

課題番号：2-1904

課題名：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
(JPMEERF20192004)

重点課題：主【重点課題⑧】地球温暖化現象の解明・予測・対策評価
副【重点課題⑦】気候変動への適応策に係る研究・技術開発

研究代表機関・代表者：東京大学大気海洋研究所 高荻 縁

研究実施期間：2019年度～2021年度

累計予算額：12,000千円

サブ① 東京大学大気海洋研究所（高荻、宮川）・富山大学（濱田）

東京大学先端科学技術研究センター（中村、小坂）・九州大学（森）

日本周辺域の異常天候に関するストーリーラインのための大気海洋大規模循環の研究（総括班）

サブ② 北海道大学（堀之内）・JAMSTEC（河谷）・学芸大学（佐藤）

上部対流圏および成層圏循環と日本周辺域の異常天候との関連についての解析

サブ③ 気象庁気象研究所（仲江川、遠藤、高谷）・東京都立大学（高橋）

日本周辺域の異常天候に関するユーラシア大陸の気候変化の解析

サブ④ 国立環境研究所（江守、塩竈、高橋、花崎、肱岡、石崎）

温暖化に伴う日本域の異常天候に関するストーリーラインの影響評価・適応研究への連携研究

1. はじめに (研究背景)

- 2018年の「7月豪雨」や「災害級の暑さ」など、**近年、異常気象が多発し**、その多くには、地球温暖化の影響が指摘されている (IPCC AR6)。
- 地球温暖化は、適応策が必要なステージにあり、日本では2018年12月1日に**気候変動適応法が施行**された。
- 政策決定者にとって、温暖化の進行と共にその地域で何が起こるかについての**具体的なイメージ**が必要である。
- 近年、温暖化に伴う地域的 (極端) 現象の将来変化とそのバリエーションを具体的なイメージで伝える「**ストーリーライン手法**」が注目されている。



2018年7月豪雨 冠水した倉敷市真備町 = 7月7日午後
(c)共同通信社/アマナイメーجز

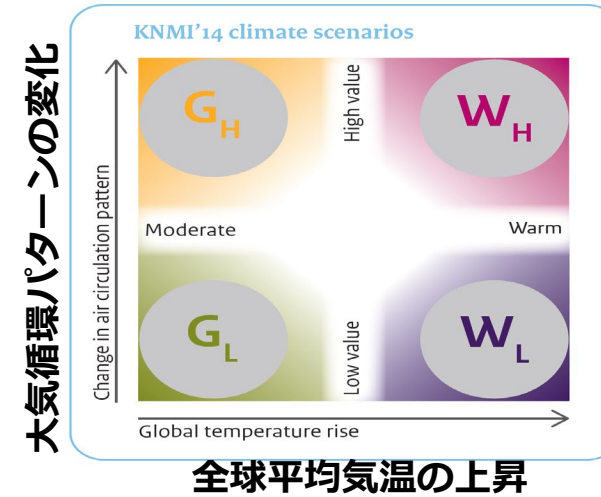
ストーリーライン手法

- 温暖化に伴うローカルな気候の将来変化予測は、気候モデルによって少しずつ異なる。
- 的確な適応策を策定するためには、確率情報だけでは現実的なイメージが掴みにくく、動きにくい。
- 気候変動によってその地域で何が起こり得るかについての具体的なイメージ(ストーリー)を示すことが有効である (Shepherd et al. 2018): 「ストーリーライン手法」
- オランダなどで、気候変化シナリオを作る際にストーリーライン手法を取り入れている。

本課題への導入

- ローカルな異常天候現象の変化を大規模場の変化に帰着させて理解する。
- 将来起こり得る変化について、物理的理解に基づき、そのバリエーションを代表する複数のストーリーとしてわかりやすく伝える。

