモデルに分かれた。この違いは主に低気圧活動の変化の違いによって生じることを明らかにした。その要因は偏西風帯の北上傾向の違いと関連していることから、ジェットの再現性が冬季降水の予測に重要であると明らかになった。さらに、CMIP6でも同様な結果が得られた。

本課題に先立つ課題において我々は、CMIP5モデル群を用いて日本域冬期の降水変化のストーリーラインについて、熱帯上部対流圏温度変化と成層圏極渦変化の2つを指標として整理した。今回、同じ手法

をCMIP6データに適用したところ、熱帯上部対流圏温度変化のモデル間の差異が減っていたことから、成層圏極渦変化のほうがより大きな要因であることが示唆された。従来の研究では極渦が将来強まるか弱まるか不明であるとされたが、極渦の現在気候の再現性に着目して解析したところ、弱まる可能性が高いと示唆され、遠隔影響の不確実性が低減された（投稿準備中）。さらに、海洋フロントと成層圏の関連についても示唆を得た（成果番号：31, Kawatani et al. 2024）。

日本の夏季の降水については、CMIP5を用いた解析により、日本の南の海上における下層の南風の将来変化が水蒸気フラックスの変化を左右し、梅雨降水の変化の多寡を左右することなどを明らかにした（成果番号：28, Horinouchi et al. 2022）。その関係はCMIP6を用いた研究でも共通であった（投稿準備中）。即ち、下層の南風の将来変化の再現性を高めることが不確実性低減に重要であることが明らかになった。他に、シルクロードテレコネクションの停滞成分の位相の変化が梅雨の将来変化に重要であることも示唆されたが（成果番号：28, Horinouchi et al. 2022）、その度合いはCMIP5からCMIP6の変化でやや低下した。

＜サブ3＞

サブテーマ3では、21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンの近年出現状況と要因分析を行い、CMIP6のどのモデルも21世紀末の出現を予測している夏季東アジアの海面気圧パターンは、すでに近年の長期変動の中に正のトレンド変化として出現していることを示した。これは、地球温暖化に伴う北方大陸の強い昇温が確実に始まっているためである。この空間パターンを含めて、CMIP6による夏季東アジアの21世紀末予測パターンのうち大きな空間パターン（上位主要3パターン）は、CMIP6の21世紀末アンサンブル予測平均と矛盾しない近年の変化を示している。また、CMIP6による夏季東アジアの21世紀末予測の海面気圧将来変化パターンのうち、比較的小さい空間スケールであるが、しかし日本の気候変化として無視できないパターン（下位主要3パターン）は、21世紀末予測平均とは符号が逆方向の負のトレンドの近年変化を示している。これは、近年の熱帯海面水温変化が、CMIP6による21世紀末の予測平均と逆符号の将来変化パターンが21世紀末に実現する可能性もあることを示す。

また、CMIP5/6マルチモデル予測実験データを用いて、アジア周辺の地上気温（SAT）の昇温パターンのモデル間差異が東アジア夏季モンスーン（EASM）降水量変化に及ぼす影響について調べた。アジア周辺のSAT将来変化のマルチモデルEOF解析で得られるSAT_EOF1パターンは、ユーラシア大陸上の大きな昇温と周辺海域の小さな昇温で特徴づけられる。SAT_EOF1スコアが大きなモデルは、対流圏下層で南風モンスーンが強化すると同時に対流圏上層では東アジアジェットが弱化するため、その結果、初夏から盛夏への季節進行が相対的に早く、EASM降水量は大陸上で顕著に増加することを示した。また、将来変化としてのSAT_EOF1スコアは現在陸上モンスーン降水量と有意な正相関をもつことから、モデル降水量を観測値で制約することによりEASM降水量予測の不確実性を低減できる可能性を示した。

さらに、北半球の積雪による地上気温への影響を、気候再解析や季節内から季節予測モデルのデータに、Liang-Kleeman information flow 解析を適用することで評価した。その結果、積雪域から地上気温への強い因果関係（影響）を示す領域、月が特定された。さらに、季節内予測モデルにおける積雪域と地上気温の因果関係を同手法によって評価した結果、予測モデルでは、積雪域による地上気温への因果関係を過小評価していることがわかった。本研究で用いたLiang-Kleeman information flow解析では、解析とモデルの結果を比較することが可能であり、モデルの積雪影響の強さを評価するのに役立つ。こうした評価を通じて、気候モデルにおける積雪影響を理解し、正しく表現することは、温暖化予測の不確実性の低減につながると期待される。今後、本研究で行ったプロセスレベルの評価と長期的な温暖化傾向との関係を分析する必要がある。（成果番号：37, Takaya et al. 2024）

＜サブ4＞

サブテーマ4では、全球平均気温の不確実性低減手法を応用することで、影響評価に使われる様々な気候変数や極端現象指標の予測不確実性を世界の多くの地域で低減できることを示した（成果番号：43, Shiogama et al. SOLA, in press）。また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開発し、21世紀末の経済影響評価の不確実性幅の上限を引き下げ、分散を3割削減できることを示した（成果番号：42, Shiogama et al. 2022, ERL）。これらの研究成果は、気温上昇が過大な気候モデル（ホットモデル）を含んだ共通気候シナリオを利用する世界規模の影響評価研究では不確実性を過大評価する可能性を示すものである。一方、日本の影響評価研究では、ホットモデルを外した共通気候シナリオNIES2020（前身課題の成果）が幅広く利用されており、不確実性を過大評価する可能性は小さいことも分かった。そのほかに、日本近海で観測史上最高の極端な海洋熱波が常態化（2年に一度以上発生）することを防ぐには、パリ協定の1.5℃目標達成が鍵であることも示した（成果番号：40, Hayashi et al. 2022, GRL）。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。

5-2. 研究目標の達成状況

<全体の達成状況>・・・・・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

全体目標	全体の達成状況
本提案課題では、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旨とする。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。	○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。

<【サブテーマ1】達成状況>・・・・・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

(1-1: 極端降水に関する予測不確実性低減と水文研究への連携)

(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)

サブテーマ1目標	サブテーマ1の達成状況
<1-1>局地的な極端降水の将来変化がグローバルスケールの環境要因の変化にいかに関係するかについて物理的な理解を深めるとともに定量化を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する解析手法を開発する。さらに、CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いて水文モデルを走らせることにより、社会生活により密着した情報の伝達	<1-1> 1. 西日本における梅雨期の広域豪雨の将来予測には、気候モデルにおける広域の海面水温の再現性が全球規模の亜熱帯ジェット変動を通して関わっていることを示した。大気海洋の大規模場の観点からモデルを選択することで予測の不確実性を低減できることを示すことができた。（図1-1、図1-2）

に貢献する。

<1-2> 日本に極端気象をもたらす大気擾乱は、熱帯などの大気海洋結合変動から遠隔に影響を受け、また近海での大気海洋相互作用による変調を受ける。温暖化に伴いこれらがどう変わるかを予測の不確実性ととともに評価し、その低減に資する知見を得る。

サブテーマ1は、影響評価研究課題（推進費S-18）に極端降水、熱波に関するCMIP6の不確実性低減情報、水文モデル実験情報を渡す。国際誌に7報以上の論文発表、国民との対話を行う。マニュアルの「気候変動影響評価と見直し」に資する。

2. 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係を調査し、蓄積された衛星観測データとの統計的比較によりCMIP6モデルの中で海洋上と陸上の双方で高いスコアを持つモデルが存在せず、極端降水に海洋と陸上の違いをもたらすメカニズムがまだCMIPの気候モデルで表現できていないことを示した。（図1-3、図1-4）
3. 秋雨期の東日本の広域豪雨では、東日本への水蒸気輸送は北東-南西方向の双極子構造をもつ擾乱の気圧配置によって強化されており、これは梅雨の西日本豪雨とは異なっていることを示した。（図1-5）
4. 2020年7月の九州地方の豪雨は、上層トラフに伴って水蒸気流入する大規模環境場の下、メソスケールシステムが発生し、その中で強い降水帯が形成した階層構造の重要性を示した。（図1-6）
5. CMIP6データを用いた機械学習ダウンスケーリングを実施し、その推定値を統合陸域シミュレータに適用することにより、複数モデル、複数シナリオによる不確実性を含めた河川流量の将来予測を実施した。図1-7に手法の概要、図1-11に不確実性を含めた複数モデル、複数シナリオの球磨川流域の河川流量（95パーセンタイル値に相当）を示した。またデータの一部を河川流量予測研究者に提供した。
6. 春・夏・冬の日本に異常天候や極端気象をもたらす複数の大気循環変動（移動性低気圧活動、西太平洋パターン、極前線ジェット上のテレコネクション）や大気海洋結合現象（カリフォルニア沖下層雲と太平洋大気海洋循環の相互作用）に対し、予測可能性や温暖化に伴う変調を明らかにした。これらにより、日本付近の気候変動の不確実性低減と予測の改善に対し、モデルの高解像度化や冬季チベット周辺域の大気-陸面相互作用や北太平洋大気海洋相互作用の表現の向上、カリフォルニア沖の下層雲の表現の改善、夏季極前線ジェット気流の下流域への伸長の不確実性低減が資することが物理的なメカニズム理解にもとづきわかった。

○サブテーマ1の国際誌への査読付き論文発表は24報(成果番号: 1-2, 5-7, 9-27)で目標7報を大きく上回った。毎年国民との対話も達成。また複数メンバーにより2年間で7件の受賞(成果番号: 314-320)があり、国内外のコミュニティへのインパクトも高く評価された。以上により、目標を上回る成果をあげることができたと言える。

＜【サブテーマ2】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

サブテーマ2 目標	サブテーマ2 の達成状況
地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、またその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価し、低減を図る。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、2報以上の学術論文として発表する。	1. 成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測の気候モデル間の違いとその要因については複数の論文で明らかにした。(図2-1～2-14) 2. また、現在気候の再現性から不確実性の低減もできた。 3. 本研究の成果はサブ1の総括に貢献し、目標を上回る本数の論文を発表した。(成果番号: 28-31)

＜【サブテーマ3】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

サブテーマ3 目標	サブテーマ3 の達成状況
モデル予測の妥当性を判断する際の一つの根拠になる長期観測データ解析から得られる知見、具体的には、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調べ、その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)の幅を絞ることができるかどうかを調べる。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、4報以上の学術論文として発表する。	モデル予測の妥当性を判断する際の一つの根拠になる長期観測データ解析から得られる知見を得るために研究を実施した。その結果、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)の幅を絞ることができることを明らかにした。(図3-1～3-11) 成果はプロジェクト会合などで共有し、サブ1の総括に貢献した。また、目標の4報を超える8報を学術論文として成果を発表することができた。(成果番号: 32-39)

＜【サブテーマ4】達成状況＞・・・・・・・・・・ 2. 目標を上回る成果をあげた

「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」

サブテーマ4 目標	サブテーマ4 の達成状況
日本やアジア太平洋域における影響評価研究の入力データとなる様々な気候変数や重要な極端現象指数などの予測不確実性に対して、全球平均気温などの全球スケール現象の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査する。その上で、影響評価研究で利用される共通気候シナリオの信頼性を評価し、サブ1と協力して気候変動に伴う極端現象の不確実性低減情報のまとめと影響評価・適応研究への情報提供を行う。国際誌に3報以上の学術論文として発表し、国民との対話の機会を毎年もつ。	以下のように研究目標を全て達成した。 1. 様々な気象変数・極端現象指標の予測不確実性に対して、全球平均気温の不確実性低減がどのように波及するかを調査し、ホットモデルを含むISIMIP3bの共通気候シナリオは不確実性を過大評価していること、ホットモデルを除いた日本の共通気候シナリオNIES2020ではそのような問題は少ない事を示した((成果番号: 43, Shiogama et al. SOLA, in press)(図4-4)。 2. 国内外の影響評価研究プロジェクトに情報を提供してきた。また開発中の次世代気候変動予測データセットの実験設計に際して、知見を提供し、NIES2020と整合性のあるものになるよう意見を述べてきた。 3. 国際誌に4報の学術論文を発表し、国民との対話の機会を毎年持った。 また追加で、下記の成果を得た 4. 不確実性低減手法を経済影響評価の分野に初めて応用し、IPCC-AR7に向けて気候変動の予測と影響評価の分野をまたいだ総合的な知見を得るた

	めに必要な道筋を示した(成果番号: 42, Shiogama et al. 2022, ERL)(図4-5)。 5. 日本近海で極端な海面水温イベントが発生する可能性が過去の温暖化で増加しており、そのようなイベントが常態化することを防ぐには、1.5℃目標達成が鍵であることを示した(成果番号: 40, Hayashi et al. 2022, GRL)(図4-5)。
--	---

5-3. 研究成果の学術的意義と環境政策等への貢献

<得られた研究成果の学術的意義>

<サブ1>

従来の気候モデル研究では難しい広域豪雨予測について、モデルと衛星観測との複合的手法の適用により実現し、その予測不確実性を物理的に解釈したことは独創的・新規的である。気候モデルの極端降水の性能評価手法を開発し、CMIP6モデルで極端降水に海陸差をもたらす仕組みが表現できていない現状を明示したことは、気候モデルコミュニティへの有用なインプットである。先行研究の少ない秋雨期において広域豪雨の仕組みを解明した点は新規性があり、梅雨期の豪雨の階層構造下での仕組みの解明と共に、日本の豪雨現象の理解深化に貢献した。

最近になって、機械学習を用いたダウンスケーリング手法が大きく発展しているが、気候変動予測への適用事例はほとんどない。本課題において様々な検証を行い、気候変動予測における本手法の妥当性を示した。従来の力学的ダウンスケーリング手法に対して、同等以上のパフォーマンスであり計算コストを大幅に削減できることから、不確実性を考慮した気候変動予測の精度向上が期待される。

<サブ2>

サブテーマ2の、ジェットの変化に関連した低気圧活動の変化、下層風の長期変化、停滞波列の変化による降水活動の変化については着眼点自体に独創性がある。また成層圏極渦の変化を現在気候の再現性によって評価する研究も初めてで独創性がある。サブテーマ全体で追及した、遠隔的・力学的な効果は、地域気候の将来変化を評価する上で今後益々重要になると考えられ、発展性が高い。

<サブ3>

サブテーマ3では、21世紀末の気圧配置将来変化パターンとその近年出現状況を比較することで、不確実性を低減する方法論は、様々な要素に利用することができることから、その結果は影響評価研究などへ波及効果が大きい。この結果は、地球温暖化に対する日本国内の防災や環境対策は、緯度や東西方向に依存する程度の緩やかな地域性の基盤的な対策が、現段階では適当であることを示唆するもので、影響評価での発展的利用が期待できる。

<サブ4>

IPCC第6次報告書で気温上昇が極端に大きいモデル(ホットモデル)の全球平均気温変化予測は信頼性が低いと評価されたが、それが気温と降水量以外の変数の将来変化予測の信頼性に関係するのかは分かっていなかった。サブテーマ4では、ホットモデルは気温・降水量以外にも影響評価に使われる様々な気候変数の変化予測や経済影響評価の信頼性が低いことを初めて示し、不確実性を低減するための方法論を提示したことに先導性がある。

<行政等に既に貢献した成果>

特に記載すべき事項はない。

＜行政等に貢献することが見込まれる成果＞

貢献の見通しについては、以下の項目が挙げられる。

＜サブ1-1＞

前推進費研究の結果、温暖化時における西日本・東日本での局地的雷雨の増加および東日本での広域豪雨の増加は、モデルによらない不確実性の低い予測であり、防災対策の必要が明らかな一方、西日本での広域豪雨の将来予測不確実性は比較的大きいことを示した。本課題では、後者がモデルにおける亜熱帯ジェットと広域海面水温分布と深く関係することを明らかにした。亜熱帯ジェットと西岸強化流の表現向上によって西日本豪雨の将来予測不確実性が低減化できる可能性が示された。気候モデルのさらなる改良、及び、モデル検証の根拠となり詳細な豪雨予測を実現する衛星観測の継続と充実のための政策支援が重要であることを提案した。この結果は、気候変動による豪雨対策のための将来変化推定の精度向上に貢献できる。

ダウンスケーリング推定値を用いた河川流量推定調査の結果、低解像度の気候モデルシミュレーションから高解像度の強雨イベントを推定し、さらに観測値に対応した河川流量推定値が得られることが明らかになった。この結果は、気候変動による水災害リスク評価の精度を大幅に改善し、水災害の防災、減災に貢献できる。

＜サブ1-2＞

冬季日本に異常気象をもたらす西太平洋パターンの再現・予測精度向上のために高解像度気候モデルが必要なことを示し、数値気候モデルの一層の改良・高解像度化を支援する政策が求められることを提案した。

人口密集地帯に降水・降雪をもたらす「南岸低気圧」活動の海面水温や海氷に基づく予測は難しいことを明らかにし、大気・陸面間の相互作用等の正確な把握のため、観測の拡充と予報高精度化を支援する政策の必要性を提案した。

雲の放射冷却を人工的に強めて地球温暖化を緩和する方法であるMarine cloud brighteningがカリフォルニア沖で実施された場合に日本周辺の気候へ影響することを示し、地球温暖化緩和のための施策が別の望まない気候変化をもたらさぬよう注視・検討する必要性を提案した。

＜サブ2＞

サブテーマ2の成果より、影響評価や適応策策定における力学的効果の考慮の重要性が示唆された。具体的な評価において、気象学をベースにする研究者との情報交換を重ねていくことが重要であると言える。

＜サブ4＞

サブテーマ4では、ISIMIP3bが用いる共通気候シナリオは不確実性を過大評価していることを明らかにした。そのような気候シナリオを用いると経済影響評価も過大評価する可能性が高いことを示し、不確実性を低減するための方法も提案した。これは、IPCC第7次報告書に向けて気候変動の予測と影響評価の分野をまたいだ総合的な知見を得るために必要な道筋を示すものである。

サブテーマ4では、推進費S-18など日本の影響評価研究で広く使われる気候シナリオNIES2020（前身課題の成果）は、不確実性を過大評価していないことを示した。この知見は、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、重要な根拠を提供するものである。

6. 研究成果の発表状況の概要

6-1. 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	4 3
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1 0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	1 6 1
知的財産権：	0
「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
その他の成果発表：	0

6-2. 主な査読付き論文等の主要な成果

成果番号	主要な成果（10件まで）
21	A. Narita and Y. N. Takayabu: SOLA, Vol. 20, 16-22, doi:10.2151/sola.2024-003 (2024) The environment and precipitation characteristics of widespread extreme rainfall events during the Akisame season.
11	T. Yoshikane and K. Yoshimura: Sci. Rep. 13, 9412, https://doi.org/10.1038/s41598-023-36489-3 (2023) A downscaling and bias correction method for climate model ensemble simulations of local-scale hourly precipitation.
20	A. MIYAMOYO, H. NAKAMURA, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: J. Climate, 36, 8443-8459, (2023) Radiative impacts of Californian marine low clouds on North Pacific climate in a global climate model.
16	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: J. Climate, 36, 4793-4814 (2023) Distinct roles of cyclones and anticyclones in setting the midwinter minimum of the North Pacific eddy activity: a Lagrangian perspective.

28	T. HORINOCHI, Y. KAWATANI and N. SATO: Clim. Dyn, 323, 1-16, doi:10.1007/s00382-022-06418-7 (2022) Inter-model variability of the CMIP5 future projection of Baiu, Meiyu, and Changma precipitation.
29	N. SATO, T. HORINOCHI and Y. KAWATANI: SOLA, 19, doi: 10.2151/sola.2023-011 (2023) Bimodal distribution of precipitation found in the multimodel climate prediction over central Japan in winter.
38	T. OSE, H. ENDO, and T. NAKAEGAWA: J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II, (2024) Emergence of Future Sea-Level Pressure Patterns in Recent Summertime East Asia.
39	H. ENDO: J. Meteor. Soc. Japan, 101, 309-322. doi:10.2151/jmsj.2023-019. (2023) Long-term precipitation changes in the Baiu and Akisame seasons in Japan over the past 120 years (1901-2020).
42	H. SHIOGAMA, J. TAKAKURA and K. TAKAHASHI: Environ. Res. Lett., 17, 124028, doi: 10.1088/1748-9326/aca68d (2022) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator.
43	H. SHIOGAMA, M. HAYASHI, N. HIROTA, T. OGURA: SOLA, in press (2024) Emergent constraints on future changes in several climate variables and extreme indices from global to regional scales.

※この欄の成果番号は「Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細」と共通です。

7. 国際共同研究等の状況

<国際共同研究等の概要>

- 1) ソウル国立大学の研究グループと、朝鮮半島での豪雨についての共同研究を実施した。日本域での豪雨についてのこれまでの推進費研究に基づく知見を共有し、共同で国際誌論文を発表した。
- 2) イスラエル国のWeizmann Institute of Scienceとの二国間共同研究「斬新な解析手法による中緯度ストームトラック力学と全球的遠隔影響過程の理解の深化」を実施し、2022年度は日本側研究者がイスラエルを訪問、2023年度はイスラエル側研究者が日本を訪問しそれぞれ国際ワークショップを開催した。
- 3) 日中韓フォーサイト事業「北東アジアにおけるフューチャーアース推進のための気候変動研究共同拠点形成」に参画し、2023年度に韓国（4月）及び中国（12月）を訪問しそれぞれワークショップを行った他、東アジアの極端気象に関するレビュー論文の執筆を進めている。
- 4) 北極域研究加速プロジェクト（ArCS II）海外研究力強化プログラムにおいて「北極域気候変動と遠隔影響に関する日本・ノルウェー教育研究連携」を実施し、日本側・ノルウェー側研究者が互いに相手先機関を訪問しワークショップを行い共同研究を実施した。

<相手機関・国・地域名>

機関名	国・地域名（本部所在地等）
ソウル国立大学	大韓民国
Weizmann Institute of Science	イスラエル国
中山大学	中華人民共和国
釜山国立大学	大韓民国

University of Bergen	ノルウェー王国
----------------------	---------

8. 研究者略歴

<研究代表者略歴>

代表者氏名	略歴（学歴、学位、経歴、現職、研究テーマ等）
高薮 縁	東京大学理学系研究科修士修了 博士（理学）（論文博士） 国立公害研究所・国立環境研究所主任研究員、東京大学気候システム研究センター助教授・教授を経て、 東京大学大気海洋研究所教授（2023年度末まで） 専門は気象学。主に熱帯気象及び全球の降水と気候を研究

<研究分担者（サブテーマリーダー）略歴>

分担者氏名	略歴（学歴、学位、現職、研究テーマ等）	参画期間
1) 高薮 縁	東京大学理学系研究科修士修了 博士（理学）（論文博士） 国立公害研究所・国立環境研究所主任研究員、東京大学気候システム研究センター助教授・教授を経て、 東京大学大気海洋研究所教授（2023年度末まで） 専門は気象学。主に熱帯気象及び全球の降水と気候を研究	2022年度 ～ 2023年度
2) 堀之内 武	京都大学理学研究科修士修了 博士（理学） 学振海外特別研究員、京都大学助手・助教を経て、 現在北海道大学地球環境科学研究院教授	2022年度 ～ 2023年度
3) 仲江川 敏之	東京大学大学院工学系研究科修士修了 博士（工学） 東京大学生産技術研究所助手を経て、 現在、気象研究所応用気象研究部室長 環境省「気候変動による災害激甚化に関する影響評価検討委員会」座長、同「気候変動の影響に関するWG 水環境・水資源分野」委員 専門は、水文気候学と気候サービスを研究	2022年度 ～ 2023年度
4) 塩竈 秀夫	京都大学理学研究科修士修了 博士（理学） 国立環境研究所主任研究員を経て、 現在、国立環境研究所地球システム領域室長 専門は気象学、研究テーマは気候変動予測の不確実性	2022年度 ～ 2023年度

Ⅱ． 成果の詳細

Ⅱ－１ サブテーマ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」

〔サブテーマ１要旨〕

サブテーマ１では、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。さらに、CMIP6モデルデータ解析結果を水文モデル研究に適用し、社会に密着した情報伝達を可能にすることを旨とする。

＜サブ1-1＞では、まず局地的な極端降水の将来変化のグローバルスケールの環境要因の変化への依存性について物理的な理解を深めるための定量的解析を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する提案を行った。さらに、CMIP6モデルデータを高解像度化した情報を用いて水文モデルを走らせ、社会生活により密着した情報を抽出した。具体的には以下の6テーマで成果を上げた。(a) 梅雨期の強雨の将来変化予測の不確実性低減、(b) 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係の数値化、(c) 日本の梅雨期、秋雨期における広域豪雨をもたらす大規模環境場の比較、(d) 2020年7月豪雨に関する解析、(e) 機械学習手法を用いた全球気候モデル(CMIP6)出力データの高解像度化、(f) 複数シナリオダウンスケーリング推定値の陸面モデル(ILS)適用による球磨川流域河川量の評価

＜サブ1-2＞では、日本に極端気象をもたらす大気擾乱が、熱帯などの大気海洋結合変動からの遠隔影響、および、近海での大気海洋相互作用による変調を受けることに注目し、これらの温暖化に伴う変化の予測を不確実性ととともに評価し、その低減に資する知見を得ることを目的とした。具体的には以下のテーマで成果を上げた。(g) 東アジアの移動性低気圧活動の全球再解析データおよび大気大循環モデル大規模アンサンブルシミュレーションd4PDFを用いた評価とメカニズムの調査、(h) 日本の冬季に顕著な寒波をもたらす大気循環変動「西太平洋パターン」の季節予測可能性についての評価、(i) カリフォルニア沖の下層雲が日本周辺を含む太平洋広域に与える影響の気候モデル実験による定量化およびCMIP6モデルにおける下層雲再現性の評価、(j) ユーラシア極前線ジェット上のテレコネクションの構造やシルクロードパターンとの関連などの力学的特性や地球温暖化に伴う変化の調査。

サブテーマ１全体の目標達成度に関して、まず、研究結果について課題全体会合などを通じて共有して課題を総括し、地球温暖化評価研究グループにCMIP6モデルの将来予測のばらつきの低減に関する研究成果を共有することができた。また、国際誌への査読付き学術論文の発表数は25報（目標7報）と目標を大きく上回った。毎年の国民との対話も達成した。また、複数メンバーにより、2年間で7件の受賞があり、国内外のコミュニティへのインパクトが大きく評価された。

1. サブテーマ１研究開発目的

サブテーマ＜1-1＞では、局地的な極端降水の将来変化がグローバルスケールの環境要因の変化にいかに関係するかについて物理的な理解を深めるとともに定量化を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する解析手法を開発する。さらに、CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いて水文モデルを走らせることにより、社会生活により密着した情報の伝達に貢献する。サブテーマ＜1-2＞では、日本に極端気象をもたらす大気擾乱は、熱帯などの大気海洋結合変動から遠隔に影響を受け、また近海での大気海洋相互作用による変調を受けることに注目する。温暖化に伴いこれらがどう変わるかを予測の不確実性ととともに評価し、その低減に資する知見を得ることを目的として研究を実施する。

2. サブテーマ1 研究目標

サブテーマ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 (1-1: 極端降水に関する予測不確実性低減と水文研究への連携) (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)
サブテーマ1 実施機関	東京大学
サブテーマ1 目標	<1-1>局地的な極端降水の将来変化がグローバルスケールの環境要因の変化にいかに関係するかの関係について物理的な理解を深めるとともに定量化を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する解析手法を開発する。さらに、CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いて水文モデルを走らせることにより、社会生活により密着した情報の伝達に貢献する。 <1-2>日本に極端気象をもたらす大気擾乱は、熱帯などの大気海洋結合変動から遠隔に影響を受け、また近海での大気海洋相互作用による変調を受ける。温暖化に伴いこれらがどう変わるかを予測の不確実性ととともに評価し、その低減に資する知見を得る。 サブテーマ1は、影響評価研究課題（推進費S-18）に極端降水、熱波に関するCMIP6の不確実性低減情報、水文モデル実験情報を渡す。国際誌に7報以上の論文発表、国民との対話を行う。マニュアルの「気候変動影響評価と見直し」に資する。

3. サブテーマ1 研究開発内容

<サブ1-1>

（令和5年度）衛星降雨観測データ、再解析気象データ、CMIP6データを用い、豪雨をもたらす大規模場（上空の循環、水蒸気量、大気安定性）の効果を調べ、気候モデル内の降雨強度と大規模場との関係を検証する。CMIP6モデルデータを入力とした水文モデル実験を準備する。

（令和6年度）豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内の降雨強度との関係を数値化し、CMIP6モデルでの強雨の将来変化との関係を求め、将来の強雨変化の不確実性の幅を低減する。CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いた水文モデル実験により洪水の将来変化等の身近な情報に替えて社会に伝達する。

- (a) 梅雨期の強雨の将来変化予測の不確実性低減
- (b) 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係の数値化
- (c) 日本の梅雨期、秋雨期における広域豪雨をもたらす大規模環境場の比較
- (d) 2020年7月豪雨に関する解析
- (e) 機械学習手法を用いた全球気候モデル（CMIP6）出力データの高解像度化
- (f) 複数シナリオダウンスケーリング推定値の陸面モデル（ILS）適用による球磨川流域河川量の評価

<サブ1-2>

（令和5年度）日本の夏冬に極端気象をもたらす西太平洋パターンやシルクロードパターン、また日本付近の移動性低気圧活動について、CMIP6や大気大循環モデル大規模アンサンブルシミュレーションd4PDFに基づき再現性評価と将来変化の解析を行う。

（令和6年度）初年度に調査した各変動現象の将来変化をもたらす仕組みを解析し、プロセス理解に基づきモデル間の多様性と結びつけることで不確実性の起源を明らかにするとともに、現在気候再現性に対応づけて不確実性低減の可能性を探索する。

- (g) 全球再解析データおよびd4PDFを用いた東アジアにおける移動性低気圧活動の季節性の評価とメカニズムの調査
- (h) 日本の冬季に顕著な寒波をもたらす大気循環変動「西太平洋パターン」の季節予測可能性の評価
- (i) カリフォルニア沖の下層雲が日本周辺を含む太平洋広域に与える影響の気候モデル実験による定量化およびCMIP6モデルにおける下層雲再現性の評価
- (j) ユーラシア極前線ジェット上のテレコネクションの構造やシルクロードパターンとの関連などの

力学的特性及び地球温暖化に伴う変化の調査

4. サブテーマ1 結果及び考察

サブテーマ1の成果は、査読付き論文（1-27）、学会等における口頭発表（54-169）で公表した。また論文未発表の成果については現在投稿論文を準備中である。

<サブ1-1>

(a) 梅雨期の強雨の将来変化予測の不確実性低減

初夏（5-7月）の日本付近において強雨をもたらす降水システムは、大まかに、湿潤な環境場で生じる組織化した「広域豪雨タイプ」と、不安定な場で生じる面積が小さく背の高い「局地的雷雨タイプ」とに分類される（Yokoyama et al., 2017, 2019）。本研究では、Yokoyama et al. (2019)で開発した手法を適用し、全球降水観測（GPM）計画主衛星搭載のKu帯降水レーダ観測雨域データベースと全球再解析（JRA55）データ、最適内挿海面水温（OISST）データ、20個のCMIP6気候モデル群による大規模環境場の予測データを組み合わせた解析を実施し、上述の2タイプの雨域（衛星観測によるひとつながりの雨の領域として定義）の雨について、**将来変化予測のモデル間のばらつきをもたらす要因の調査および予測の不確実性低減の検討**を行った。本手法では、各タイプの降水を特徴づける大規模環境パラメータ（対流圏中層の大規模鉛直風および海面水温）から各タイプの降水分布を再構築することによって、気候モデルでは表現できない、強雨をもたらす具体的な降水システムの情報が得られる。

解析の結果、将来変化予測のばらつき方は、雨域のタイプや領域によって異なることが分かった。そこで、東日本（137.5° -142.5° E、35° -40° N）と西日本（130° -135° E、30° -35° N）とに分けてさらに解析した。その結果、局地的雷雨タイプの雨は、東日本・西日本の両領域において、どのモデルでも将来増加した。このタイプの雨の将来の増加量のモデル間ばらつきは、将来の海面水温の昇温量のばらつきと正相関し、海面水温の増加に伴う大気的不安定度の増加のばらつきに起因すると示唆された。

一方、広域豪雨タイプの雨の将来変化のばらつき方は、領域によって異なっていた。東日本では、将来の広域豪雨タイプの雨は、モデルによらず増加を示した。モデル間のばらつきは比較的小さく、領域の南東側の850 hPaにおける南北風の将来変化のばらつきと有意な相関を示した。対照的に、西日本における広域豪雨タイプの雨の将来変化は、増加から減少までモデル間で大きくばらついた。これらのばらつきと相関する大規模環境場は東日本とは異なり、日本付近における対流圏上層の亜熱帯ジェットおよび亜熱帯ジェット南側における対流圏中層の大規模上昇流が重要であることが分かった。これらの結果は、初夏の日本付近において亜熱帯ジェットの南でジェットの二次循環に伴う上昇流が降水システムの組織化に好都合な場を作り出していることを指摘した先行研究（Yokoyama et al. 2017, 2020）と整合的であり、西日本の広域豪雨タイプの雨の将来変化予測もまた、モデルによる亜熱帯ジェットやそれに伴う鉛直風の将来変化予測のばらつきに影響されることが考えられる。

さらに、西日本における広域豪雨タイプの雨の将来変化のモデル間のばらつきは、現在気候における西日本の海面水温のばらつきとも負相関することが示された（図1-1a）。そこで、西日本の海面水温が高いモデル群と低いモデル群に分けて解析した結果、海面水温が高いモデル群では、将来、日本付近における亜熱帯ジェットがより顕著に減速し、ジェットの南側において組織化タイプの雨がより抑制される傾向が見られた（図1-2a, b）。興味深いことに、西日本での海面水温が高いモデルほど、北太平洋および北大西洋における西岸強化流域の海面水温が高い傾向があり、西日本における海面水温のモデル間変動がローカルな現象ではなく、大規模な現象の一部であることが分かった。同時に、気候モデルは、西日本での海面水温の違いにより、全球規模の亜熱帯ジェットの現在気候パターンや将来変化パターンにも系統的な差異を示すことが明らかになった。これらの結果から、西日本における広域豪雨の将来変化予測は、亜熱帯ジェットを介して、気候モデルにおける北太平洋・北大西洋における西岸強化流域の海面水温表現に依存することが考察される。

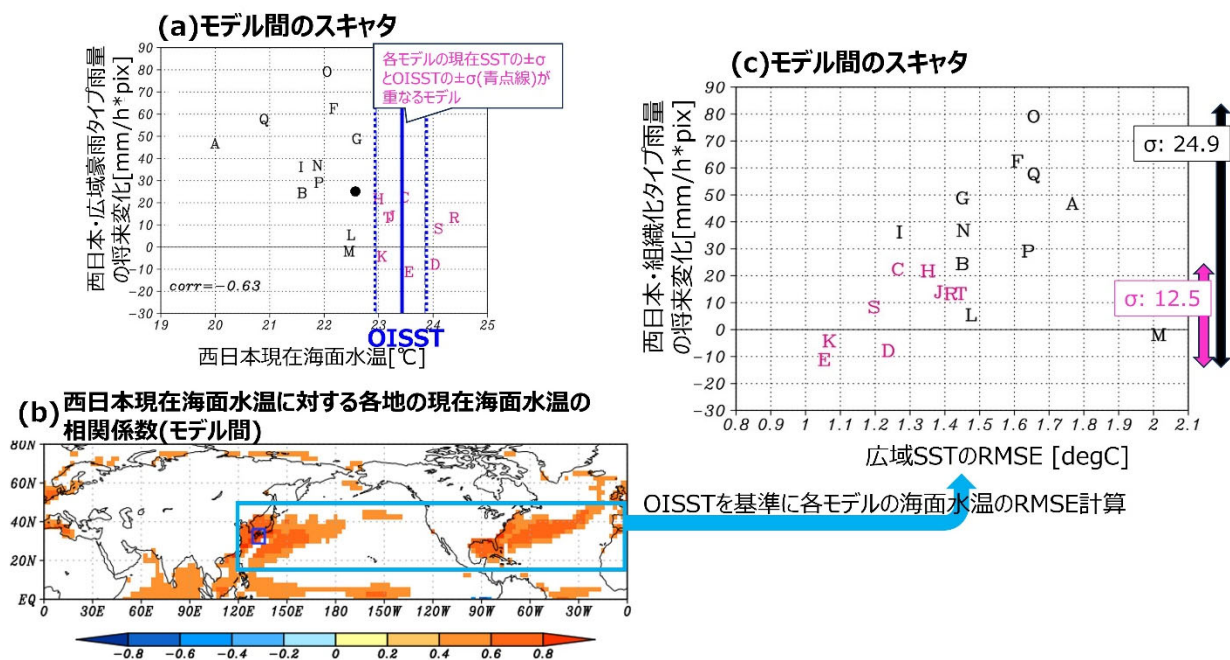


図 1-1 (a)現在気候の西日本における海面水温(°C)に対する西日本の広域豪雨タイプ雨量の将来変化(mm h^{-1} pixel)のマルチモデル間のスキッタ。(b)現在気候の西日本における海面水温に対する各地の現在海面水温の相関係数(モデル間)。(c)(b)における水色枠域の OISST を基準にした各モデルの海面水温の RMSE(°C)に対する西日本の広域豪雨タイプ雨量の将来変化(mm h^{-1} pixel)のマルチモデル間のスキッタ。20 モデルおよび選択された 9 モデル(ピンク)で計算した標準偏差を右端に記載。(a)において各モデルの現在海面水温の標準偏差と OISST の標準偏差(青点線)が重なる 9 モデル(ピンク)を選択した。

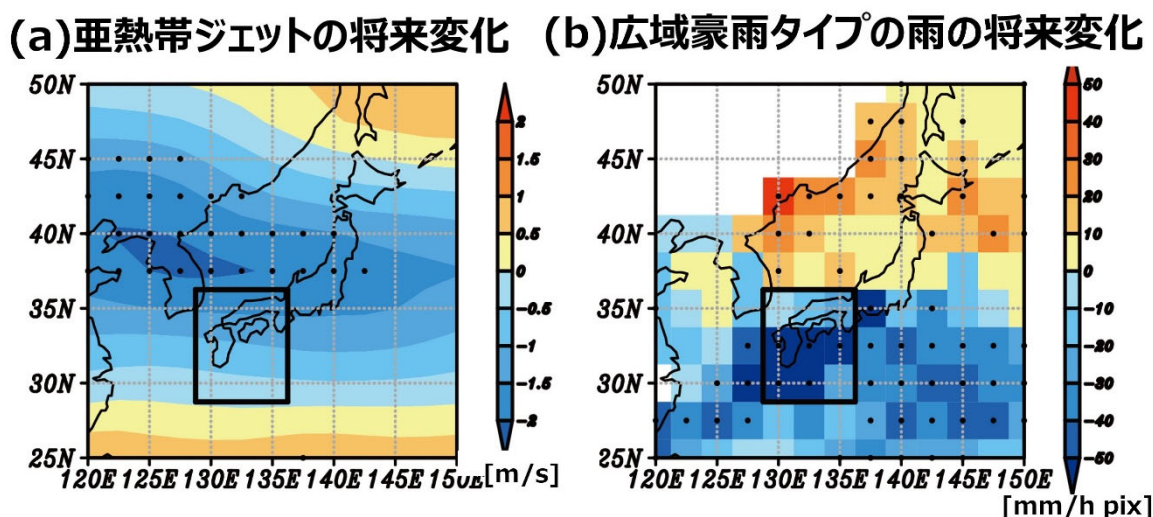


図 1-2 現在気候の西日本における海面水温の高い 8 モデル平均と低い 8 モデル平均の差。(a)亜熱帯ジェット(250 hPa の東西風; m s^{-1})の将来変化と(b)広域豪雨タイプの雨の将来変化(mm h^{-1} pixel)。色はモデル平均の差、黒点は差が 90% 有意である箇所を示す。黒枠の四角は西日本域を示す。

そこで、各モデルによる海面水温の再現性を示す指標として北太平洋・北大西洋における OISST を基準とした各モデルの二乗平均平方根誤差 (RMSE) を計算し (図 1-1b)、広域における海面水温再現性の

観点から西日本の広域豪雨予測の不確実性低減の検討を行った。その結果、広域における海面水温の再現性は、西日本の組織化タイプの雨の将来変化と相関があることが示された（図1-1c）。さらに、西日本の海面水温の再現性の良いモデルだけを選択したモデル間標準偏差は、全モデルに対する標準偏差に比べて約半分に低減した（図1-1c）。これらは、西日本における広域豪雨の将来予測には、気候モデルにおける広域の海面水温の再現性が全球規模の亜熱帯ジェット変動を通して関わっており、その観点からモデルを選択することで予測の不確実性を低減できることを示しており、より確度の高い予測情報を提供する上で重要な知見である。また、マルチ気候モデル間において西岸強化流の強度と亜熱帯ジェットパターンとの間に一定の相互関係があることは、今後のモデル改良にも繋がる新しい科学的知見である。

(b) 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係の数値化

先行研究から、極端降水発生時の大気環境は、下層から中層まで強く湿っていることに加え、成層の不安定度が比較的弱いことが知られている（Hamada et al. 2015）。このような特徴は、近年、日本付近で発生している豪雨にも見られる（Tsuji et al. 2020）。極端降水の将来予測の不確実性を低減する上で、モデルがこのような対流の環境場依存性を適切に表現できているかどうかを検証することが重要である。そこで、CMIP6モデルにおいて、極端降水が大気の湿潤度と成層の安定度にどのように関連しているかを調べ、観測および再解析データと比較した。

CMIP6が提供するデータには、日平均データと6 hourlyデータがあるが、6 hourlyデータでは解析対象にできるモデルの数が少なくなってしまうため、本研究は日平均データを使用した。安定度の指標としては、日平均データからCAPEを計算することができないため、Surface airの湿潤静的エネルギーと500hPaの飽和湿潤静的エネルギーの差（Surface Air Moist static energy Surplus: SAMS）を指標とした。湿潤度については、日平均データの鉛直解像度が粗く、可降水量を計算することが難しいため、925hPaより上で鉛直積分した水蒸気量（Free atmospheric Precipitable Water: FPW）を指標とした。モデル検証用に、降水量としてGSMaP、大気変数としてERA5のデータを用いた（2014年3月～2022年2月）。SAMSとFPWの2変数をx軸、y軸として降水量に対するビン（SAMS、FPWがそれぞれある値をとるときの平均的な降水量）を作成し、モデルと観測・再解析データを比較した。

観測と再解析データの組み合わせで、3 hourlyデータで作成したビンと日平均データで作成したビンと比較し、日平均でも3 hourlyのものと定性的に似た結果が得られることが確認された（図1-3）。頻度分布においては、海洋上で、不安定の度合いが比較的弱いときに、湿潤度が最大になるくちばし状の構造が見られる（図1-3）。極端降水はこのくちばし状の場所で発生する。降水のピークの位置は、海陸で明瞭な違いがあり、海洋上ではくちばしの上寄りに位置するのに対し、陸上では、くちばしの下寄りに位置する。陸上で発生する極端降水が、海洋上と比べてより安定な環境で発生するのが興味深い。CMIP6モデルは、降水量の安定度と湿潤度に対する依存性をおおまかに再現することに成功しているが、くちばし状の構造をうまく表現できていないモデルや、極端降水の量が少なすぎるモデル、逆に多すぎるモデルが存在する。降水量のピークの位置を表現できるモデルは少なかった。

モデルの極端降水のパフォーマンスを客観的に評価するため、各モデルの降水量のビンに対して、観測・再解析の結果に対するTaylor skill score (TSS)を計算した（図1-4右）。TSSは比較するデータの一致の度合いを表す指標だが、欠損値を含んでいると計算できないため、定義域（欠損値でない領域）が両者で重なっている領域に対して計算している。そこで、定義域の一致の度合いの指標として、両者のCritical success index (CSI)も計算した（図1-4左）。CSIでは海洋上と陸上で正の相関があるのに対し、TSSでは海洋上と陸上で負の相関が見られる。すなわち、海洋上で極端降水をよく表現しているモデルは陸上でのパフォーマンスが著しく悪く、逆に、陸上が得意なモデルは海洋上のパフォーマンスが著しく悪い。現状、海洋上と陸上の両方で高いスコアを持つモデルが一つも存在しないということが明らかとなった。このことは、極端降水に海洋と陸上の違いをもたらす未知のメカニズムが存在しており、それがまだCMIPの気候モデルで表現できていないことを示唆している。

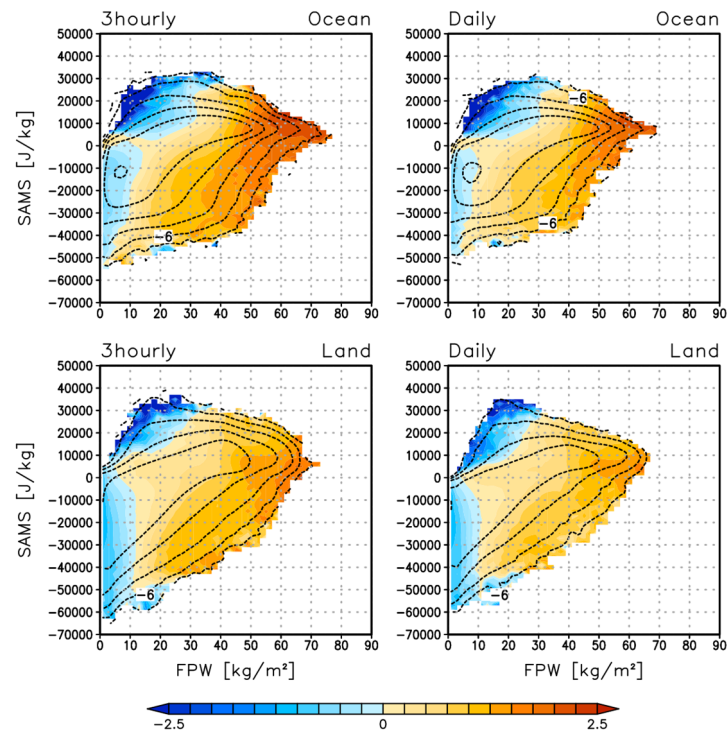


図1-3 FFW（横軸）・SAMS（縦軸）に対する降水量（ $\text{Log}_{10}[\text{mm/day}]$ ）のビン（カラー）。コンターは頻度分布（ $\text{Log}_{10}[\%]$ ）。左（右）は、3 hourly（日平均）データから作成したもの。上（下）図は、海洋（陸）上。降水量はGSMaP、SAMSとFFWはERA5から計算した。

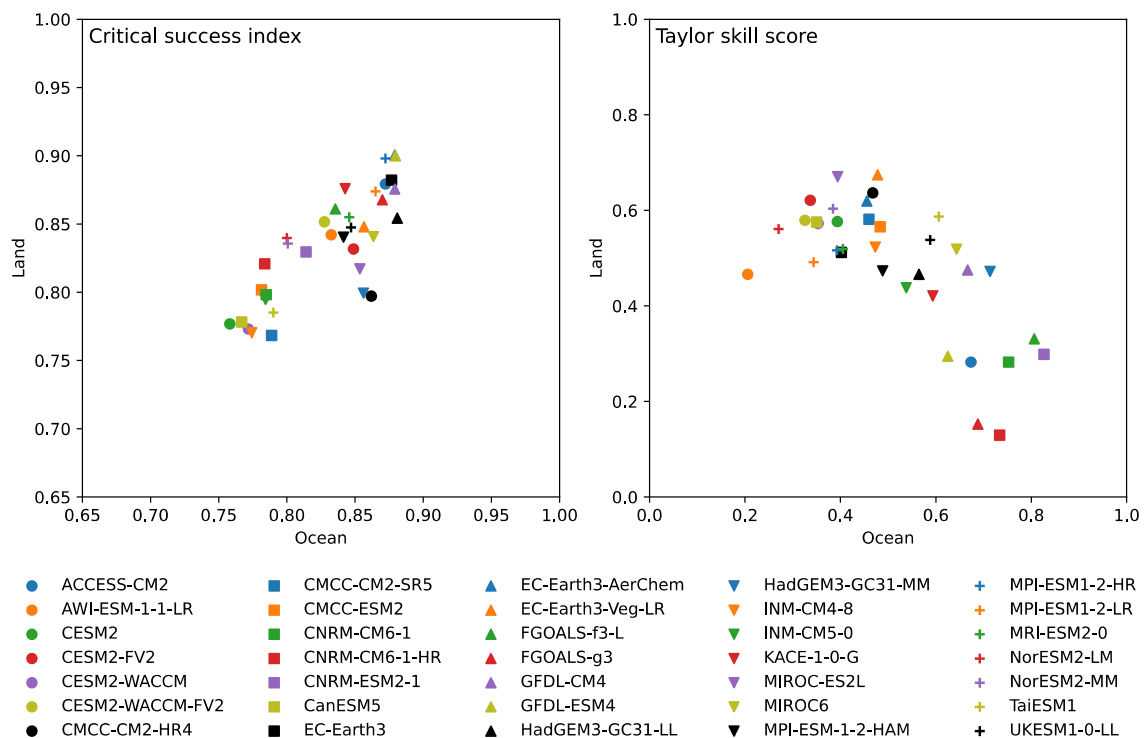


図1-4 FFW・SAMSに対する降水量の2次元のビンにおける、CMIP6モデルのCritical Success IndexとTaylor skill score。横軸は海洋上。縦軸は陸上。

(c) 日本の梅雨期、秋雨期における広域豪雨をもたらす大規模環境場の比較

気象庁JRA55再解析の気象データ、AMeDAS雨量計データ、JAXA GSMP降水量データ、GPM衛星降水レーダーデータを用い、秋雨期の広域豪雨の降水特性と気象場を調査した。その結果、秋雨期の広域豪雨は、梅雨とは異なる気候場と大気擾乱の重ね合わせとして発生することを明らかにした。まず秋雨期の気候場は、梅雨期と異なり、東方にシフトした北太平洋の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することを示した。湿潤な条件下で、強い対流と広い層状降水を伴うよく組織化された降水システムが大雨をもたらす点は梅雨期と似通る。次に、渋谷ら（2021）が開発した手法を用い、広域豪雨に伴う擾乱構造の解析を行った。秋雨期の東日本の広域豪雨では、東日本への水蒸気輸送は北東-南西方向の双極子構造をもつ擾乱の気圧配置によって強化されており、これは梅雨の西日本豪雨とは異なっていた（図1-5）。

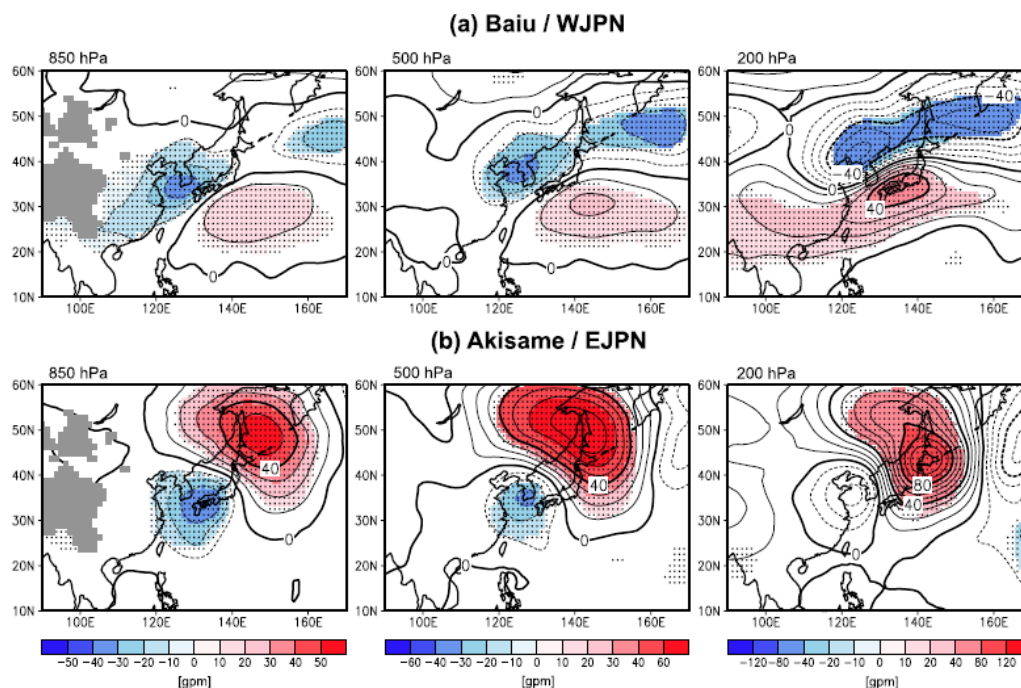


図1-5 1979-2020年における広域豪雨時のジオポテンシャル高度偏差 (gpm) のコンポジット。(a)梅雨期（103事例）、(b)秋雨期（102事例）の結果。左列は850 hPa、中央列が500 hPa、右列が200 hPaを示す。

(d) 2020年7月豪雨に関する解析

2020年7月に九州で豪雨をもたらした降水システムの発生、発達と関係する階層構造について、気象庁メソモデル(MSM)初期値データ、JRA55再解析データ、ひまわり8号赤外輝度温度データ、気象庁地上レーダーデータを用いて解析を行った。

解析から、2020年7月豪雨は図1-6に模式的に示す階層構造の元、豪雨をもたらす降水システムが発生、発達したことを明らかにした。まず、豪雨に先行して上層のトラフやトラフ前面の雲域(sub-synoptic scale cloud system)が発達、水蒸気を九州に流入させ、豪雨をもたらす降水システムの発達に好ましい環境場が生成される(図1-6)。加えて、上層トラフの直下で発達したメソスケール擾乱やトラフ前面の雲域と関係した循環が九州付近で傾圧性を高める(図1-6a)。このような環境場において、九州の西の海上で活発な対流域が生成、200～300 kmのスケールを持つ降水システムに発達する(図1-6b)。この降水システムの中にはメソβスケールの降水域が複数存在し、これが豪雨災害の原因となった。この降水システムを解析から、地表から700 hPa程度までの厚さを持つ水蒸気流入層が強雨域近辺で斜めに上昇し、上昇域で湿潤絶対不安定層(MAUL)を伴う構造が確認された(図1-6b)。このような特徴は、熱帯海上などの湿った環境場において発達し、多量の降水をもたらすことが先行研究で指摘されているよく組織化したメソ対流系の構造と整合的である。

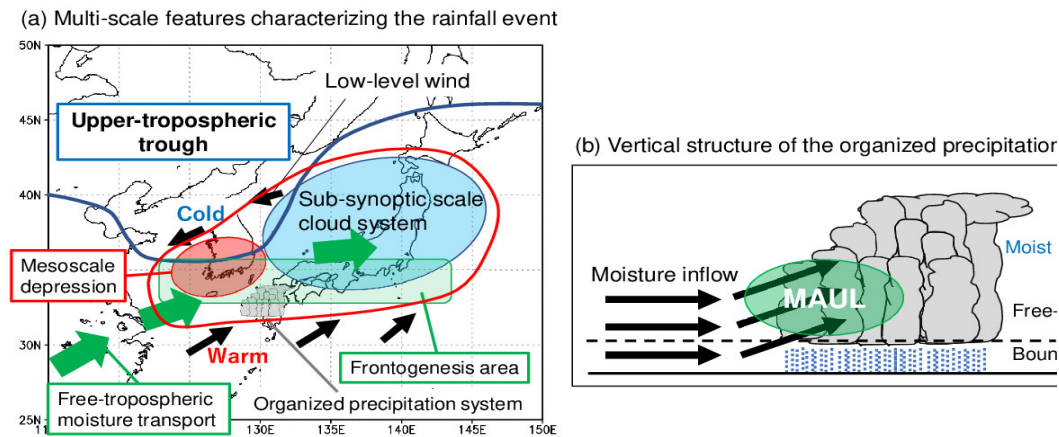


図1-6 解析によって明らかにした2020年7月豪雨における環境場の階層構造と降水システムの特徴の模式図。

(e) 機械学習手法を用いた全球気候モデル（CMIP6）出力データの高解像度化

気候変動による水災害、水資源リスク評価研究の発展を目的として、機械学習手法を用いたダウンスケーリング・バイアス補正手法を開発し、CMIP6の複数のモデル、複数のシナリオによる気候モデルシミュレーションの出力データを用いたダウンスケーリング・バイアス補正を実行した。ダウンスケーリング推定値を水文モデル（統合陸域シミュレータ）に適用し、河川流量・積雪水量を算出し、観測と比較しながらパフォーマンスを評価した。システムの全体図を図1-7に示す。本手法で用いる訓練データとして、ERA5再解析データや解析雨量データによる降水量、気温、地上風、比湿、気圧、下向き短波・長波放射、雲量を2008年から2018年までの各月毎のデータを用いた。説明変数はERA5再解析値（3時間間隔）を1.5度にアップスケールした7x7格子のデータを用いた。目的変数には降水は解析雨量、降水以外ではERA5の10km解像度、1時間データを用いた。本手法では、空間ダウンスケーリングと同時に対象時間帯の前後3時間のデータを用いて時間ダウンスケーリングを実施した。

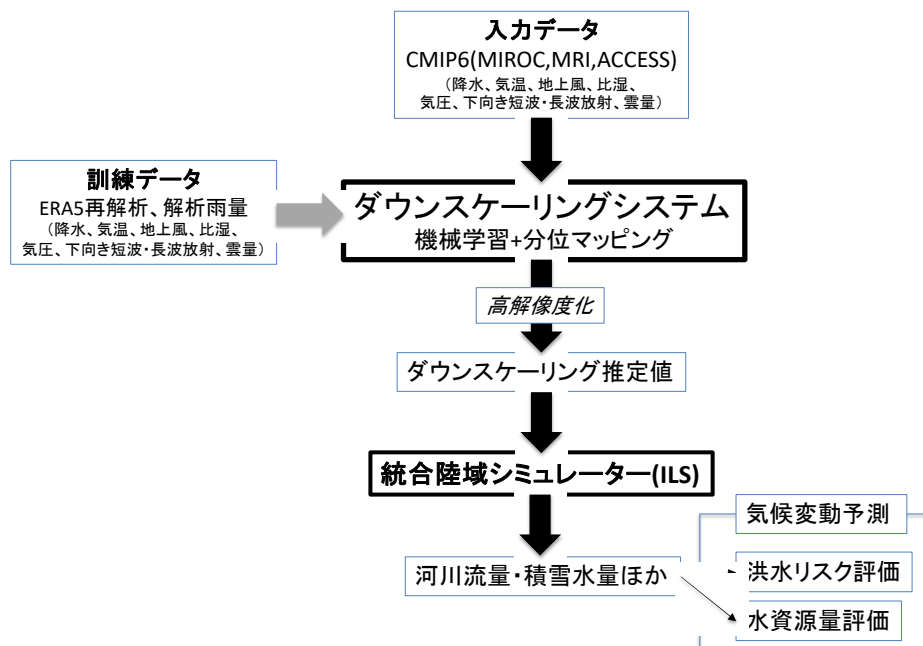


図1-7 ダウンスケーリング・バイアス補正手法とILSへの適用の全体図

ダウンスケーリング・バイアス補正実験では、MIROC, MRI, ACCESSの3つのCMIP6モデルのhistorical実験の1985年から2014年とssp126およびssp370の2つの将来シナリオ実験の2015年から2044年までの

各30年間のデータを用いて、空間解像度150kmから10km、時間解像度3時間から1時間へのダウンスケーリング実験を実施した。図1-8は現在の30年間の7月の降水量、 1mmh^{-1} 以上の降水頻度、99パーセンタイル値の空間分布の入力データ（CMIP6 MIROC historical）（上図）、本手法による推定値（中央図）、観測値（下図）である。入力データでは低解像度により観測で見られる地形に対応した空間分布特性が不明瞭だが、本手法による推定値では、ほぼ観測値と対応した空間分布特性が得られている。入力データでは、強雨の再現が困難だが、本手法により観測とほぼ同様の強雨が推定されており、バイアスが大幅に改善されたことが確認できる。

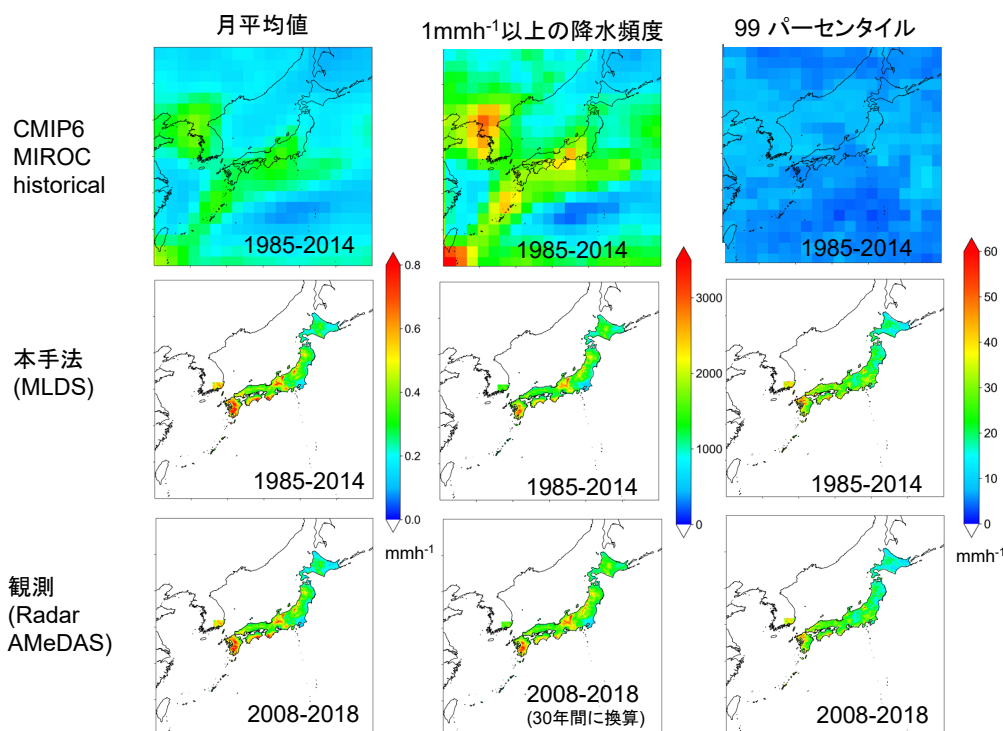


図1-8 30年間の7月の月平均、 1mmh^{-1} 以上の降水頻度、99パーセンタイル値の空間分布。入力データ（CMIP6 MIROC historical, 1985~2014）（上図）、入力データを用いた本手法推定値（中央図）、観測（下図）を示す。観測は、2008~2018年の11年間の結果。

(f) 複数シナリオダウンスケーリング推定値の陸面モデル（ILS）適用による球磨川流域河川量の評価
さらに、上記の高解像度化データを水文モデル（ILS）に適用して、主に河川流量について観測値と比較しながらパフォーマンスの評価を実施した。図1-9は、球磨川流域における 80mm/day 以上の流域平均降水量の頻度で、上図が入力データ、下図が本手法による推定値の結果である。 80mm/day はほぼ95パーセンタイル値に相当する。入力データでは、MIROC, MRI, ACCESS, IPSL, MPIのいずれのCMIP6モデルで顕著な過小評価になっており、強雨イベントに対応する降水量が再現できていない。一方で、本手法による推定値では観測値と有意差がなく、強雨が推定されたことがわかる。複数のモデル、複数のシナリオで実験を実施して、不確実性の幅を評価することにより将来予測の精度が大幅に改善されたことが確認された。

球磨川流域における7月の80mm/day以上の流域平均降水量の頻度(30年間当たりの日数)

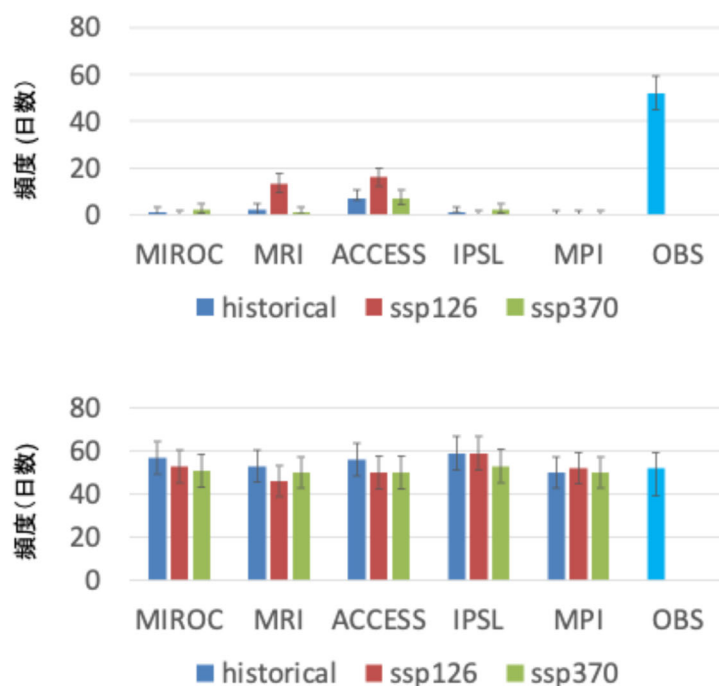


図1-9 球磨川流域における80mm/day以上の流域平均降水量の全期間(7月の30年間:930日)当たりの日数で、上図が入力データ、下図が入力データを用いた本手法による推定値の結果である。80mm/dayは観測値のほぼ95パーセンタイル値に相当する。誤差はポアソン分布による標準偏差を示す。

また、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した。河川流量は防災基本計画や洪水の避難の判断に使用されるなど重要な情報であり、本手法により流量の再現精度が大きく改善されたことを確認した。図1-10は、熱帯性擾乱の通過時の降水量(上段)と河川流量(下段)の空間分布の時間変化を示す。上図が入力データ

(CMIP6-MIROC)、下図が本手法による推定値を示す。入力データでは熱帯性擾乱の通過に伴う降水量が少なく、河川流量の変化も小さいが、推定値では、熱帯性擾乱の動きに対応した降水変化が顕著であり、それに伴い河川流量が大きく変化している様子が確認できる。大規模スケールでの擾乱等の動きに対応した局地降水の時間変化特性の推定は本手法の基本的なコンセプトであり、気候モデルの降水再現性を大幅に改善し、擾乱に伴う強雨イベントによる洪水イベントの詳細を調査することが可能である。

熱帯性擾乱通過時の降水量と河川流量の時間変化

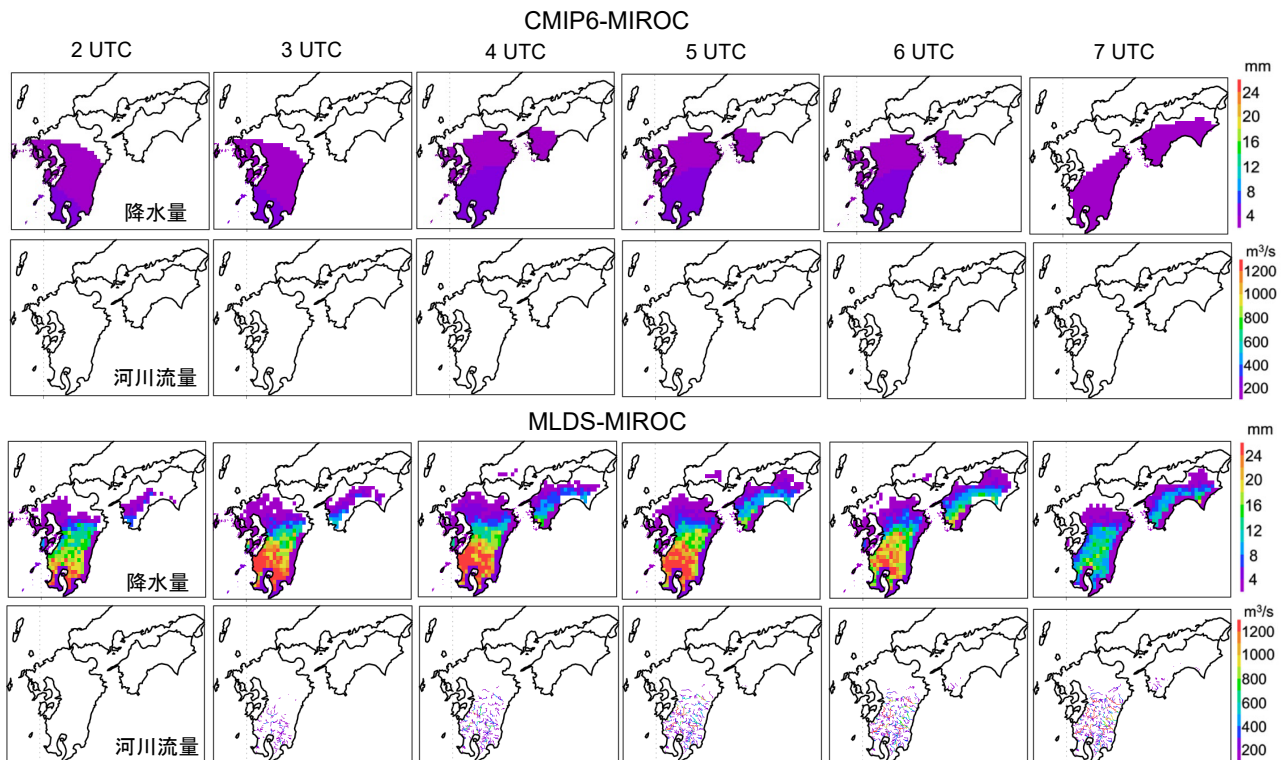


図1-10 熱帯性擾乱の通過時の降水量（上段）と河川流量（下段）の空間分布の時間変化を示す。上図が入力データ（CMIP6-MIROC）、下図が本手法による推定値（MLDS-MIROC）を示す。

さらに、球磨川流域で河川流量の95パーセンタイルに相当する $1,200\text{m}^3/\text{s}$ の頻度が観測値と統計的に差がないことを示した。図1-5は球磨川流域での30年間の7月の $1,200\text{m}^3/\text{s}$ 以上の頻度を示す。 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ は観測値の95パーセンタイル値に相当する。上図が各モデル（MIROC, MRI, ACCESS）のhistoricalシナリオの入力データ（CMIP6）と、それぞれの入力データに対応する本手法推定値（MLDS）を用いた頻度、下図が各モデルのhistorical, ssp126, ssp370シナリオの入力データを用いた本手法推定値の頻度を示す。上図のhistoricalシナリオの入力データ及び本手法推定値の頻度では、入力データで顕著な過小評価であるのに対し、本手法推定値ではいずれのモデルも観測と有意差がなく、河川流量が大きな時の頻度がよく推定されていることが確認できる。本手法推定値（MLDS）を用いたモデル毎の頻度について、ssp126及びssp370では、流域平均降水量（図1-11）と同じくhistoricalとの有意差が確認できなかった。球磨川流域におけるシナリオによる降水量の変化が小さかったためと推測される。一方で、MRI-ssp126とACCESS-ssp370では有意差が確認できる。各モデルのシナリオ間の変化に統一が見られないことから、この差は温暖化による影響よりも自然変動による影響が大きいことが示唆される。

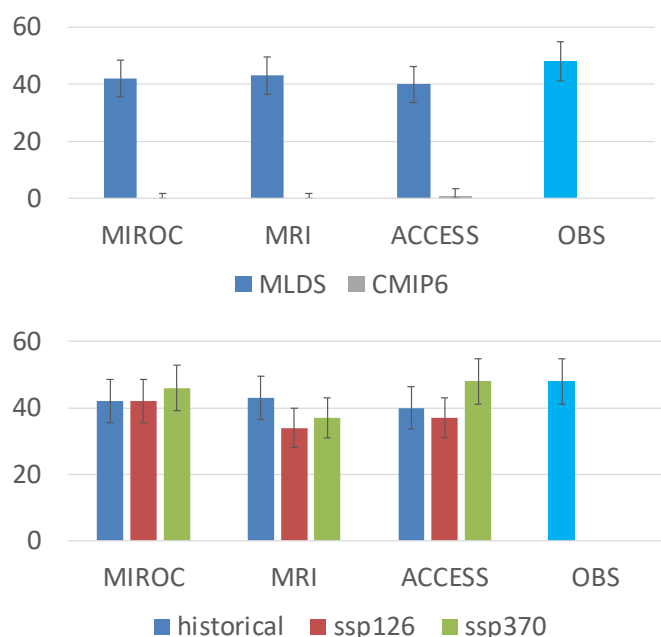
球磨川流域(横石)における7月の1,200m³/s以上の頻度(30年間)

図1-11 球磨川流域での30年間の7月の1,200m³/s以上の頻度を示す。1,200m³/sは観測値のほぼ95パーセンタイル値に相当する。上図が各モデル(MIROC, MRI, ACCESS)の入力データ(CMIP6)と本手法の推定値(MLDS)を用いた頻度、下図が各モデルのhistorical, ssp126, ssp370シナリオを用いた本手法による推定値の頻度を示す。OBSは国土交通省水文水質データベースによる1988年から2017年までの30年間の河川流量データを用いた。誤差はポアソン分布による標準偏差を示す。

その一方で、ダムや遊水池による流量調整の重要度や、自然変動（特に台風）による河川への影響評価の難しさが顕在化し、さらなる精度向上および信頼性向上に向けて今後の課題が明らかになった。また、CMIP6モデルをダウンスケーリングして水文モデルに適用することにより観測されていない様々な極端現象による洪水パターンの再現が可能である。洪水被害を最小限にするために最適なダム、遊水池の建設や調整方法について水文モデルを用いてシミュレーション評価することにより、災害に強いまちづくりに貢献できるだろう。研究成果について、MLDS手法の有効性を示した論文を国際誌に投稿した。また、水文モデルの開発とMLDS手法の詳細について、国内外の学会で発表した。さらに、新聞・雑誌などのマスメディアに研究成果を広く公開した。気候変動による洪水リスク評価や水資源量評価等の情報を分かりやすく伝達するためデータを提供した。

<サブ1-2>

(g) 全球大気再解析データJRA-55並びに大規模アンサンブルシミュレーションd4PDFの過去再現実験・温暖化実験データに対し、新規に開発した移動性低気圧中心を客観的に抽出する手法（査読有り学術論文7）や大気の前線の客観的同定法を適用し、東アジアに極端気象をもたらす主要因の1つである移動性低気圧について日本周辺における活動の季節性を明らかにした（口頭発表59・65）。本州南岸を通る移動性低気圧（所謂「南岸低気圧」）の頻度は春季に極大となり、東日本太平洋側を中心とする春季の降水極大との関連が示唆される。その頻度極大には、華南から東シナ海における下層ジェットが春にかけて気候学的に発達し、その北縁で低気圧性シアが強まることが本質的に重要で、大気の前線とそこで発生する低気圧の頻度が明らかとなった。さらに、線形傾圧モデルを用いた数値実験から、冬から春への下層ジェットの発達には熱帯域よりも寧ろチベット高原周辺における非断熱加熱の季節進行が重要な事が明らかになった。また、d4PDFの過去再現実験においても「南岸低気圧」活動は春季に極大となり、東アジア域の移動性低気圧活動の季節性を比較的良く再現することが確認できた。一方、1980年頃から2000年代

にかけての春季東アジアにおける移動性低気圧活動の減少は、d4PDF過去再現実験のアンサンブル平均場には見られなかった。そこで、d4PDF大アンサンブルデータの特性を活かし、春季「南岸低気圧」活動の経年変動のうち海面水温及び海氷の変動によって予測され得る割合(潜在的予測可能性)を定量的に評価した結果、その潜在的予測可能性は冬季よりも低く、経年変動の大部分(90%以上)は大気内部変動に伴う事が分かった。これは、海面水温や海氷以外の要素として、チベット周辺域の大気-陸面相互作用等を季節予測において活用する必要性を示唆する。さらに、d4PDFの温暖化実験(全球平均気温の4度昇温に対応)から、温暖化時にも依然として「南岸低気圧」活動の春季極大は見られるものの、その春季の活動自体が有意に弱化するという結果が得られた。温暖化実験では、低気圧活動の弱化と整合的な東シナ海周辺域の下層ジェットの低気圧性シアの弱化に加え、上空のジェット気流の弱化及び大気の静的安定度の増加を反映した傾圧擾乱の最大成長率の低下も見られた。加えて、春季「南岸低気圧」に対する海面水温及び海氷変動による潜在的予測可能性が温暖化時に高まるという結果も得られた。

(h)2022年2月に日本各地で最深積雪の歴代1位記録をもたした寒波事例について、水平解像度50kmの大気大循環モデルに北太平洋中高緯度で観測された海面水温を与えた寒波の予測再現アンサンブル実験と、平年の水温分布を与えた参照アンサンブル実験との比較を行った(ポスター発表9)。その結果、この月の日本域へ寒気南下には、北太平洋10年規模変動に伴う中緯度域の暖水偏差の影響により、冬季北太平洋域で卓越する大気循環変動「西太平洋パターン」の位相が日本上空での寒帯前線ジェットや亜熱帯ジェットを南下させる状態を取りやすかったことが寄与した可能性が見出された。一方、熱帯で観測された水温偏差からの影響を同様に評価したが、それによる「西太平洋パターン」の位相の変化は見出されなかった。以上の結果は、北太平洋中緯度の海水温変動が「西太平洋パターン」の潜在的予測可能性に寄与し、その影響は熱帯のものより大きい可能性を示唆する。さらに、この結果は、現在の気候のみならず将来気候の予測においても中緯度水温変動が日本の気候変動に与える影響が無視できないことを意味する。因みに、水平解像度が粗い100kmの大気大循環モデルで同様な実験を行ったところ以上の傾向は見出されず、中緯度の水温変動の季節予測可能性への寄与や日本の気候変動への影響の評価には高解像度気候モデルが必要なことを示唆する。

(i)大気海洋結合モデルにて下層雲の放射効果を特定の領域で除去することで、カリフォルニア沖下層雲が日本周辺を含む太平洋広域の気候に与える影響を評価した(査読有り学術論文9)。下層雲は、太陽光の反射効果により直下の海面水温(SST)を低下させるが、このSST低下の応答は亜熱帯高気圧の強化を引き起こしつつ、下層雲領域にとどまらず南西側へ拡大する。この非局所的な応答は、貿易風強化に伴う海面蒸発の増大を介したwind-evaporation-SST(WES)フィードバックによってもたらされることが分かった。このjoint low cloud-WESフィードバックが、亜熱帯北太平洋SSTの海盆スケールの東西コントラストを説明するほど重要なことが初めて定量的に示された。この結合応答は夏から秋に特に強いという季節性を持つ。地表付近の高気圧応答に付随して、下層雲は第一傾圧的な応答として対流圏上層には低気圧応答をもたらす。この南縁に位置するハワイ周辺では、上層の西風強化と下層の北東貿易風強化に伴って風鉛直シアが30%程度強化する。この鉛直シア強化とSST低下はハワイ周辺のハリケーン発生を抑制するように働くことが分かった。さらに、下層雲は海洋循環の変化を通じて日本周辺域の気候にも影響する。亜熱帯高気圧強化に伴う海洋への高気圧性風応力カールの注入は、北太平洋亜熱帯循環系を加速するように働き、黒潮を約30%加速させる。これに伴う水温上昇応答によって、黒潮周辺では約20%年平均降水量が増加することが分かった。なお、最新のCMIP6気候モデル群でカリフォルニア沖下層雲の再現性を調査すると、モデル間で大きなバラツキがあることが分かった。特に、太平洋広域影響の主要因である暖候期の下層雲を気候モデルは過小評価する傾向が分かり、太平洋の気候の再現性に影響する可能性が示唆された。

(j)夏季東アジアの天候は、チベット高原北縁上空を吹くアジアジェットに沿うテレコネクション「シルクロードパターン」に加え、ユーラシア大陸の北極沿岸域上空を吹く極前線ジェットに沿った東西波列

状のテレコネクションの影響も受ける。この「極前線ジェットテレコネクション」について、全球大気再解析データERA5及び大規模アンサンブルシミュレーションd4PDFの過去再現実験と4°C温暖化実験データを用いて、力学特性と地球温暖化に伴う変動を調査した(口頭発表63)。同テレコネクションにおいて特定の東西位相の卓越は顕著でなく、その東西位相次第でシルクロードパターンと相関を持ったり、オホーツク海高気圧の形成に影響したりすることで、東アジアの天候に影響することを見出した。その変動の大部分は大気の内部分動で、潜在的予測可能性が低いことも示唆された。さらに、d4PDFの過去再現実験と4°C温暖化実験の比較を行い、この夏季極前線ジェットテレコネクションに伴う大気循環偏差が全体としては特に対流圏で弱化する一方、ジェット下流側に当たる極東域ではやや強化される傾向を見出した。これに対応して、同テレコネクションによるオホーツク海高気圧への影響も、特に晩夏に温暖化によって強まる傾向も見出した。

5. サブテーマ1 研究目標の達成状況

サブテーマ<1-1>は、局地的な極端降水の将来変化がグローバルスケールの環境要因の変化にいかに関与するかについて物理的な理解を深めるとともに定量化を行い、CMIP6モデルにおける極端降水の将来変化予測の不確実性の幅を低減する解析手法を開発する。さらに、CMIP6モデルデータの不確実性を評価した情報を用いて水文モデルを走らせることにより、社会生活により密着した情報の伝達に貢献することを目指した。これに対し、(a) 西日本における梅雨期の広域豪雨の将来予測には、気候モデルにおける広域の海面水温の再現性が全球規模の亜熱帯ジェット変動を通して関わっており、大気海洋の大規模場の観点からモデルを選択することで予測の不確実性を低減できることを示すことができた。(b) 豪雨をもたらす大規模場効果と気候モデル内降雨強度との関係を調査し、蓄積された衛星観測データとの統計的比較によりCMIP6モデルの中で海洋上と陸上の両方で高いスコアを持つモデルが存在せず、極端降水に海洋と陸上の違いをもたらすメカニズムがまだCMIPの気候モデルで表現できていないことを示した。(c) 秋雨期の東日本の広域豪雨では、東日本への水蒸気輸送は北東-南西方向の双極子構造をもつ擾乱の気圧配置によって強化されており、これは梅雨の西日本豪雨とは異なっていることを示した。また、(e) 機械学習手法を用いた全球気候モデル(CMIP6)出力データの高精度化、(f) 複数シナリオダウンスケーリング推定値の陸面モデル(ILS)適用による球磨川流域河川量の評価の各テーマにおいてCMIP6モデル出力データを高精度化した情報を用いた水文モデル実験により、社会に伝達しやすい洪水の将来変化等の身近な情報に替えて伝えることができた。以上の成果により、目標は十分に達成することができたと言える。

サブテーマ<1-2>は、日本に極端気象をもたらす大気擾乱が、熱帯などの大気海洋結合変動から遠隔に影響を受け、また近海での大気海洋相互作用による変動を受けることに注目し、温暖化に伴いこれらがどう変わるかを予測の不確実性ととも評価し、その低減に資する知見を得ることを目標とした。これに対し、(g) 日本を含む東アジアに極端気象をもたらす得る南岸低気圧活動の季節性とd4PDFにおける再現性評価及び温暖化に伴う変化メカニズムの調査、(h) 日本の冬季に寒波をもたらす大気循環変動「西太平洋パターン」の季節予測における中緯度海洋変動の重要性とモデル解像度依存性の評価、(i) カリフォルニア沖下層雲が駆動するjoint low-cloud-WESフィードバック系が日本周辺の黒潮や降水に遠隔影響を及ぼす要因であることの気候モデル実験による実証およびCMIP6モデル群におけるカリフォルニア沖下層雲の再現性の評価、(j) 日本の夏季天候にとって重要なテレコネクションの1つであるユーラシア極前線ジェット上のテレコネクションの構造やシルクロードパターンとの関連などの力学特性や地球温暖化に伴う変化の調査を行い、それぞれのテーマにおいて物理的な理解を深め、今後の影響評価研究等に有益な成果を上げることができた。以上により、目標は十分に達成できたと言える。

サブテーマ1全体の目標としては、影響評価研究課題(推進費S-18)に極端降水、熱波に関するCMIP6の不確実性低減情報、水文モデル実験情報を渡す。国際誌に7報以上の論文発表、国民との対話を行う。マニュアルの「気候変動影響評価と見直し」に資することと設定した。結果、成果は課題全体会合などを通じて共有し、課題の総括に貢献した。査読付き学術論文の発表数は27報(うち国際誌24報)と目標を大きく上回った。毎年の国民との対話も達成した。また、サブ1の複数メンバーにより、2年間で7件の受賞があり、国内外のコミュニティへのインパクトが大きく評価された。以上、目標を上回る成果であった。成果の一部は未出版であり、今後まとめたい。

<引用文献>

C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and T. HORINOUCI: J. Climate, 30, 8127-8147,

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0724.1> (2017)

Precipitation Characteristics over East Asia in Early Summer: Effects of the Subtropical Jet and Lower-Tropospheric Convective Instability.

C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU, O. ARAKAWA and T. OSE: J. Climate, 32, 5251-5274, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0656.1. (2019)

A study on future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments

C. YOKOYAMA, H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 98, 235-255, doi: 10.2151/jmsj.2020-013 (2020)

The Effects of an Upper-Tropospheric Trough on the Heavy Rainfall Event in July 2018 over Japan.

A. HAMADA, Y. N. TAKAYABU, C. LIU and E. J. ZIPSER, 2015: Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms. Nat. Commun., Vol. 6(6213), doi:

<http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7213> .