(1)オランダKNMI気候シナリオ



気温上昇の大きさと
循環パターンで全球
モデルを分類

↓
それぞれの場合、
ローカルに何が起き
るかを示す

(2)オーストラリア

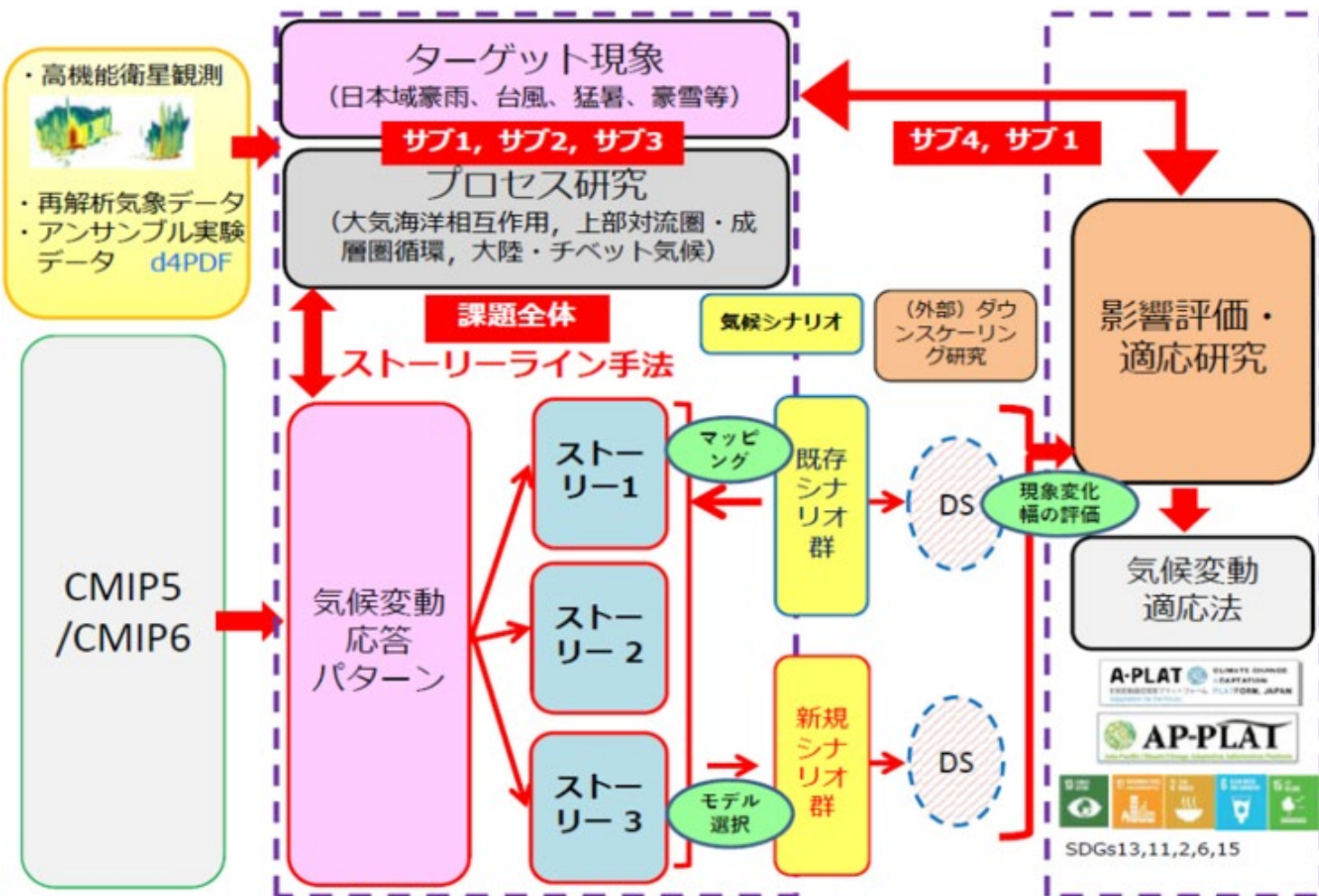
各ストーリーラインに
可能性の表現を付与

2030 A1B, ビクトリア州の気温と降水量の変化で分類

	Little change (up to 0.5C warmer)	Warmer (0.5 to 1.5C warmer)	Hotter (1.5 – 3.0C warmer)	Much hotter (more than 3.0C warmer)
Much wetter (more than +15%)	No evidence	No evidence	No evidence	No evidence
Wetter (0 to 15% wetter)	No evidence	Possible 5 models	No evidence	No evidence
Drier (0 to 15% drier)	Slight evidence 2 models GISS AOM, PCM	Most Likely 16 models	No evidence	No evidence
Much drier (More than 15% drier)	No evidence	Observed trend	No evidence	No evidence

2. 研究開発目的

- 豪雨、猛暑、干ばつ、豪雪、強風など、評価・適応研究に求められる日本域の異常天候をターゲットとして、CMIP5/CMIP6マルチモデルによる将来予測から気候シナリオのストーリーラインを構築する。
- 物理的理解に基づくストーリーラインのため、最新の高性能衛星観測などの観測データ、全球気象再解析データ、CMIP、d4PDF数値実験データなどを活用し、地域的な異常天候と大規模場とを関係づけるプロセスを明らかにする。
- 統計的モデル選択手法を開発し、CMIP6予測のばらつきを代表できる少数の気候モデルを選択する。影響評価・適応研究プログラムの共通シナリオとして、代表モデルによるストーリーラインと共に情報提供する。



3. 研究目標

適切な気候変動適応策が可能となるよう、日本域の異常天候に注目して、気候シナリオのばらつきを加味したストーリーラインの構築を目指す。すなわち、多数の気候モデルによる予測実験（CMIP5及びCMIP6）から、注目すべき異常天候と大規模大気循環場を紐づけ、将来変化のばらつきを代表できる少数のモデルを選択する。そして代表的な気候シナリオに伴う異常天候の変化について、不確実性を含め、影響評価研究者や政策決定者等のユーザーにわかりやすいストーリーラインとして情報提供を行う。また、日本域全域を対象とした影響評価・適応研究プロジェクトや地域適応コンソーシアム事業で従来使われてきた気候シナリオをCMIP予測のばらつきの上にマッピングし、影響評価の不確実性評価の偏りや要因を検証すると共に、今後の影響評価・適応研究での気候シナリオの選択・開発への指針を提案する。各サブ課題は以下を受け持つ。

- **サブ1:** 課題全体と協力し、以下を目標に総括する。注目する日本域の異常天候を選択する。異常天候と大規模気候場の変動パターンを紐づけ、CMIPモデルでのストーリーラインを構築する。従来利用されてきた気候シナリオのマッピングなど、成果を今後の影響評価・適応研究へ繋げる。
- **サブ2:** 対流圏上部から成層圏に注目し、日本域の天候の変化に効果的な大規模場要素を抽出する。他サブテーマと協力してストーリーラインを構築し、気候変動に伴う変化の仕組みを明らかにする。
- **サブ3:** ユーラシア大陸やチベット気候に注目し、ターゲットの変化に効果的な大規模場要素を抽出する。全体と協力してストーリーラインを構築し、気候変動に伴う変化の仕組みを明らかにする。
- **サブ4:** 影響評価研究者へのヒアリング等を通じて、日本域の適応策検討において優先的なターゲット現象の抽出を行い、ストーリーラインの構築に貢献する。既存の気候シナリオをストーリーラインにマッピングして妥当性について検証するとともに、今後の影響評価・適応研究での気候シナリオの選択・開発について指針を提案する。