H. TSUJI, C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 98, doi:10.2151/jmsj.2020-045 (2020)

Contrasting features of the July 2018 heavy rainfall event and the 2017 Northern Kyushu rainfall event in Japan.

Ⅱ－２ サブテーマ２「成層圏と対流圏上層ジェットの影響に関する予測不確実性低減」

〔サブテーマ２要旨〕

サブテーマ２では、地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるかとその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価して低減を図ることを目的として研究を実施した。CMIP5、CMIP6気候モデルにおいて、中部日本に対応する領域で予測された冬季の地上気温と降水量の変化を調べたところ、どのモデルも地上気温の上昇を予測している一方で、降水量に関しては、増加を予測するモデルと、ほとんど増加しないか、減少すると予測するモデルに分かれた。この違いは主に低気圧活動の変化の違いによって生じることを明らかにした。その要因は偏西風帯の北上傾向の違いと関連していることから、ジェットの再現性が冬季降水の予測に重要であると明らかになった。また、従来の研究では冬季の成層圏の極渦が将来強まるか弱まるか不明であるとされたが、極渦の現在気候の再現性に着目して解析したところ、弱まる可能性が高いと示唆された。これにより、極渦の変化が東アジアの降水に及ぼす影響遠隔影響の不確実性が低減された。また、海洋フロントと成層圏の関連についても示唆を得た。日本の夏季の降水については、日本の南の海上における下層の南風の将来変化が水蒸気フラックスの変化を左右し、梅雨降水の変化の多寡を左右することなどを明らかにした。さらに、シルクロードテレコネクションの停滞成分の位相の変化が梅雨の降水量に影響を与えることも明らかにした。

１． サブテーマ２研究開発目的

サブテーマ２では、地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、またその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価し、低減を図ることを目的として研究を実施した。

２． サブテーマ２研究目標

サブテーマ２	「成層圏と対流圏上層ジェットの影響に関する予測不確実性低減」
サブテーマ２実施機関	北海道大学、東京学芸大学
サブテーマ２目標	地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、またその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価し、低減を図る。成果はサブ１の総括に貢献すると共に、２報以上の学術論文として発表する。

３． サブテーマ２研究開発内容

積雪の多い中部日本における冬季の降水量の予測のモデル間相違とその成因を調べた（Sato et al., 2023, 成果番号29）。使用したのは、CMIP5のRCP4.5シナリオによる予測データである。本研究では、32個の気候モデルによる予測データをあらかじめ水平解像度2.5度×2.5度に変換した上で解析した。まず、中部日本における冬季（12～2月）の気温と降水量の21世紀におけるトレンドによって、32個のモデルを2つのグループに分け、グループ間で、気温、降水量、海面気圧、東西風などの気候予測の差異を調べた。基本的にはRCP4.5シナリオによる月別の予測値を用いたが、渦南北熱輸送を計算するときには、1980/81～1998/99年冬季と2080/81～2098/99年冬季における日別値を用いた。これらのデータを使い、モデル間での降水量予測の違いと、南北温度勾配や上部対流圏の偏西風などとの関係を明らかにした。

CMIP6モデル群を用いて、日本域での冬期降水量の変動に関係する、成層圏の極渦と熱帯上部対流圏の昇温という2つの要素の変動のモデル間相違を調べた。CMIP6のhistoricalおよびSSP585シナリオ実験の月平均データを用いて、現在気候は1979-1998年、将来気候は2079-2098年平均したもので、成層圏極渦に関しては高度10hPa、70-80N平均した帯状平均東西風の将来変化、熱帯上部対流圏に関しては高度300hPa、南緯15度 - 北緯15度平均した帯状平均温度の変化を指標とした。

4. サブテーマ2 結果及び考察

Sato et al. (2023)では、中部日本における冬季（12～2月）の降水量の変動予測のモデル間の差異を解析した。まず、図2-1に示すように、現在気候での気候平均の降水量分布を調べた。図2-1（左）のように大きな空間スケールで見ると、冬季には北太平洋上の中緯度域で降水が多いことが分かる。これは主に低気圧活動によるものと考えられる。日本付近に注目すると、中部日本から日本海にかけて、北太平洋上とは別の降水量のピークが見られる。この領域（35.0～37.5° N、137.5～140.0° E）に着目し、AMeDASによって観測された降水量の分布を調べると、図2-1（右）のような結果が得られた。よく知られているように、中部日本の日本海側で多量の降水が観測されている。

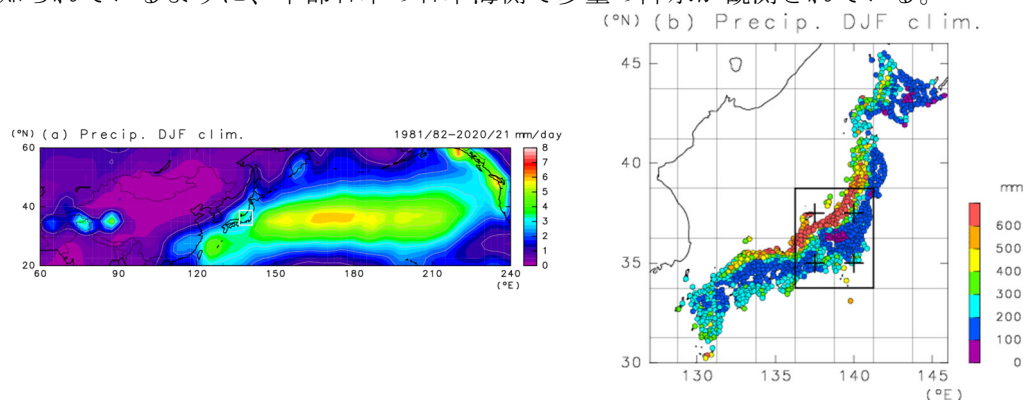


図2-1 1981/82年から2020/21年で平均した12～2月の降水量。左は、CMAPデータによる降水量分布。右は、AMeDASによって観測された降水量。右の図には、気候モデルデータを解析において中部日本の降水量変化の計算に用いる領域を長方形と+印で示した。

次に、CMIP5気候モデルにおいて、中部日本に対応する領域で予測された冬季（12～2月）の地上気温と降水量の変化を調べた。ここでは、21世紀の100年間における線形トレンドを計算した。図2-2（左）に示すように、程度の差はあるものの、どのモデルも地上気温の上昇を予測している。一方で降水量に関しては、増加を予測するモデルと、ほとんど増加しないか、減少すると予測するモデルに分かれた。本研究では、図のような2次元の散布図上でt統計量が最大になるように2つのグループに分けることにした。その結果、図中に白い丸と黒い丸で示されるようにグループ分けした。以下、降水量の増加を予測している白丸で示される11個のモデルをAグループ、降水量があまり変化しないか減少している黒丸で示される20個のモデルをBグループとする。ここで、昇温トレンドがゼロに近いモデルがひとつあったが、どちらのグループにも属しないとみなし、以下の解析の対象からは除外した。Aグループのモデルにおいては、気温の上昇に対応する降水量の増加が、クラウドジウス・クラペイロンの関係に近い場所にプロットされていることが分かる（図2-2（左））。

以下では、Aグループの属するモデルとBグループに属するモデルの間での冬季の気候変動の予測の違いに注目する。まず、図2-2（右）に、それぞれのグループの属するモデルが予測した降水量のトレンドの分布を示す。どちらのグループのモデルも、平均的に見れば、北日本で降水が増加し、日本の南海上で降水が減少する傾向を示している。両者の差を計算すると、日本を含む東アジア域で、Aグループのモデルのほうが温暖化時に降水がより増加する傾向を示していることが分かる。一般に、冬季の中部日本の日本海側でもたらされる多量の降水は、北西季節風と中部山岳の地形の効果によるものと考えられ、図2-1（右）にも示されているように比較的狭い領域で見られる特徴である。しかし、モデル間の変動予測に違いという観点で見た場合、中部日本の日本海側の地域に限定されるのではなく、東アジア全域に及ぶような広い範囲での変動を伴っていることが分かる。その一方で、図2-2（右下）を、図2-1（右）や図2-2（右上、右中）と比較すると、北太平洋域全体で気候平均の降水が多く、気候変動予測においても、全モデルを平均的に見れば、北太平洋域全体で降水の増加が予測されているのに対して、モデル間の降水予測の差異が大きい領域は東アジア域の比較的狭い領域に限られていると捉えることもできる。

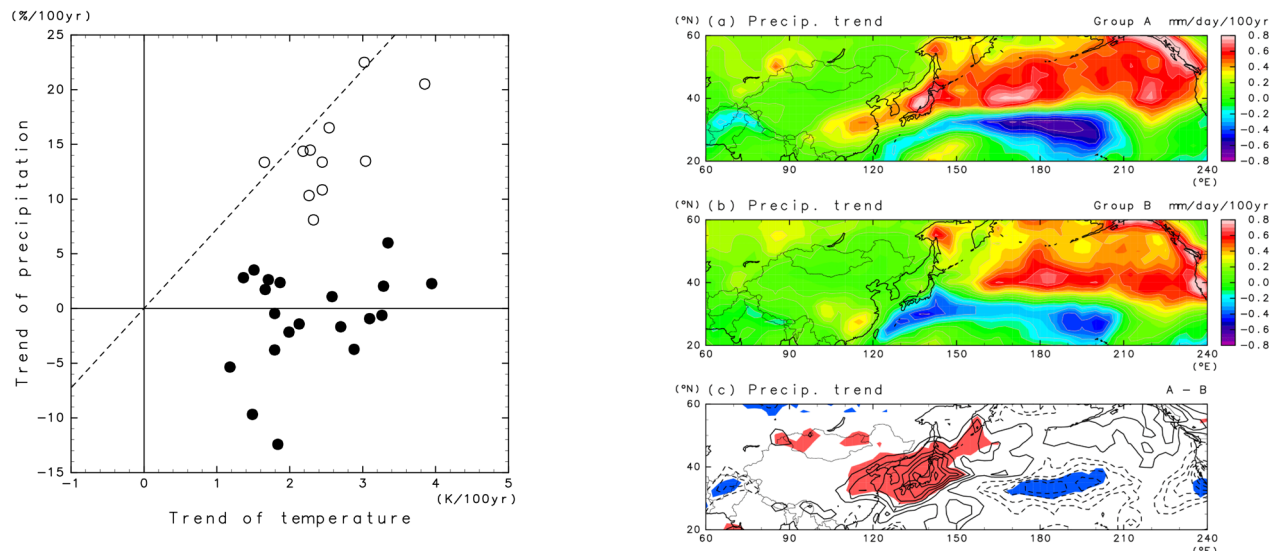


図2-2 左は、気候モデルによって予測された中部日本での冬季の地上気温と降水量の変化。21世紀における100年間のトレンドを示した。白い丸はAグループに属するモデル、黒い丸はBグループに属するモデルを示す。図中の点線はクラウジウス・クラペイロンの関係を表す。右は、それぞれのグループの属するモデルが予測した降水量のトレンドの分布。上から順に、Aグループ、Bグループ、AグループとBグループの差（点線は負の値、95%有意な変動に色付け）を示す。

図2-2に示すように、東アジア域で冬季の降水の変化予測にモデル間差異が生じた原因を調べるため、地上気温や海面気圧の変化予測を調べた（図2-3）。左側に示した地上気温のトレンドに関しては、どちらのグループのモデルも、高緯度ほど昇温する傾向を示しており、結果的に温暖化時には南北温度勾配は緩和される傾向にある。AグループとBグループの違いという観点では、全体的な昇温トレンドの大小に関しては大きな差はない。東アジア域に限って見れば、日本の北のほうのシベリアからオホーツク海にかけての領域において、Aグループのモデルのほうが比較的昇温が小さくなっていることがわかる。このことは、Aグループのほうが、温暖化による南北温度勾配の減少が少なく抑えられていることを意味している。なお、オホーツク海上では昇温傾向が顕著であるが、これは海氷の減少によるものである。Aグループのモデルのほうが海氷の減少が穏やかであり、それに対応して地上気温の上昇も緩やかになっている。

図2-3（右）に示した海面気圧の変化予測においては、どちらのグループのモデルにおいても、北太平洋の高緯度域で顕著な低気圧偏差が見られる。これは、アリューシャン低気圧の強化を示していると考えられる。しかし、2つのグループの差に注目すると、高緯度域では有意な差異はなく、中緯度域において、Aグループにおいて太平洋上で高気圧偏差、ユーラシア大陸上で低気圧偏差となっている。これらの偏差は統計的に有意であるが、気候平均でのシベリア高気圧やアリューシャン低気圧の中心からは低緯度側にずれており、図2-3（右下）に示されたようなモデル間差異がシベリア高気圧やアリューシャン低気圧に直接対応しているようには見られない。

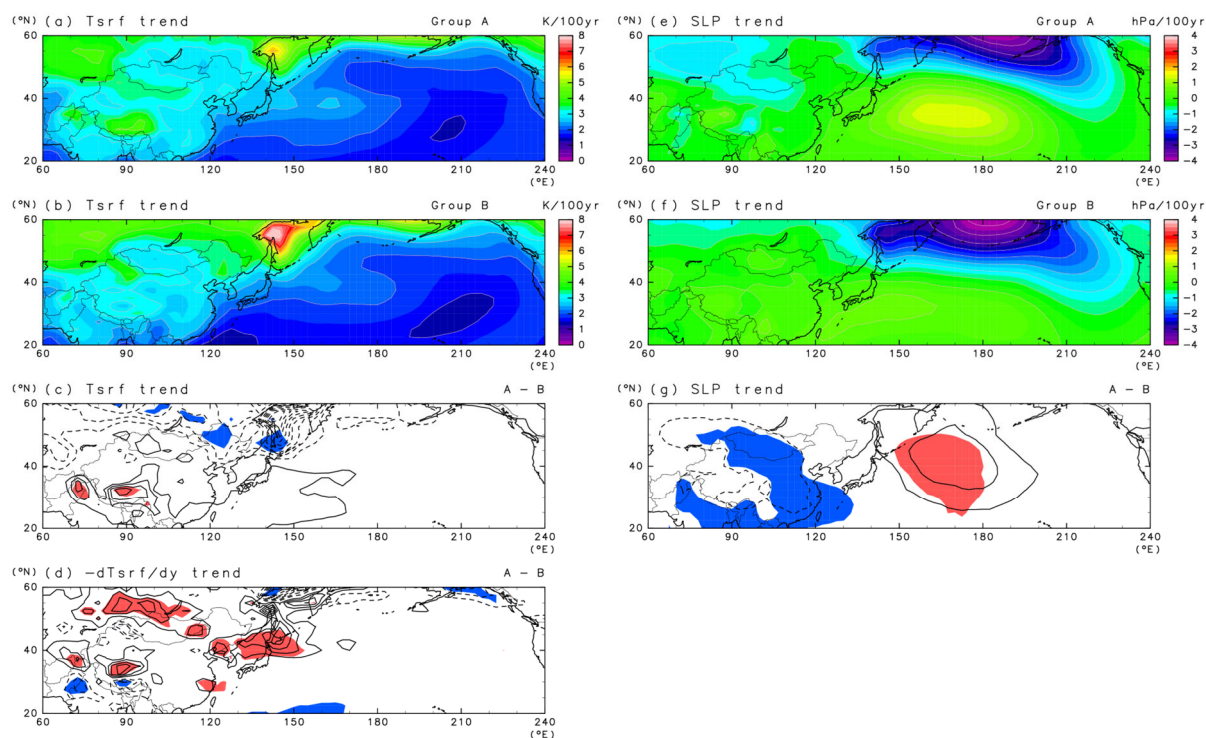


図 2-3 図 2-2 (右) と同じ、ただし左は気温、右は海面気圧。左には南北温度勾配のトレンドも示した。

そこで、季節平均場で見られるようなシベリア高気圧やアリューシャン低気圧ではなく、低気圧活動との関係に注目して、じょう乱による南北熱輸送の大きさの変化を解析した。ここでは、低気圧活動に対応して、周期 8 日以下の短周期じょう乱を対象とした。地上気温、降水量、海面気圧、東西風などのトレンドとは異なり、この解析では気温と南北風の日別値が必要である。本研究では、日別値が有効な気候モデルとして 15 個のモデルを選んで解析対象とした。図 2-4 (左) に 850hPa 面における南北熱輸送のトレンドの解析結果を示す。どちらのグループにおいても、北太平洋の高緯度域で、南北熱輸送の増加が予測されている。これは低気圧活動の活発化を意味しており、図 2-3 (右) で見られたアリューシャン低気圧の強化と矛盾しない結果である。図 2-4 (左) において、東アジア域に注目すると、A グループでは南北熱輸送が増加する傾向にあるのに対して、B グループでは日本付近で逆に南北熱輸送の減少が生じていて、A グループのほうが温暖化時に低気圧活動がより強くなると予測されることがわかる。一般に傾圧不安定による低気圧活動は南北温度勾配をエネルギー源とする。A グループのほうが低気圧活動が強化されるという図 2-4 (左) の結果は、A グループのほうが温暖化しても南北温度勾配が比較的保たれるとする図 2-3 (左) の結果と整合的である。

さらに、上部対流圏の偏西風の変動についても同様の解析を行った。図 2-4 (右) に示されるように、東アジア域では温暖化時には低緯度側で負偏差、高緯度側で正偏差となっていて、偏西風帯が北上することを示している。ふたつのグループ間の差に注目すると、A グループのほうが東西風の変動が大きく、偏西風帯の北上の傾向がより強いといえる。温度風の関係から、上空の西風は南北温度勾配の大きさに対応するので、北日本に対応する緯度帯で偏西風が強化されるという図 2-4 (右下) の結果は、A グループのモデルのほうが温暖化時の南北温度勾配が大きいとする図 2-3 (左下) の予測結果と整合的である。

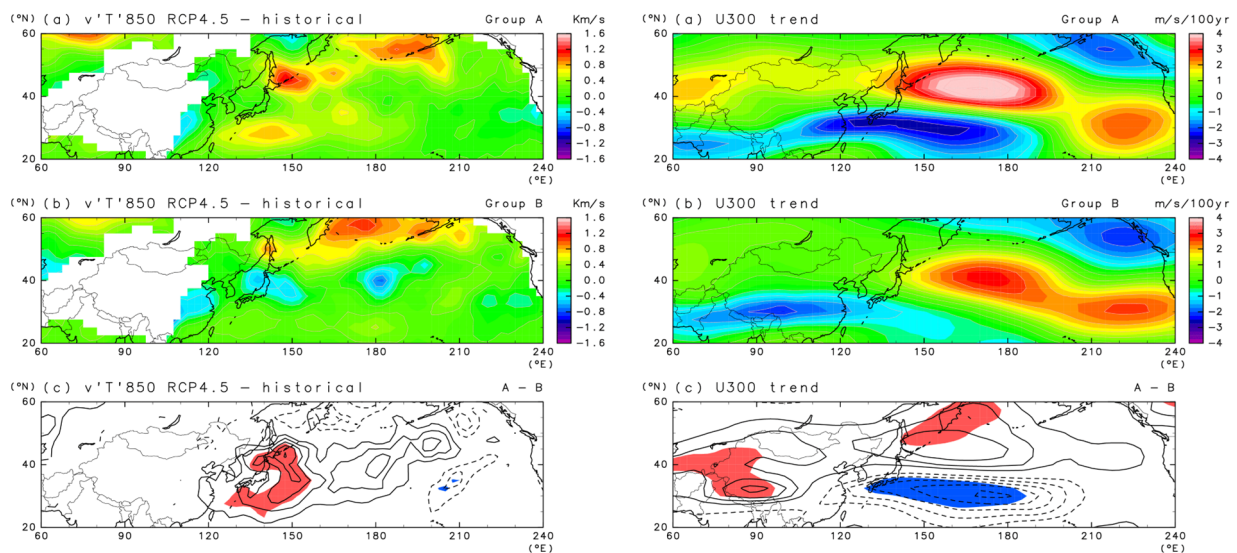


図 2-4 図 2-2 (右) と同じ、ただし左は渦南北熱輸送、右は300hPa東西風。左は1980/81～1998/99年冬季と、2080/81～2098/99年冬季との差である。

今後に向けた解析として、現在気候において実際に発生している顕著な降水事例での大規模場の特徴を解析した。ここでは、中部日本で年最大積雪深が200cm以上である観測地点として、只見、桧枝岐（福島県）、藤原（群馬県）、野沢温泉（長野県）、小出、十日町、関山、津南、湯沢（新潟県）の9地点を選んだ。これらの観測地点の最低1か所で50mm以上の日降水量が観測された日を顕著事例として抽出した。その結果、12月に72事例、1月に66事例、2月に14事例の計152事例が抽出された。

これらの顕著事例における海面気圧偏差と300hPa高度の時間変化の合成図をNCEP/NCARによる客観解析データを用いて作成した（図2-5）。図2-5（左）に示された顕著事例における海面気圧偏差に注目すると、日本の東海上に低気圧偏差が見られる。3日前からの変化をみると、低気圧偏差は発達しながら、西から東へ移動していることが分かる。このことから、この低気圧偏差は低気圧活動によるものと考えられる。また、低気圧偏差の発生に先立って、シベリアでの高気圧偏差もみられ、これは顕著な降水事例に先立ってシベリア高気圧が強化されていることを示唆している。顕著事例における300hPa高度（図2-5（右））においては、北海道の北に中心が位置する閉じた低気圧が見られる。気候平均においては、日本付近は気圧の谷になるものの、このような閉じた低気圧は見られない。この低気圧の時間変化は遅く、顕著事例においては、切離低気圧が発生していると考えられる。また、顕著事例においては、上空の偏西風は南下し、300hPaの東西風偏差は日本の北で負偏差、日本付近から日本の南海上で正偏差である（図は省略）。

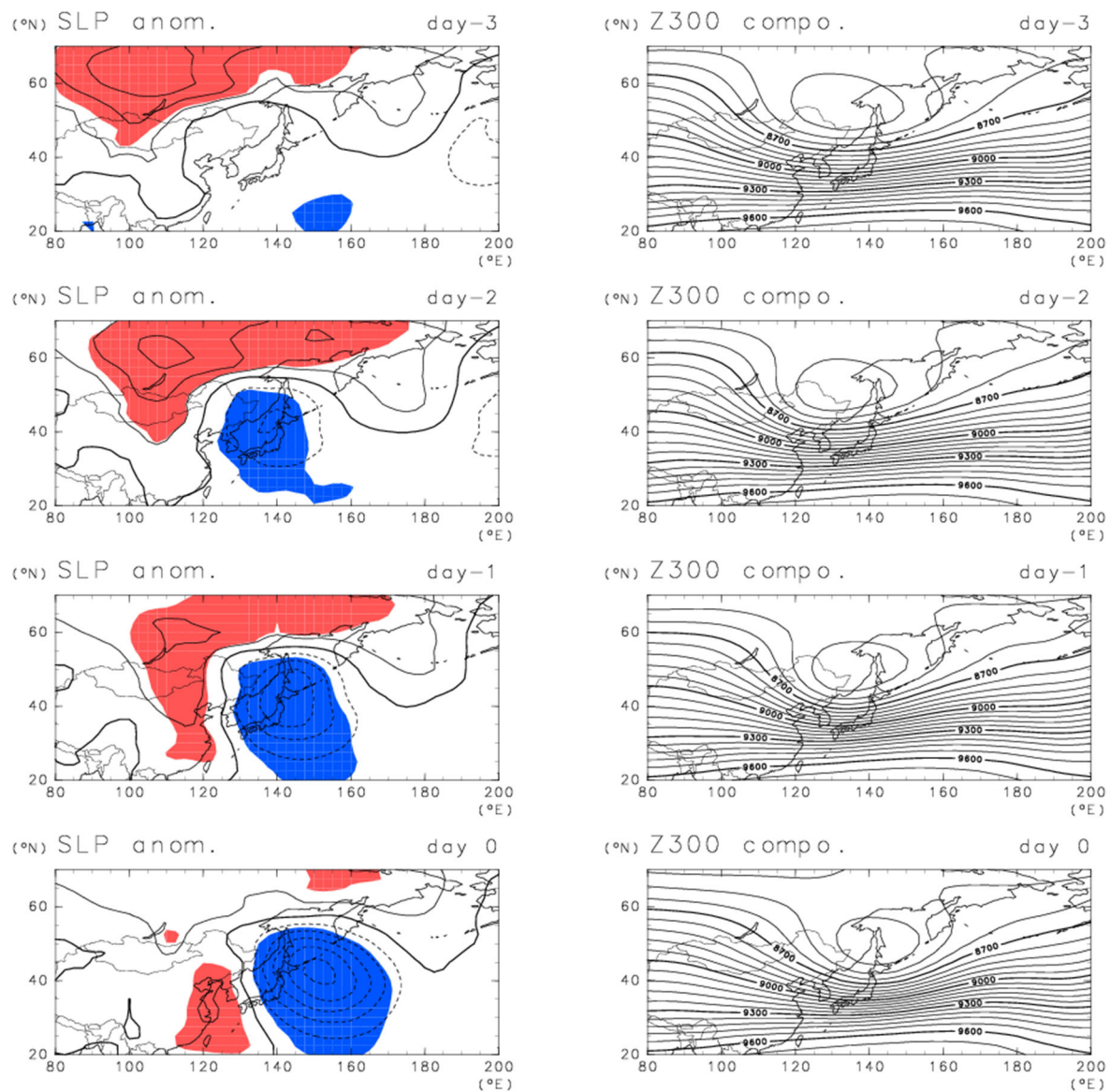


図2-5 左は1979/80～2018/19年冬季における顕著な降水事例での海面気圧偏差の合成図。右は300hPa高度の合成図。上から順に、3日前、2日前、1日前、同時。左は95%有意な偏差に色つけ。

現在気候における切離低気圧の発生頻度の変化傾向を調べるため、Kasuga et al. (2021)の方法になって、北緯40～60度、東経130～150度の範囲で発生した切離低気圧の発生頻度を解析した。ここでは水平解像度1.25度×1.25度のJRA-55客観解析データの日別値を用いている。解析の結果、過去40年間で切離低気圧の発生は有意な増加傾向にあることが分かった(図2-6)。このような傾向は、この経度帯に特有であり、他の経度帯では見られない(図は省略)。図2-5の結果は、偏西風が低緯度側で強化されている場合に顕著な降水事例が発生しやすいことを示唆し、図2-6の結果は、そのような顕著事例が増加傾向にあることを示しているが、一方で、図2-4(右)に示された気候モデルによる偏西風の変動の予測は、高緯度側での偏西風の強化であり、しかも、高緯度側での偏西風強化が大きいモデル(Aグループのモデル)ほど冬季の降水量が増加する傾向にあることを示している。このような気候モデルによる予測と、現在気候で観測されている変化傾向を統合的に理解することが今後の課題である。

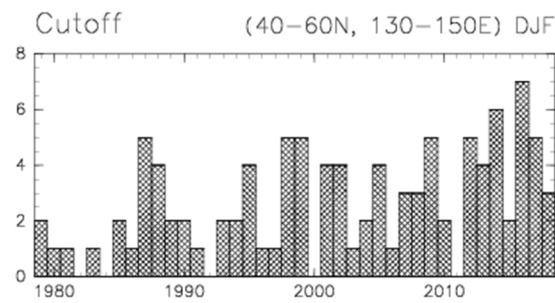


図 2 - 6 冬季における切離低気圧の発生数の経年変化。

CMIP5モデル群を用いた、日本域冬期の降水変化に関するストーリーライン研究 (Kawatani et al., 2022) では、熱帯上部対流圏温度変化と成層圏極渦変化の2つを指標とし、将来の降水量変化を調べたところ、前者が支配的であることを示している。本課題ではCMIP5モデル群とCMIP6モデル群を比較した。図2-7は全球平均した地表面温度上昇1Kあたりの熱帯上部対流圏の温度変化と成層圏極渦変化の散布図を示す。CMIP5は33モデル、CMIP6は42モデルからなる。CMIP5に比べてCMIP6では熱帯上部対流圏温度変化のモデル間のばらつきが顕著に小さくなっている。このことは、CMIP6ではモデル間で同じような温度変化をする傾向になったことを意味する。一方で成層圏極渦強度変化は、CMIP6でも大きなばらつきが依然として見られる。

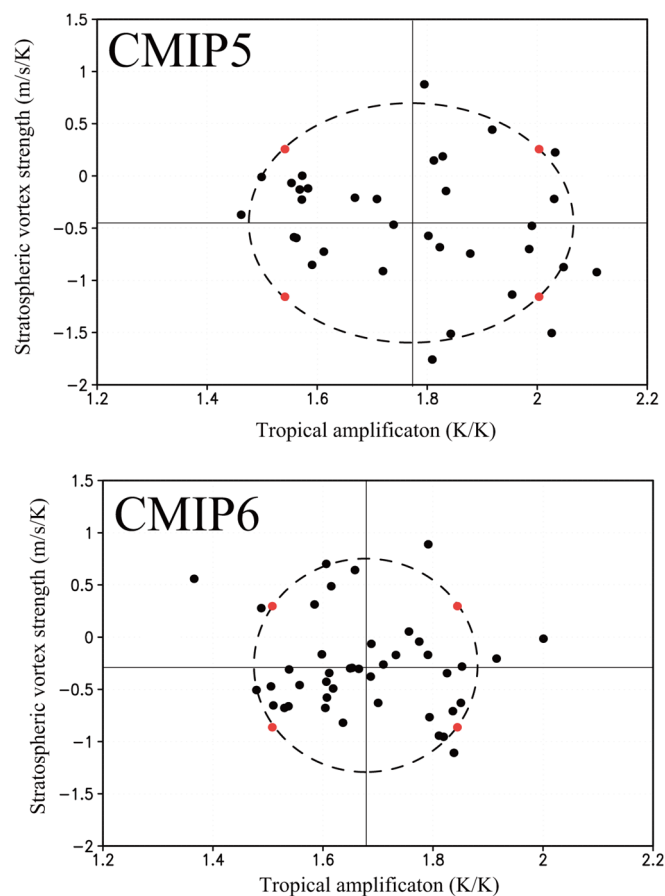


図 2 - 7 全球平均した地表面温度上昇1Kあたりの（横軸）熱帯上部対流圏の温度変化と（縦軸）成層圏極渦変化の散布図。黒丸は（上）CMIP5、（下）CMIP6の各モデルを示す。

図2-8は12-1-2月（DJF）平均した、日本域の降水量将来変化に対する、熱帯上部対流圏温度変化と成層圏極渦変化の回帰係数を示す。CMIP5モデル群では熱帯温度変化が降水変化に対して大きな正の回

帰係数を持ち、熱帯上部対流圏温度が上がるほど日本域降水量が増えることを示している。一方でCMIP6では回帰係数の値が小さく、CMIP6モデルで熱帯温度変化のばらつきが小さくなっていることと対応する。一方で成層圏極渦変化はCMIP6モデルでも正の回帰係数が見られる。これらから、CMIP6モデル群では、日本域冬期降水量の変化に関して、極渦の変化がより重要であることが分かる。

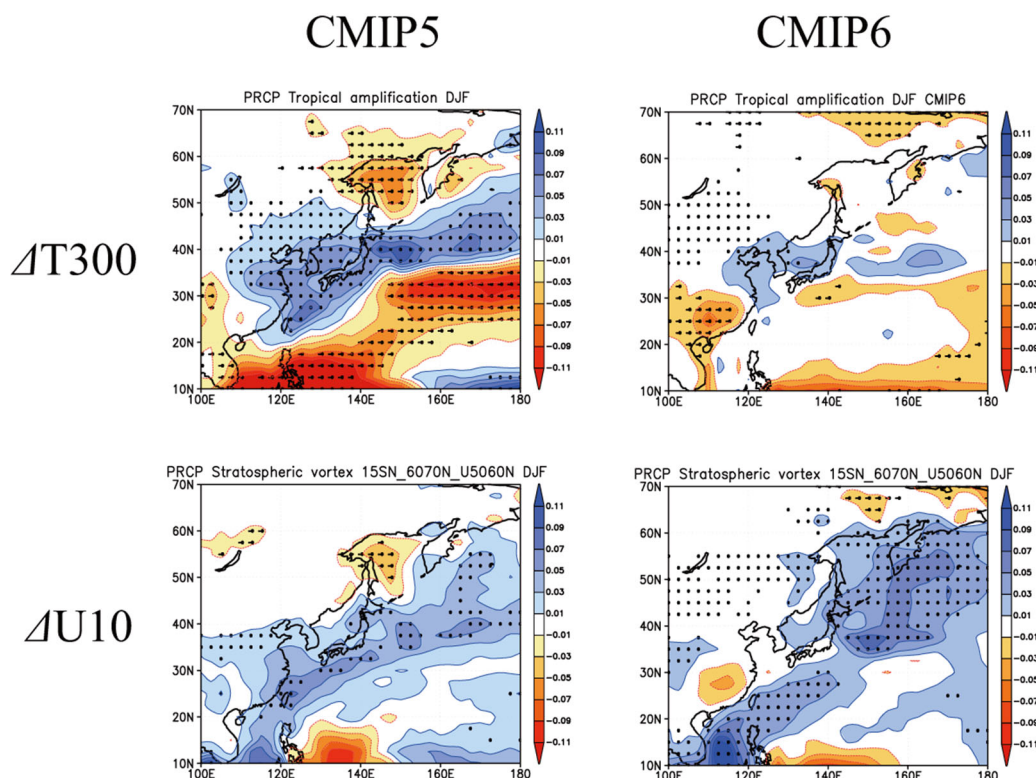


図2-8 12-1-2月（DJF）平均した将来の降水量変化に対する、熱帯上部対流圏温度変化（ $\Delta T300$ ）と成層圏極渦変化（ ΔU ）の回帰係数。統計的に95%有意な場所を黒ドットで示す。

成層圏極渦の将来変化には大きな不確実性があり、将来極渦が強まるのか、弱まるのかは結論が出ていない（Karpechko et al. 2022）。本課題では、成層圏極渦の現在気候での再現性に着目した。図2-9はCMIP6モデルのhistorical実験におけるDJF平均した帯状平均東西風の緯度－高度断面図である。成層圏極渦の再現性はモデルによって非常に大きく異なっている。現実大気の成層圏極渦は高度とともに赤道に傾く構造をしている。いくつかのモデルはそのような構造を示しているが、極渦が鉛直に立った構造をしているモデルや、極端に強いモデルや弱いモデルも存在する。最新のCMIP6モデル群でも、依然として成層圏循環の再現性は難しいことを意味している。

このような状況下で、極渦の再現性が良いモデル・悪いモデルを混在し、将来の極渦変化、および関連する現象の変化を議論するのは良くない。次にhistorical実験における成層圏東西風の再現性について調べた。図2-10はhistorical実験における高度70-1hPa、北緯30-90度平均した帯状平均東西風を指標としたTaylorダイアグラムで、黒丸はJRA55。赤丸が各モデルを示す。黒丸に近いモデルほど、成層圏東西風の再現性が良いことを示す。再現性の良いモデルと悪いモデルが混在していることが明確に示されている。

図2-11に帯状平均東西風の再現性が良いモデル上位5つと悪いモデル下位5つのモデルを平均した、東西風の将来変化を示す。コンターはhistorical実験における東西風である。再現性の良いモデルは、将来極渦が弱まる傾向にあることを示すのに対して、再現性の悪いモデルは極渦が強まることを示している。このことは例えば将来の日本域降水変化をストーリーライン手法で議論する際に、極渦が弱まる傾向にあるストーリーの方が、もっともらしい将来変化を示すことになりうる。しかしながら、不確実性をどの程度定量的に減らすことができるかは、より慎重な解析・検討が必要である。

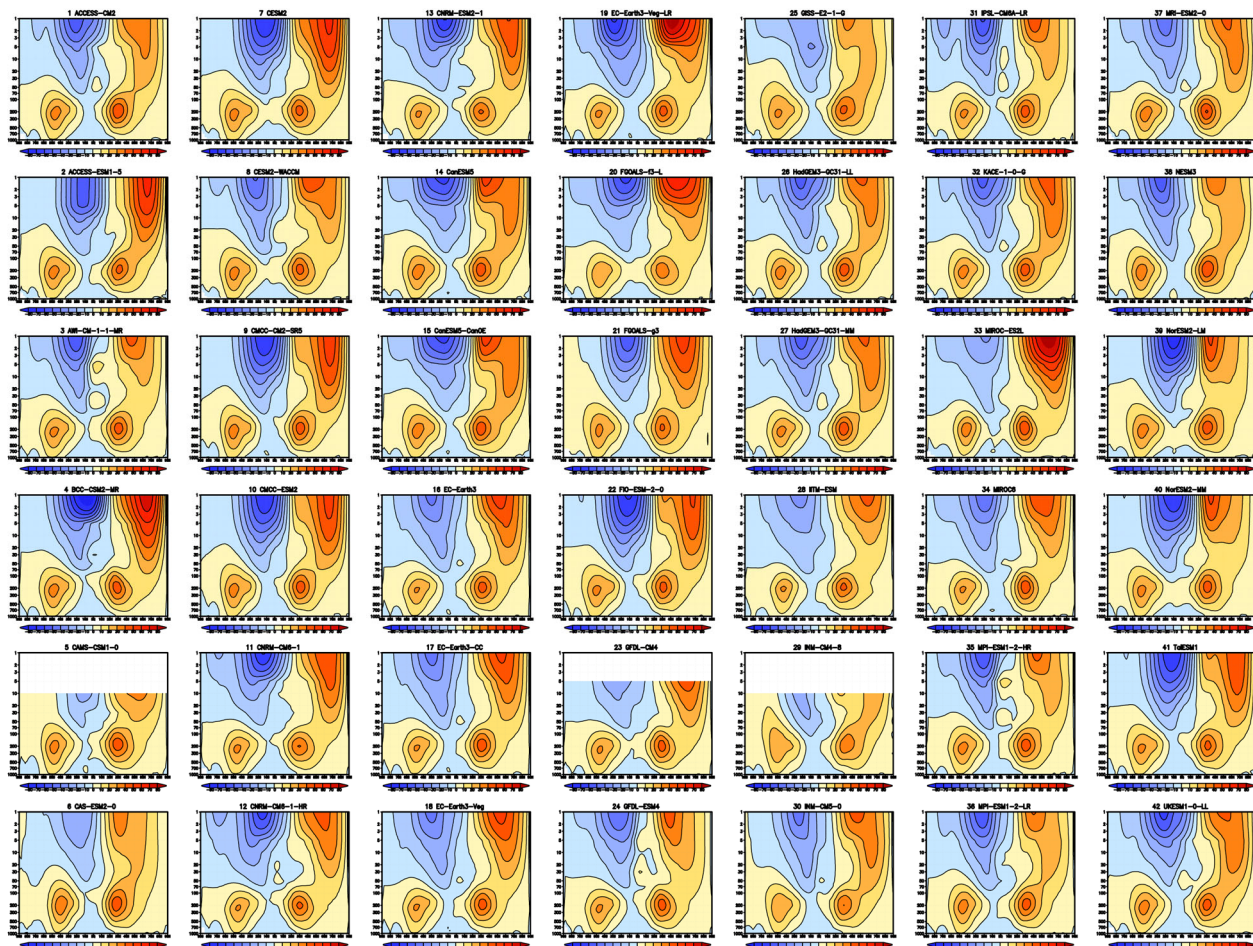


図 2-9 CMIP6モデルのhistorical実験におけるDJF平均した帯状平均東西風の緯度—高度断面図。

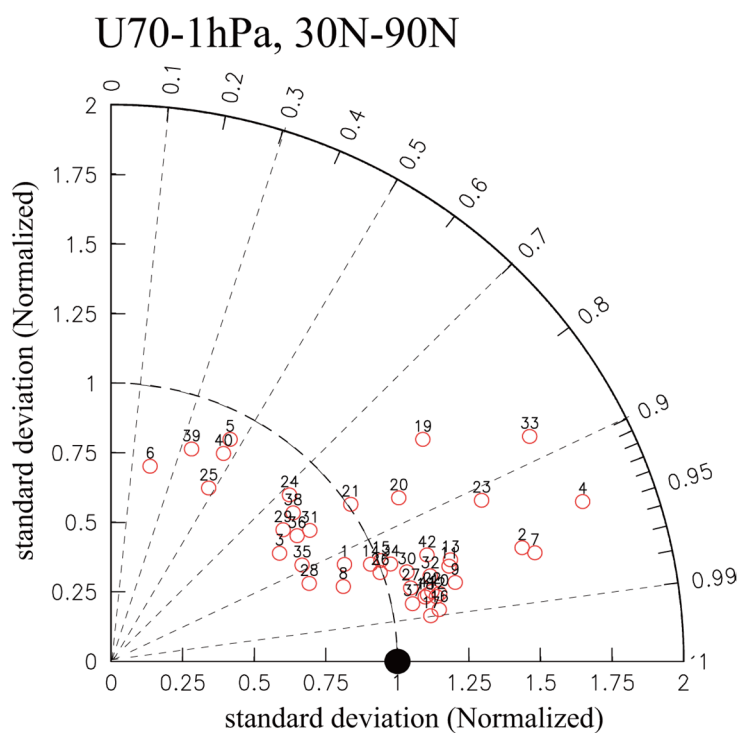


図 2-10 historical実験における高度70-hPa、北緯30-90度平均した帯状平均東西風を指標としたTaylorダイアグラム。黒丸はJRA55。赤丸が各モデルを示す。黒丸に近いモデルほど再現性が良いことを示す。

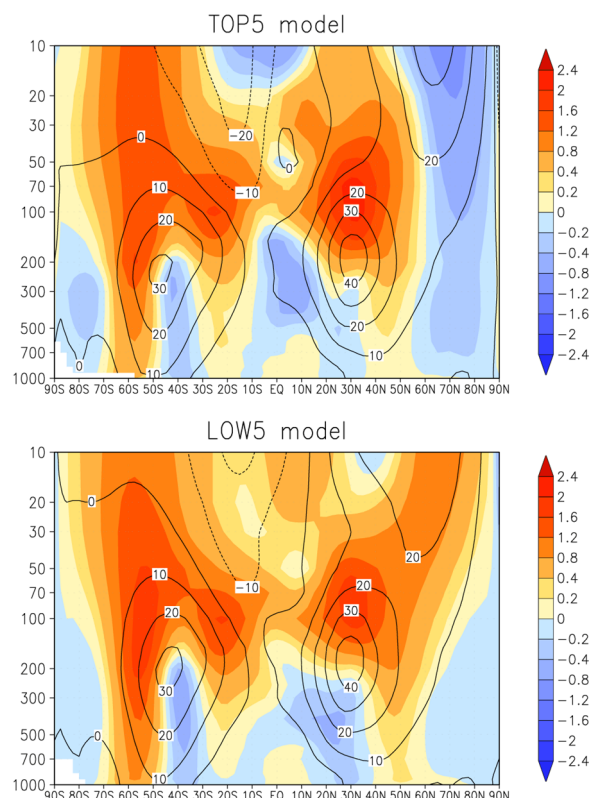


図 2-1-1 帯状平均東西風の再現性が（上）良いモデル上位5つと（下）悪いモデル下位5つのモデルを平均した、東西風の将来変化（カラー）。コンターはhistorical実験における東西風を示す。