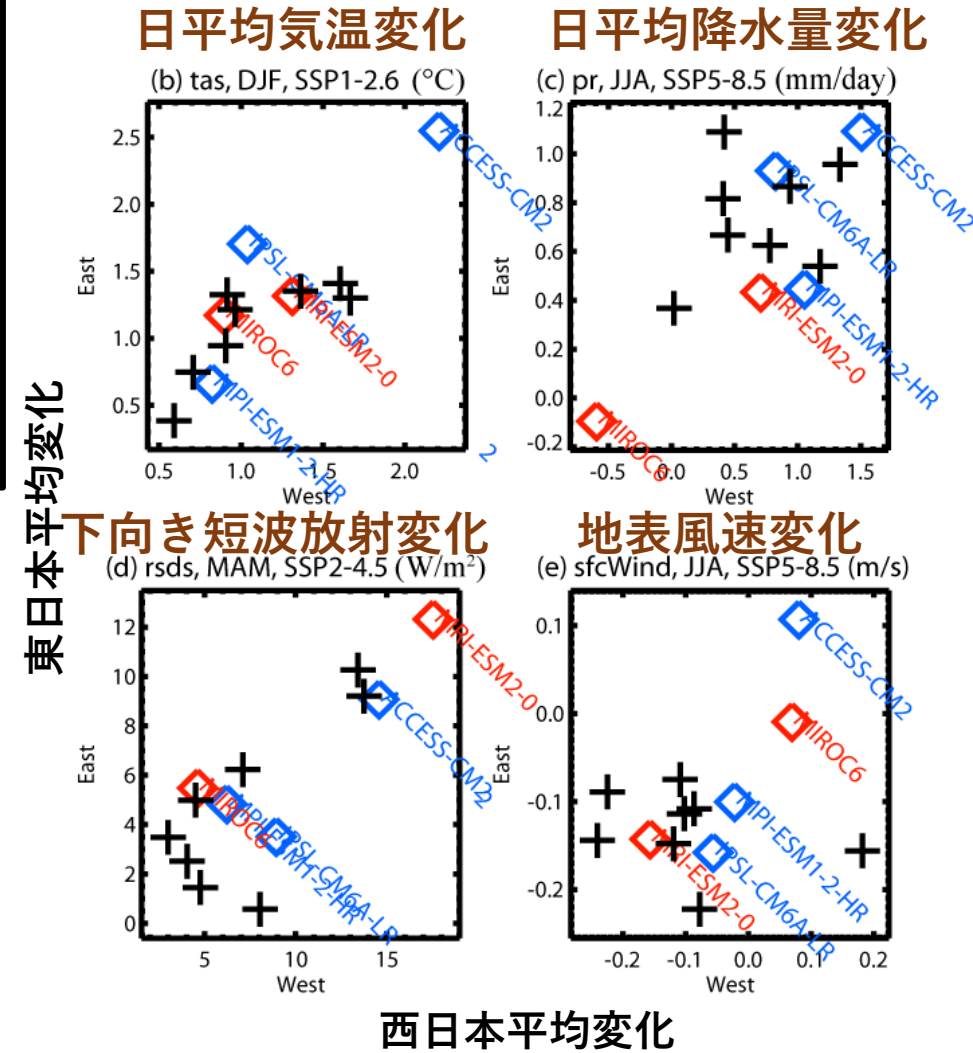
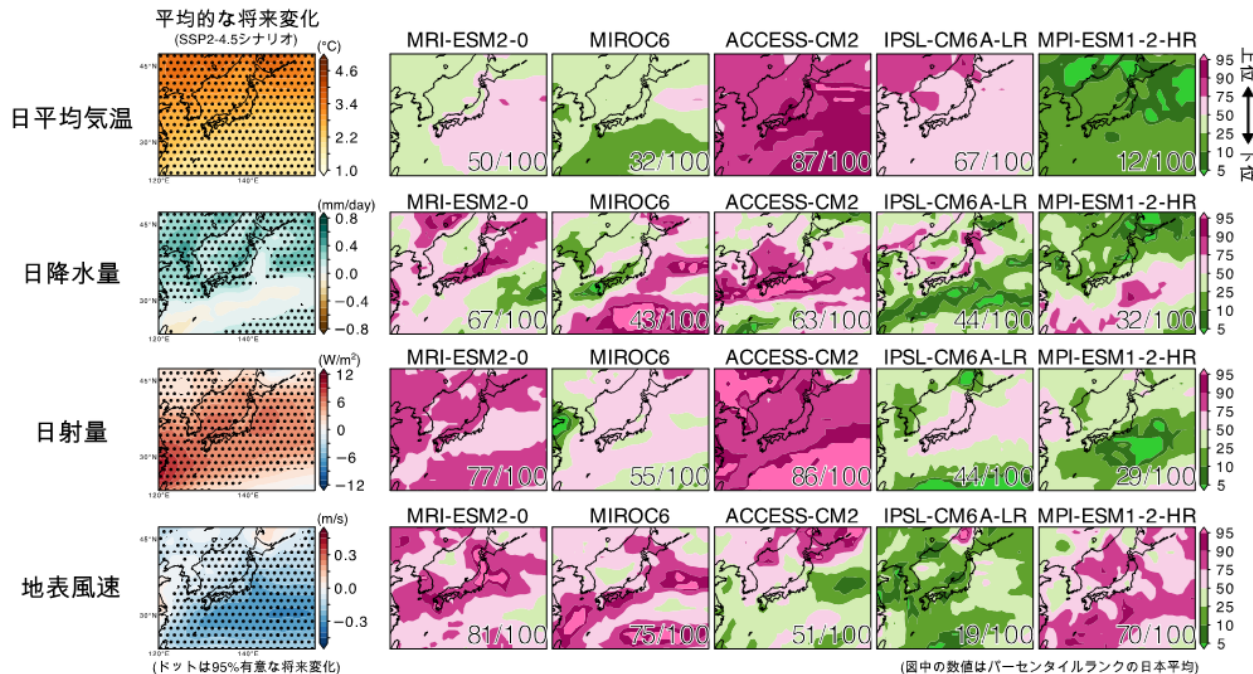
4. 研究開発内容