以上の研究は、冬季に焦点をあてている。夏季については、以下のような研究を行った。

Horinouchi et al. (2022, 成果番号28) では、CMIP5データを用いて、地球温暖化に伴って予測された梅雨期の降水量変化のモデル間相違と、上部対流圏の偏西風の変化との関連を調べた。この研究は、本推進費の採択以前に開始したが、論文投稿後の改訂は本推進費にて実施した。梅雨を含む東アジア夏季モンスーン(EASM)に関する既往研究の多くは、6-8月平均を対象としているが、それでは季節進行を捉えられないため、6, 7, 8月の月ごとに解析を実施した。日本と中国の梅雨 (Baiu, Meiyu) については6, 7月、韓国のChangmaについては7, 8月を主な対象とした。CMIP5のHistory実験の1979-1999年の21年分の平均から、将来予測実験 (RCP4.5およびRCP8.5) の2079-2099年の21年分の平均への変化を調べた。その際、各モデルにおける全球平均昇温量で規格化することで、シナリオの違いや気候感度の違いを吸収した。

Baiu, Meiyu, Changma域について、降水の将来変化のモデル間スプレッドと様々な量との相関を計算した。すると、いずれにおいても、対象域の南側の鉛直積算水蒸気フラックスの北向き成分のスプレッドとの相関が高いことが分かった。Baiu域では、図 2-1-2 に示すように、特に6月に顕著な相関がみられた。その理由は、この時期はSSTが盛夏ほど高くなく、降水において長距離輸送された水蒸気ももとなる割合が高いからと考えられる。

鉛直積算水蒸気フラックスの北向き成分の変化は下層の南北風の変化に支配される。しかし、より広く太平洋高気圧の大規模な変化との関連を見出すのは困難であった。また、設定した3領域の降水変化間の相関も弱く、局所性が高かった。このことは、下層での遠隔相関関係は規模があまり大きくないため、従来の研究で用いられがちな、大規模なモンスーンのインデックスの変化などが、必ずしも良い指標とならないことを示唆する。

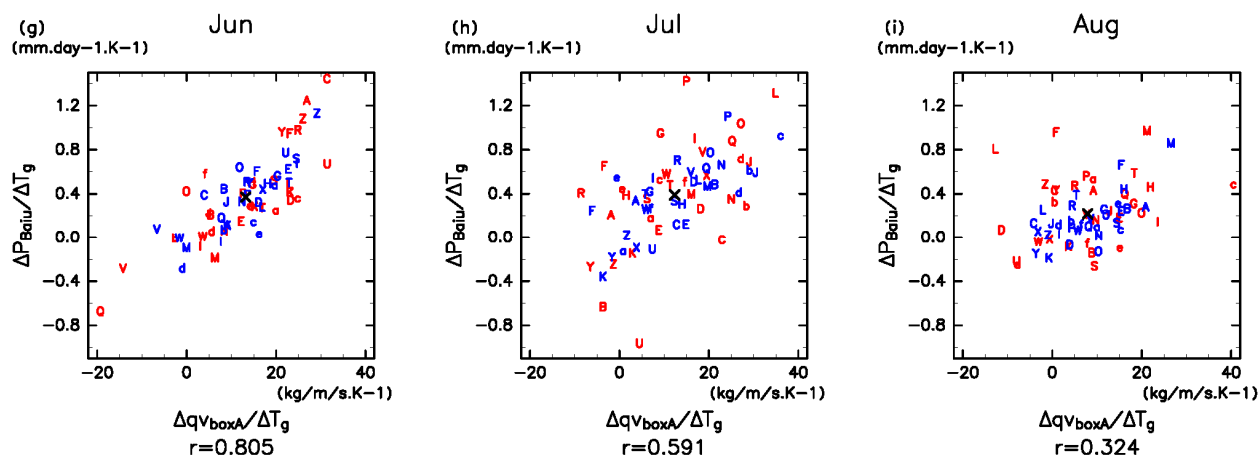


図2-1-2 日本の梅雨(Baiu)に関する、現在気候(1979-1999年)から将来気候(2079-2099年)への100年間の変化を、CMIP5のモデル毎に全球地表気温1℃あたりで規格化したもの。西日本から東日本にかけて(北日本を除いて)設定した梅雨域での6,7,8の各月での平均降水量の年変化(縦軸)と、日本の南の海上(詳しくはHorinouchi et al. 2022, 成果番号28 参照)での水蒸気の南北フラックスの間の関係を、モデル毎、シナリオ毎(赤:RCP4.5, 青:RCP8.5)に示した散布図。X印は平均を表す。

日本の梅雨については、興味深い遠隔作用が見いだされた。6, 7月の梅雨降水の変化のモデル間スプレッドを200 hPaの南北風の変化に回帰すると、シルクロードパターンのような相関パターンが現れる。この構造は、日本の南海上の下層の南北風に回帰したほうが高いことと、上下層のジェットが同時的に変動する力学的な結合関係によって生ずると説明できる。アジアジェットにそったシルクロードテレコネクションの下流に日本が位置するため、気候学的に見ても日本の降水のローカルな変化が、広い経度範囲で相関関係をみせると言える。

本研究ではさらに、日本の梅雨の将来変化について、最新のCMIP6データを用いて上記の研究を深めた。気候学的な平均を定義する期間については30年に改め、全部で44モデルを用いた。現在気候は1985-2014年の平均で定義し、将来気候については、2030-59年、2050-79年、2070-99年と、平均期間を複数設定すること、さらに、アンサンブル実験による複数ランがアーカイブされているモデルについてはアンサンブルについても考慮するなどの深化により、より総合的な診断を行った。使用したシナリオは、上述と同様なSSP245ならびにSSP585で、全球昇温1度あたりで規格化したことも同じである。また、日本の影響評価に用いることが本推進費で推奨された代表的な5モデルについて、梅雨の将来変化という観点から全モデルにおける相対的な位置づけがわかるようにするための工夫も行った。

まずは各モデルについて1ランを使った統計を実施した(図2-1-3)。CMIP5で得られた関係性(下層の南北風の将来変化が梅雨降水の将来変化を左右する)は、CMIP6でも成り立つことがわかる。より温室効果ガスの変化が小さいシナリオやより近い「将来」のほうが全球昇温量が平均的に小さい(図2-1-3各パネルの左下)が、ほぼそれに対応してモデル間のスプレッドの標準偏差が低下することがわかる。このことは、将来変化を左右する循環の変化の効果(通常「力学効果」と称される)の変動幅は、温室効果ガスの濃度変化に直接起因する熱力学的効果の全般的な大きさに対して頭打ちになるため、全球的な熱力学的な効果が増すにつれてそれが支配的になることを示唆する。

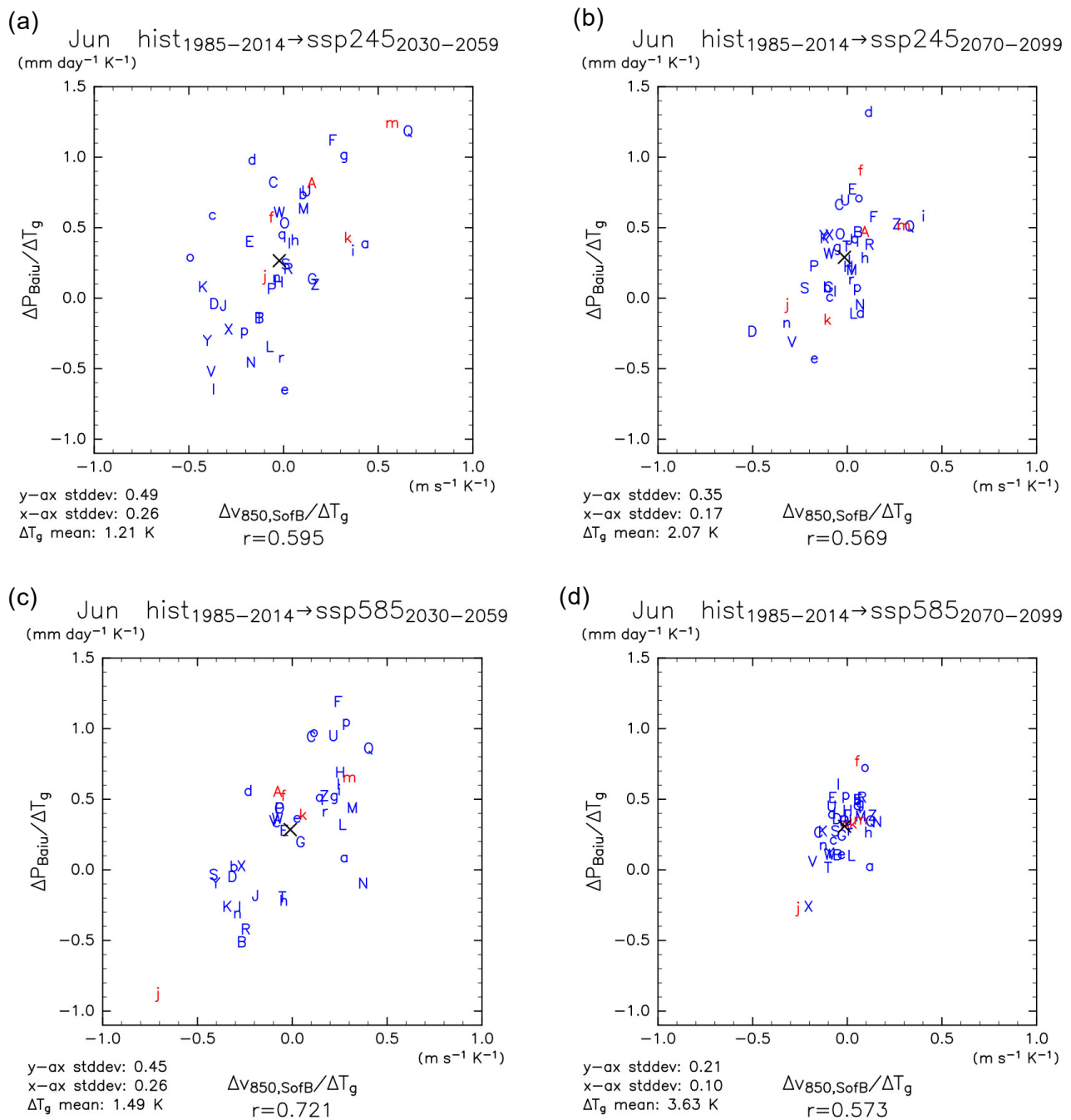


図 2-13 日本の梅雨(Baiu)に関する、現在気候(1985-2014の平均)から将来気候(2030-2059年または2070-2099年の平均)への変化を、CMIP6のモデル毎に全球地表気温 1℃あたりで規格化したもの(各モデル1ラン。6月の結果を示す)。赤い記号は代表5モデル、青はそれ以外。縦軸は梅雨域の降水の変化、横軸は日本の南の海上(領域設定はHorinouchi et al. 2022, 成果番号28と同様)の850 hPaの南北風の変化。後者は鉛直積分した水蒸気フラックスの変化と良い相関がある。シナリオはSSP245(上段)とSSP585(下段)。各パネルの左下にはx軸およびy軸に沿った標準偏差と、正規化に使った全球昇温量(モデル毎)を全モデルについて平均した値を、中央下には相関係数を示す。

この考察より、図 2-13 に示された「モデル間」の変動はモデル毎の特性によるのか、それともどのモデルでも大なり小なり生ずる内部変動(例えば大気海洋結合系の数十年周期変動など)によるのかという疑問がわく。そこで、各モデルの将来変化の複数ランの結果をすべて表示する結果の例を図

2-14に示す。なお、現在気候についてはランを一つに固定している。

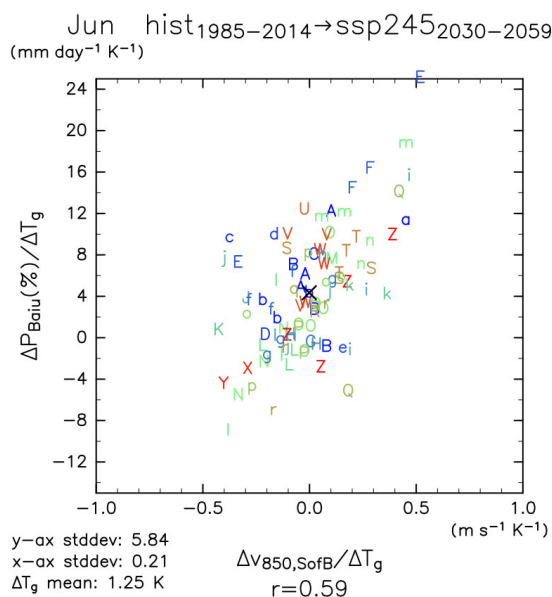


図2-14 図2-13aと同様（SSP245シナリオによる1985-2014年の平均から2030-3059年の平均への変化）だが、利用可能な将来変化の全てのランについて示したもの（現在気候については各モデル同一ランを使用）。記号は図2-13aと共通（記号毎に色を割り振り、代表5モデルかどうかは区別しない）。

図2-14に示すように利用可能なランの数はごく少数で、1ランしかないモデルも多い。これは南北風などの3次元データの月平均値のCMIP6データベースへの登録が少ないためである。このため、可能な議論は限られるが、図からは、ランごとの違いが小さいモデルが多いことである。従って、力学的効果の違いには、数十年規模の内部変動の特定の状態を捉えることによるランダムに近い変動だけでなく、モデル間の違いも効いていることが伺える。

Horinouchi et al. (2022, 成果番号28) によるシルクロードテレコネクションの効果についても、CMIP6データにより概ね確かめられた。ただし、相関の度合いはやや小さくなった。その理由はいきらかではないが、CMIP6では平均的にモデルの分解能が高くなったこと、物理過程計算スキームのモデル間の違いが小さくなったこと、解析において21年平均を30年平均に改めたことなどが効き得るであろう。

以上の結果などより、Horinouchi et al. (2022, 成果番号28)の主張は最新のデータでも概ね成り立つことが言える。今後、より詳細な研究が望まれる。利用可能なデータは限られることによる制約についても、何らかの対応が望まれる。

5. サブテーマ2 研究目標の達成状況

サブテーマ2では、「地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか、またその要因を物理的に明らかにし、遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性を評価し、低減を図る。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、2報以上の学術論文として発表する。」を目標に掲げた。それに対し、上記の研究によって「地球温暖化にともなう成層圏や対流圏上層ジェットの変化の予測について、気候モデル間でどのように異なるか」を明らかにすることは、冬季についても夏季についてもよく達成されたと言える。要因を物理的に明らか

にすることについても、鍵となる領域での変化の効果が多く特定された（「シベリアからオホーツク海にかけての領域」での冬季の昇温量の変化の効果や「日本の南の海上での南北風の変化」による夏季の水蒸気の降水量の変化など）ことより、十分達成できたといえる。このことは、「遠隔影響による東アジアの降水や極端現象の予測の不確実性の低減」にも繋がる。現在気候の再現性を考慮することで極渦の将来変化が制約できることをはじめて示したことはその例である。

これらの成果は課題全体の会合などを通じて共有され、サブ1の総括に貢献した。学術論文の発表数も目標を上回ったが、成果の一部は未出版であるため、今後まとめたい。

<引用文献>

Kasuga, S., Honda, M., Ukita, J., Yamane, S., Kawase, H., & Yamazaki, A. (2021). Seamless detection of cutoff lows and preexisting troughs. *Monthly Weather Review*, 149(9), 3119-3134.

Kawatani, Y., Horinouchi, T., & Sato, N. (2022). Storylines of projected climate changes around Japan associated with upper troposphere and stratosphere responses. *SOLA*, 18, 122-128.

Karpechko, A. Y., Afargan - Gerstman, H., Butler, A. H., Domeisen, D. I., Kretschmer, M., Lawrence, Z., et al (2022). Northern hemisphere stratosphere - troposphere circulation change in CMIP6 models: 1. Inter - model spread and scenario sensitivity. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(18), e2022JD036992.

Ⅱ－３ サブテーマ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」

〔サブテーマ３要旨〕

本研究課題では、極端気象の将来変化に関する物理的理解のうち、アジアモンスーン・熱帯域に注目し、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を行うことを目的とし、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。これらの成果は以下のようにまとめられる。

第六期結合モデル国際比較プロジェクト（CMIP6）による21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化アンサンブル予測を経験的直交関数（EOF）解析によって分類したパターンはそれぞれ出現要因が異なることに注目し、ストーリーライン・アプローチの視点で各パターンが近年（1980年から2020年）41年間に於いて実際に出現した状況について観測再解析データ（JRA-55）を用いて調査した。近年の各パターン出現の状況と要因を21世紀末将来予測と比較することにより、21世紀末予測の妥当性を評価し、さらにエマージェント・コンストレインの概念に基づいて、近年の出現状況から各予測パターンの21世紀末出現予測範囲を検討した。その結果、CMIP6のどのモデルも21世紀末の出現を予測している夏季東アジアの海面気圧パターンは、すでに近年の長期変動の中に正のトレンド変化として出現しており、その原因は地球温暖化に伴う北方大陸の強い昇温が確実に始まっているためである。

地球温暖化に伴う空間的に非一様な地表面昇温は、大気循環変化を介してモンスーン降水に影響を及ぼすとされている。本解析では、CMIP5、CMIP6のマルチモデル予測実験データを用いて、アジア周辺の地上気温の昇温パターンのモデル間差異が東アジア夏季モンスーン（EASM）降水量変化に及ぼす影響について調べた。その結果、地上気温将来変化のマルチモデルEOF解析で得られる第一モード（EOF1）は、ユーラシア大陸上の大きな昇温と周辺海域の小さな昇温で特徴づけられ、モンスーン循環・降水の強弱と密接に関連することを示した。そして、EOF1スコアに関連するEASM降水変化は、大陸上（特に中国北部）では正相関の一方で日本付近を含む海上では負相関であることを示した。EOF1スコアが大きなモデルは、対流圏下層で南風モンスーンが強化すると同時に対流圏上層では東アジアジェットが弱化するので、EOF1パターンに関連するEASM降水量変化は大陸上と海洋上で異なる特徴を示すと考えられる。

積雪は北半球の気象や気候に影響する重要な下部境界（陸面）条件の一つである。特に地球温暖化において、雪－アルベドフィードバックは主要なフィードバック過程の一つであり、そのプロセスレベルでの理解、モデルにおける定量的評価が求められる。本研究では、季節内時間スケールの積雪による地上気温の影響をLiang-Kleeman information flowと呼ばれる新しい手法によって解析した。その結果、積雪域から地上気温への強い因果関係（影響）を示す領域、月が特定された。さらに、季節内予測モデルにおける積雪域と地上気温の因果関係を同手法によって評価した結果、予測モデルでは、積雪域による地上気温への因果関係を過小評価していることがわかった。

JRA-55を用いて、1981年から2020年の8月の西日本を対象として、上位10%程度の熱波日を定義した。この熱波日は、数100km程度以上の空間スケールを持つものを選んだ。その10%程度の熱波日の日別の850-hPaのgeopotential heightをEOF解析し、特徴的なパターンを取り出し、熱波日の大規模循環場の特徴を明らかにした。また、将来変化についても、d4PDFを用いて、同様に解析した。その結果、よく知られている通り、太平洋高気圧が西側に張り出し、日本を覆う様な循環場が見られた。しかしながら、日本を中心に発達する場合は、2割程度であり、他のパターンも熱波を引き起こす重要な要素である。それ以外のパターンとして、日本の北もしくは、日本の南で高気圧性偏差が見られるパターンであった。

1. サブテーマ３研究開発目的

本研究課題全体でターゲットとする極端気象の将来変化に関する物理的理解のうち、アジアモンスーン・熱帯域に注目し、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を行うことを目的とする。具体的には、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む。この成果を、各サブテーマと共有すると共に、サブテーマ4を通して、様々な意思決定者に不確実性の低減を踏まえた予測情報の提供を目指す。

2. サブテーマ3 研究目標

サブテーマ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」
サブテーマ3 実施機関	気象庁気象研究所、東京都立大学
サブテーマ3 目標	モデル予測の妥当性を判断する際の一つの根拠になる長期観測データ解析から得られる知見、具体的には、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調べ、その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)の幅を絞ることができるかどうかを調べる。成果はサブ1の総括に貢献すると共に、4報以上の学術論文として発表する。

特に以下の4つの課題を中心に研究を実施した。

- (1) 21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンの近年出現状況と要因分析
- (2) 東アジア夏季モンスーン降水の将来変化におけるユーラシア大陸昇温の影響
- (3) 北半球の積雪による地上気温への影響の評価
- (4) 日本の猛暑と大規模循環場の要因分析

3. サブテーマ3 研究開発内容

- (1) 21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンの近年出現状況と要因分析

第六期結合モデル国際比較プロジェクト (CMIP6) による21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化アンサンブル予測を経験的直交関数 (EOF) 解析によって分類したパターンはそれぞれ出現要因が異なること (Ose et al. 2022) に注目し、ストーリーライン・アプローチ (Shepherd 2019) の視点で各パターンが近年 (1980年から2020年) 41年間において実際に出現した状況について観測再解析データ (JRA-55) を用いて調査した。近年の各パターン出現の状況と要因を21世紀末将来予測と比較することにより、21世紀末予測の妥当性を評価し、さらにエマージェント・コンストレイン (Tokarska et al. 2020) の概念に基づいて、近年の出現状況から各予測パターンの21世紀末出現予測範囲を検討した。

- (2) 東アジア夏季モンスーン降水の将来変化におけるユーラシア大陸昇温の影響

地球温暖化に伴う空間的に非一様な地表面昇温は、大気循環変化を介してモンスーン降水に影響を及ぼすとされている。本解析では、CMIP5 (42モデル) およびCMIP6 (44モデル) のマルチモデル予測実験データを用いて、アジア周辺の地上気温の昇温パターンのモデル間差異が東アジア夏季モンスーン (EASM) 降水量変化に及ぼす影響について調べた。高排出シナリオ (CMIP5: RCP8.5シナリオ、CMIP6: SSP585シナリオ) における20世紀後半 (1951~1999年) に対する21世紀末 (2051~2099年) の変化を計算した。モデル間およびシナリオ間の昇温量の違いの影響を除くため、各モデルの将来変化を6~9月 (JJAS) 全球平均1℃昇温相当に規格化して解析した。

- (3) 北半球の積雪による地上気温への影響の評価

積雪は北半球の気象や気候に影響する重要な下部境界 (陸面) 条件の一つである。特に地球温暖化において、雪-アルベドフィードバックは主要なフィードバック過程の一つであり、そのプロセスレベルでの理解、モデルにおける定量的評価が求められる。本研究では、季節内時間スケールの積雪による地上気温の影響をLiang-Kleeman information flowと呼ばれる新しい手法によって解析した。さらに、季節内予測モデルにおける積雪影響の再現性を考察した。本報告の詳細については、Takaya et al.

(2024, 成果番号37) を参照されたい。

(4) 日本の猛暑と大規模循環場の要因分析

JRA-55を用いて、1981年から2020年の8月の西日本を対象として、上位10%程度の熱波日を定義した。この熱波日は、数100km程度以上の空間スケールを持つものを選んだ。その10%程度の熱波日の日別の850-hPaのgeopotential heightをEOF解析し、特徴的なパターンを取り出し、熱波日の大規模循環場の特徴を明らかにした。また、将来変化についても、d4PDFを用いて、同様に解析した。

4. サブテーマ3 結果及び考察

(1) 21世紀末夏季東アジア海面気圧の将来変化パターンの近年出現状況と要因分析

図3-1は、38のCMIP6モデルによる夏季東アジア海面気圧の21世紀末将来変化アンサンブル予測に経験的直交関数(EOF)解析を適用した結果得られた上位主要3パターン(EOF1-3)の特徴を示す(0set al. 2022)と0set al. 2024, 成果番号38)。EOF1は東アジア全域の偏差(図3-1a)、EOF2は南北方向の偏差(図3-1b)、EOF3は東西方向の偏差(図3-1c)の分布を示している。

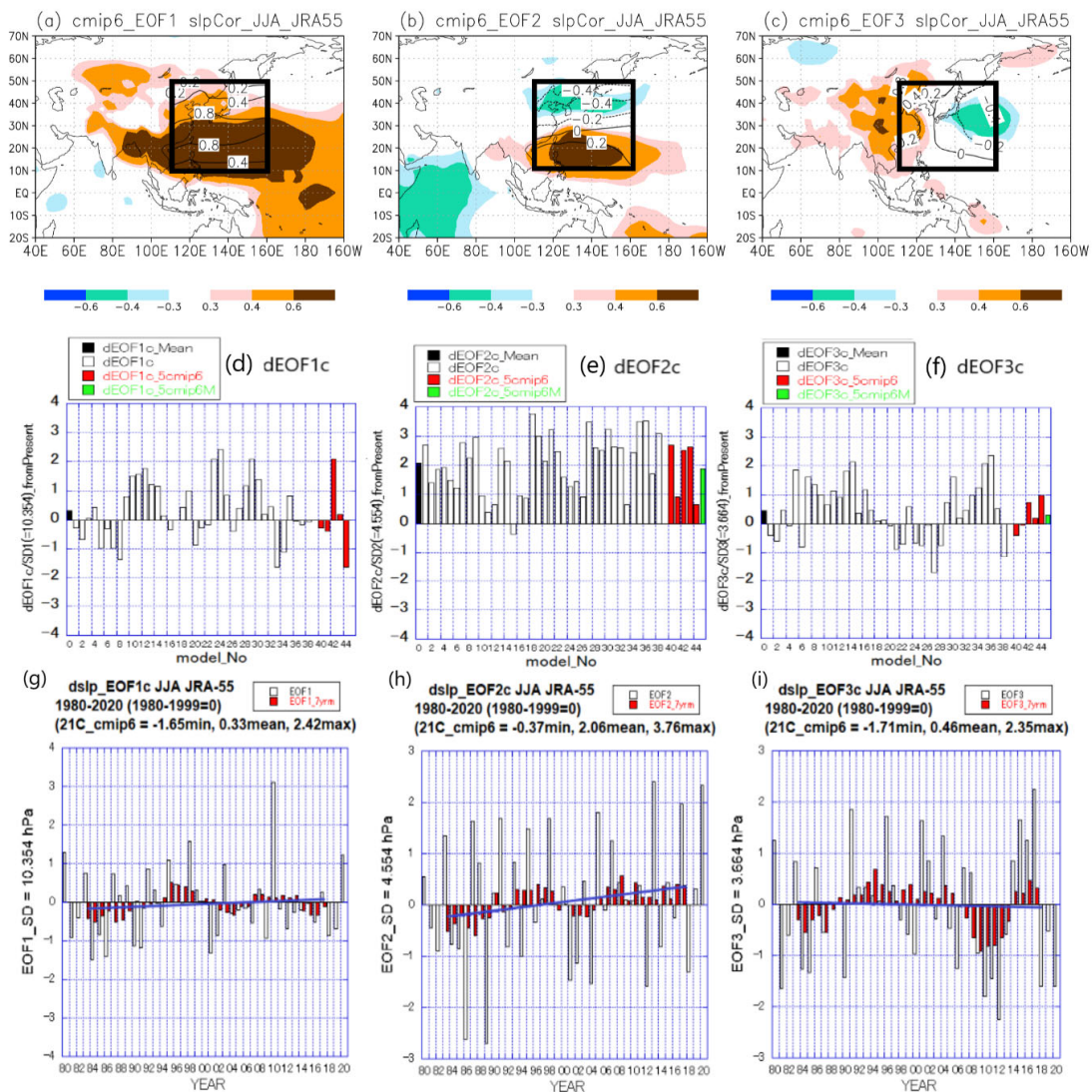


図3-1 21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化の上位主要3パターンの特徴

(a) (b) (c) 38のCMIP6アンサンブル予測実験に基づく21世紀末（4K昇温時に換算）の夏季東アジア海面気圧将来変化の上位主要3パターン（左からEOF1-3）の地理分布。枠内はEOF解析対象範囲で、等値線はEOF1-3に標準偏差をかけた分布(hPa)を表す。カラー陰影は、観測解析データ（JRA-55）の近年（1980年～2020年）夏季海面気圧年々変動と3つの主要パターン（EOF1-3）間の相関係数の地理分布。(e) (f) (g) 上位主要3パターン（EOF1-3）が、38の異なるCMIP6モデルによる21世紀末（4K昇温時に換算）将来変化に含まれる大きさ（縦軸は規格化値）。横軸は、38のCMIP6モデル実験（空白の棒グラフ）とその中の5つの代表モデル実験（Shiogama et al. 2021）、赤塗の棒グラフ）ならびに各実験平均（黒塗と緑塗の棒グラフ）を示す。(g) (h) (i) 近年（1980年から2020年）の観測再解析データ（JRA-55）の夏季年々変動に含まれる上位主要3パターン（EOF1-3）の大きさ（空白棒グラフで縦軸は規格化値）で横軸は年。長期変動（7年移動平均）は赤塗棒グラフ、長期変動の線形トレンドは青色の直線。

このうち、EOF2パターンは、ほとんどすべてのCMIP6モデルの将来変化に正值として含まれており、出現確実な将来変化パターンである（図3-1e）。そのうえ、観測再解析データ（JRA-55）を使って近年（1980年から2020年）の長期変動（7年移動平均）のトレンドを評価すると有意な線形増加トレンドとなって出現していることがわかった（図3-1h）。一方、EOF1とEOF3は、CMIP6の21世紀末将来変化のアンサンブル予測は正負の符号がモデルによって異なっており、モデル依存性のある不確実な将来変化パターンであることがわかる（図3-1dと図3-1f）。近年（1980年～2020年）の長期変動（7年移動平均）のトレンドを評価すると、線形トレンドの大きさは残りの長期変動成分に比べて小さくトレンドの有意性は低い（図3-1gと図3-1i）。

図3-2は、経験的直交関数（EOF）解析結果の下位主要3パターン（EOF4-6）の特徴を示す。下位のパターンであるため、空間スケールと変動の大きさは小さいが、日本域の気候変化への影響は小さいとは限らないことがわかっている。実際、各パターンは夏季平均や月平均の年々変動を説明する場合によく使用される空間分布に似ている。EOF4（図3-2a）は夏季エルニーニョ Nino4 海面水温に対する応答パターンに類似し、EOF5（図3-2b）は太平洋－日本（PJ）パターン（e.g. Kosaka and Nakamura 2006）に、EOF6（図3-2c）は積雲ジャンプパターン（Ueda and Yasunari 1996）に類似の空間分布である。ただし、いずれも偏差は逆符号である。図3-2の中の正負符号は、CMIP6アンサンブル平均21世紀末予測値が正值となるように決めている。

EOF4、EOF5およびEOF6は、いずれもCMIP6各モデルの将来変化アンサンブル内に正負符号のモデルが存在しており、モデル依存性のある不確実な将来変化パターンとなっている（図3-2d、図3-2eおよび図3-2f）。同じ不確実な将来変化パターンでも、EOF1とEOF3と違って、EOF4、EOF5およびEOF6は、近年（1980年～2020年）の7年移動平均で見ると負の線形トレンド（図3-2g、図3-2hおよび図3-2i）となっており、特にEOF5とEOF6の負の線形トレンドは統計的に有意である。

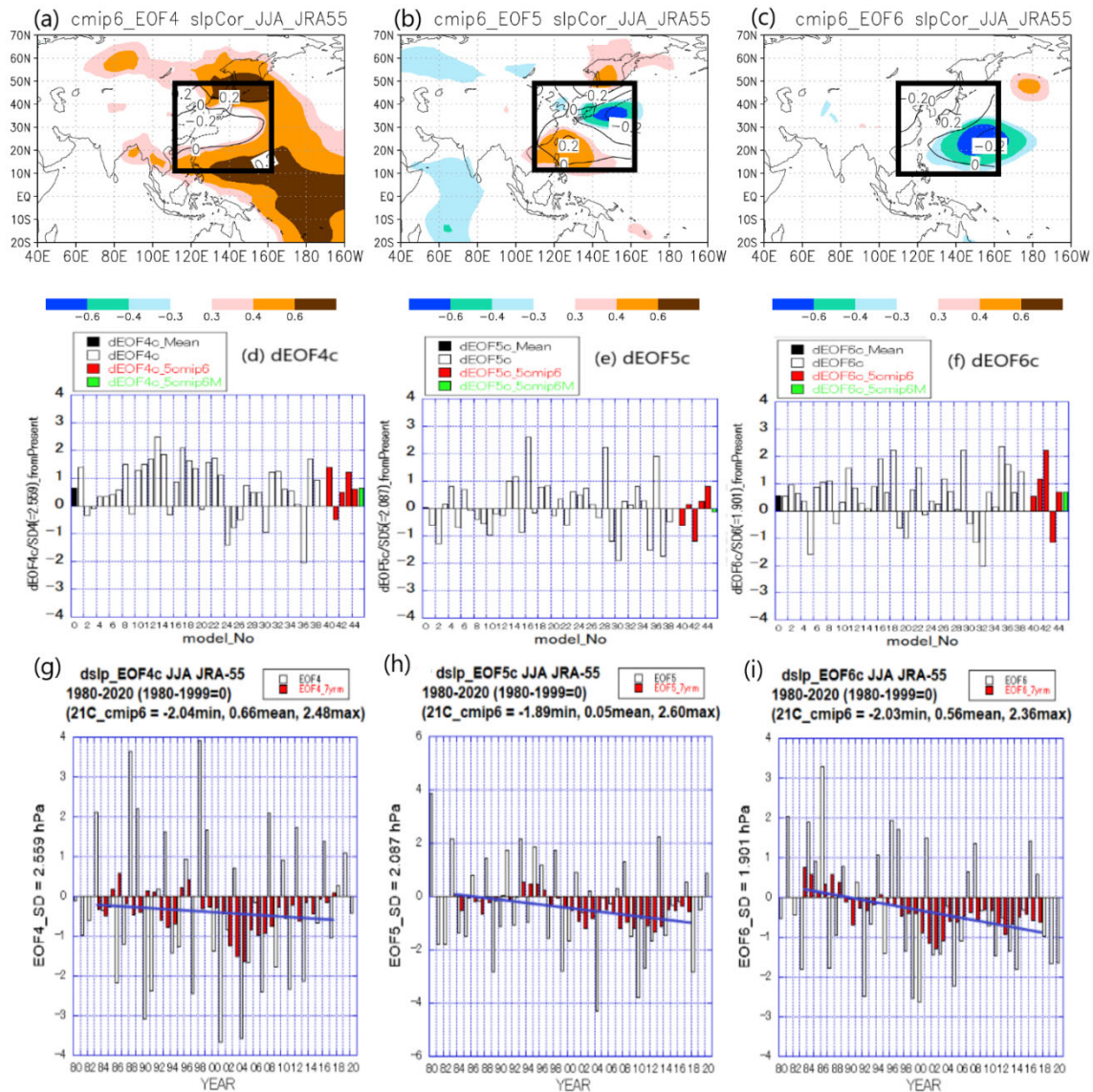


図3-2 下位主要3パターンであることを除いて図3-1と同じ。左列からEOF4、EOF5、EOF6。

図3-1と図3-2で示される結果をまとめると、夏季東アジアの海面気圧将来変化の主要パターンのうち、空間スケールが大きい上位主要3パターン（EOF1、EOF2、EOF3）の近年の気候変化は、CMIP6による21世紀末将来予測のアンサンブル平均と符号のみならず変化の大きさで見ても整合性が見られる。一方、空間スケールが小さい下位主要3パターン（EOF4、EOF5、EOF6）の近年の気候変化は、21世紀末将来予測平均とは逆符号の負の線形トレンドの傾向が見られる。

21世紀将来予測とは逆方向の、下位主要3パターンの近年における負の線形トレンドは、何が原因で形成されているのだろうか。

図3-3aは、観測再解析データ（JRA-55）の夏季海面気圧の近年（1980年～2020年）の気候変化を、図3-3bは、夏季海面気圧のCMIP6アンサンブル予測平均による21世紀末将来変化を示す。両者を比較すると、EOF2パターン類似の、東アジア北部で低気圧偏差、南部で高気圧偏差が共通して見られるほか、地中海付近やユーラシア大陸北部、北米大陸で低気圧偏差が見られる。一方、熱帯海洋上は、近年の気候変化では低気圧偏差であるが、21世紀末将来予測では高気圧偏差であるなど違いが目立つ。

図3-3cは、観測再解析データ（JRA-55）の夏季および冬季の地上気温の近年の気候変化、図3-3dは、夏季地上気温のCMIP6アンサンブル平均予測による21世紀末将来変化を示す。夏季の近年の地上気温変化では、全球的に見て昇温している地域が多いものの、南大洋や熱帯太平洋東部、北半球太平洋亜熱帯

域では地上気温が低下している地域もある。南大洋や熱帯太平洋東部での気温低下は冬季地上気温でも見られる。夏季昇温が大きいのは、北半球の大陸上である。この傾向は、21世紀末の昇温分布（図3-3d）の地域性としても見られる。CMIP6の21世紀末将来変化の解析では、海面気圧変化のEOF2パターンの出現は北方大陸とその周辺海域の昇温が要因であることが、アンサンブル予測の統計解析から判明している（Ose et al. 2022）。図3-3cによって、近年の気候変化に見られるEOF2パターンの正トレンドもまた、近年（1980年～2020年）における北方大陸の大きな昇温が原因で引き起こされていると理解できる。

図3-3dの夏季地上気温のCMIP6アンサンブル予測平均による21世紀末将来変化について、等値線の示す熱帯海洋域の昇温分布の詳細に注目すると、熱帯東部太平洋、北半球太平洋亜熱帯域やアラビア海付近で昇温が大きい。この昇温大の海域分布は、近年の昇温分布（図3-3c）の中では逆に気温が低下している海域に対応する。すなわち、熱帯海洋域における近年の昇温分布は、21世紀末将来予測による昇温分布と地理的に逆になっていることがわかる。この観測解析事実から、21世紀末海面気圧将来変化の下位パターン（EOF4、EOF5、EOF6）の近年の負のトレンド傾向（図3-2）は、近年の熱帯域海洋昇温の地理的分布によるものと考えられる。さらに詳細な解析結果（Ose et al. 2024, 成果番号38）によれば、この結論は、近年（1980年～2020年）における下位主要3パターン（EOF4、EOF5、EOF6）の年々変動と海面水温年々変動との相関関係と矛盾しない。

図3-3から得られた結果をまとめると、EOF2パターンの近年の長期変動の有意な正トレンドは、近年の北方大陸と周辺海域における大きな昇温が原因であり、これはCMIP6による21世紀末の地球温暖化アンサンブル予測平均と矛盾しない。少なくとも2つの下位主要パターン（EOF5とEOF6）の近年の長期変動の有意な負トレンドについては、近年の気候変化による熱帯海域の昇温地理分布が21世紀末将来予測の昇温地理分布と逆であることが原因である。

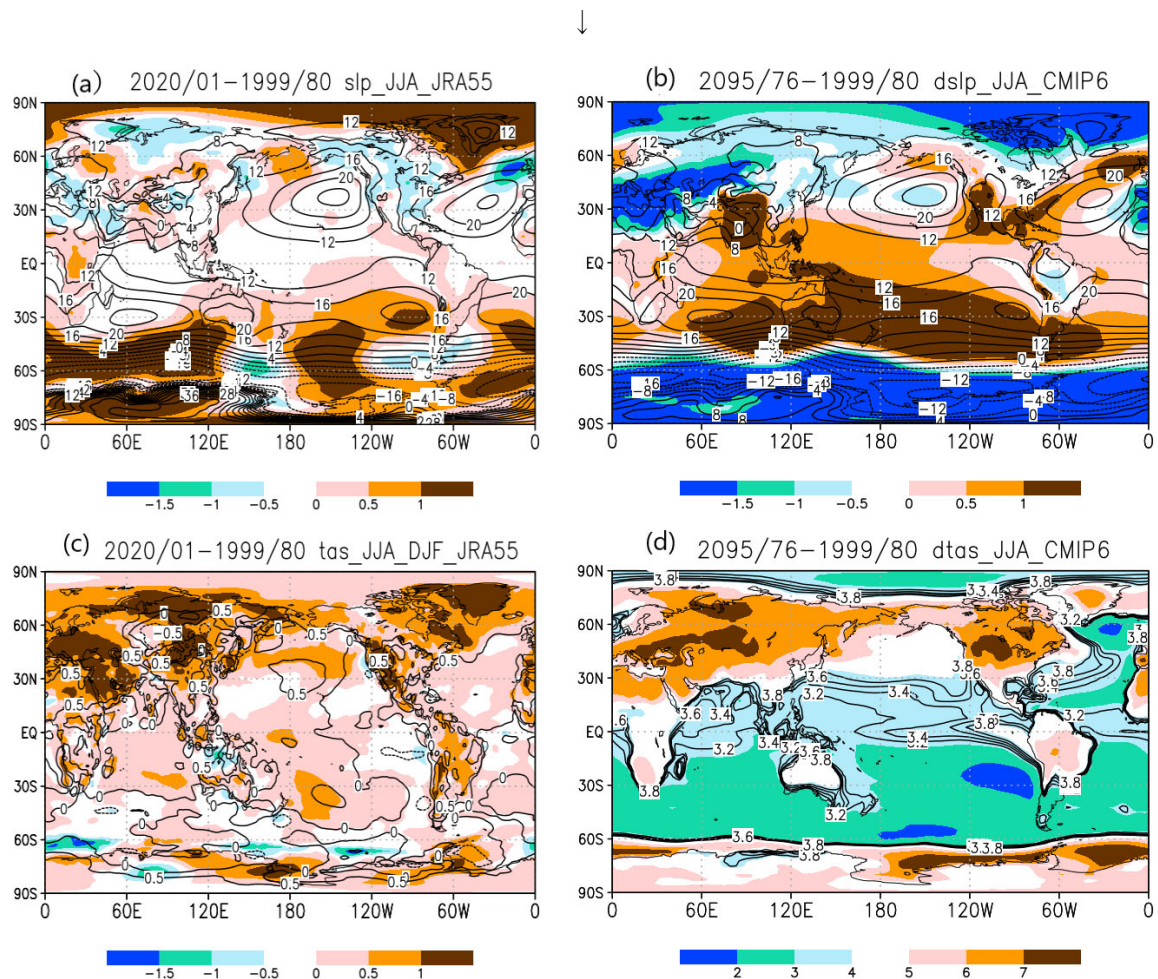


図3-3 海面気圧および地上気温の近年（1980年～2020年）の変化とCMIP6による21世紀末の変化予測

(a) 観測再解析データ（JRA-55）による近年の夏季海面気圧変化（カラー陰影：hPa）と夏季海面気圧現在気候値（等値線：4hPa毎で1000hPaからの偏差）。ここで、現在気候値は1980年～1999年の20年平均値で、近年の変化は2001年～2020年の20年平均値と現在気候値の差。(b) (a)と同じ。ただし、夏季海面気圧の38のCMIP6モデル平均21世紀末将来変化と同海面気圧現在気候値。ここで、21世紀末将来変化は2076年～2095年の20年平均値と現在気候値の差（モデル毎に全球4度上昇時に換算）の38モデル平均。

(c) 観測再解析データ（JRA-55）による近年の夏季地上気温変化（カラー陰影：℃）と冬季平均地上気温変化（等値線は-1.0、-0.5、0.0、0.5、1.0℃）。(d) カラー陰影は、夏季地上気温の38のCMIP6モデル21世紀末将来変化の平均であることを除いて(c)と同じ。3℃と4℃昇温の間を0.2℃毎に等値線で表現。

ここまで、近年（1980年～2020年）における21世紀末の海面気圧将来変化パターンの出現状況を調べてきたが、その結果は21世紀末予測での各パターンの出現の大きさと関係があるのだろうか、それとも単なる近年の一時的な気候変動だろうか。

これを調べるために、現在気候（1980年～1999年）を基準に、観測データに基づく人為的な二酸化炭素やエアロゾル排出量などを外部強制力として与えたCMIP6歴史実験から近年の気候変化（2000年～2014年）と、ssp5-8.5将来シナリオに基づくCMIP6将来予測実験の21世紀末気候変化（2076年～2095年）を比較した。図3-4は、21世紀末海面気圧将来変化の主要6パターン（EOF1、EOF2、EOF3、EOF4、EOF5、EOF6）を対象に、38の各CMIP6モデル歴史実験の近年変化（横軸）に対して、それぞれの将来予測実験の21世紀末将来変化（縦軸）をプロットしたものである。

近年変化と21世紀末将来変化の相関係数を調べると、どのEOFパターンも0.3以上の有意な相関関係があり、両者には統計的に無視できない関係が認められる。近年の気候変化は、ある程度21世紀末将来変化の傾向をとらえていることになる。ここで、両者の関係に見られるばらつきは、主にモデルの不確実性と内部変動による不確実性が含まれていると考えられる。CMIP6実験がアンサンブルの範囲内に現実の自然を再現していると仮定すると、CMIP6アンサンブルの回帰直線を使って、観測再解析データ

（JRA-55）が示す各パターンの近年変化結果を知った段階での、もっともらしい21世紀末将来変化を推定できる（図3-4各図の空白四角記号）。

上位主要3パターン（EOF1、EOF2、EOF3）の観測解析による近年気候変化から推定される21世紀末将来変化（図3-4abc）は、いずれのパターンでもCMIP6アンサンブル予測平均の将来変化（赤塗丸）からやや低い値の予測を示しているが、CMIP6によるアンサンブル予測の不確実性と比較すると、その差は小さい。これは、観測再解析の近年気候変動に見られた近年のトレンドは、CMIP6による21世紀末将来予測平均の大小とよく対応していることを示す。やや低めの予測であることは、CMIP6予測としてssp5-8.5将来シナリオを採用しているうえ、全球昇温量を4℃レベルで換算していることを考えると不自然ではない。

一方、下位主要3パターン（EOF4、EOF5、EOF6）（図3-4def）では、近年の観測解析で見られた負のトレンドを反映した負の近年気候変化（横軸）を示しているため、CMIP6アンサンブル実験の回帰直線から推定される21世紀末将来変化（縦軸）は、CMIP6予測平均正值から離れた負値を取る。近年の観測解析が示す値が予測の不確実性の範囲内ではあるが低い値に隔たっている事実は、近年の気候変動に大きな長期内部変動が含まれていると解釈するか、もしくは下位主要3パターンの21世紀末アンサンブル平均予測の信頼度は十分には高くなく、予測と逆の負値の21世紀末予測値をとる可能性もあると解釈できる。

まとめると、CMIP6 アンサンブル実験の歴史実験と将来予測実験の解析から、夏季東アジア海面気圧将来変化の分類パターンの近年の変化は、その21世紀末将来変化予測と有意な統計関係があることがわかった。この統計関係から得られる回帰直線に、観測解析から得られた近年変化の事実を適用すると、近年変化の観測事実を踏まえた場合の、上位主要3パターン（EOF1、EOF2 と EOF3）の21世紀末予測は、やや低い傾向があるものの不確実性を考慮するとおおむねCMIP6 アンサンブル予測平均値と整合的である一方、下位主要3パターン（EOF4、EOF5 と EOF6）の21世紀末予測は、その不確実性を考慮してもかなりCMIP6 アンサンブル予測平均値から離れた低い値を示すことがわかった。

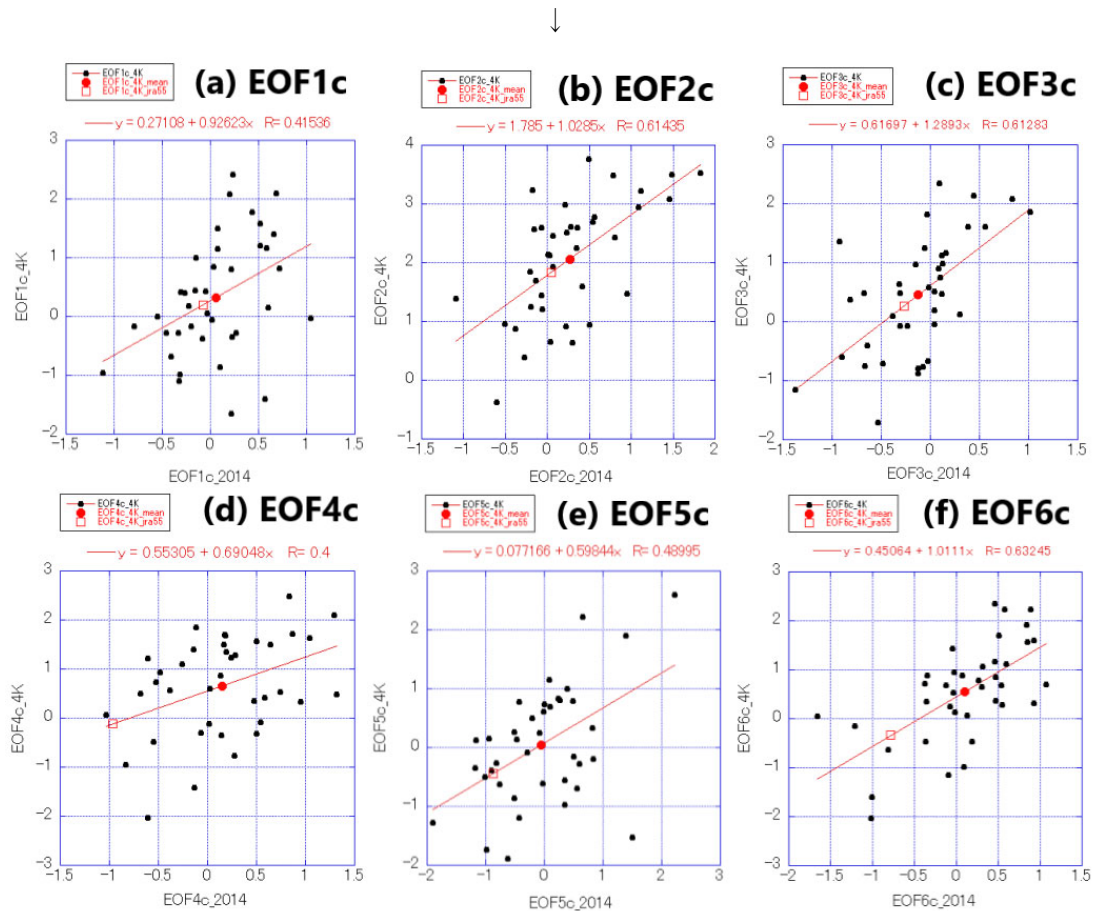


図3-4 CMIP6モデルによる夏季東アジア海面気圧の近年の変化値と21世紀末将来変化値の関係

38のCMIP6モデルの歴史実験による夏季東アジア海面気圧主要パターン値の近年（ここでは、2000年～2014年の15年平均）変化値（横軸）とssp5-8.5シナリオ予測実験による21世紀末（2076年～2095年の20年平均）将来変化値（全球平均気温4K昇温時にモデル毎に換算）（縦軸）。ここで、変化の基準とする現在気候値は、両者とも歴史実験の1980年～1999年の20年平均値。(a) EOF1、(b) EOF2、(c) EOF3、(d) EOF4、(e) EOF5、(f) EOF6で、横軸・縦軸とも規格化値(図3-1defghiと図3-2defghiの縦軸と同じ規格値)。

赤の直線は38のCMIP6モデルの近年変化値と21世紀末将来変化値のアンサンブルから得られた回帰直線で、赤塗丸印はそのアンサンブル平均値。白抜きの四角記号は、観測再解析(JMA-55)から得られた近年変化値に対する回帰直線上の21世紀末将来変化値を示す。

全体のまとめ

・CMIP6のどのモデルも21世紀末の出現を予測している夏季東アジアの海面気圧パターン（EOF2）は、すでに近年の長期変動の中に正のトレンド変化として出現している。これは、地球温暖化に伴う北方大陸の強い昇温が確実に始まっているためである。この空間パターンを含めて、CMIP6による夏季東アジアの21世紀末予測パターンのうち大きな空間パターン（上位主要3パターン）は、CMIP6の21世紀末アンサンブル予測平均と矛盾しない近年の変化を示している。

・CMIP6による夏季東アジアの21世紀末予測の海面気圧将来変化パターンのうち、比較的小さい空間スケールであるが、しかし日本の気候変化として無視できないパターン（下位主要3パターン）は、21世紀末予測平均とは符号が逆方向の負のトレンドの近年変化を示している。これは、近年の熱帯海面水温変化が、CMIP6による21世紀末将来昇温分布とは逆符号の地理的分布をしているためであると考えられる。この近年の変化の観測事実は、近年の熱帯海面水温変化がこのまま続けば、CMIP6の予測平均と逆符号の21世紀末将来変化パターンが21世紀末に実現する可能性もあることを示す。

考察

・近年の熱帯海面水温変化がCMIP6将来予測と地理的分布が異なることは、すでにIPCCレポート（2013）の中で認識されているが、それによれば長期内部変動や地球温暖化に伴う一時的な変動とする見方が紹介されているものの、確かな結論は明らかになっていない。近年の熱帯海面水温の変化の監視と原因を追究する研究を進める必要がある。

・ここで解析された夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンが、地球温暖化した日本の各地に実際にどのような気候変化を及ぼすのか、より具体的に調査する必要がある。

・大陸上の気温変動については、これまで年々変動の原因として、また重要なモデル開発要素として注目されてこなかった。しかし、地球温暖化に対する陸面過程の応答（e.g. Endo et al. 2018）が具体的に確実な影響を日本域の気候変化に与えることがわかったことから、今後、この観点でも研究を進めていく必要がある。

（2）東アジア夏季モンスーン降水の将来変化におけるユーラシア大陸昇温の影響

アジア周辺（30E-180E、10S-60N）の地上気温（SAT）将来変化を全球1℃昇温で規格化し、マルチモデルEOF解析を行った（図3-5）。第1モード（SAT_EOF1；寄与率38%）は、ユーラシア大陸上の大きな昇温と周辺海域の小さな昇温で特徴づけられる。このパターンは将来変化で予測される昇温パターンの強弱に関連する。SAT_EOF1パターンに関して、ユーラシア大陸では海面気圧低下、周辺海域では海面気圧上昇が見られる。また、大陸上のモンスーン地域で降水量増加、熱帯北西太平洋などの周辺海域で降水量減少が見られる。このように、SAT_EOF1は海陸温度コントラスト変化に伴うモンスーン循環・降水の強弱と密接に関連する昇温パターンである。また、SAT_EOF1はユーラシア大陸を含む中高緯度で昇温量が大きいため、南北温度傾度が減少して亜熱帯ジェットの弱化を伴う。SAT_EOF1スコアを図3-6に示す。CMIP6モデルが正値を予測する傾向が見られる。他方で、第2モード（17.8%）や第3モード（7.3%）ではモンスーン地域で有意な降水量偏差は見られない。

以降では、SAT_EOF1と東アジアモンスーン（EASM）との関係を詳しく見ていく。SAT_EOF1スコアと東アジアモンスーンに関わる各種指数の関係を図3-7に示す。東アジアモンスーン地域の降水量について、大陸上と海上に分けて示す。SAT_EOF1スコアに対する降水量偏差は、大陸上では正相関が見られ、特に中国北部で正相関が明瞭である。一方、日本付近を含む海上では負相関が見られる。CMIP6モデルはCMIP5モデルと比べて、大陸上で降水量増加が大きく海上で降水量増加が抑制されている。大気循環については、SAT_EOF1スコアの増加に対して、下層の南風モンスーンが強化する一方で上層の東アジアジェットは弱化する傾向が明瞭に見られる。東アジアの海上モンスーン地域で見られるSAT_EOF1スコアと降水量の負相関関係は、SAT_EOF1パターンがもつ中高緯度の大きな昇温に伴う東アジアジェット弱化の結果として、梅雨前線が弱化するために生じていると考えられる。このように、東アジアのモンスーン地域では、SAT_EOF1に関連する降水量偏差の符号が大陸上と海上で異なる点は興味深い特徴である。

次に、SAT_EOF1スコアが-1以下のモデル群（低SAT_EOF1スコア群）と+1以上のモデル群（高

SAT_EOF1スコア群)に分類して合成図解析を行った。6月～9月における各月の降水量と850hPa風の将来変化を図3-8に示す。東アジアの降水量変化は、両グループにおいて全体としては増加傾向であるが、空間分布や季節進行には顕著な差異が見られる。低SAT_EOF1スコア群では(図3-8a-d)、日本域を含む海上で降水量増加が顕著で、梅雨前線に伴う降水帯の季節的北上が遅れている。東アジアでは北寄りの風偏差で、盛夏期の8月においても日本付近では降水量増加が顕著である。一方で高SAT_EOF1スコア群では(図3-8e-h)、大陸上で降水量増加が顕著で南風強化が見られる。初夏から盛夏への季節進行が早く、6月に梅雨降水帯は強化するが7月になると降水量増加の中心は中国北部へ移り、中国南部～西日本付近では降水量減少や高気圧性循環偏差が見られる。また、9月になっても大陸上の降水量増加が明瞭で夏季モンスーンの影響が長期化している。SAT_EOF1スコアに関連したこのような降水量偏差パターンは、CMIP5予測とCMIP6予測の差異と類似する。CMIP6(CMIP5)モデルはSAT_EOF1スコアが相対的に高い(低い)モデルが多いため、高(低)スコアグループ寄りの将来変化を予測している(図3-8m-p)。

以上をまとめると、アジア周辺のSAT将来変化のマルチモデルEOF解析で得られるSAT_EOF1パターンは、ユーラシア大陸上の大きな昇温と周辺海域の小さな昇温で特徴づけられ、モンスーン循環・降水の強弱と密接に関連する。SAT_EOF1スコアに関連するEASM降水変化は、大陸上(特に中国北部)では正相関の一方で日本付近を含む海上では負相関を示す。SAT_EOF1スコアが大きなモデルは、対流圏下層で南風モンスーンが強化すると同時に対流圏上層では東アジアジェットが弱体化しており、その結果、SAT_EOF1パターンに関連するEASM降水量変化は大陸上と海洋上で異なる特徴を示すと考えられる。またSAT_EOF1スコアの大きなモデルは、初夏から盛夏への季節進行が相対的に早く、EASM影響が長期化する傾向が見られる。

夏季東アジアのモンスーン降水の将来予測の不確実性低減について議論する。現在気候の降水量気候値をSAT_EOF1スコアへ回帰した結果を図3-9に示す。SAT_EOF1スコアは現在気候の陸上モンスーン降水量と有意な正相関をもつ。この統計関係の物理的解釈としては、現在気候において大陸で大気加熱が大きいモデルは、温暖化に伴う海陸温度コントラスト強化→モンスーン循環強化→大陸でモンスーン降水(大気加熱)強化→海陸温度コントラスト強化という正のフィードバックが働きやすくなることが考えられる。この結果は、現在気候のモデル降水量を観測値で制約することにより、夏季東アジアのモンスーン降水の将来予測の不確実性を低減できる可能性を示唆する。

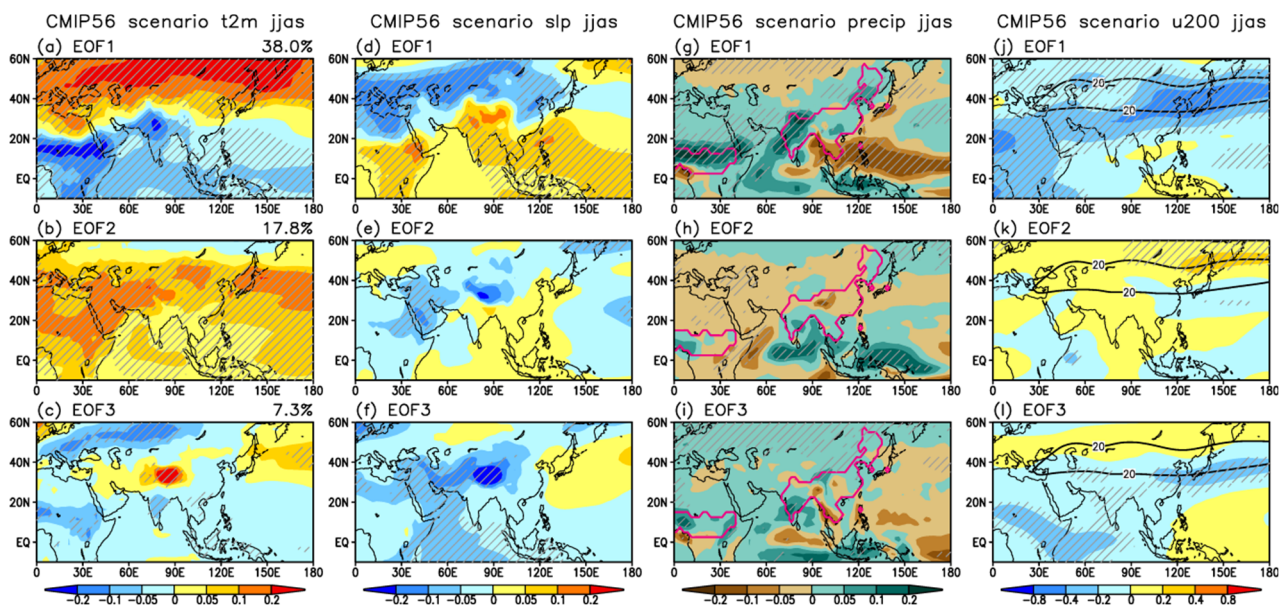


図3-5 アジア周辺(30E-180E、10S-60N)の地上気温(SAT)将来変化のマルチモデルEOF解析における各モード係数への回帰分布。(a-c)地上気温、(d-f)海面気圧、(g-i)降水量、(j-l)200hPa東西風の将来変化。いずれも6～9月(JJAS)平均。上から順にEOF1、EOF2、EOF3。各EOFモードの寄与率

を(a-c)の右上に示す。斜線は有意水準5%以下の偏差。(j-1)では200hPa東西風の現在気候値の20m/s等値線をコンターで示し、(g-i)では大陸上のモンスーン領域をコンターで示す。モンスーン領域は、観測データで雨季(5~9月)と乾季(11~3月)の降水量差が2.5mm/d以上として定義した。

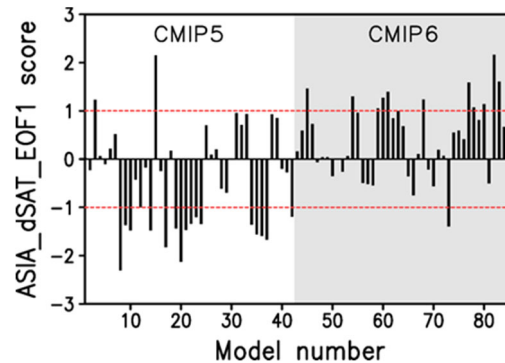


図3-6 SAT_EOF1スコア（分散が1になるように規格化）。横軸の番号はモデルを表し、1~42番がCMIP5モデル、43~86番がCMIP6モデルに対応する。

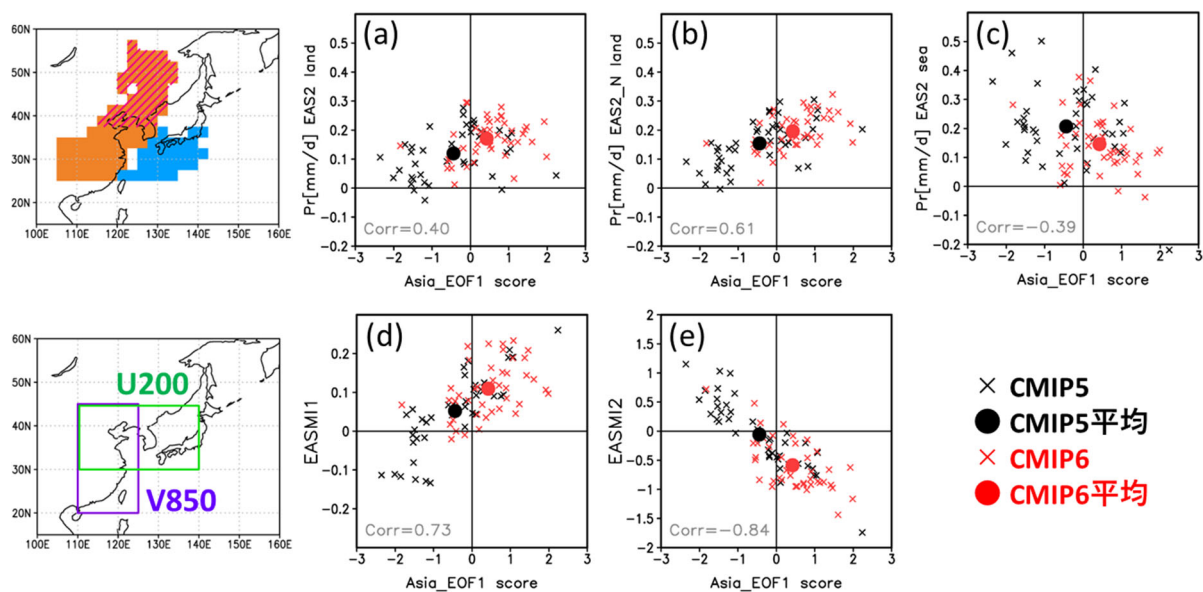


図3-7 (横軸) SAT_EOF1スコアと(縦軸) 東アジアの各種インデックスの関係を示す散布図(いずれもJJAS平均)。(a)陸上モンスーン領域の降水量、(b) 37.5N以北の陸上モンスーン領域の降水量、(c) 海上モンスーン領域の降水量、(d) 850hPa南北風、(e) 200hPa東西風。(a-b) モンスーン降水量計算の定義領域を左上、(d, e) 大気循環インデックス計算の定義領域を左下に示す。

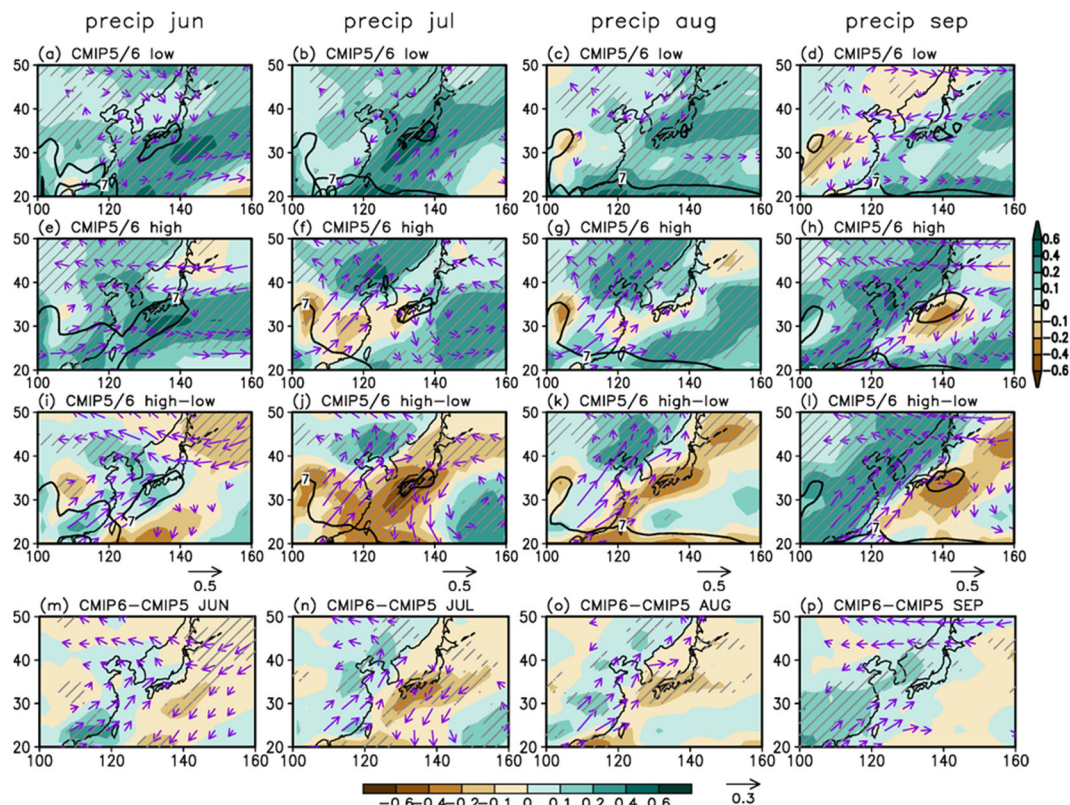


図3-8 降水量 (mm/d) と850hPa風 (m/s) の将来変化。(a-d) 低SAT_EOF1スコア群平均 (18モデル)、(e-h) 高SAT_EOF1スコア群平均 (13モデル)、(i-l)両グループの差、(m-p) CMIP6モデル平均とCMIP5モデル平均の差。左から順に6月、7月、8月、9月。有意水準5%以下の降水量偏差 (850hPa風偏差) を斜線 (矢印) で示す。

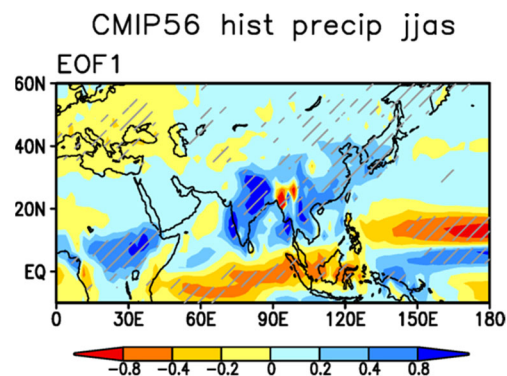


図3-9 現在気候の降水量気候値をSAT_EOF1スコアへ回帰した分布 (mm/d)。斜線は有意水準5%以下の偏差。

(3) 北半球の積雪による地上気温への影響の評価

データと解析方法

本研究では、アメリカ航空宇宙局 (NASA) によるModern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2、Gelaro et al. 2017) 再解析の日積雪域、積雪水当量、地上気温データを用いた。解析データの期間は2000年～2020年である。季節内予測のデータには、世界気象研究計画/世界気候研究計画の季節内から季節予測プロジェクト (S2Sプロジェクト、Vitart et al. 2017) の再予報データを使用した。積雪データを提供している中国気象局 (CMA、BCC-CPS-S2Sv2)、欧州中期予報センター (ECMWF、CY47R1)、気象庁 (JMA、GEPS2203) の3機関の再予報データを使用した。本研究では、全ての解析、予測データを2.5度の

等緯度経度格子に内挿した後解析した。

本研究では、エントロピー（平均情報量）の時間変化に基づく、Liang-Kleeman information flowという新たな因果解析手法を使用した（Liang and Kleeman, 2005; Liang, 2008, 2014, 2015）。ガウス分布に従う2変数（ X_1 と X_2 ）の確率過程（ウィーナー過程）を含む線形なシステムにおける、変数 X_1 から X_2 へのエントロピー変化への寄与の最尤推定値は、

$$T_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d1} - C_{12}^2C_{1,d1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2}$$

と書ける。ここで、 C_{ij} は X_i と X_j の共分散、 d_1 は X_1 の前方差分を意味する。本研究では、これを X_1 のエントロピーの変化項の絶対値の総和で規格化した値（Liang 2015）を示す。以降、この量を因果関係（causality）と呼ぶ。

結果

本研究では、7日平均した変数に対し、Liang-Kleeman information flow解析を適用し、因果関係を調べた。MERRA-2再解析により、積雪から地上気温への因果関係の強い領域及び月は、9月及び10月の北ユーラシア、10月と5月の東シベリア、11月のカナダ、11月と3月の東アジア、10月と11月の中央アジア、3月の東ヨーロッパであることがわかった（図3-10）。

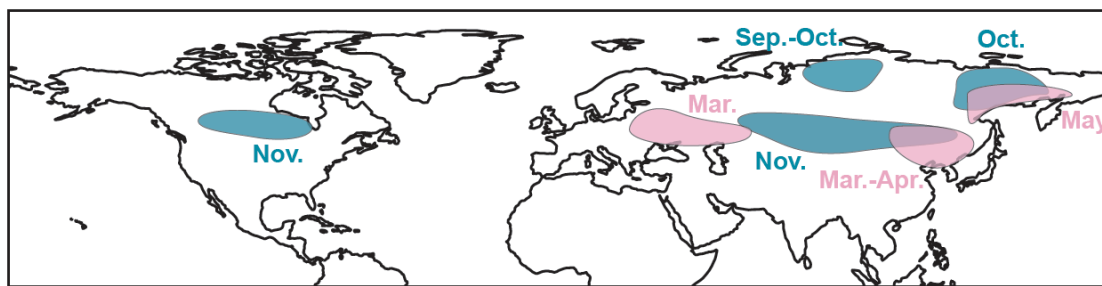


図3-10 本研究で特定された、積雪域から地上気温への強い因果関係を示す領域。

因果関係の季節変化を調べるため、図3-11に積雪から地上気温への因果関係の強い領域の因果関係の月変化を示す。MERRA-2の結果をみると、多くの領域では、積雪から地上気温への因果関係が強い月には、地上気温から積雪への因果関係も同時に強いことがわかる。このことは、積雪と地上気温の間に双方向のフィードバックが働くことを示唆する。さらに、これと季節内予測モデルの結果を比較した。モデルにおける積雪域から地上気温への因果関係はMERRA-2再解析に比べ過小評価されている傾向がみられる。

まとめ

本研究では、Liang-Kleeman information flow解析を北半球の地上気温と積雪域に適用し、地上気温に対する積雪影響の強さを評価した。その結果、積雪域から地上気温への強い因果関係（影響）を示す領域、月が特定された。さらに、季節内予測モデルにおける積雪域と地上気温の因果関係を同手法によって評価した結果、予測モデルでは、積雪域による地上気温への因果関係を過小評価していることがわかった。本研究で用いたLiang-Kleeman information flow解析では、解析とモデルの結果を比較することが可能であり、モデルの積雪影響の強さを評価するのに役立つ。こうした評価を通じて、気候モデルにおける積雪影響を理解し、正しく表現することは、温暖化予測の不確実性の低減につながると期待される。今後、本研究で行ったプロセスレベルの評価と長期的な温暖化傾向との関係を分析する必要がある。

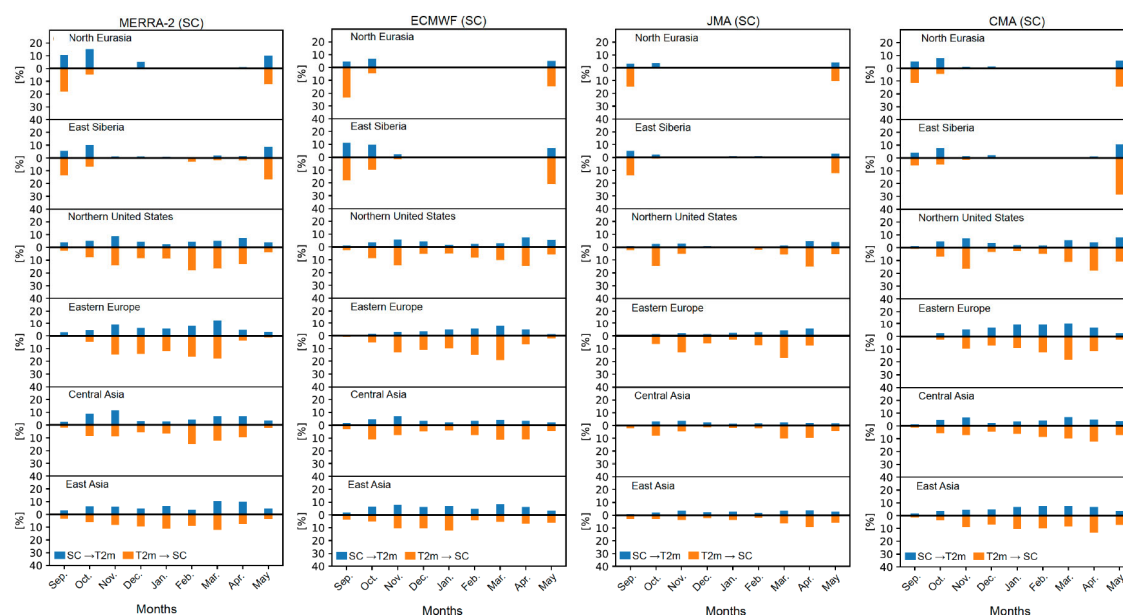


図3-11 積雪域から地上気温への因果関係が強い領域における積雪域と地上気温の因果関係の季節性。積雪域から地上気温への因果関係の平均値(青)、地上気温から地上気温への因果関係の平均値(橙)を示す。それぞれの領域は(a)東シベリア: 60°N - 72.5°N , 130°E - 150°E 、(b)東アジア: 40°N - 60°N , 100°E - 140°E 、(c)カナダ: 47.5°N - 57.5°N , 120°W - 80°W 、(d)東ヨーロッパ: 45°N - 60°N , 22.5°E - 57.5°E 、(e)中央アジア: 45°N - 60°N , 57.5°E - 100°E 、(f)北ユーラシア: 65°N - 75°N , 80°E - 110°E 。左列より、それぞれ、MERRA-2再解析、ECMWFモデル、JMAモデル、CMAモデルの結果。

(4) 日本の猛暑と大規模循環場の要因分析

一般的にもよく知られている通り、太平洋高気圧が西側に張り出し、日本を覆う様な循環場が見られた。しかしながら、日本を中心に発達する場合は、2割程度であり、他のパターンも熱波を引き起こす重要な要素である。それ以外のパターンとして、日本の北もしくは、日本の南で高気圧性偏差が見られるパターンであった。前者は、熱帯起源のテレコネクションと、後者は、中緯度の対流圏上層の波活動と関連していた。さらに、台風などの熱帯擾乱活動が西日本の近傍で活発な事例も3割近くに達し、これについては、かなりの割合であることがわかった。温暖化による熱波日の循環場の変化としては、熱帯擾乱など、熱帯からの影響が弱まる可能性が示唆されたが、将来変化については、CMIPモデルの使用も含めて、今後さらに研究する必要がある。

5. サブテーマ3 研究目標の達成状況

本研究課題全体でターゲットとする極端気象の将来変化に関する物理的理解のうち、本サブテーマでは、アジアモンスーン・熱帯域に注目し、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実施し、21世紀末夏季東アジアの海面気圧将来変化パターンの近年出現状況と要因分析、東アジア夏季モンスーン降水の将来変化におけるユーラシア大陸昇温の影響、北半球の積雪による地上気温への影響の評価、日本の猛暑と大規模循環場の要因分析などを明らかにし、成果を公表している。また、これらの成果を各サブテーマと共有すると共に、サブテーマ4を通して、様々な意思決定者に不確実性の低減を踏まえた予測情報の伝達を行った。このことから、目標は達成された。

<引用文献>

- Ose, T., H. Endo, Y. Takaya, S. Maeda, and T. Nakaegawa, 2022: Robust and uncertain sea-level pressure patterns over summertime East Asia in the CMIP6 multi-model future projections. *J. Meteor. Soc. Japan*, 100, 631-645, doi:10.2151/jmsj.2022-032.
- Shepherd, T.G., 2019: Storyline approach to the construction of regional climate change information. *Proc. Roy. Soc. A*, 475, 20190013. doi:10.1098/rspa.2019.0013
- Tokarska, K. B., M. B. Stolpe, S. Sippel, E. M. Fischer, C. J. Smith, F. Lehner, and R. Knutti, 2020: Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Sci. Adv.*, 6, eaaz9549.
- Shiogama, H., N. N. Ishizaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, S. Emori, R. Ito, T. Nakaegawa, I. Takayabu, Y. Hijioka, Y. N. Takayabu, R. Shibuya, 2021: Selecting CMIP6-based future climate scenarios for impact and adaptation studies. *SOLA*, 17, 57-62.
- Kosaka, Y. and H. Nakamura, 2006: Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132, 2009-2030, doi:10.1256/qj.05.204.
- Ueda, H. and T. Yasunari, 1996: Maturing process of the summer monsoon over the western North Pacific - A coupled ocean/atmosphere system. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74, 493-508.
- Endo, H., A. Kitoh, and H. Ueda, 2018: A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: the role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere. *SOLA*, 14, 57-63, doi:10.2151/sola.2018-010.
- Gelaro, R., et al., 2017: The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *J. Climate*, 30, 5419-5454.
- Vitart, F., et al., 2017: The Subseasonal to Seasonal (S2S) Prediction Project Database. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 98, 163-173.
- Liang, X. S., Kleeman, R. 2005: Information Transfer between Dynamical System Components. *Phys. Rev. Lett.*, 95, 244101.
- Liang, X. S., 2008: Information flow within stochastic dynamical systems. *Phys. Rev. E*, 78, 031113.
- Liang, X. S., 2014: Unraveling the cause-effect relation between time series. *Phys. Rev. E*, 90, 52150.
- Liang, X. S., 2015: Normalizing the causality between time series. *Phys. Rev. E*, 92, 22126.