- 影響評価研究者へのヒアリングを行い、日本域で注目すべき異常天候現象や気候変数を抽出した。
- 既存の影響評価モデル研究で標準気候シナリオとして利用されてきた4つの代表GCMに大きな偏りがあることを示した。
- 新しい統計的手法を開発し、CMIP6モデル群から、影響評価モデルの入力データとなる気候変数のばらつきを適切にカバーできる5つの代表GCMを選択した。代表GCMの気候シナリオデータが推進費S-18等で共通気候シナリオとして採用された。
- 豪雨、猛暑、干ばつ、豪雪、強風など、評価・適応研究に求められる日本域の異常天候をターゲットとして、将来変化のストーリーラインを作成するため、高機能衛星観測などの観測データ、全球気象再解析データ、全球・地域気候モデル実験データなどを活用し、それぞれの地域的な異常天候と大規模場とを関係づけるプロセスを明らかにした。
- CMIP6マルチモデルによる将来予測から日本域の異常天候のストーリーラインを構築した。特に、新しい共通気候シナリオの元となった5つの代表GCMによるストーリーラインも構築し、共通気候シナリオの特性として影響評価研究者に渡した。

5-1.成果 (サブ4ハイライト) 影響評価の共通気候シナリオ(統計DS)作成のために CMIP6モデル群から5モデルを客観的に選ぶ手法を開発

1. S-18、NIES適応プログラムの影響評価研究者と連携。
2. 排出シナリオは、SSP1-2.6(低), SSP2-4.5(中), SSP5-8.5(高)。
3. 影響評価に良く用いられる**8変数(平均・最高・最低気温、降水量、短波、長波、湿度、風速)**に関して、**CMIP6のばらつきを均等にカバーしながら、現在気候のバイアスも少ない5モデル**を選択。
4. NIES適応プロで5モデルの統計DSデータを作成、A-Plat-proで公開。
 - **S-18 + NIES適応プロ** (参加者は約300名) の共通気候シナリオ
 - **文科省・気象庁の気候予測データセット2022の重要な要素**
 - **気候変動影響評価報告書2025(仮)の主要な根拠となる見込み。**

ミニアンサンプルの気候モデルによる将来変化のフルアンサンプルに対するパーセンタイルランク



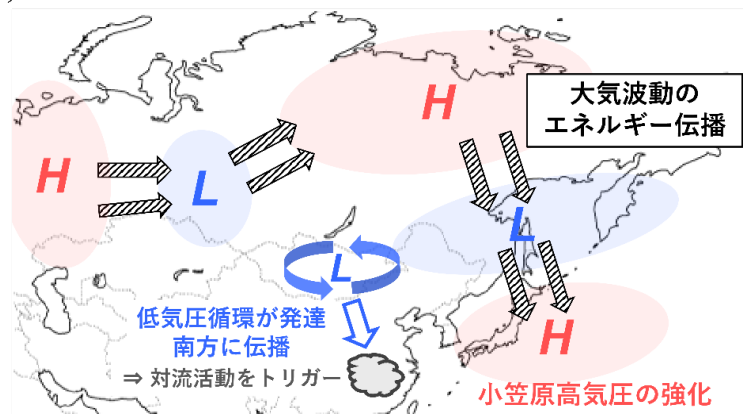
5-1.成果

(サブ・ハイライト)