Ⅱ－４ サブテーマ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」

〔サブテーマ4要旨〕

気候変動の将来予測には気候モデル間でばらつき（不確実性）があり、それが気候変動影響評価にも不確実性をもたらす。最新の気候モデルアンサンブルCMIP6では、将来の世界平均気温上昇が非常に大きいホットモデルが多数含まれている。これらのホットモデルは過去の気温変化を過大評価していて気温変化予測の信頼性が低いことが分かっており、IPCC-AR6-WG1報告書ではCMIP6モデルのばらつきをそのまま使うのではなく、上限を引き下げた不確実性幅が示された。しかし、世界平均気温の不確実性低減が、影響評価に用いられる様々な気候変数や極端現象指標の予測不確実性や影響評価の不確実性の削減につながるかどうかは分かっていなかった。

サブテーマ4では、全球平均気温の不確実性低減手法を応用することで、世界の多くの地域で気温以外にも降水量、長波、短波、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。ま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。そして、ホットモデルの気候変化予測データを用いた経済影響評価は過大であることを示し、21世紀末の経済影響評価の不確実性幅の上限を引き下げ、分散を31%削減できた。これらの研究成果は、ホットモデルを含んだ共通気候シナリオを利用する世界規模の影響評価では不確実性を過大評価することを示唆するものである。一方、日本の影響評価研究では、ホットモデルを外した共通気候シナリオ（前身課題の成果）が幅広く利用されており、ホットモデル問題の影響は小さい。

さらに、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過去の温暖化で増加しており、そのような極端な海面水温イベントが常態化（2年に一度以上発生）することを防ぐには、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。

1. サブテーマ4研究開発目的

21世紀末までの気温や降水量等の変化予測には、気候モデル間で不確実性があり、その低減が求められている。過去の観測データと気候モデルシミュレーションの比較に基づいて将来予測の不確実性を低減する研究手法は、Emergent Constraint (EC) と呼ばれ、過去15年間ほどの間に活発に研究が行われてきた(Knutti 2010, Shiogama et al. 2011, Hall et al. 2019)。第6期結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP6)に参加した気候モデルの中には、それまでのCMIP5モデルと比較して、将来の全球平均気温上昇が極めて大きいモデル(ホットモデル)が多く含まれた。しかし、最近の研究によって、将来の全球平均気温上昇が特に大きいホットモデルは1980年から現在の全球平均気温上昇を過大評価する傾向があり、気温の予測に関する信頼性が低いため、気温予測の上限を引き下げられることが分かった(Tokarska et al. 2020)。そのため、気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第6次第1作業部会報告書(IPCC-AR6-WG1)では、気候モデルアンサンブルの全球平均気温変化予測の幅をそのまま使うのではなく、低減された不確実性幅が示された (Hausfather et al. 2022)。さらに本サブテーマの代表者である塩竈らは、将来の全球平均降水量増加が特に大きい気候モデルは過去の全球平均気温上昇を過大評価しており、全球平均降水量の将来変化予測に関しても上限を引き下げられることを明らかにした (Shiogama et al. 2022b)。

本課題の前身となるプロジェクト(推進費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」)において我々は、推進費S-18などの日本の気候変動影響評価研究で使われる共通気候シナリオNIES2020(Ishizaki et al. 2022, 成果番号41)用にCMIP6の数十ある気候モデルから5つの代表モデルを選択した(Shiogama et al. 2021)。その際に上記の知見を元にホットモデルは選択肢から除外した。しかしながら、影響評価モデルの入力データとして使われる様々な気候変数（気温、降水量、日射量、風速等）や極端現象

指数の将来変化が全球平均気温上昇と相関するのかは自明ではなく、ホットモデルを除いたことで、各地点・各変数の不確実性がどの程度減っているのかを知りたいという要望が、NIES2020のユーザである日本の影響評価研究者達から寄せられていた。一方、世界を対象とした影響評価研究プロジェクト Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project 3b (ISIMIP3b)では、ホットモデルを含めた5つの代表気候モデルを用いて影響評価が行われているが、それによって影響をどれだけ過大評価しているのかは分かっていない (Hausfather et al. 2022)。ISIMIP3bは、IPCC第7次第2作業部会報告書 (IPCC-AR7-WG7)において主要な根拠となることを期待されているプロジェクトであり、その影響評価結果がどの程度過大評価であるのかを知ることはIPCC AR7への貢献としても、アジア太平洋域の適応策支援のためにも重要である。

このような背景のもと、サブテーマ4では、気候変動の影響評価モデルにおいて入力データとして用いられる様々な気候変数や重要な極端現象指数の予測不確実性に対して、全球平均気温の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査し、影響評価・適応研究者への情報提供を行うことを目的とした。

2. サブテーマ4 研究目標

サブテーマ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
サブテーマ4実施機関	国立環境研究所
サブテーマ4目標	日本やアジア太平洋域における影響評価研究の入力データとなる様々な気候変数や重要な極端現象指数などの予測不確実性に対して、全球平均気温などの全球スケール現象の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査する。その上で、影響評価研究で利用される共通気候シナリオの信頼性を評価し、サブ1と協力して気候変動に伴う極端現象の不確実性低減情報のまとめと影響評価・適応研究への情報提供を行う。国際誌に3報以上の学術論文として発表し、国民との対話の機会を毎年もつ。

3. サブテーマ4 研究開発内容

サブテーマ4では、下記の研究を実施した。

I. 様々な気候変数、極端現象指数の不確実性低減

全球平均気温の予測不確実性低減の効果が、気候変動の影響評価モデルにおいて入力データとして用いられる様々な気候変数や重要な極端現象指数の予測不確実性に対してどのように波及するのかを調べるために、CMIP5とCMIP6の気候モデルの将来予測実験データを分析した。具体的には、日平均気温、年最高日最高気温、降水量、年最大日降水量、絶対湿度、下向き長波放射量、下向き短波放射量、海面気圧、地上10m風速の9気候変数・極端現象指標に関して、全球平均気温変化と相関があるかどうかを調べ、相関があるのなら過去の全球平均気温トレンドの再現性評価に基づいてECが可能かどうかを調べた。

II. 気候変動経済影響評価の不確実性低減（影響評価との連携研究）

(I)の研究などで気候モデルの不確実性を減少させることができれば、影響評価の不確実性も低減できると期待される。しかしながら、気候予測の不確実性低減に関する情報を影響評価に活用する手順はこれまで確立されておらず、ホットモデルも含んだ影響評価の幅をそのまま示す研究が多いのが現状で、活用手順の改善が求められている (Hausfather et al. 2022)。そのため、当初の計画には無かったが、推進費2-2002「世界を対象としたネットゼロ排出達成のための気候緩和策及び持続可能な開発」の影響評価研究者と協力して、ホットモデルによって実際に経済影響評価がどれだけ過大評価されるのか、どうすれば不確実性を低減できるのかを研究した。

III. 日本近海で増える極端な高海面水温への地球温暖化の寄与の評価と将来予測

前課題(推進費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」)において、我々は2020年8月に生じた日本南方沖を含む北西太平洋の未曾有の高海面水温を分析し、人為的な地球温暖化によって、このような異常高温の発生頻度が1000年に一度以下から約15年に一度にまで高まっていることを示した(Hayashi et al. 2021)。サブテーマ4では、この研究を発展させて、CMIP6モデルアンサンブルの分析に基づいて、日本近海で観測史上最高の極端な海面水温イベントの発生確率が過去の温暖化でどれだけ変化しているか、1.5℃、2℃温暖化時にどのように変化するかを調べた。その際に、(I)、(II)の結果を参考に、ホットモデルは除外して分析を行った。

IV. 影響評価・適応研究への情報提供

サブテーマ1と共に、本課題で得られた成果を影響評価・適応研究者に情報提供した。

4. サブテーマ4 結果及び考察

サブテーマ4では、下記の研究結果を得た。

I. 様々な気候変数、極端現象指数の不確実性低減

図4-1a-bの横軸は、1980年から2021年の全球平均気温トレンド（長期変化傾向）を示す。縦軸は、温室効果ガスの濃度増加が中程度の場合（RCP4.5とSSP2-4.5）の67の気候モデルの全球平均気温と全球平均降水量の将来変化予測である。先行研究(Tokarska et al. 2020, Shiogama et al. 2022b)が示すように、将来の全球平均気温変化と全球平均降水量変化は、過去の全球平均気温トレンドと良い相関を持っており、過去の気温トレンドの大きい気候モデルほど将来の気温変化と降水量変化が大きい傾向がある。図4-1a-b下部の青い横棒は、観測された過去の気温トレンドに、気候システム内の自然の揺らぎ（エル・ニーニョ等）によって偶然生じえる幅を加えたものである。複数の気候モデルが過去の気温トレンドを過大評価しているが、それらの気候モデルでは将来の気温上昇と降水量増加も過大評価しているものと考えられる。この予測の信頼性に関する情報を加味すると、予測の不確実性幅（5-95%幅）を元々の黒い箱ひげ図から青い箱ひげ図の幅へと低減することができ、特に上限（95%値）を顕著に引き下げることができる。

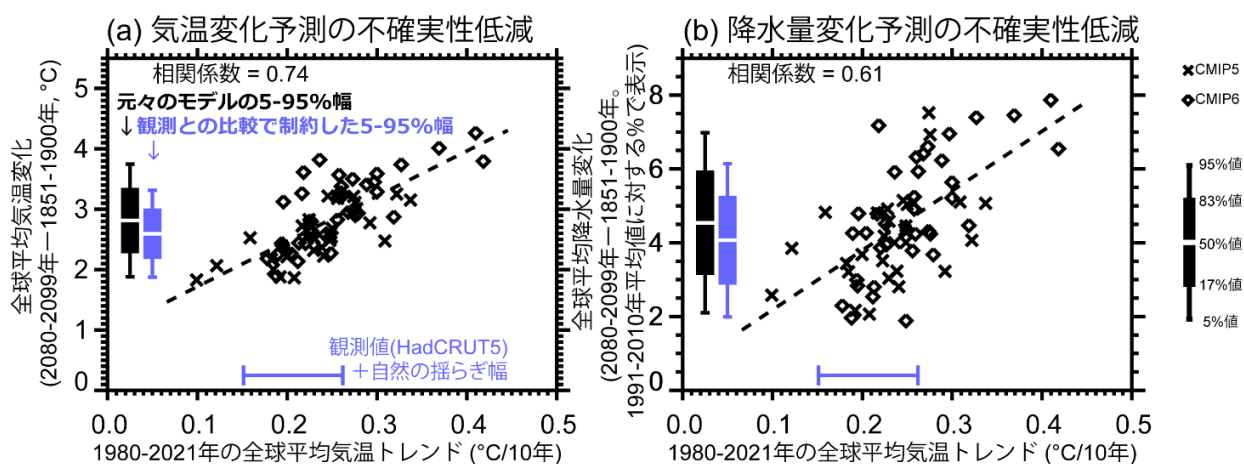


図4-1 将来の全球平均気温変化と降水量変化の不確実性低減。横軸は、各気候モデルでの1980年から2021年の全球平均気温トレンド(°C/10年)。縦軸は将来の全球平均気温変化(°C)と全球平均降水量変化(%)。×と◇は、それぞれCMIP5(31モデル)とCMIP6(36モデル)の気候モデル。黒い破線は回帰直線。青い横棒は、観測された(HadCRUT5データ)1980年から2021年の全球平均気温トレンド

に自然の揺らぎによる不確実性幅（5-95%幅）を加えたもの。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。

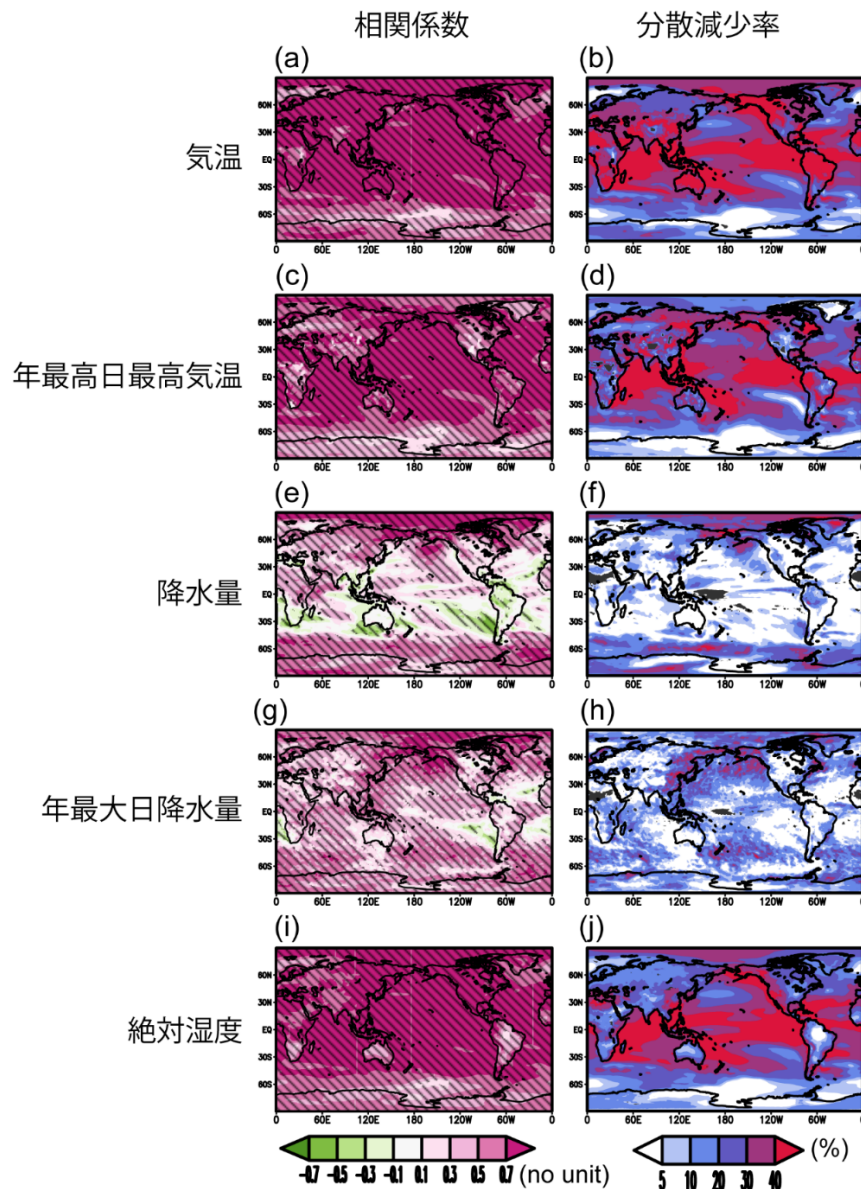


図4-2 (a) 将来の全球平均気温変化(2051-2100平均と1851-1900平均の差)と各グリッドでの年平均気温変化の相関係数。斜線は $\pm 10\%$ 水準で有意な場所。(b) 年平均気温変化予測の分散減少率(%)。元々のモデル分布がガウス分布になっていない場所は、EC手法が適応できないので、灰色で塗りつぶしている。ほかのパネルは(a, b)と同様だが、それぞれ(c, d)年最高日最高気温、(e, f)年平均降水量、(g, h)年最大日降水量と(i, j)年平均絶対湿度の将来変化に関するもの。

この先行研究(Tokarska et al. 2020, Shiogama et al. 2022b)で開発されたEC手法を拡張して、各グリッドでの将来変化予測の不確実性が低減できるかを調べた。ここでは必要なデータが得られたCMIP5とCMIP6の40の気候モデルの予測実験(RCP4.5とSSP2-4.5)を分析する。図4-2に各グリッドの年平均気温、年最高日最高気温、年平均降水量、年最大日降水量、年平均絶対湿度の将来変化と全球平均気温変化とのモデル間相関係数と、EC手法によって予測のモデル間分散が何%削減できるか(分散減少率)を示す。相関係数が統計的に有意な正の値を示す場所・変数では、ホットモデルは正の将来変化を過大評価している(例えば気温上昇が大きすぎる)。逆に、相関係数が負の場所・変数では、ホットモデルは負の将来変化を過大評価している(例えば降水量が減少しすぎる)。相関係数が有意ではない場所で

は、不確実性は低減できない。ホットモデルは、世界中のほとんどの場所で気温、年最高日最高気温、湿度の増加を過大評価しており（相関係数が正に有意）、我々のEC手法を用いれば上限を下げるができる。ほとんどの場所で分散を減らすことができ、特に熱帯域では分散を40%以上削減することができる。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では、これらの変数に関して熱帯域で分散が40%以上過大評価された入力データを用いて影響評価を行っていることになる。降水量は高緯度や熱帯域では正の相関（ホットモデルは降水量増加を過大評価）を、アマゾン域などでは負の相関（降水量減少を過大評価）を示し、相関係数が有意な場所では分散を削減することができる。年最大日降水量は、年平均降水量よりも広い範囲で正の相関を示す（ホットモデルは強い雨の強化を過大評価）ので、それらの地域では上限を引き下げ、分散を低減することができる。

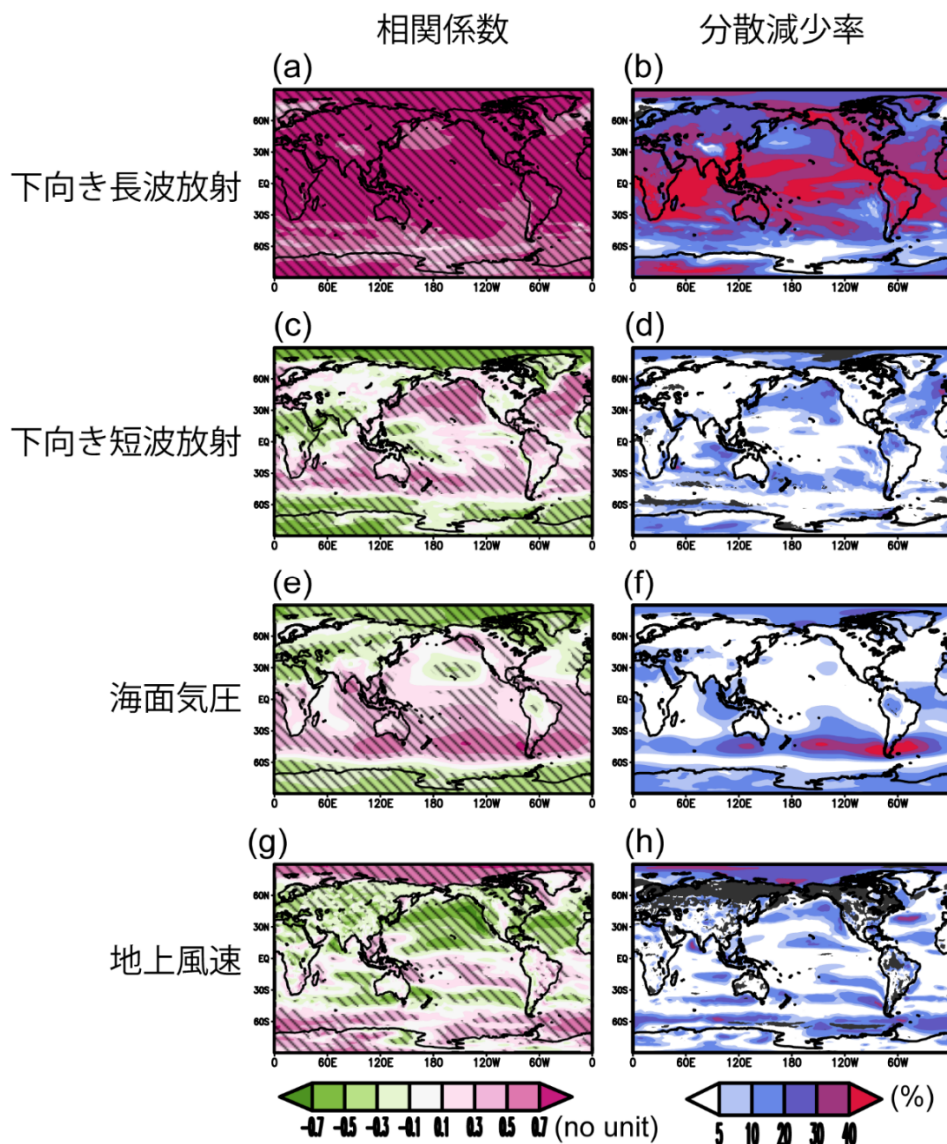


図4-3 図4-2と同様だが、それぞれ(a, b)地表面での下向き長波放射、(c, d)下向き短波放射、(e, f)海面気圧と(g, h)地上10m風速の将来変化に関するもの。

下向きの長波放射は気温に依存する変数なので、下向き長波放射の将来変化は大部分のグリッドで全球気温変化と良い正相関を持ち（ホットモデルは長波の増加を過大評価）、ECで分散を低減することができる（図4-3）。一方、下向き短波放射、海面気圧、地上風速の将来変化はお互いに関係しあって、複雑な相関係数のパターンを持つ。南半球では、温暖化時に偏西風ジェット気流とストームトラック（移動性高低気圧の通り道）が南向きにシフトし、例えばニュージーランドなど中緯度では風速弱化和短波放射増加をもたらすことが知られている。海面気圧変化が南極上で負、中緯度で正の相関係数を

持つが、これはホットモデルがジェット気流の南向きシフトを過大評価することを示唆する。そのためホットモデルでは、南半球中緯度で風速弱化和短波放射増加を過大評価する。一方、北極域では、海氷融解が進むことで海面気圧が低下し、海面からの蒸発で雲が増えて下向き短波放射が減り、海氷より海面の摩擦係数が低いことで風速が増加すると予測されているが、ホットモデルはこれらの将来変化予測も過大評価している。また北半球では気温の南北勾配が小さくなることで中緯度のストームトラックの活動度が下がって、地上風速が低下し、下向き短波放射が増えるが、ホットモデルでは過大評価されている。EC手法を用いることで、これらの予測のモデル間分散を低減することができる。

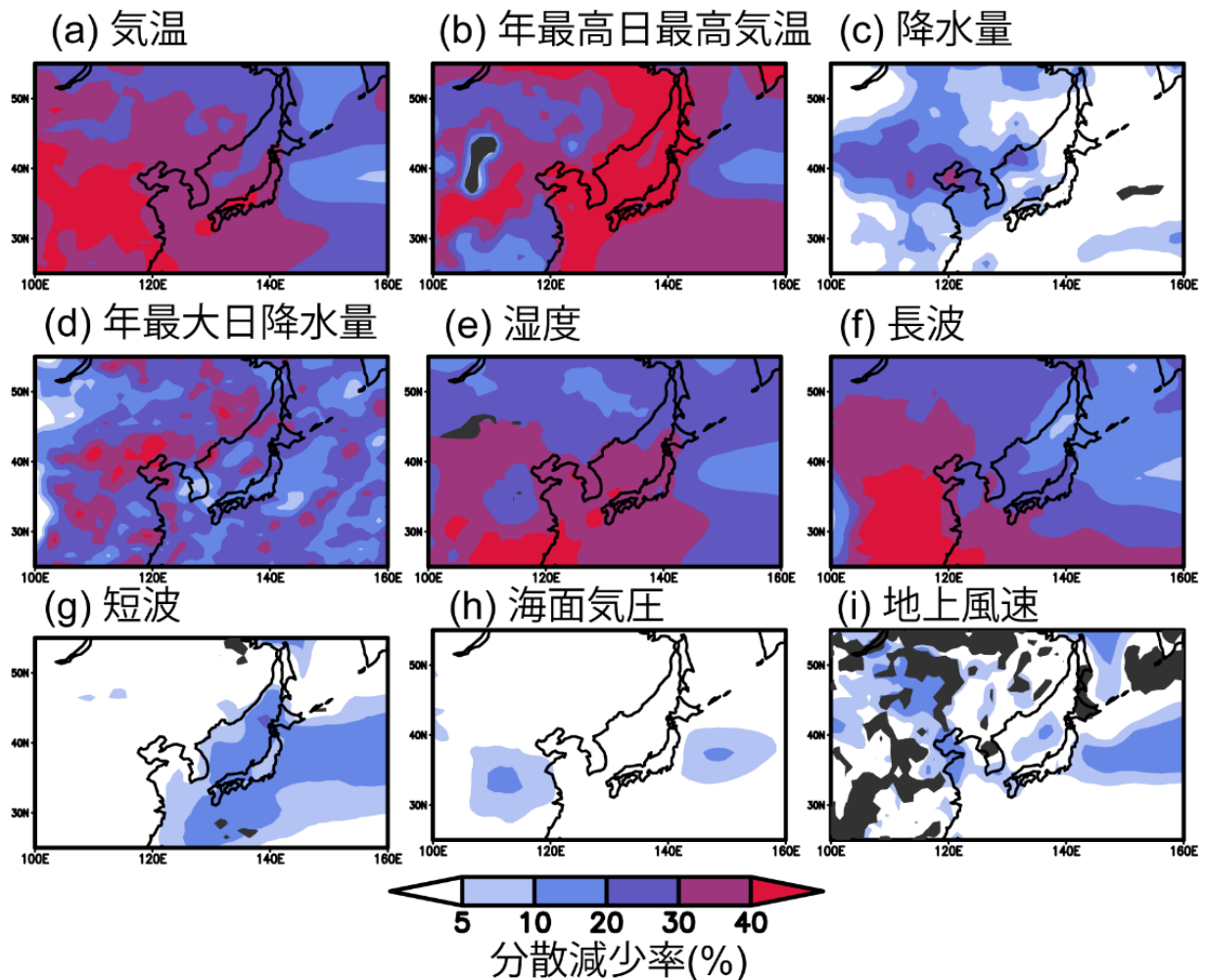


図4-4 図4-2と図4-3の分散減少率(%)を日本周辺で拡大したもの。

図4-4に日本周辺での分散減少率を示す。EC手法によって、日本の気温、年最高日最高気温、年最大日降水量、湿度、長波放射、短波放射の不確実性を減らすことができ、特に年最高日最高気温に関しては分散を40%以上低減することができる。また九州や東日本の太平洋沿岸では、地上風速の不確実性を5%ほどだが減らすことができる。つまり日本の影響評価で広く使われている気候シナリオNIES2020の作成時にホットモデルを除外するという判断をしたことで、これらの変数を入力データとして用いる影響評価研究で不確実性幅を過大評価するリスクを減らせたことになる。逆に言えば、もしホットモデルを含む気候シナリオを用いた場合は、これらの変数が重要な影響評価（例えば暑熱、洪水、再生可能エネルギー等）では影響の上限値と不確実性の幅を過大評価してしまう可能性があることが分かった。

以上の結果をまとめた論文(Shiogama et al. 2024, 成果番号43)は、SOLA誌に受理された。

II. 気候変動経済影響評価の不確実性低減（影響評価との連携研究）

影響評価分野でEC研究が進んでこなかった原因の一つは、計算資源の制約などから、世界で数十ある気候モデルの予測データを全て用いて影響評価を行うのが難しい事である。ISIMIP3bや推進費S-18のような従来の影響評価の研究プロジェクトでは、将来予測のばらつきを少数のモデルでカバーする方法を検討した上で5つ程度の気候モデルを選んで入力データとして用いてきた (Shiogama et al. 2021)。一方EC研究では、多くの気候モデルを統計的に分析することで不確実性を低減するが、5つ程度のデータ数では統計的な関係を議論することができない。この問題を克服するために、推進費2-2002「世界を対象としたネットゼロ排出達成のための気候緩和策及び持続可能な開発」と協力して、影響エミュレータという統計モデル(Takakura et al. 2021)を使って経済影響を評価した。この影響エミュレータは、気候モデルの気温と降水量の予測データだけを入力データとして、複雑な影響評価モデルによる経済影響評価(Takakura et al. 2019)を再現できるように機械学習を用いて構築されたものである。ここでは、農業生産性・飢餓・暑さによる死亡・冷暖房需要・労働生産性・水力発電・火力発電・河川洪水・海面上昇の9分野の影響を被害額へ換算したものを扱う。この影響エミュレータに、CMIP5とCMIP6の67の気候モデルの気温変化、降水量変化予測データ(RCP4.5/SSP2-4.5実験のデータ)を与えることで、67の気候モデルに対する9分野の経済影響を評価した。

図4-5の縦軸は、影響エミュレータによって求めた世界の気候変動経済影響（金銭換算した被害額が2080年から2099年のGDPの何%に相当するかを9分野で総計）、横軸は全球平均気温トレンドである。ここでは、67のCMIP5とCMIP6の気候モデルのRCP4.5/SSP2-4.5実験の出力データを利用した。横軸と縦軸の間には統計的に有意な正の相関があり、過去の気温トレンドの大きい気候モデルを入力データにした場合に将来の経済影響も大きくなる傾向があることがわかった。観測データと比べて過去の全球平均気温トレンドを過大評価しているモデルが複数あるが、それらのホットモデルは将来の全球平均気温変化や全球降水量変化(図4-1)だけでなく、将来の経済影響も過大評価しており、ECで上限を下げるができる。元々の不確実性幅は0.8%~2.9%だが、ECによって低減された不確実性幅は0.8%~2.5%になる。上限が2.9%から2.5%へと顕著に低下し、分散も31%削減することができた。

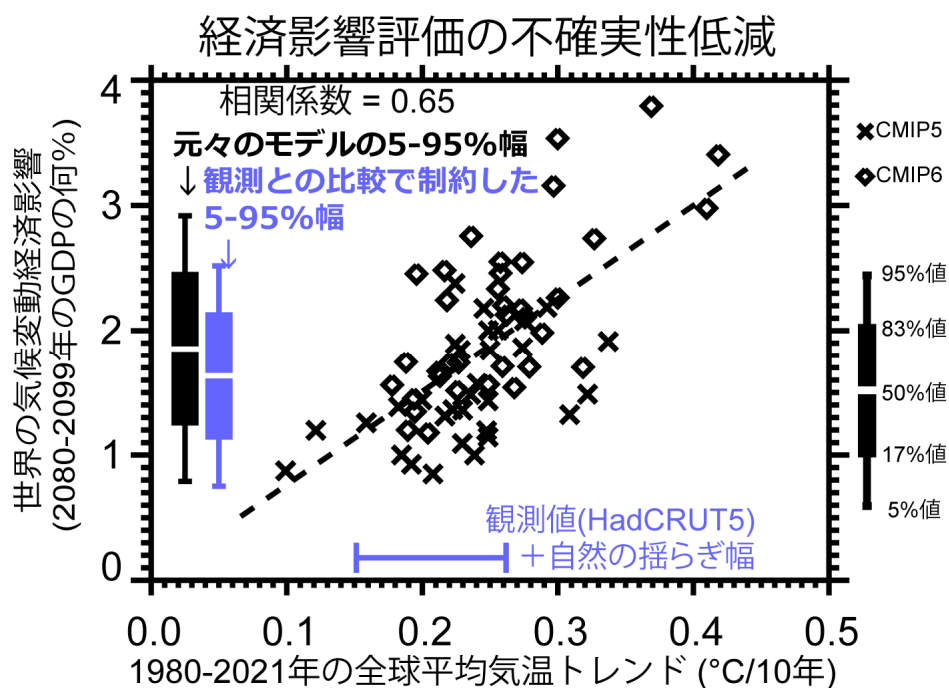


図4-5 世界の経済影響の不確実性低減。横軸は、各気候モデルでの1980年から2021年の全球平均気温トレンド(°C/10年)。縦軸は将来の気候変動による世界の経済影響(%)。×と◇は、それぞれCMIP5(31モデル)とCMIP6(36モデル)の気候モデル。黒い破線は回帰直線。青い横棒は、観測された(HadCRUT5データ)1980年から2021年の全球平均気温トレンドに自然の揺らぎによる不確実性幅(5-95%幅)を加えたもの。黒い箱ひげ図は元々の不確実性幅(右端の凡例参照)。青い箱ひげ図

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。

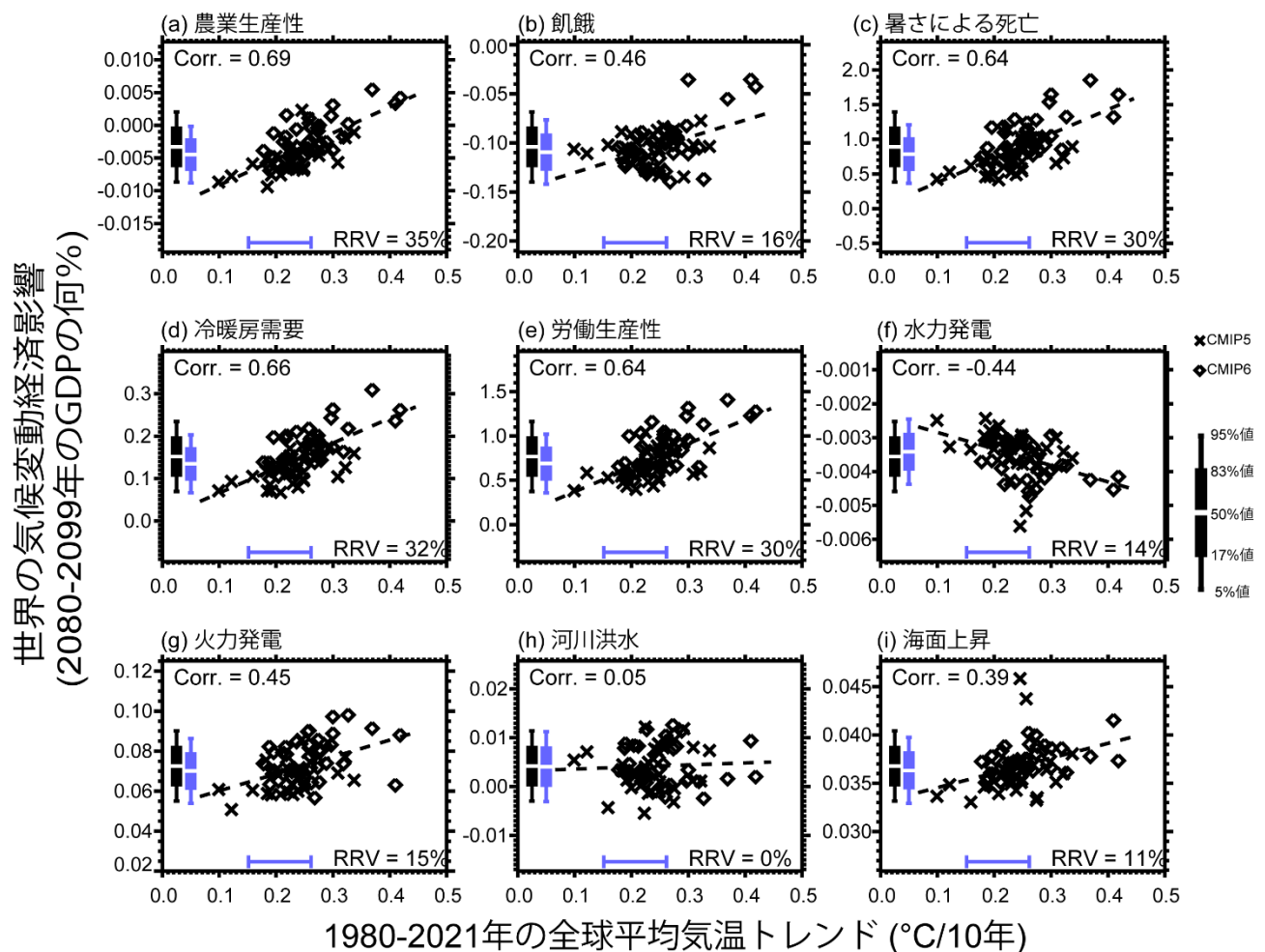


図4-6 分野ごとの世界の経済影響の不確実性低減。横軸は、各気候モデルでの1980年から2021年の全球平均気温トレンド(°C/10年)。縦軸は将来の気候変動による世界の(a) 農業生産性、(b) 飢餓、(c) 暑さによる死亡、(d) 冷暖房需要、(e) 労働生産性、(f) 水力発電、(g) 火力発電、(h) 河川洪水、(i) 海面上昇に関する経済影響(%)。×と◇は、それぞれCMIP5(31モデル)とCMIP6(36モデル)の気候モデル。黒い破線は回帰直線。青い横棒は、観測された(HadCRUT5データ)1980年から2021年の全球平均気温トレンドに自然の揺らぎによる不確実性幅(5-95%幅)を加えたもの。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。分散減少率(RRV, %)も示す。

図4-6に各分野の経済影響と過去の全球平均気温トレンドの関係を示す。「暑さによる死亡」、「冷暖房需要」、「労働生産性」の経済影響は、ほかの分野に比べて大きく、図4-5の経済影響も主にこれら3分野による寄与率が高い(図4-5c, d, e) (Takakura et al. 2019, 2021)。これら3分野はアンサンブル平均した影響は正(GDP減)である。相関係数は有意に正で、ホットモデルは影響を過大評価する。ECによって「暑さによる死亡」、「冷暖房需要」、「労働生産性」のそれぞれで上限は1.4%、0.23%、1.2%から1.2%、0.20%、1.0%に下がり、分散も30%、32%、30%減少する。

農業生産性、飢餓のアンサンブル平均値は負(GDP増)であるが、これはRCP-4.5/SSP2-4.5の中程度の温暖化では特定の穀物・地域によっては生産性が増加するためである(図4-5a, b) (Iizumi et al. 2017)。ただ相関係数は有意に正で、ホットモデルでは農業生産性影響は正(GDP減)になり(Müller et al. 2021)、飢餓の負値も小さくなる。ECによって、それぞれ上限値は、0.0020%、-0.068%から-0.0002%、-0.077%に下がり、分散は35%、16%減少する。

ホットモデルは年平均降水量の増加が大きい(図4-1b)ため水力発電の経済影響は負(GDP増)に大きくなる(Zhou et al. 2018b)が、ECによって負の経済影響の下限を-0.0046%から-0.0044%へ上げ、分散を14%減らせる(図4-6f)。火力発電は、気温上昇が大きいほど冷却用の河川水や外気の温度が上がって発電効率が悪くなるため正の経済影響(GDP減)が大きくなる(図4-6g)(Zhou et al. 2018a, c)。相関係数は正に有意で、ECで上限を0.090%から0.086%へ下げ、分散を15%減少させることができる。

河川降水は過去の気温トレンドと有意な相関がないため、ECで不確実性を低減できない(図4-6h)。海面上昇の相関係数は有意に正で、ECで上限を0.0404%から下げ0.0397%、分散を11%減少させることができる(図4-6i)。

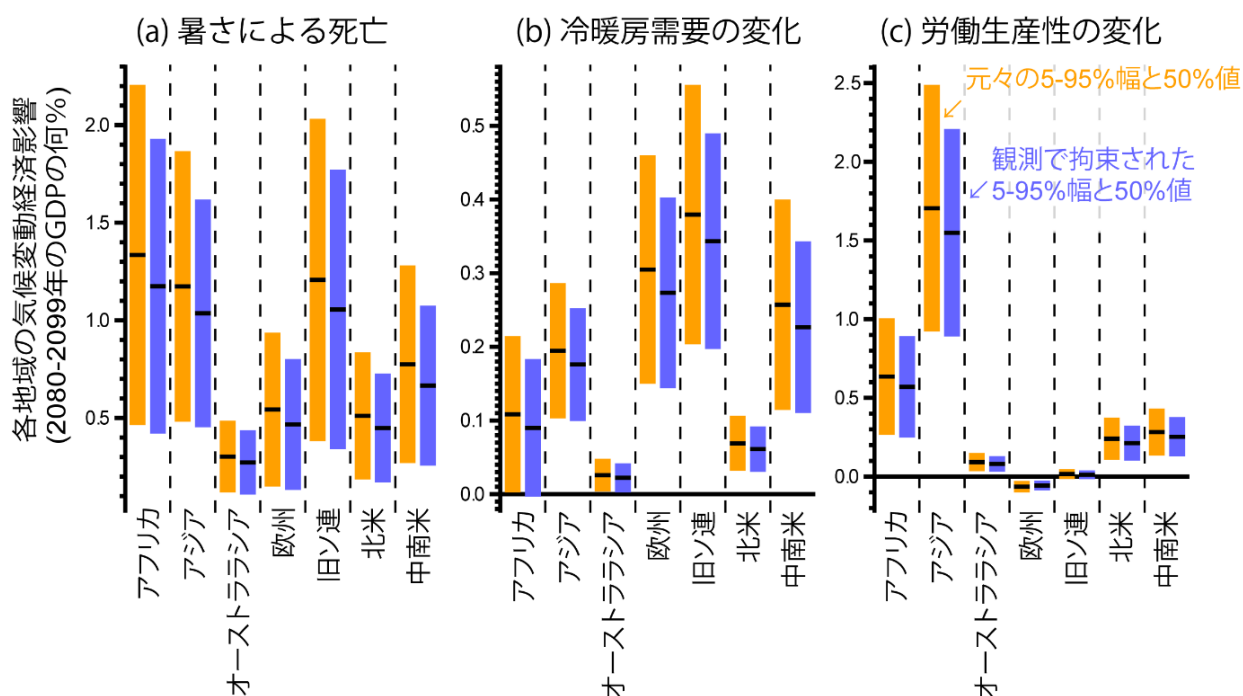


図4-7 各地域の暑さによる死亡、冷暖房需要、労働生産性の経済影響に関する不確実性低減。世界7地域における(a)暑さによる死亡、(b)冷暖房需要、(c)労働生産性の変化による経済影響(2080-2099年の各地域のGDPの何%に相当するか)。オレンジ色のボックスは元々の5-95%幅と50%値を、青いボックスは不確実性を低減したときの5-95%幅と50%値を表す。

図4-7に世界の7地域における「暑さによる死亡」、「冷暖房需要」、「労働生産性」の3分野の経済影響(各地域のGDPの何%に相当するか)を示す。暑さによる死亡の被害は、人口の多いアフリカとアジア、冷房設備の少ない旧ソ連圏などで大きい。また旧ソ連圏や欧州などの現在は冷房設備が不要な地域では、冷房設備を購入する費用が多く発生する。さらにアジアやアフリカでは、屋外労働者が暑熱関連疾患を避けるために必要な休憩時間が増加することで大きな経済損失が生じる。これらの3分野の影響評価には大きな不確実性があるが、ECによって多くの地域で不確実性幅の上限を下げられることが分かった。

まとめると、これまで多くの影響評価研究では、少数の気候モデルの実験結果だけを入力データとして用いて影響評価を行ってきたため、ECの研究を行うことができなかった。単独の影響評価分野では、数十の気候モデルデータを入力データとした研究も行われているが、不確実性を低減していない幅をそのまま示すことが多く、既に不確実性低減の研究が進んでいる気候変動予測の分野の知見とは整合しないという問題が生じている。本研究では、気候モデル実験データ、影響エミュレータ、EC手法を組み合わせることで、統合的な経済影響評価に関しても過去の気候観測データとの比較によって不確実性を低減できることを初めて示した。世界を対象地域とした影響評価研究プロジェクトISIMIP3bでは、ホットモデルの気候変化予測データも共通気候シナリオとして使用しており、このままではEC研究の成果も考

慮したIPCC-AR6-WG1の全球平均気温変化幅と整合しない影響評価結果の幅を示すこととなる。ISIMIP3bは、IPCC-AR7-WG2に主要な根拠を提供することが期待される研究プログラムであり、このままでは次のIPCC-AR7でWG1とWG2の間で大きな不整合を生じることになる。この問題を解決するためには、我々が本研究で開発した手法を応用して、ISIMIP3bの影響評価結果を元に影響エミュレータを再構築し、EC手法を組み合わせることで、影響評価の不確実性幅を低減することが有効である。

以上の結果をまとめた論文(Shiogama et al. 2022, 成果番号42)は、Environmental Research Letters誌に掲載された。

III. 日本近海で増える極端な高海面水温への地球温暖化の寄与の評価と将来予測

図4-8に観測データ(COBE-SST2)とホットモデルを除いた24のCMIP6モデルで平均した1982-2021年の海面水温変化を示す。気象庁が日本周辺の海面水温予報に用いる10の監視海域に着目する。CMIP6アンサンブルは過去40年間に観測された海面水温の上昇を全体としてよく再現しているが、北海道南東方(海域2)周辺では水温上昇を過大に表現するため、海域2を除く9の監視海域について解析する。

図4-9に「2021年までの観測史上最高水温」に達する高水温イベントが発生する確率年(何年に1度の確率で発生するか)の温暖化レベルごとの違いを示す。温暖化していない時(温暖化レベル=0℃)では、観測史上最高水温のイベントが発生する確率は小さいが、現在(温暖化レベル=1.1℃)では、過去の温暖化によって多くの監視海域と月で確率年が10年以下になっている。将来は、たとえパリ協定の2℃目標を達成できたとしても、全ての海域で確率年が2年以下になる月がある。これは、観測史上最高水準に2年に一度は達する、すなわち我々が2021年までに経験した異常高温の常態化を意味する。一方、温暖化レベルを1.5℃に抑えたと、確率年が2年を下回る可能性は多くの海域と季節で回避されることがわかる。したがって、日本近海で観測史上最高の海面水温が常態化することを防ぐには、パリ協定の1.5℃目標を達成する必要があることを示唆している。

以上の結果をまとめた論文(Hayashi et al. 2022, 成果番号40)は、Geophysical Research Letters誌に掲載された。

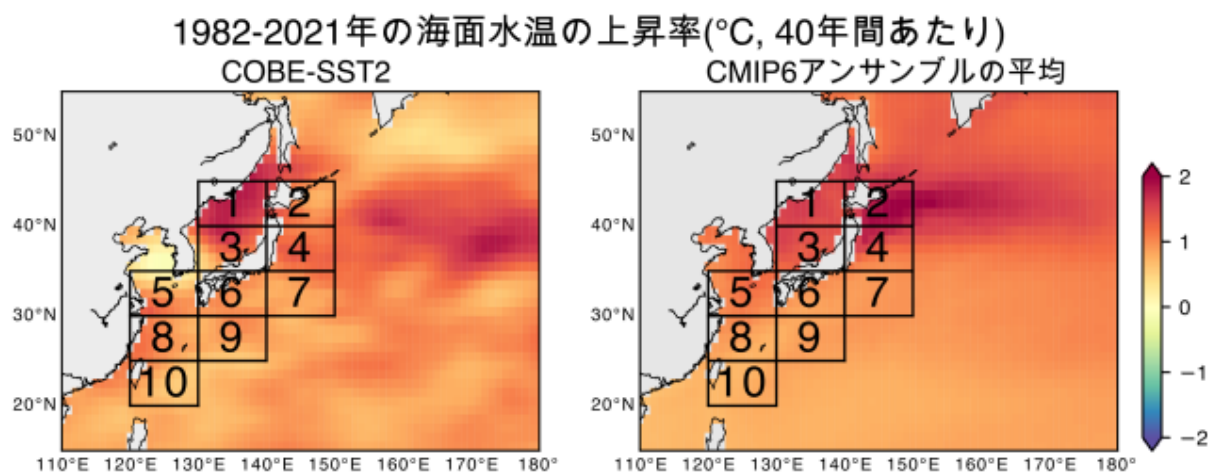


図4-8 気象庁が用いる10の監視海域と1982年から2021年にかけての年平均海面水温の変化。左はCOBE-SST2、右はCMIP6アンサンブルの平均。海面水温の40年間あたりの変化量、単位は℃。

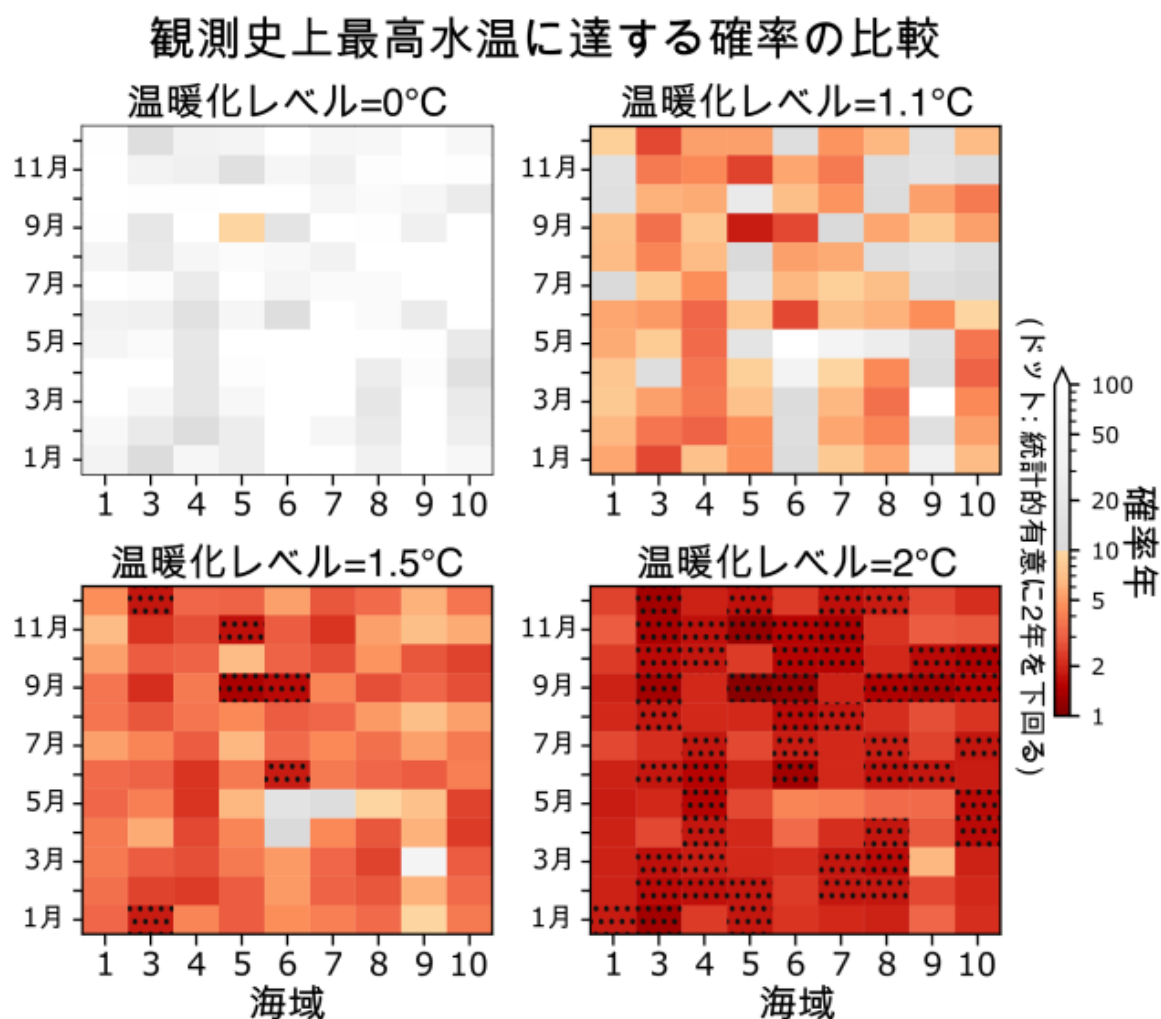


図4-9 観測史上最高水温に達する確率年（何年に1度の確率で発生するか）の温暖化レベルごとの違い。横軸は海域、縦軸は暦月。灰色は10年以上、暖色は10年以下の確率年を示す。確率年が統計的有意に2年以下となる値にドットを付ける。

IV. 影響評価・適応研究への情報提供

(II)の研究では、我々が開発してきたEC手法を初めて影響評価研究に応用して、ホットモデルが影響評価研究とIPCC-AR7-WG2にとって極めて重要な問題であることを指摘し、その解決策を提示した。また下記のようにサブテーマ1と共に、本課題で得られた成果を影響評価・適応研究者に情報提供した。

- 2022年10月17日：推進費S-18の気候シナリオ・社会経済シナリオワーキンググループ合同会合において、S-18後期の共通気候シナリオと共通社会経済シナリオに関する情報提供を行った。（サブテーマ4の石崎、高橋、塩竈）
- 2023年1月13日：推進費S-18勉強会で本課題と前課題（推進費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」）の紹介を行い、今後の連携に関して議論を行った。その中で、前課題で我々が選択したS-18共通気候シナリオNIES2020では、ホットモデル問題の影響が小さい事を説明した。（課題代表兼サブ1代表の高薮、サブ4代表の塩竈）
- 2023年2月8日：推進費S-18の三村代表とS-18後期の共通気候シナリオと共通社会経済シナリオに関する意見交換を行った。（サブテーマ4の塩竈、石崎、高橋）
- 2023年11月28日：NIES2020（日本）とISIMIP3bの共通気候シナリオ（世界）を影響評価に用いる国立環境研究所気候変動適応プログラムのセミナーで、ホットモデル問題に関する情報を提供した。（サブテーマ4の塩竈）
- ISIMIP3bにおける影響エミュレータ研究の中心人物であるFranziska Piontek（ポツダム気候影響研究所）に(II)の研究論文を送り、IPCC-AR7-WG2に向けて影響評価研究におけるホットモデル問題を解決するために影響エミュレータとEC手法を組み合わせたアプローチが必要であることを伝

え、関心を持ってもらった。また欧州地球科学連合2023年定期大会でPiontek氏らが主催したエミュレータに関する専門分科会にサブ4の塩竈が参加して発表したほか、ISIMIPの会合でも情報提供を行ってきた。

- CMIP5、CMIP6の気候モデル予測データと並んで、日本で開発された気候予測データセットd4PDFは影響評価研究や適応策検討のために幅広く使われている。例えば、国土交通省の治水計画検討にはd4PDFが利用されている。現在、文部科学省の気候変動予測先端研究プログラムにおいてd4PDFの後継データセットが作成されているが、サブテーマ4の塩竈がその実験設計を決めるグループに参加し、サブ4の林とともに本課題で得られた知見（影響評価におけるホットモデル問題の重要性や海面水温の記録更新確率の変化等）を提供し、S-18等で使われている共通気候シナリオNIES2020と整合性のある実験設計になるように意見してきた。

5. サブテーマ4 研究目標の達成状況

以下に示すように、サブテーマ4は研究目標を全て達成した上、当初の目標にはなかった成果もあげた。

目標：日本やアジア太平洋域における影響評価研究の入力データとなる様々な気候変数や重要な極端現象指数などの予測不確実性に対して、全球平均気温などの全球スケール現象の予測不確実性低減の効果がどのように波及するのかを調査する。その上で、影響評価研究で利用される共通気候シナリオの信頼性を評価

→サブテーマ4では、(I)の研究において、影響評価モデルの入力データとして利用される様々な気象変数・極端現象指標の予測不確実性に対して、全球平均気温の不確実性低減がどのように波及するかを調査し、ホットモデルを含むISIMIP3bの共通気候シナリオは不確実性を過大評価していること、ホットモデルを除いた日本の共通気候シナリオNIES2020ではそのような問題は少ない事を示し、目標を達成した。

目標：サブ1と協力して気候変動に伴う極端現象の不確実性低減情報のまとめと影響評価・適応研究への情報提供を行う

→国内外の大規模な影響評価研究プロジェクト（推進費S-18、国立環境研究所気候変動適応プログラム、ISIMIP3b）に情報を提供してきた。また文部科学省・気候変動予測先端研究プログラムで開発中の次世代気候変動予測データセットの実験設計に際して、本課題で得られた知見を提供し、さらに前課題の成果である共通気候シナリオNIES2020と整合性のある実験デザインになるよう意見を述べてきた。そのため目標は達成したと考える。

目標：国際誌に3報以上の学術論文として発表し、国民との対話の機会を毎年もつ

→国際誌に4報の学術論文を発表し、国民との対話の機会を毎年持っており、目標を達成した。

また事前の計画には含まれなかったが、(II)の研究において、気候変動予測の分野で開発された最新の不確実性低減手法を経済影響評価の分野に世界で初めて応用し、IPCC-AR7に向けて気候変動の予測と影響評価の分野をまたいだ総合的な知見を得るために必要な道筋を示した。さらに(III)の研究において、日本近海で観測史上最高の極端な海面水温イベントが発生する可能性が過去の温暖化で増加しており、そのような極端な海面水温イベントが常態化（2年に一度以上発生）することを防ぐには、パリ協定の1.5℃目標達成が鍵であることを示した。

<引用文献>

- Hall, A., Cox, P., Huntingford, C. et al. (2019) Progressing emergent constraints on future climate change. *Nat. Clim. Chang.* **9**, 269-278. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0436-6>
- Hausfather, Z., K. Marvel, G. A. Schmidt, J. W. Nielsen-Gammon & M. Zelinka (2022) Climate simulations: recognize the ‘hot model’ problem. *Nature*, **605**, 26-29. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01192-2>

- Hayashi, M., Shiogama, H., Emori, S., Ogura, T., & Hirota, N. (2021) The northwestern Pacific warming record in August 2020 occurred under anthropogenic forcing. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL090956. <https://doi.org/10.1029/2020GL090956>
- Hayashi, M., Shiogama, H., & Ogura, T. (2022) The contribution of climate change to increasing extreme ocean warming around Japan. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL100785. <https://doi.org/10.1029/2022GL100785>
- Iizumi, T., Furuya, J., Shen, Z. et al. (2017) Responses of crop yield growth to global temperature and socioeconomic changes, *Sci. Rep.*, **7**, 7800, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08214-4>
- Ishizaki, N. N., Shiogama, H., Hanasaki, N., Takahashi, K. (2022) Development of CMIP6-based climate scenarios for Japan using statistical method and their applicability to heat-related impact studies. *Earth and Space Science*, **9**, e2022EA002451, <https://doi.org/10.1029/2022EA002451>
- Knutti, R. (2010) The end of model democracy? *Climatic Change*, **102**, 395-404, <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9800-2>
- Müller, C., J. Franke, J. Jägermeyr, et al. (2021) Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environ. Res. Lett.* **16** 034040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd8fc>
- Shiogama, H., Emori, S., Hanasaki, N. et al. (2011) Observational constraints indicate risk of drying in the Amazon basin. *Nature Communications*, **2**, Article number 253. <https://doi.org/10.1038/ncomms1252>
- Shiogama, H., M. Hayashi, N. Hirota, T. Ogura (2024) Emergent constraints on future changes in several climate variables and extreme indices from global to regional scales. *SOLA*, in press.
- Shiogama H., N. N. Ishizaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, S. Emori, R. Ito, T. Nakaegawa, I. Takayabu, Y. Hijioka, Y. N. Takayabu, R. Shibuya (2021) Selecting CMIP6-based future climate scenarios for impact and adaptation studies. *SOLA*, **17**, 57-62, <https://doi.org/10.2151/sola.2021-009>
- Shiogama H., J. Takakura, K. Takahashi (2022a) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator. *Environmental Research Letters*, **17**, 124028, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aca68d>
- Shiogama, H., Watanabe, M., Kim, H., Hirota, N. (2022b) Emergent constraints on future precipitation changes. *Nature*, **602**, 612-616, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04310-8>
- Takakura J., Fujimori S., Hanasaki N., Hasegawa T., Hirabayashi Y., Honda Y., Iizumi T., Kumano N., Park C., Shen Z., Takahashi K., Tamura M., Tanoue M., Tsuchida K., Yokoki H., Zhou Q., Oki T., and Hijioka Y. (2019) Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways, *Nature Climate Change*, **9**, 737-741, <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0578-6>
- Takakura, J., Fujimori, S., Takahashi, K., Hanasaki, N., Hasegawa, T., Hirabayashi, Y., Honda, Y., Iizumi, T., Park, C., Tamura, M., and Hijioka, Y. (2021) Reproducing complex simulations of economic impacts of climate change with lower-cost emulators, *Geosci. Model Dev.*, **14**, 3121-3140, <https://doi.org/10.5194/gmd-14-3121-2021>
- Tokarska K. B., M. B. Stolpe, S. Sippe, E. M. Fischer, C. J. Smith, F. Lehner, and R. Knutti (2020) Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Science Advances*, **6**, eaaz9549, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9549>
- Zhou, Q., N. Hanasaki, S. Fujimori (2018a) Economic Consequences of Cooling Water

- Insufficiency in the Thermal Power Sector under Climate Change Scenarios, *Energies*, **11**, 2686, <https://doi.org/10.3390/en11102686>
- Zhou, Q., Hanasaki, N., Fujimori, S., Masaki, Y., Hijioka, Y. (2018b) Economic consequences of global climate change and mitigation on future hydropower generation, *Climatic Change*, **147**, 77-90, <https://doi.org/10.1007/s10584-017-2131-9>
- Zhou, Q., N. Hanasaki, S. Fujimori, S. Yoshikawa, S. Kanae, T. Okadera (2018c) Cooling Water Sufficiency in a Warming World: Projection Using an Integrated Assessment Model and a Global Hydrological Model, *Water*, **10**, 872, <https://doi.org/10.3390/w10070872>

Ⅲ．研究成果の発表状況の詳細

※この項目の成果番号は通し番号です。

(1) 成果の件数

成果の種別	件数
査読付き論文：	4 3
査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）：	0
その他誌上発表（査読なし）：	1 0
口頭発表（国際学会等・査読付き）：	0
口頭発表（学会等・査読なし）：	1 6 1
知的財産権：	0
「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
その他の成果発表：	0

(2) 誌上発表

<査読付き論文>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文
1	T. Yoshikane and K. Yoshimura: PLOS water. 2022, 1(5), doi:10.1371/journal.pwat.0000016. (2022) A bias correction method for precipitation through recognizing mesoscale precipitation systems corresponding to weather conditions.
2	P. MARTINEAU, H. NAKAMURA, A. YAMAMOTO and Y. KOSAKA: Geophys. Res. Lett., 49, 15, e2022GL097791 (2022) Baroclinic blocking.
3	新田友子, 荒川隆, 鳩野美佐子, 竹島滉, 山崎大, 芳村圭. 統合陸域シミュレータと気候モデルMIROCの連成シミュレーション. 計算工学講演会論文集. 2022, 27, A-12-01.
4	芳村圭, 新田友子. 次世代地球システムモデルに向けた統合陸域シミュレータの開発 ～土壌物理プロセスに着目して～. 土壌の物理性. 2022.

5	A. MANDA, S. IIZUKA, H. NAKAMURA and T. MIYASAKA: Front. Clim., 4, doi:10.3389/fclim.2022.967154 (2022) Assessing the impact of the recent warming in the East China Sea on a torrential rain event in northern Kyushu (Japan) in early July 2017.
6	G. Yin, T. Yoshikane, K. Yoshimura, K. Yamamoto and T. Kubota: J. Hydrol. 2022, 612, 128125, doi:10.1016/j.jhydrol.2022.128125(2022) A support vector machine-based method for improving real-time hourly precipitation forecast in Japan..
7	Y. NAKAMURA and Y. N. TAKAYABU: J. Atmos. Sci., 79.11.2919-2933, doi:10.1175/JAS-D-22-0003.1 (2022) Convective couplings with equatorial Rossby waves and equatorial Kelvin 1 waves. Part II: Coupled precipitation characteristics.
8	伏尾佳悟, 六藤雄一, 福田哲也, 塚田洋平, 新田友子, 吉兼隆生, 山崎大, 芳村圭, 丸吉政博, 統合陸域シミュレータ (ILS) と統合評価モデル (IAM) の連成シミュレーションによる水ストレス評価 生産研究 75(2) 135-140 2023年
9	S. SEKIZAWA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: J. Climate, 36, 3, 983-1000 (2023) Interannual variability of the Australian summer monsoon sustained through internal processes: Wind-evaporation feedback, dynamical air-sea interaction, and soil moisture memory.
10	A. SEIKI, Y. KOSAKA and S. YOKOI: J. Meteor. Soc. Japan, 101, 2, 103-123 (2023) Development of Synoptic-Scale Disturbances over the Tropical Western North Pacific Associated with the Boreal Summer Intraseasonal Oscillation and the Interannual Pacific-Japan Pattern.
11	T. Yoshikane and K. Yoshimura: Sci. Rep. 13, 9412, https://doi.org/10.1038/s41598-023-36489-3 (2023) A downscaling and bias correction method for climate model ensemble simulations of local-scale hourly precipitation.
12	M. NAKAYAMA, H. NAKAMURA and F. OGAWA: J. Climate, 36, 4219-4234 (2023) Modulations of storm-track activity associated with the baroclinic annular mode.
13	H-N. CHEUNG, N.-E. OMRANI, F. OGAWA, N. KEENLYSIDE, H. NAKAMURA and W. ZHOU: npj. Clim. Atmos. Sci., 6, 61, (2023) Pacific oceanic front amplifies the impact of Atlantic oceanic front on North Atlantic blocking.
14	H. TSUJI, Y. N. TAKAYABU and E. TOCHIMOTO: J. Climate, doi: 10.1175/JCLI-D-22-0197.1 (2023) Quantification of precipitation and latent heating associated with Northern Hemisphere winter extratropical cyclones using the GPM KuPR.
15	H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, vol.101, 271-287, doi: 10.2151/jmsj.2023-017 (2023) A hierarchical structure of the heavy rainfall event over Kyushu in July 2020.
16	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: J. Climate, 36, 4793-4814 (2023) Distinct roles of cyclones and anticyclones in setting the midwinter minimum of the North Pacific eddy activity: a Lagrangian perspective.
17	P. MARTINEAU, S. K. BEHERA, M. NONAKA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: Geophys. Res. Lett., 50, e2022GL101983 (2023) Tropical Pacific influence on summertime South African high-frequency temperature variability and heat waves.
18	G. Yin, T. Yoshikane, R. Kaneko and K. Yoshimura: JGR-Atmos, https://doi.org/10.1029/2023JD038929 , (2023) Improving global subseasonal to seasonal precipitation forecasts using a support vector machine-based method.
19	Y. Nakamura and Y. N. Takayabu: Geophysical Research Letters, 50, doi:2023GL105160 (2023) Convective couplings with equatorial Rossby waves and equatorial Kelvin waves: 3. Variations of clouds and their radiative effects.
20	A. MIYAMOYO, H. NAKAMURA, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: J. Climate, 36, 8443-8459, (2023) Radiative impacts of Californian marine low clouds on North Pacific climate in a global climate model.
21	A. Narita and Y. N. Takayabu: SOLA, Vol. 20, 16-22, doi:10.2151/sola.2024-003 (2024) The environment and precipitation characteristics of widespread extreme rainfall events during the Akisame season.
22	P. MARTINEAU, S. K. BEHERA, M. NONAKA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: Wea. Clim. Dyn., 5, 1-15 (2024) Seasonally dependent rise in subweekly temperature variability over

	Southern Hemisphere landmasses detected in multiple reanalyses.
23	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: Geophys. Res. Lett., 51, e2023GL106932, (2024). Anticyclonic suppression of the North Pacific transient eddy activity in midwinter.
24	P. ZHANG, S.-P. XIE, Y. KOSAKA and N. J. LUTSKO: J. Climate, 37, 199-212 (2024) Non-ENSO precursors for Northwestern Pacific summer monsoon variability with implications for predictability.
25	M. MORI, Y. KOSAKA, B. TAGUCHI, H. TOKINAGA, H. TATEBE and H. NAKAMURA: Communications Earth & Environment, 5 (2024) Northern Hemisphere winter atmospheric teleconnections are intensified by extratropical ocean-atmosphere coupling, in press.
26	K. TAKEMURA, H. SATO, A. ITO, T. UMEDA, S. MAEDA, M. HIRAI, Y. TAMAKI, H. MURAI, H. NAKAMIGAWA, Y. N. TAKAYABU, H. UEDA, R. KAWAMURA, Y. TANIMOTO, H. NAOE, M. NONAKA, T. HIROOKA, H. MUKOUGAWA, M. WATANABE and H. NAKAMURA: SOLA, 20 (2024) Preliminary diagnosis of primary factors for an unprecedented heatwave over Japan in 2023 summer, in press.
27	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and T. SPENGLER: Geophys. Res. Lett., 51, e2023GL106187 (2024). Midlatitude oceanic fronts strengthen the hydrological cycle between cyclones and anticyclones, in press.

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文
28	T. HORINOCHI, Y. KAWATANI and N. SATO: Clim. Dyn, 323, 1-16, doi:10.1007/s00382-022-06418-7 (2022) Inter-model variability of the CMIP5 future projection of Baiu, Meiyu, and Changma precipitation.
29	N. SATO, T. HORINOCHI and Y. KAWATANI: SOLA, 19, doi: 10.2151/sola.2023-011 (2023) Bimodal distribution of precipitation found in the multimodel climate prediction over central Japan in winter.
30	H. FUJIWARA, H. OKOCHI, M. KAMOGAWA, T. SUZUKI, S. HAYASHI, N. SATO, Y. ORIHARA, J. MATSUMOTO, J.-I. HAMADA, K. MURATA, E. YOSHIKAWA and T. KUDO: J. Atmos. Electr., 42, 1-14 (2023) Characteristics of hailfall and lightning in a splitting thunderstorm observed on May 4, 2019 in the Tokyo Metropolitan Area, Japan.
31	Y. KAWATANI, H. NAKAMURA, S. WATANABE and K. SATO: Geophys. Res. Lett., 51, e2024GL108262 (2024). Effects of mid-latitude oceanic fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves, in press.

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文
32	H. G. TAKAHASHI, S. SUGIMOTO and T. SATO: Climate Dynamics (2022) Impact of spring land-surface conditions over and around the Tibetan Plateau on the early summer Asian monsoon circulation using AGCM large-ensemble experiments.
33	R. ITO, H. KAWASE and Y. IMADA: J. Appl. Meteor. Climatol., 61, 1573-1587, doi:10.1175/JAMC-D-22-0062.1. (2022) Regional differences in summertime extremely high temperature in Japan due to global warming.
34	T. NAKAEGAWA and K. MURAZAKI: Int. J. of Climatology, 42, 8950-8970, https://doi.org/10.1002/joc.7784 (2022) Historical trends in climate indices relevant to surface air temperature and precipitation in Japan for recent 120 years.
35	N. N. ISHIZAKI, H. SHIOGAMA, N. HANASAKI, K. TAKAHASHI AND T. NAKAEGAWA: Int. J. of Climatology, 43, 1179-1192, doi: 10.1002/joc.7903 (2023) Evaluation of the spatial characteristics of climate scenarios based on statistical and dynamical downscaling for impact assessments in Japan.

36	Y. TAKAYA, H. REN, F. VITART, A. ROBERTSON: MAUSAM, 74, 455–466, doi:10.54302/mausam.v74i2.5925 (2023) Current status and progress in the seasonal prediction of the Asian summer monsoon
37	Y. TAKAYA, K. K. KOMATSU, N. G. GANESHI, T. TOYODA, H. HASUMI: Clim. Dyn. accepted (2024) A sub-monthly timescale causality between snow cover and surface air temperature in the Northern Hemisphere inferred by Liang-Kleeman information flow analysis.
38	T. OSE, H. ENDO, and T. NAKAEGAWA: J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II, (2024) Emergence of Future Sea-Level Pressure Patterns in Recent Summertime East Asia.
39	H. ENDO: J. Meteor. Soc. Japan, 101, 309–322. doi:10.2151/jmsj.2023-019. (2023) Long-term precipitation changes in the Baiu and Akisame seasons in Japan over the past 120 years (1901-2020).

成果 番号	【サブテーマ4】の査読付き論文
40	M. HAYASHI, H. SHIOGAMA and T. OGURA: Geophys. Res. Lett., 49, e2022GL100785 (2022) The Contribution of Climate Change to Increasing Extreme Ocean Warming around Japan.
41	N. ISHIZAKI, H. SHIOGAMA, N. HANASAKI and K. TAKAHASHI: Earth Space Sci., 9, e2022EA002451 (2022) Development of CMIP6-based climate scenarios for Japan using statistical method and their applicability to heat-related impact studies.
42	H. SHIOGAMA, J. TAKAKURA and K. TAKAHASHI: Environ. Res. Lett., 17, 124028, doi: 10.1088/1748-9326/aca68d (2022) Uncertainty constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator.
43	H. SHIOGAMA, M. HAYASHI, N. HIROTA, T. OGURA: SOLA, in press (2024) Emergent constraints on future changes in several climate variables and extreme indices from global to regional scales.

<査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）>

成果 番号	【サブテーマ1】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】の査読付き論文に準ずる成果発表（人文・社会科学分野）
	特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】のその他誌上発表（査読なし）
44	岡島悟：天気、69、489-492（2022）3次元格子データのmaterialization—3Dプリンタによる”物質化” —
45	中村尚：GIS NEXT、81、12-15（2022）異常気象をいかに捉えるか
46	中村尚：大学の物理教育（日本物理学会）、28（3）、125-128（2022）気象学・気候科学と物理学
47	小坂優：Japan Geoscience Letters, 18, 4, 1-3（2022）テレコネクションが形作る大規模な気候の共変動
48	E.-P. LIM, H. HENDON, A. BUTLER, D. J. THOMPSON, Z. LAWRENCE, A. SCAIFE, T. SHEPHERD, I. POLICHTCHOUK, C. KOBAYASHI, R. COMER, L. COY, A. DOWDY, R. GARREAU, P. NEWMAN, H. NAKAMURA, G. WANG: Bull. Amer. Meteor. Soc., 103 (1), 29-33 (2023) Stratospheric warning: Seasonal forecasts told of a sudden event over Antarctica, and impacts in Australia.
49	関澤偲温：天気（日本気象学会）、70(2)、82-85（2023）やさしい解説—気象学動静—「2022年1月のトンガ火山噴火に伴う気象津波」
50	岡島悟：天気（日本気象学会）、70(7)、291-300（2023）擾乱のオイラー統計量における高低気圧性渦の寄与の分離 —2022年度山本賞受賞記念講演—
51	中山盛雄、中村尚：天気（日本気象学会）、70(8)、367-369（2023）傾圧環状モード（Baroclinic Annular Mode）
52	中村 尚：近年の異常気象の実態と顕在化する地球温暖化の関わり，地域防災，52，12-15，2023.
53	岡島悟：月刊海洋（海洋出版），2024年1月号，26-32（2024）移動性擾乱活動に対する多角的で「ハイブリッド」な視点

成果 番号	【サブテーマ2】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】のその他誌上発表（査読なし）
	特に記載すべき事項はない。

(3) 口頭発表

<口頭発表（国際学会等・査読付き）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】の口頭発表（国際学会等・査読付き）
	特に記載すべき事項はない。

<口頭発表（学会等・査読なし）>

成果 番号	【サブテーマ1】の口頭発表（学会等・査読なし）
54	中村雄飛、高薮縁、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）赤道Rossby波・Kelvin波に結合する降水・雲の統計解析
55	辻宏樹、高薮縁、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）GPM搭載レーダ観測データをを用いた2021年8月に九州で大雨をもたらした降水システムの解析
56	釜堀弘隆、高薮縁、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）日本域における台風降水量の変動
57	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）5月18日、北太平洋の移動性擾乱活動の「真冬の振幅低下」に対する擾乱の構造と背景場の役割
58	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）北太平洋の移動性擾乱活動の「真冬の振幅低下」に対する擾乱の構造と背景場の役割
59	中村尚、日本気象学会2022年度春季大会シンポジウム「線状降水帯に関する研究の最前線と今後の展望」、東京、招待講演（2022）5月19日、線状降水帯や豪雨に関わる大規模環境場と温暖化の影響
60	中村尚、日本地球惑星科学連合2022年大会（パブリックセッション）、千葉（2022）5月22日、真鍋淑郎先生ノーベル賞記念講演および気候モデリングの発展 — Nobel Prize Lecture —
61	小坂優、Japan Geoscience Union Meeting 2022、ランチタイムレクチャー、千葉、招待講演（2022）5月25日、地球温暖化の加速と減速の要因分析
62	関澤惲温、神山翼、日本地球惑星科学連合2022年大会、幕張&オンライン（2022）5月、2022年トンガ火山噴火に伴う気象津波の1次元浅水波モデルによる考察
63	S. SEKIZAWA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: Japan Geoscience Union meeting 2022, Chiba, 2022/5, Self-sustaining mechanisms for the interannual variability of the Australian summer monsoon
64	Y. KOSAKA and S.-P. XIE: Japan Geoscience Union Meeting 2022, 千葉, 2022/5/25, The rapid global surface warming since the 2010s and the role of tropical Pacific decadal variability

65	A. MIYAMOTO, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: Japan Geoscience Union Meeting, 千葉, 2022/5/26, Decadal cooling trend of the East China Sea in the early 21st century
66	K. NISHII, H. NAKAMURA and A. MANDA: Japan Geoscience Union meeting 2022, Chiba and online, 2022/5/26, Impacts of high-resolution sea surface temperature on atmospheric reanalysis; an example over the Sea of Japan in winter
67	S. SEKIZAWA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: Japan Geoscience Union meeting 2022, Chiba and online, 2022/5, poster, Remote influence of the interannual variability of the Australian summer monsoon on wintertime climate in East Asia and the western North Pacific
68	H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: The EGU General Assembly 2022, 2022, A case study of heavy rainfall event in July 2020 over western Japan focusing on free-tropospheric moisture
69	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: Stormtracks2022: Midlatitude storm-tracks workshop, Orlean, France, 2022/5/30, A new look at atmospheric energetics: cyclonic and anticyclonic contributions and their interactions with the jet stream
70	新田友子, 荒川隆, 鳩野美佐子, 竹島滉, 山崎大, 芳村圭: 第27回計算工学講演会 (2022) 統合陸域シミュレータと気候モデルMIROCの連成シミュレーション.
71	H. NAKAMURA: Stormtracks2022: Midlatitude storm-tracks workshop, Orlean, France, 2022/5/30, An energetic perspective on the midwinter minimum of the North Pacific storm track activity
72	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、ArCS II 第3回全体会合 (2022) 6月9日、高低気圧性渦の振舞い及びジェット気流との相互作用の診断・評価手法の開発
73	中村尚、日本混相流学会 混相流レクチャーシリーズ47 「医療・環境分野における混相流研究の最前線」、オンライン、招待講演 (2022) 6月15日、地球温暖化と異常気象：メカニズムと予測
74	Y. N. TAKAYABU: Workshop on Atmospheric Satellites for Asian Monsoon cloud-precipitation Science and Applications (WASAMSA), online, invited, 2022, Atmospheric Rivers associated rainfall characteristics: Implications on Heavy Rainfall Events based on GPM/TRMM
75	H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: AOGS 19th Annual Meeting, online, 2022, Analysis of a precipitation system causing heavy rainfall over Kyushu in August 2021 using GPM KuPR observation data
76	H. TSUJI, Y. N. TAKAYABU and E. TOCHIMOTO: AOGS 19th Annual Meeting, online, 2022, Quantification of precipitation and latent heating associated with extratropical cyclones using GPM KuPR: Significance of latent heating on explosive development
77	Y. N. TAKAYABU and H. TONE: AOGS 19th Annual Meeting, online, invited, 2022, Precipitation Characteristics and Environments of Extreme Precipitation Events Extracted from the GPM/DPR Measurements
78	芳村圭: 海の生きもの地球ミュージアム2022 (2022) 変動する気候、極端気象にどう適応するか.
79	岡島悟、中村尚、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」、岩手、(2022) 8月、中緯度海洋前線帯が大気に与える影響における高低気圧性渦の寄与
80	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、第4回高低気圧ワークショップ (2022) 8月30日、北太平洋冬季の移動性高低気圧頻度の季節性 ～「真冬の振幅低下」との関連～
81	岡島悟、中村尚、新学術領域研究科研費「Hotspot2」夏季若手研究者セミナー、三重、(2022) 9月、移動性高低気圧の活動と中緯度大気海洋相互作用
82	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、中緯度大気海洋相互作用の観測・解析に関する研究集会、三重、(2022) 9月、北太平洋冬季の移動性高低気圧頻度の季節性
83	H. NAKAMURA: Bjerknes Seminar, Bergen, Norway, invited, 2022/10/5, On the significance of the baroclinic nature of the NAO and maritime blocking

84	S. SEKIZAWA: BALMCAST kick-off Meeting Bias Attribution Linking Moist Dynamics of Cyclones and Storm Tracks, Bergen, Norway, 2022/10/5, Remote influence of the interannual variability of the Australian summer monsoon on wintertime climate in East Asia and the western North Pacific
85	M. NAKAYAMA: BALMCAST kick-off Meeting Bias Attribution Linking Moist Dynamics of Cyclones and Storm Tracks, Bergen, Norway, 2022/10/6, Modulation of storm-track activity associated with the Southern Baroclinic Annular Mode
86	S. OKAJIMA: BALMCAST kick-off Meeting Bias Attribution Linking Moist Dynamics of Cyclones and Storm Tracks, Bergen, Norway, 2022/10/6, Cyclonic and anticyclonic contributions to air-sea interactions and the midwinter suppression
87	A. MIYAMOTO: BALMCAST kick-off Meeting Bias Attribution Linking Moist Dynamics of Cyclones and Storm Tracks, Bergen, Norway, 2022/10/6, Maintenance mechanisms of the wintertime subtropical high over the South Indian Ocean
88	横山千恵、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）初夏日本付近の強雨の将来変化に関するストーリーライン研究
89	辻宏樹、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）GPM搭載レーダ観測データを用いた北半球冬季温帯低気圧の降水と潜熱加熱の統計
90	細谷桂介、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）全球的な降水現象の多様性と環境場との関係についての統計的解析
91	成田愛子、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）日本付近の秋雨に関する衛星データを用いた解析
92	関澤偲温、中村尚、小坂優、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）10月、夏季オーストラリアモンスーンの自己維持的な経年変動
93	関澤偲温、神山翼、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）10月、トンガ火山噴火に伴う気象津波の1次元浅水波モデルによる再現
94	佐野美憂、西井和晃、2022年度日本気象学会秋季大会、札幌（2022）10月24日、熊野灘で観測された海上竜巻の発生環境場(2)
95	西井和晃、田口文明、中村尚、2022年度日本気象学会秋季大会、札幌（2022）10月24日、2021/22年冬季の北太平洋上の海面水温場と海面気圧偏差
96	岡島悟、中村尚、2022年度日本気象学会秋季大会、札幌（2022）10月24日、南岸低気圧の特徴的な季節性に関する解析
97	宮本歩、中村尚、岡島悟、小坂優、日本気象学会2023年度秋季大会、札幌、2022/10/24、近年の極東域における春のストームトラック活動の十年規模変動
98	岡島悟、2022年度日本気象学会秋季大会、山本賞受賞記念講演、札幌（2022）10月25日（招待講演）、擾乱のオイラー統計における高低気圧性渦の寄与の分離
99	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、2022年度日本気象学会秋季大会（2022）10月26日、北太平洋冬季の移動性高低気圧頻度の季節性 ～「真冬の振幅低下」との関係～
100	高薮縁、横山千恵、第9回「富岳」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会、オンライン（2022）10月28日、気候と気象の大規模データ 解析研究拠点形成
101	Y. KOSAKA and Y. UCHIDA: CLIVAR Climate Dynamics Panel workshop, 2022/9/21, Weakening of the Silk Road teleconnection pattern under global warming in CMIP6 projections
102	Nakamura, H.: Bjerknes Seminar, Geophysical Institute, University of Bergen, Norway, invited, 2022/10/5, On the significance of the baroclinic nature of the NAO and maritime blocking
103	Y. N. TAKAYABU: Atmosphere Time-Varying Observation Workshop, online, 2022, Detecting regions where extreme precipitation is dominated by diurnal variations
104	Y. KOSAKA and Y. UCHIDA: International Year of Basic Sciences for Sustainable Development, invited, 2022/11/23, Weakening of the Silk Road teleconnection under global warming
105	C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: Asian Conference on Meteorology 2022, online, invited, 2022/11/24, Future projections of Baiu precipitation characteristics

	combining GPM DPR observation and CMIP models
106	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: JSPS - ISF (Japan - Israel) Symposium in Atmospheric Dynamics and Climate, Rehovot, Israel, invited, 2022/11/24, Understanding the seasonality of the North Pacific transient eddy activity
107	H. NAKAMURA: Geophysics Colloquium, Tel Aviv University, Israel, invited, 2022/11/28, Significance of the baroclinic nature of the NAO and maritime blocking highs
108	G. YIN: AGU Fall Meeting 2022, A Support Vector Machine-based Method for Improving Real-time Hourly Precipitation Forecast in Japan
109	Y. KOSAKA, R. SATOH, S. NAWA, H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO and S. OKAJIMA: AGU Fall Meeting 2022, Chicago, USA, 2022/12/16, An energetical analysis on wintertime meridional teleconnections over the North Pacific
110	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: AGU Fall Meeting 2022, Chicago, USA, invited, 2022/12/16, A new look at atmospheric energetics: cyclonic and anticyclonic contributions and their interactions with the jet stream
111	H. NAKAMURA: Mesoscale and Frontal-Scale Air-Sea Interaction Workshop, US-CLIVAR, Boulder, CO, USA (hybrid), invited, 2023/3/6, An overview of climatic impacts of midlatitude ocean fronts and eddies
112	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, T. SPENGLER: Mesoscale and Frontal-Scale Air-Sea Interaction Workshop, US-CLIVAR, Boulder, CO, USA (hybrid), 2023/3/6, Cyclonic and Anticyclonic contributions to air-sea interactions around midlatitude oceanic frontal zones
113	S. SEKIZAWA, H. NAKAMURA and Y. KOSAKA: The 7th International Symposium on Arctic Research (ISAR-7) Tokyo, 2023/3/6, Remote influence of the interannual variability of the Australian summer monsoon on wintertime climate in East Asia and the western North Pacific
114	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: The 7th International Symposium on Arctic Research (ISAR-7), Tokyo, 2023/3/6, Distinct seasonality in the frequency of migratory cyclones and anticyclones over the North Pacific
115	A. MIYAMOTO, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, Y. KOSAKA, B. TAGUCHI and K. NISHII: Mesoscale and Frontal-Scale Air-Sea Interaction Workshop, US-CLIVAR, CO, USA, hybrid, 2023/3/6, Importance of the Agulhas SST front in shaping clouds and circulations over the south Indian Ocean
116	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and T. SPENGLER: Mesoscale and Frontal-Scale Air-Sea Interaction Workshop, US-CLIVAR, CO, USA, hybrid, 2023/3/6, Cyclonic and Anticyclonic Contributions to Air-Sea Interactions around Midlatitude Oceanic Frontal Zones
117	M. NAKAYAMA, H. NAKAMURA and F. OGAWA: Mesoscale and Frontal-Scale Air-Sea Interaction Workshop, US-CLIVAR, CO, USA, hybrid, 2023/3/6, Impacts of a Midlatitude Oceanic Frontal Zone on the Southern Baroclinic Annular Mode
118	辻宏樹、高薮縁、横山千恵、幾田泰醇、GPMおよび衛星シミュレータ合同研究集会、名古屋（2023）台風域SLHアルゴリズム開発のための降水特性解析
119	横山千恵、高薮縁、GPMおよび衛星シミュレータ合同研究集会、名古屋（2023）GPM DPR観測とCMIP6モデルを用いた初夏日本付近の強雨の将来変化に関するストーリーライン研究
120	S. OKAJIMA and H. NAKAMURA: 1st Joint Workshop on the A3 Foresight Program: Networking Climate Change Hubs for Promoting Future Earth Over Northeast Asia, Busan, South Korea, invited, 2023/4/18, A spring peak in the frequency of “south coast cyclones” along the Kuroshio
121	Y. KOSAKA and Y. UCHIDA: 1st Joint Workshop on the A3 Foresight Program: Networking Climate Change Hubs for Promoting Future Earth Over Northeast Asia, Busan, South Korea, invited, 2023/4/18, Weakening of the Silk Road teleconnection under global warming

122	H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: 1st Joint Workshop on the A3 Foresight Program: Networking Climate Change Hubs for Promoting Future Earth Over Northeast Asia, Busan, South Korea, invited, 2023/04/18, Radiative impact of marine low-level clouds off California on the North Pacific climate system
123	辻宏樹、高薮縁：九州域に大雨をもたらす降水システムとその環境場の特徴、大気海洋研究交流会、2023年5月13日、九州大学
124	千喜良稔・高薮縁・横山千恵：極端降水の環境場依存性に関するCMIP6モデル比較、日本気象学会2023年度春季大会、2023年5月16日～20日、オンライン&東大本郷
125	成田愛子、高薮縁：秋雨期における広域豪雨の発生環境と降水特性について、日本気象学会2023年度春季大会、2023年5月16日～18日オンライン、19日～20日東大本郷
126	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: 2023年度日本気象学会春季大会、オンライン、2023/5/18、擾乱とジェット気流の存在下におけるシア渦度と曲率渦度
127	中村尚、日本気象学会2023年度春季大会シンポジウム「夏季アジアモンスーン研究の多面的展開」、東京、招待講演、(2023) 5月20日、モンスーン活動が日本の夏季天候に及ぼす影響
128	千喜良稔・高薮縁・横山千恵：極端降水の環境場依存性に関するCMIP6モデルの検証、日本地球惑星科学連合2023年大会、2023年5月21日～26日、幕張メッセ
129	高薮縁：気候変動と極端降雨、ランチャタイムスペシャルレクチャー、日本地球惑星科学連合2023年大会2023年5月21日～26日（招待講演）、幕張メッセ、千葉
130	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, T. SPENGLER: 日本地球惑星科学連合2023年大会、千葉&オンライン、2023/5/21, Cyclonic and anticyclonic contributions to air-sea interactions around midlatitude oceanic frontal zones
131	岡島悟、中村尚、Y. Kaspi、日本地球惑星科学連合2023年大会、幕張&オンライン、招待講演、(2023) 5月22日、移動性擾乱活動に対する多角的で「ハイブリッド」な視点
132	H. Tsuji and Y. N. Takayabu: The Role of Free-Tropospheric Moisture Convergence for Rainfall Events in Western Japan, The 15th International Conference on Mesoscale Convective Systems (ICMCS-XV), May 22-25 2023, Colorado, US.
133	Y. N. Takayabu: Precipitation characteristics and Environments: Heavy Rainfalls observed from TRMM & GPM, nextGEMS Cycle 3 Hackathon, May 29-June 2 2023, Madrid, Spain (keynote seminar, invited)
134	H. NAKAMURA: WCRP Workshop on Improving Climate Models and Projections Using Observation, Cambridge, MA, USA (hybrid), 2023/06/12, An overview of regional atmospheric reanalysis for Japan: ClimCORE Project
135	H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: Hotspot2 Workshop on Mid-latitude Ocean-Atmosphere Interactions: Their Processes and Predictability, 富山, 2023/06/16, Radiative impact of low clouds off California on the North Pacific climate system
136	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: Hotspot2 Workshop on Mid-latitude Ocean-Atmosphere Interactions: Their Processes and Predictability, 富山, 2023/6/17, Anticyclonic suppression of the North Pacific transient eddy activity in midwinter
137	Y. N. Takayabu: Precipitation characteristics and Environments: Heavy Rainfalls observed from TRMM & GPM, The 2023 University Allied Workshop on Changing Climate, June 27-29, 2023, AORI, Univ. of Tokyo
138	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, T. SPENGLER: 28th IUGG General Assembly, Berlin, Germany, 2023/7/12, Cyclonic and anticyclonic contributions to air-sea interactions around midlatitude oceanic frontal zones
139	H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: 28th IUGG general assembly: Berlin, Germany, 2023/07/13, Radiative impacts of marine low clouds off California on the North Pacific climate system.
140	K. NISHII, B. TAGUCHI, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: The 28th General Assembly of the international union of Geodesy and Geophysics, Chiba, Japan, 2023/7/13, Large-scale atmospheric response to warm SST anomalies in the North Pacific in the 2021-22 winter