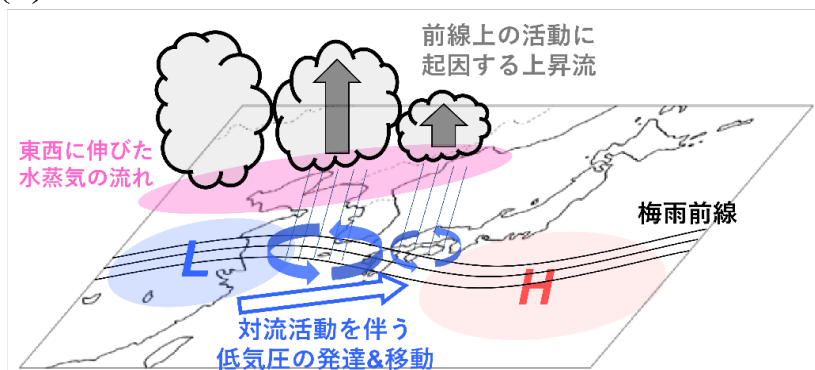
暖候期の広域豪雨のメカニズムを解明

①42年間の観測データから広域豪雨に共通する気象パターンを調べた。ユーラシア大陸上空の大気波動によるエネルギー伝播と中国南部の対流活動との相乗効果を指摘。将来変化の議論には、水蒸気量増加と前線の強化度合を把握することが必要である。

(a) 広域大規模豪雨発生14日前～3日前



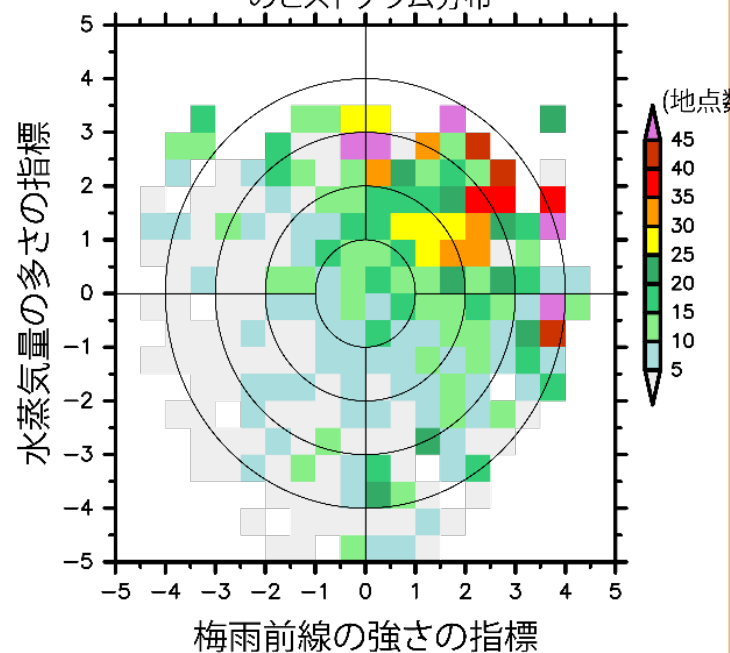
(b) 発生2日前～発生直前



Shibuya et al. (2021, J. Climate)

②広域豪雨に関連する大規模環境場を表す気象変数を2つの変数群（前線の強さの指標、水蒸気量の指標）として低次元化することができた。大規模環境場の低次元化は、今後、環境場と豪雨との時空間変動を統計的に捉えるための調査で有効活用できる。

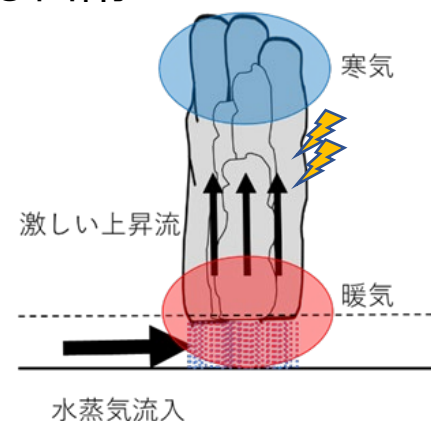
(a) AMeDAS観測地点が
極端降雨を「同時に」観測した地点数
のヒストグラム分布



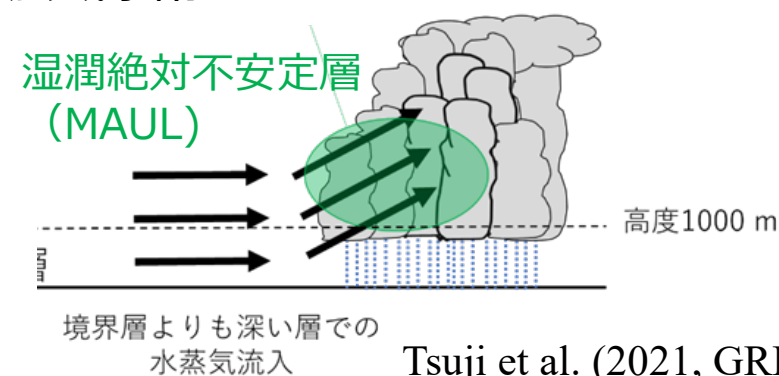
Shibuya et al. (2021, SOLA)

③大雨の前後の大気水蒸気収支解析から、広域豪雨をもたらす対流が、局地的な雷雨とは異なるメソスケールの「湿潤絶対不安定層」のメカニズムで生じていることを初めて統計的に指摘した。

局地的な雷雨



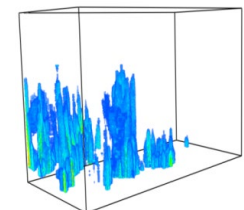
広域豪雨



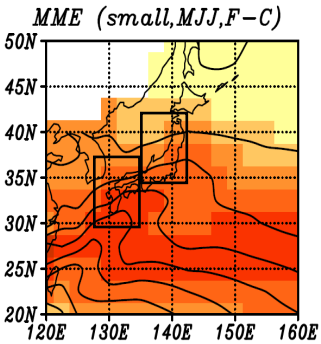
Tsuji et al. (2021, GRL)