141	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, Y. KASPI: 28th IUGG General Assembly, Berlin, Germany, 2023/7/16, Cyclonic and anticyclonic contributions to the midwinter minimum of the North Pacific storm-track activity. Part I. Lagrangian perspective
142	H. NAKAMURA, S. OKAJIMA and Y. KASPI: 28th IUGG general assembly: Berlin, Germany, 2023/07/15, Cyclonic and anticyclonic contributions to the midwinter minimum of the North Pacific storm-track activity. Part II. Energetics
143	Aiko Narita and Yukari N. Takayabu: Analysis of the Environment and Precipitation Characteristics of Widespread Heavy Rainfall Events During the Akisame Season(AS47-A011), AOGS2023 20th Annual Meeting, Singapore, Jul 30-Aug 4 2023
144	小坂 優、内田 裕太、東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター共同利用研究集会「多様な時空間スケールでの気象学・気候学・大気科学」、岩手、招待講演、2023/8/21、シルクロードテレコネクションの地球温暖化に伴う弱化
145	岡島 悟、中村尚、T. SPENGLER、東京大学大気海洋研究所大槌沿岸センター共同利用研究集会「多様な時空間スケールでの気象学・気候学・大気科学」、岩手、特別講演、2023/8/22, Cyclonic and anticyclonic contributions to air-sea interactions around midlatitude oceanic frontal zones
146	H. NAKAMURA: ECMWF Annual Seminar 2023, Reading, UK, 2023/9/4, Regional atmospheric reanalyses for Japan under the ClimCORE project
147	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: Japan-Israel Joint Symposium on Atmospheric Dynamics and Climate, Tokyo, Japan, 2023/9/26, Anticyclonic suppression of the North Pacific transient eddy activity in midwinter
148	H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: Japan-Israel Joint Symposium on Atmospheric Dynamics and Climate: Tokyo, Japan, 2023/09/26, Radiative impact of marine low-clouds off California on the North Pacific climate system
149	H. NAKAMURA, S. OKAJIMA and Y. KASPI: A Joint DynVar/SNAP Meeting~The Role of Atmospheric Dynamics for Climate and Extremes~: Munich, Germany, 2023/10/10, Cyclonic and anticyclonic contributions to the midwinter minimum of the North Pacific storm-track activity
150	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and Y. KASPI: The Role of Atmospheric Dynamics for Climate and Extremes; A Joint DynVar-SNAP Meeting, Munich, Germany, 2023/10/24, Distinct roles of cyclones and anticyclones in setting the midwinter minimum of the North Pacific eddy activity: a Lagrangian perspective
151	横山千恵: GPM DPR観測・CMIP6モデルを用いた梅雨期の強雨の将来変化予測の不確実性低減に関する研究、日本気象学会2023年度秋季大会、10月23日～26日、仙台国際センター
152	千喜良稔: 極端降水の環境場依存性に関するCMIP6モデル比較、日本気象学会2023年度秋季大会、10月23日～26日、仙台国際センター
153	高薮 緑: 藤原賞受賞記念講演、研究業績: 熱帯・中緯度域の雲降水システムの大規模な組織化に関する先駆的研究ならびに衛星気象学・気候学の発展への貢献、日本気象学会2023年度秋季大会、10月23日～26日、仙台国際センター
154	岡島 悟、中村尚、2023年度日本気象学会秋季大会、仙台、(2023) 10月25日、南岸低気圧活動の変動と温暖化時の変化
155	西井和晃、田口文明、中村尚、Y. J. Orsolini、日本気象学会2023年度秋季大会、仙台 (2023) 10月26日、2021/22年冬季北太平洋上の海面水温場と極成層圏気温
156	中村 尚、日本気象学会2023年度秋季大会、仙台 (2023) 10月26日、日本域領域再解析データの作成とその広範な利用を目指して-ClimCOREプロジェクト
157	C. Yokoyama, Y. N. Takayabu, and T. Kubota, 2023: Storylines of future changes of Baiu heavy rainfall projected by combining GPM DPR and CMIP6, the joint PI meeting of JAXA Earth Observation Missions FY2023, 6-10 Nov. 2023, Tokyo, Japan.
158	Chie Yokoyama, Y. N. Takayabu: Uncertainty in projected future precipitation characteristics in western Japan and its relationship to reproducibility of global-scale atmosphere-ocean circulation., The International Workshop on "Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings", 21-22 Nov 2023, AORI

159	Y. N. Takayabu: Summary Talk "What we have discussed through CMIP model intercomparison studies", The International Workshop on "Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings", 21-22 Nov 2023, AORI
160	T. Yoshikane: The International Workshop: Communications on future changes of extreme weather with reduced uncertainty based on physical understandings. (2023), Development of a method for downscaling CMIP6 model outputs and land surface models for water-related disaster risk assessment.
161	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA: The International Workshop on "Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings", Chiba, Japan, 2023/11/22, A spring peak in the frequency of "south coast cyclones" along the Kuroshio
162	Y. KOSAKA, S. SAKAI: The International Workshop on "Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings", Chiba, Japan, 2023/11/22, A wave-like teleconnection along the summertime polar front jet over the Eurasian sector: Dynamics and changes under global warming
163	中村 尚、日中韓A3フォーサイト京都会合、宇治、(2023) 12月5日、2023年夏の日本域の記録的な高温について
164	岡島 悟: 京都大学防災研究所一般研究集会2023WS-07「異分野融合による東アジアの天候に係わる気候システム研究の更新」, 京都 (2023) 12月7日、春季東アジアにおける移動性低気圧活動
165	S. OKAJIMA: The 2nd Workshop on the A3 Foresight Program "Networking Climate Change Research Hubs for Promoting Future Earth Over Northeast Asia", Zhuhai, China, 2023/12/20, Migratory cyclone activity in springtime East Asia
166	Y. KOSAKA, T. KAWAMURA, K. USUI, S. OKAJIMA, A. MIYAMOTO, S. SEKIZAWA, M. TODA and H. NAKAMURA: Workshop in interbasin interactions and predictability in the tropics, 神奈川, 2023/12/20, Modulations of the Northern Annular Mode under global warming
167	Y. N. Takayabu "Statistical Characterization of Precipitation Events Collected from the GPM DPR" The 104th AMS Annual Meeting 28 January - 1 February, 2024, Baltimore, Maryland.
168	S. OKAJIMA, H. NAKAMURA and T. SPENGLER: Ocean Sciences Meeting 2024, New Orleans, USA, 2024/2/21, Midlatitude oceanic fronts strengthen the moisture transport from anticyclones to cyclones
169	H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO, S.-P. XIE, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: Ocean Sciences Meeting 2024, New Orleans, USA, Radiative Impact of Marine Low Clouds off California on the North Pacific Climate System

成果 番号	【サブテーマ2】の口頭発表（学会等・査読なし）
170	河谷芳雄、堀之内武、佐藤尚毅、日本地球惑星科学連合2022年大会（2022）Storylines of projected climate changes around Japan associated with upper troposphere and stratosphere responses
171	佐藤尚毅、堀之内武、河谷芳雄、日本気象学会2022年度秋季大会（2022）中部地方日本海側における冬季の降水量と極端降水事例の経年変化
172	佐藤尚毅、堀之内武、河谷芳雄、日本気象学会2023年春季大会（2023）日本海中西部で見られる2000年代以降の冬季海面水温の低下傾向
173	佐藤尚毅、堀之内武、河谷芳雄、日本気象学会2023年秋季大会（2023）冬季の中部地方日本海側で見られる極端降水事例における大規模場の特徴
174	堀之内武、河谷芳雄、佐藤尚毅、日本気象学会2023年秋季大会（2023）夏季東アジアの降水と循環の長期変化に関するCMIP5とCMIP6の比較
175	河谷芳雄、中村尚、佐藤薫、渡辺真吾、日本地球惑星科学連合2023年大会（2023）Effects of mid-latitude SST fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves

176	Y. Kawatani, H. Nakamura, K. Sato and S. Watanabe: 28th IUGG General assembly, Berlin, 17 July 2023, Effects of mid-latitude SST fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves
177	Y. Kawatani, H. Nakamura, K. Sato and S. Watanabe: International Conference on the Asian Summer Monsoon Anticyclone, online, 11 September 2023, Effects of mid-latitude SST fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves
178	Y. Kawatani, H. Nakamura, S. Watanabe and K. Sato: Japan-Israel Symposium on Atmospheric Dynamics and Climate, Tokyo, 26 September 2023, Effects of mid-latitude SST fronts on the middle atmosphere through upward propagating atmospheric waves
179	Y. Kawatani, T. Horinouchi and N. Sato: The International Workshop on Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings, 21 November 2023, Reducing uncertainty in projection of future changes in the stratospheric polar night jet in CMIP models

成果 番号	【サブテーマ3】の口頭発表（学会等・査読なし）
180	尾瀬智昭、遠藤洋和、仲江川敏之、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）夏季東アジアの海面気圧将来変化と近年の気候変動
181	仲江川敏之、村崎万代、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）日本国内51地点で算定された過去120年間の気候指標のトレンド
182	高谷祐平、日本気象学会2023年度春季大会シンポジウム、東京（2023）、アジアモンスーンと台風の季節予報の進展
183	尾瀬智昭、遠藤洋和、仲江川敏之、日本気象学会 2023 年度春季大会、東京（2023）夏季東アジアの海面気圧将来変化と近年の気候変動（2）
184	伊東瑠衣、遠藤洋和、尾瀬智昭、川瀬宏明、今田由紀子、仲江川敏之、日本気象学会 2023 年度春季大会、東京（2023）日本の夏季高温現象の将来予測に関する不確実性の考察
185	高谷祐平、Hong-Li Ren、Frédéric Vitart、Andrew Robertson、日本気象学会 2023 年度秋季大会、仙台（2023）マルチモデルの季節予報ハインドキャストによる夏季アジアモンスーン予測の比較
186	尾瀬智昭、遠藤洋和、仲江川敏之、日本気象学会 2022 年度秋季大会、仙台（2023）夏季東アジアの海面気圧将来変化と日本各地域の近年気候変動
187	高橋洋、尾瀬智昭、遠藤洋和、仲江川敏之、日本気象学会2022年度秋季大会、仙台（2023）西日本の高温日における大規模循環場の特徴
188	仲江川敏之、村崎万代、日本気象学会 2023 年度秋季大会、仙台（2023）日降水量データセット APHRODITE から算定された降水指標の特性
189	遠藤洋和、鬼頭昭雄、尾瀬智昭、日本気象学会 2023 年度秋季大会、仙台（2023）東アジア夏季降水量の将来変化の不確実性における海陸温度コントラストの影響
190	H. ENDO: 2023 TCCIP International Workshop on Climate Change, Taipei, Taiwan, 2023/11/23, Global model analysis for understanding climate change around Japan.
191	H. ENDO: Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) 2023, Singapore, 2023/8/2, Long-term precipitation changes in the Baiu and Akisame seasons in Japan over the past 120 years (1901-2020).
192	H. ENDO, A. KITOH, R. MIZUTA, and T. OSE: Asia Oceania Geoscience Society (AOGS) 2022, Online, 2022/8/1, Different future changes between early and late summer monsoon precipitation in East Asia.
193	遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、尾瀬智昭、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター共同利用研究集会「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」、岩手県大槌町、2022/8/24、東アジアの夏季降水量の将来変化における初夏と晩夏の違い
194	遠藤洋和、鬼頭昭雄、尾瀬智昭、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道札幌市、2022/10/24、夏季東アジア降水量の将来変化：CMIP5/6の違い

195	遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、尾瀬智昭、長期予報研究連絡会 研究会「長期予報と大気大循環」、オンライン、2023/1/17、東アジアの夏季降水量の将来変化における初夏と晩夏の違いについて
196	遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、尾瀬智昭、東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター共同利用研究集会「多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来」、岩手県大槌町、2022/8/24、東アジアの夏季降水量の将来変化における初夏と晩夏の違い
197	遠藤洋和、鬼頭昭雄、尾瀬智昭、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道札幌市、2022/10/24、夏季東アジア降水量の将来変化：CMIP5/6の違い
198	遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、尾瀬智昭、長期予報研究連絡会 研究会「長期予報と大気大循環」、オンライン、2023/1/17、東アジアの夏季降水量の将来変化における初夏と晩夏の違いについて

成果番号	【サブテーマ4】の口頭発表（学会等・査読なし）
199	塩竈秀夫、渡部雅浩、H. KIM、廣田渚郎、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）5月20日、21世紀後半までの降水量変化予測の不確実性低減
200	林未知也、塩竈秀夫、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）5月20日、日本域の気候変動影響評価適応研究のために選択されたCMIP6の将来予測ミニアンサンプルの分析
201	廣田渚郎、道端拓朗、塩竈秀夫、小倉知夫、鈴木健太郎、日本気象学会2022年度春季大会、オンライン（2022）5月、MIROCにおける雲・降水プロセス高度化の雲フィードバックへの影響
202	H. SHIOGAMA, M. WATANABE, H. KIM and N. HIROTA: EGU General Assembly 2022, online, 24 May 2022 Observational constraints on the uncertainties of the future precipitation change projections
203	塩竈秀夫、渡部雅浩、H. KIM、廣田渚郎、Japan Geoscience Union Meeting 2022、オンライン、（2022）5月26日、21世紀後半までの降水量変化予測のEmergent Constraints
204	廣田渚郎、道端拓朗、塩竈秀夫、小倉知夫、鈴木健太郎、日本地球惑星科学連合2022年大会、幕張（2022）5月、MIROC6における降水過程精緻化による雲の温暖化応答への影響
205	N. HIROTA, T. MICHIHATA, H. SHIOGAMA, T. OGURA and K. SUZUKI: CFMIP 2022, Seattle, Jul 2022, Impacts of Precipitation Modeling on cloud response to global warming in MIROC6
206	塩竈秀夫、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌（2022）10月25日、気温の極端現象指標の将来変化とその不公平性
207	石崎紀子、塩竈秀夫、花崎直太、高橋潔、日本気象学会2022年度秋季大会、北海道大学（2022）アナログ手法とバイアス補正を用いた気候シナリオ開発
208	林未知也、塩竈秀夫、小倉知夫、日本気象学会2022年度秋季大会、札幌、（2022）10月25日、日本周辺の極端海洋昇温の増加への地球温暖化の寄与
209	M. HAYASHI: Asian Conference on Meteorology 2022, online, 24 Nov 2022, Extreme ocean warming events near Japan and climate change
210	林未知也、塩竈秀夫、小倉知夫、異常気象研究会2022、京都、（2022）12月1日、日本周辺で1982年以降に生じた極端海洋昇温に対する地球温暖化の影響の統計的調査
211	塩竈秀夫、高倉潤也、高橋潔、EGU General Assembly 2023、オンライン、（2023）4月25日、Observational constraints on economic impact assessments of climate change simulated by an impact emulator
212	塩竈秀夫、高倉潤也、高橋潔、日本気象学会2023年春季大会、オンライン、（2023）5月16日、気候変動経済影響評価の気候モデル不確実性を低減
213	塩竈秀夫、高倉潤也、高橋潔、Japan Geoscience Union Meeting 2023、幕張、（2023）5月23日、Observational constraints on climate-related uncertainty of economic impact assessments
214	塩竈秀夫、2023年度環境3学会（環境法政策学会、環境経済・政策学会、環境社会学会）合同シンポジウム「気候変動と分配的正義」、オンライン、（2023）7月8日、極端現象変化の世代間・地域間不公平性

(4) 知的財産権

成果 番号	発明者	出願者	名称	出願以降 の番号	出願 年月日
	特に記載すべき事項 はない。				

(5) 「国民との科学・技術対話」の実施

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ1】の実施状況
215	2022	小坂優（2022）3.5seed in Tokyo 明日のための時間（東京）「気候変動について」2022年4月29日
216	2022	中村尚（2022）かわさき市民アカデミー（神奈川）「地球温暖化と異常気象・自然災害」2022年5月13日
217	2022	宮本歩（2022）私立広島学院中・高等学校 遠隔授業（オンライン）「地球温暖化って何」2022年6月7日
218	2022	中村尚（2022）首都高速道路（株）技術発表会（東京）「顕在化する地球温暖化と我が国の異常気象・気象関連災害」2022年6月20日
219	2022	中村尚（2022）高野山会議2022（和歌山）「地球表層環境の変遷、気候の自然変動と地球温暖化」2022年7月2日
220	2022	中村尚（2022）市村賞受賞記念フォーラム基調講演（仙台）「顕在化する地球温暖化と深刻化する異常気象 — その実態と予測 —」2022年8月19日
221	2022	小坂優（2022）東京大学グローバルサイエンスキャンパス 2022年度STEAM型学習（オンライン）「気候の揺らぎと移ろいの科学」2022年9月3日
222	2022	関澤 偲温（2022）Norway-Japan Arctic Seminar, Yokohama 「Part 2: Connecting Arctic and Ocean Science to the Future」(invited panelist) 2022年9月13日
223	2022	高薮縁（2022）山梨県立甲府南高等学校スーパーサイエンスハイスクール推進部 サイエンスフォーラム講演「衛星から見た大雨」（主催：山梨県立甲府南高等学校スーパーサイエンスハイスクール推進部、2022年10月28日、場所：山梨県立甲府南高等学校、聴衆：約250名）
224	2022	西井和晃（2022）日本気象学会九州支部2022年度第23回気象教室「冬の異常気象と地球温暖化」「地球温暖化による冬の異常気象」2022年11月13日
225	2022	中村尚（2022）先端研ユースアカデミー（2022年度第5回）（東京）「今起こっている気候変動の実態をどう読み解く？どう対応する？」2023年2月7日
226	2022	西井和晃（2023）シンポジウム「大雪は忘れた頃にやってくる～ひとすじ縄でいかない三重の雪予報～」（津）「三重の雪の過去」2023年2月18日
227	2023	中村尚（2023）かわさき市民アカデミー（神奈川）「地球温暖化と異常気象・自然災害」2023年4月28日・5月13日
228	2023	関澤 偲温（2023）樹徳高等学校における出張授業「地球温暖化をテーマ」2023年8月7日
229	2023	中村尚（2023）鎌倉淡青会20周年記念講演会「近年の異常気象の実態と顕在化する地球温暖化の関わり」2023年9月30日
230	2023	中村尚（2023）第71回気象ビジネスコンソーシアム全体会合（オンライン）「ClimCOREプロジェクトにおける日本域気象再解析データの構築」2023年10月20日
231	2023	中村尚（2023）気候変動を学ぶステップアップセミナー～持続可能なやまぐちの未来をめざして～（山口）、基調講演「顕在化する地球温暖化と最近の異常気象」2024年2月

		10日
232	2023	中村尚（2023）第8回気象ビジネスフォーラム（オンライン）基調講演「日本域気象再解析データの整備と幅広い社会・産業利用に向けて」2024年2月29日
233	2023	中村尚（2023）公開シンポジウム「日本の周りは気候の『ホットスポット』」（東京）「昨夏の記録的猛暑 海からの影響は?」2024年3月23日

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ2】の実施状況
234	2022	佐藤尚毅（2022）東京学芸大学公開講座、夏休み自由研究教室「親子で学ぶ天気図講座」、同「中高生のための天気図講座」、「ウィンタースポーツのための天気図講座」2022年7月～12月
235	2023	佐藤尚毅（2023）東京学芸大学公開講座、夏休み自由研究教室「親子で学ぶ天気図講座」、同「中高生のための天気図講座」、「ウィンタースポーツのための天気図講座」、2023年7月～12月

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ3】の実施状況
		特に記載すべき事項はない。

成果 番号	実施 年度	【サブテーマ4】の実施状況
236	2022	塩竈秀夫（2022）気候変動と極端気象現象の過去と未来、日本産業機械工業会、2022年5月11日（オンライン講演）
237	2022	塩竈秀夫（2022）気候変動と水、全水道第33回労働運動研究全国集会、2022年5月28日（オンライン講演）
238	2022	江守正多（2022）金沢市主催オンライン講演会「地球温暖化と『脱炭素』への道」2022年7月（オンライン講演）
239	2022	江守正多（2022）立教大学カーボンニュートラル人材育成講座「気候危機のリスクと社会の大転換」立教大学池袋キャンパス、2022年9月
240	2022	江守正多（2022）南三陸町環境セミナー「地球温暖化の動向最前線」2022年10月（オンライン講演）
241	2022	江守正多（2022）みずほ証券機関投資家向けESGセミナー「地球温暖化の科学と将来シナリオ～気候変動リスクと社会の大転換」2022年10月（オンライン講演）
242	2022	江守正多（2022）北海道環境財団気候変動教育連続勉強会「気候変動問題をどうコミュニケーションするか」2022年10月（オンライン講演）
243	2022	塩竈秀夫（2022）東京都省エネルギー及び再生可能エネルギーに関する研修「気候変動：我々はどこにいて、どこに向かうのか？」2022年10月31日（オンライン講演）
244	2022	塩竈秀夫（2022）住友商事本社「今と未来の気候変動」2022年11月8日（講演）
245	2022	塩竈秀夫（2022）さがみはら地球温暖化対策協議会「私たちと子供たちの気候変動」2022年12月22日（オンライン講演）
246	2023	塩竈秀夫（2023）シンポジウム”脱炭素イノベーション：香川からの提言”「気候変動のこれまでとこれから」、香川大学、2023年7月13日（講演）
247	2023	江守正多（2023）第26回公開気象講座”気候変動のリスクと予測研究の最前線”「IPCC第6次評価報告書のポイントからみる気候変動のリスクと社会の大転換」名古屋市科学館、2024年1月21日（講演）

(6) マスメディア等への公表・報道等

成果 番号	【サブテーマ1】のメディア報道等
248	MS&ADインターリスク総研（オンライン）（2022年4月7日、「気象・災害データ×AIによる新たな防災・減災支援システムを提供開始」、芳村圭）
249	読売新聞（2022年4月28日「黒潮大蛇行 観測史上最長…九州沖で渦発生 巨大化」）
250	日経速報ニュース（オンライン）（2022年5月13日、「東大、機械学習を用いた局地降水予測手法を開発」、吉兼隆生、芳村圭）
251	日本経済新聞（オンライン）（2022年5月17日、「局地的な降水を高精度に予測 東大がAI活用」吉兼隆生、芳村圭）
252	日経産業新聞（2022年5月25日、「東京大学、局地的な降水を高精度に予測」吉兼隆生、芳村圭）
253	NHK信州（2022年5月25日、「洪水発生を30時間以上前に予測するシステムのデータの活用は」芳村圭）
254	人工知能研究開発ネットワーク（オンライン）（2022年6月1日、「機械学習を用いた局地降水予測手法の開発」吉兼隆生、芳村圭）
255	生産技術研究所ウェブサイト（2023年6月27日、「【記者発表】降水の気候変化の特徴を精度よく推定——気候モデルシミュレーションを高解像度化し、温暖化の影響を評価——」
256	グリーン・エージ（2022年6・7月合併号、「気候変動のメカニズム 人為起源影響と自然変動」）
257	読売新聞（2022年6月28日「猛暑続く見込み「ラニーニャ」影響」）
258	毎日新聞（2022年6月28日「梅雨前線一気に北上」）
259	読売新聞（2022年6月29日、「異常干ばつ 常態化恐れ 40年までに 南米・欧州などの一部」）
260	読売新聞（2022年6月30日「二階建て高気圧」）
261	北國新聞（2022年7月21日「猛暑世界に打撃」）
262	日本経済新聞（電子版）（2022年8月12日「台風と前線、豪雨三たび「集中観測」で捉えきれず」）
263	共同通信（2022年8月22日「記録的猛暑「異常、極端な状態」気象庁が分析検討会」）
264	時事通信（2022年8月22日「6～7月の暑さ、「異常気象」＝高気圧発達で―気象庁検討会」）
265	毎日新聞（2022年8月23日「記録的高温「異常な状態」気象庁検討会見解 温暖化が影響」）
266	産経新聞（2022年8月23日「記録的猛暑は「異常気象」6～7月気象庁が分析検討会」）
267	日本経済新聞（2022年8月23日「6～7月猛暑「異常な状態」気象庁「分析検討会」」
268	東京新聞（2022年8月23日「列島に二重高気圧 6～7月記録的猛暑の要因 気象庁 分析」）
269	朝日新聞夕刊（2022年8月23日「今夏の記録的猛暑「異常気象」」
270	熊本日日新聞（2022年8月23日「記録的猛暑「異常、極端な状態」気象庁が分析検討会」）

271	読売新聞（2022年8月24日「猛暑 偏西風蛇行が原因 6～7月高気圧張り出す」）
272	毎日新聞（2022年8月28日「なるほドリ・ワイド「今年の記録的猛暑」
273	日経産業新聞（2022年8月31日、「防災特集——水害の見える化進む、最新技術でハザードマップ セコムなどリアルタイムで」）
274	日本経済新聞（2022年9月5日、「異常気象、経済揺らす 世界の干ばつ被害1～6月1.8兆円 発電、欧州・中国で低下 穀物の供給減少」）
275	日本経済新聞（2022年11月20日「豪雪、温暖化でむしろ増加 暖かい海水がエネルギー源」）
276	週刊女性（2022年11月29日「“四季”から“二季”へ？激変する日本の季節感」）
277	日経電子版（2022年12月4日「ビジュアルデータ：メガストームの脅威 都市と気候危機」）
278	読売新聞（2022年12月28日「対馬海流の水蒸気 大雪招く日本海で発達「JPCZ」まるで冬の「線状降水帯」
279	毎日新聞（2023年1月25日「最強寒波にぶるぶる 北極圏から極冷の渦」）
280	読売新聞及び読売新聞オンライン（2023年1月30日、夕刊11面、「1時間に100ミリ以上の「猛烈な雨」、1980年前後の2倍に…地球温暖化の影響か」大雨の将来変化に関する気象庁の発表について、推進費による研究成果を基に、地球温暖化との関係性を説明、高薮縁）
281	時事通信WEB（2023年3月2日「今冬の寒さ、偏西風の蛇行影響＝高温期もあり極端な天候—気象庁」）
282	日経新聞夕刊（2023年3月8日「成層圏で「突然昇温」、寒さ戻る可能性も」）
283	読売新聞（2023年4月20日「温室ガス削減 危機感あらわ…IPCC統合報告「60%減」」）
284	読売新聞（2023年6月3日「線状降水帯、初の連続6県で発生…台風2号が梅雨前線を活性化」）
285	日経新聞（2023年6月4日「24時間雨量が8県で最多 線状降水帯、時期・地域に変化」）
286	EurekAlert!（オンライン）（2023年6月9日、「降水の気候変化の特徴を精度よく推定 —— 気候モデルシミュレーションを高解像度化し、温暖化の影響を評価——」吉兼隆生、芳村圭）
287	東京新聞夕刊（2023年6月12日「熱中症に今から備えを 梅雨の豪雨や台風にも注意 学術団体が「市民へのメッセージ」
288	毎日新聞夕刊（2023年6月12日「今夏～秋、熱中症や豪雨に注意を 防災62学会がメッセージ」
289	The Daily NNA（2023年6月27日「（インド）悪天候で物価に上昇圧力 総選挙前の政府は対策強化」）
290	科学新聞（2023年07月07日「AIで気候シミュレーションを高度化 局地的な降水特性 再現可能に 東大生研が手法開発」芳村圭）
291	客観日本（2023年7月28日「東京大学生産技術研究所利用AI提高気候模拟精度，可再现局部降水特征」芳村圭 吉兼隆生）
292	桐生タイムス（2023年8月10日「今こそ「地球温暖化って何？」 樹徳高で理系高大連携講座」）
293	上毛新聞（2023年8月10日「温暖化 データで学ぶ 樹徳で高大連携講座」）
294	東大新聞オンライン（2023年8月12日「モデルバイアス補正で気候モデル高解像度化へ」芳村圭）

295	東洋経済オンライン（2023年8月23日「来年も猛暑？今夏がこんなにも「暑くなった」根因」）
296	共同通信（2023年8月28日「今夏の猛暑「異常だった」 平均気温、過去最高の見込み」）
297	時事通信（2023年8月28日「夏の気温、史上最高見込み＝太平洋高気圧や台風の暖気で一気象庁検討会」）
298	産経新聞朝刊（2023年8月29日「今夏の猛暑「異常だった」 平均気温、過去最高見込み 気象庁の分析検討会」）
299	毎日新聞朝刊（2023年8月29日「今夏の猛暑は「異常」 平均気温は過去最高の見込み 気象庁検討会」）
300	朝日新聞朝刊（2023年8月29日「1898年以降で最も暑い夏 気象庁分析」）
301	読売新聞朝刊（2023年8月29日「今夏の猛暑は125年間で最も「異常で圧倒的」…平均気温が最高の見込み」）
302	日本経済新聞朝刊（2023年8月29日「今夏の平均気温、過去最高見込み 気象庁の分析検討会」）
303	読売新聞（2023年9月2日「今夏 最も暑かった 平均気温 1898年以降」）
304	スカパー！と暮らす（2023年11月号「世界で起こる気候変動」）
305	NIKKEI Asia（2023年11月22日「Asia's climate-driven health crisis raises alarm ahead of COP28」）
306	読売新聞（2023年11月23日「地球環境の変化 関心持って」）
307	NHK WEBニュース（2023年12月22日「ことしの日本の平均気温 統計開始以降最高の見通し 気象庁」）
308	テレビ朝日「タモリステーション」出演（2023年12月15日 20:00 - 21:48、「沸騰する地球～2023 気候変動が生む負の連鎖～」、地球規模で進行する気候変動と近年の異常気象との関係について解説、高菰縁）
309	日本経済新聞電子版（2024年1月25日「謎多い「23年・史上最高の気温」 自然からの警戒信号」）
310	毎日新聞オンライン（2024年2月18日「季節予報」の礎を築いた科学者）

成果番号	【サブテーマ2】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ3】のメディア報道等
	特に記載すべき事項はない。

成果番号	【サブテーマ4】のメディア報道等
311	科学新聞（2022年10月28日「日本近海で増える極端昇温 国立環境研 地球温暖化の影響が明らかに」 林未知也

312	読売新聞大阪地域発行版朝刊（2022年11月18日「海面の異常高温が急増、日本周辺で2倍以上起きやすく…温暖化が影響」林未知也）
313	読売新聞（2022年10月19日「海面の異常高温が急増、日本周辺で2倍以上起きやすく…温暖化が影響」林未知也）

(7) 研究成果による受賞

成果 番号	【サブテーマ1】の研究成果による受賞
314	2022年度 山本賞、日本気象学会、2022年10月24日、岡島 悟
315	2022年度 JpGUフェロー表彰、日本地球惑星科学連合、2022年5月29日、中村 尚
316	令和4年度 理学系研究科研究奨励賞、東京大学 大学院理学系研究科・理学部、2023年3月8日、細谷桂介
317	令和5年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）2023年4月7日、高薮 縁
318	令和5年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）2023年4月7日、中村 尚
319	2023年度 藤原賞（日本気象学会）受賞題目：「熱帯・中緯度域の雲降水システムの大規模な組織化に関する先駆的研究ならびに衛星気象学・気候学の発展への貢献」2023年10月24日、高薮 縁
320	THE JOANNE SIMPSON TROPICAL METEOROLOGY RESEARCH AWARD (2024) アメリカ気象学会 (American Meteorological Society) 受賞題目：「For innovative use of satellite observations and international leadership in establishing key tropical precipitation satellite missions to advance understanding of tropical precipitation variability」2024年1月31日、高薮 縁

成果 番号	【サブテーマ2】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ3】の研究成果による受賞
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ4】の研究成果による受賞
321	2023年度 堀内賞、日本気象学会、2023年10月24日、塩竈 秀夫

(8) その他の成果発表

成果 番号	【サブテーマ1】のその他の成果発表
----------	-------------------

	特に記載すべき事項はない。
--	---------------

成果 番号	【サブテーマ 2】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 3】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

成果 番号	【サブテーマ 4】のその他の成果発表
	特に記載すべき事項はない。

Abstract

[Research Title]

Communications on Future Changes of Extreme Weather with Reduced Uncertainty Based on Physical Understandings

Project Period (FY) :	2022-2023
Principal Investigator :	Takayabu Yukari, N.
(PI ORCID) :	ORCID:0000-0003-2126-0330
Principal Institution :	The University of Tokyo 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, JAPAN Tel: +81-4-7136-4402 Fax: +81-4-7136-4375 E-mail: yukari@aori.u-tokyo.ac.jp
Cooperated by :	Hokkaido University, Tokyo Gakugei University, Meteorological Research Institute, Tokyo Metropolitan University, National Institute for Environmental Studies
Keywords :	Global warming, Climate change impact assessment, Future changes in extreme weather, Uncertainty reduction, Water disaster risk assessment

[Abstract]

In order to ensure a safe and sustainable society under the climate change, it is necessary to optimize adaptation measures based on quantitative global warming impact assessment information. In particular, there is a great concern about the vulnerability of society to extreme weather events. The IPCC AR6 reports increases of extreme heat waves and heavy rainfalls in many parts of the world, but their physical understanding is insufficient. Recently, Japan also has been plagued by frequent widespread floods and severe heat waves.

Projections of future changes simulated by most recent ensemble of climate models, CMIP6, are still subject to large uncertainties. Moreover, there raised an issue of “hot models”: some of the CMIP6 models are suspiciously too sensitive to the GHG increase (Tokarska et al. 2020), so that future projections should be performed with ensembles excluding “hot models” (Hausfather et al. 2022, Shiogama et al. 2022).

In this project, JPMEERF20222002, we aim to provide information about future changes of extreme phenomena with reduced uncertainty based on physical understandings, to climate change impact assessment research.

To this end, we study mechanisms of extreme weather occurrences under the influence of both local and remote climate and their changes. We use satellite and other observational data, global reanalysis data, CMIP6 historical and scenario runs, and high-resolution climate model ensemble d4PDF data, to analyze uncertainties of future projections of extreme weather, with physical rationality. We also develop methods to reduce such uncertainties and utilize the information in a hydrological model research, and convey information to impact assessment research group S-18.

Results are obtained for following subjects, and their reliability evaluated with accumulated observations. The results are utilized to narrow down the range of projections, and conveyed to the impact assessment group. (1) Dependence of future projections of local heavy rainfalls on reproducibility of global-scale SST and jet-streams. (2) Land-Ocean differences on relationship between heavy rainfalls and environments and their reproducibility in CMIP6 models. (3) A downscaling bias correction method developed and applied to the CMIP6 data, and implemented to a hydrological model. (4) Remote influence patterns and changes in storm track activity associated with the global warming that bring extreme weather to Japan. (5) Systemizing mechanisms how changes in temperature and large-scale circulation from upper troposphere to stratosphere affect precipitation and extreme events in East Asia. (6) Mechanisms determining climate patters, their fluctuations, and long-term changes observed and reanalyzed since the 1980s. (7) The impact of removing the “hot models” from the ensemble to reduce the projection uncertainty of global-scale phenomena; on reducing the uncertainty of various climate variables and extreme event indices around Japan and the Asia-Pacific region.

[References]

Hausfather, Z., K. Marvel, G. A. Schmidt, J. W. Nielsen-Gammon & M. Zelinka (2022) Climate simulations: recognize the ‘hot model’ problem. *Nature*, 605, 26-29. <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01192-2>

Shiogama, H., Watanabe, M., Kim, H., Hirota, N. (2022b) Emergent constraints on future precipitation changes. *Nature*, 602, 612–616, <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04310-8>

Tokarska K. B., M. B. Stolpe, S. Sippe, E. M. Fischer, C. J. Smith, F. Lehner, and R. Knutti (2020) Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models. *Science Advances*, 6, eaaz9549, <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz9549>

This research was funded by the Environment Research and Technology Development Fund (JPMEERF20222002).

另リ糸氏

【参考資料】 終了研究成果報告書 公募審査・中間評価結果への対応

指摘等	対応状況・非対応理由等
採択時コメント「3年間で国際誌に16 報以上の学術論文の発表を目標とする数値設定の実現を期待する。」	ありがとうございます。国際誌に40報の査読付き学術論文を発表することができました。
採択時コメント「これまで培ってきた研究の蓄積や経験を踏まえて、それを発展させる形で情報の不確実性を減らして、より確度の高い極端気候に関する情報提供を目指した優れた提案だと思う。説明では降水に関してどのような確度の高い情報伝達ができるかを例示しているが、それ以外の極端気候についても、通常の気候モデルのままだとどういった情報提供になって、それがこの研究プロジェクトを進めるとどのように確度が高くなるのか、その可能性を言及してこの研究プロジェクトを実施する意義への理解が深まるようにさらに工夫するとよいと思う。」	ありがとうございます。極端降水に加えて、極端な気温、地上風速、日射量などについての将来変化の情報も得ることができました。また、CMIP6モデル群の中には温暖化気体の増加に敏感すぎるモデルもあり、将来予測にはそのような「ホットモデル」を除外したモデル群を利用すべきであるという指摘があります。今回、ホットモデルを除外した影響について調査した結果、東アジア域の気温のみならず、湿度や年最大日降水量、降水量、太陽放射（短波）、地上風速などのばらつきも大きく減少し、大きな影響があることがわかりました。前回の推進費研究の成果として選択した5モデルから作成された影響評価研究用の共通気候シナリオNIES2020は、設計時にホットモデルを除外したことで、影響評価を過大評価する可能性を低減したシナリオであることが確認できました。
採択時コメント「我が国を代表する国際競争力を備えた研究実績を基盤とした力強い研究であり、研究体制も日本のベストメンバーであり、確実に良い成果が期待される。環境政策のみならず、国交相の水局や内閣府の防災政策などへの貢献も期待できる広い課題である。」	ありがとうございます。今回は水文グループにも参加いただき、全球気候モデル結果の高解像度化補正手法の開発とCMIP6データへの適用を行い水文モデルへ実装することで、より社会に密着した水災害リスクに関する情報を取り出すことができました。今後、防災政策への貢献が期待できます。
採択時コメント「学術的に有意義で期待できる研究である。本研究成果の環境政策へのインプットを明示できるように研究を進めてほしい。」	ありがとうございます。環境政策への貢献が期待できる成果を多く得ることができました。提言書としてまとめております。
採択時コメント「極端気象に伴う脆弱性に対して社会的関心の高まり等を踏まえた研究構成であり、予測の不確実性の低減と適応策立案に有効に寄与する研究成果を期待する。」	ありがとうございます。上記に書きましたように、全球モデルの不確実性の低減が、ローカルな現象の変化予測の不確実性の低減に結び付くことを示すことができ、適応策立案のためのモデル選択の合理性を確認できる成果となりました。

採択時コメント「「ストーリーライン」構築のためのチーム編成はバランスが取れていると思われる。顕著現象のストーリーラインを影響評価と適応対策につなげるためには、トップダウン的なモデル場から実用レベルの公式に落とすことが重要なので、サブテーマ4 の機能充実と発信すべきモデル成果物をよく検討してほしい。」	ありがとうございます。サブテーマ4の重要な成果として、上記のように全球モデルの不確実性の低減が、ローカルな現象の変化予測の不確実性の低減に結び付くことを示すことができ、適応策立案のためのモデル選択の合理性を確認できる成果となりました。
採択時コメント「時宜に適った提案だと思う。社会への情報発信は環境省を通じてではなく、広く社会に定常的に行うような媒体や体制を作ってはどうか。」	ありがとうございます。2年間で国民との科学・技術対話の機会を33件、マスコミ等への公表・報道を66件行い、広く社会に情報発信するよう心掛けました。今後さらに媒体や体制を作っていくことも考えたいと思います。
採択時コメント「各地域の極端現象の変化予測の不確実性を低減し、適応策を最適化するために組み立てられた研究構成となっていると評価する。特に極端現象の変化予測の不確実性の低減が、国民の行動変化につながることを期待する。」	ありがとうございます。国民への情報発信を多くできるように心がけました。
採択時コメント「極端気象現象の予測不確実性を低減し、一般市民により身近なものとしてとらえてもらう上で有用な研究である。」	ありがとうございます。
採択時コメント「ローカルな極端現象の不確実性とグローバルな事象の不確実性の関係が今一つ理解しにくい。ここが因果関係として体系的に説明できるのであれば良いが、そうでないと地域の適応策を行う人々にグローバルなレベルの不確実性を説明することの意味が理解しにくい。」	ありがとうございます。それがまさに今回のテーマであり、例えば、西日本の広域豪雨といったローカルな現象が、グローバルスケールの大気循環や海面水温分布にいかに関与されるか、日本の中央山脈域の冬の降水が上層ジェットの変動にいかに関与されるか、といったメカニズムについての成果を多く出すことができました。また、上記しましたように、全球平均気温上昇が大きいホットモデルを除外した影響について調査した結果、東アジア域の気温のみならず、湿度や年最大日降水量、降水量、太陽放射（短波）、地上風速などのばらつきも大きく減少し、大きな影響があることがわかりました。このように様々な切り口から、ローカルな現象の将来予測のばらつきが、グローバルなレベルの不確実性に大きく影響していることを示すことができたのは、今回の全体としての重要な総括となります。
採択時コメント「先行する推進費で蓄積した科学的成果に立脚した提案であり、学術的成果に期待が持てる。マニュアル改訂の見通しや国民への伝達など、社会や政策への反映について工夫が必要と思う。」	ありがとうございます。ご期待いただきましたように、学術的成果は多く得ることができました。また、上記しましたように、水文モデルを介しての社会への情報提供や、不確実性低減に関する政策への貢献が期待される重要な成果も得られました。これらをマニュアル改訂や実際の政策への反映にもっていくためにさらに工夫が必要と考えています。