5-1.成果 (サブ・ハイライト) 西日本・東日本の暖候期豪雨のストーリーライン作成

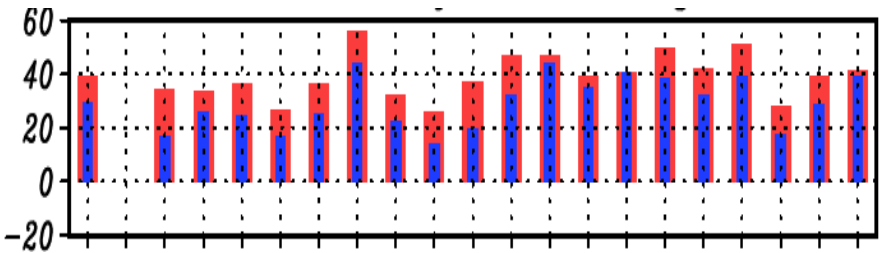
A. 小面積タイプ



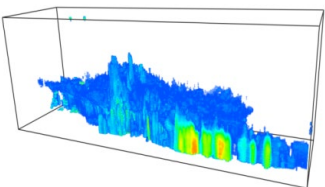
例：局地的豪雨



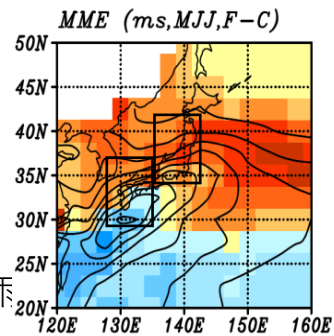
小面積タイプ将来変化 西日本 vs 東日本



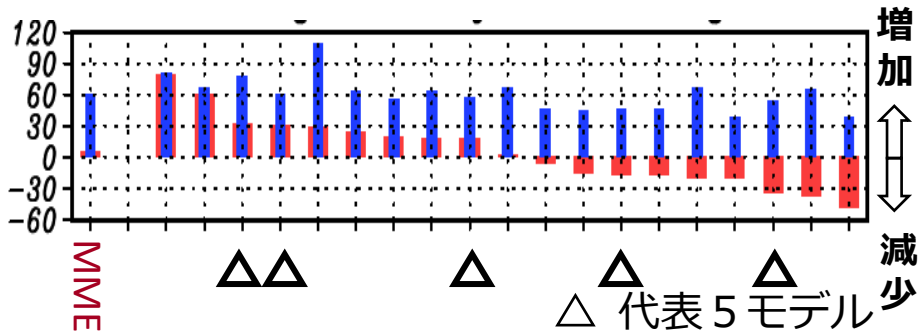
B. 組織化タイプ



例：梅雨末期の集中豪雨



組織化タイプ将来変化 西日本 vs 東日本



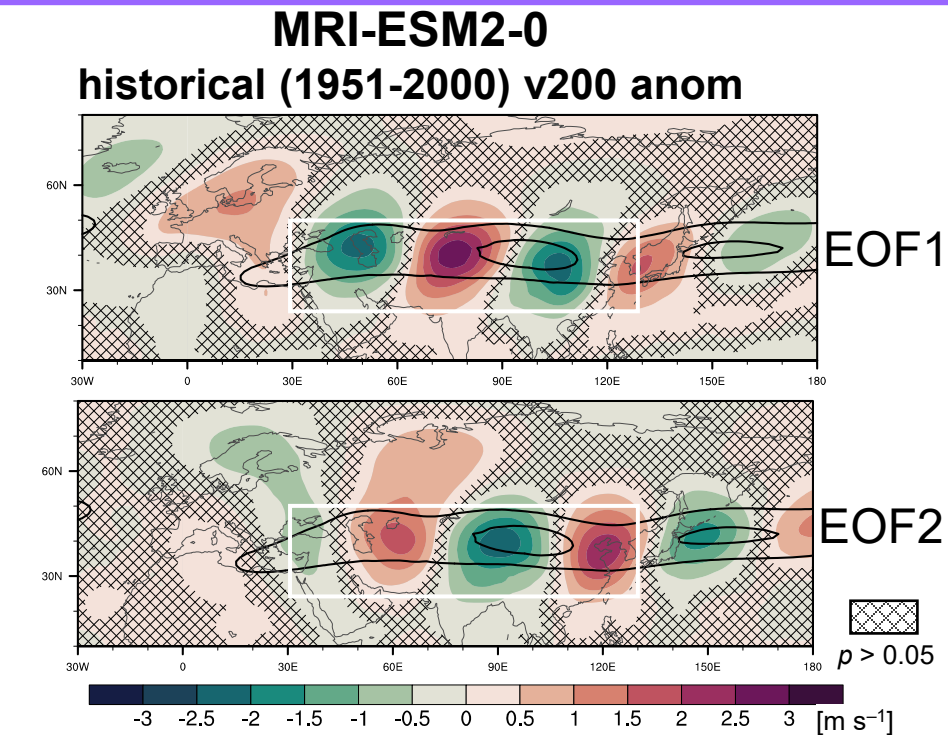
CMIP6	西日本		東日本	
	集中豪雨	局地的豪雨	集中豪雨	局地的豪雨
ACCESS-CM2	増加	増加	増加	増加
MPI-ESM1-2-HR	増加	増加	増加	増加
MRI-ESM2-0	微増	増加	増加	増加
IPSL-CM6A-LR	微減	増加	増加	増加
MIROC6	減少	増加	増加	増加
全19モデル平均	変化小	増加	増加	増加

④ 日本域暖候期の大雨の将来変化は、東日本と西日本で異なる。衛星データを利用して広域豪雨と局地的豪雨の違いを表現。

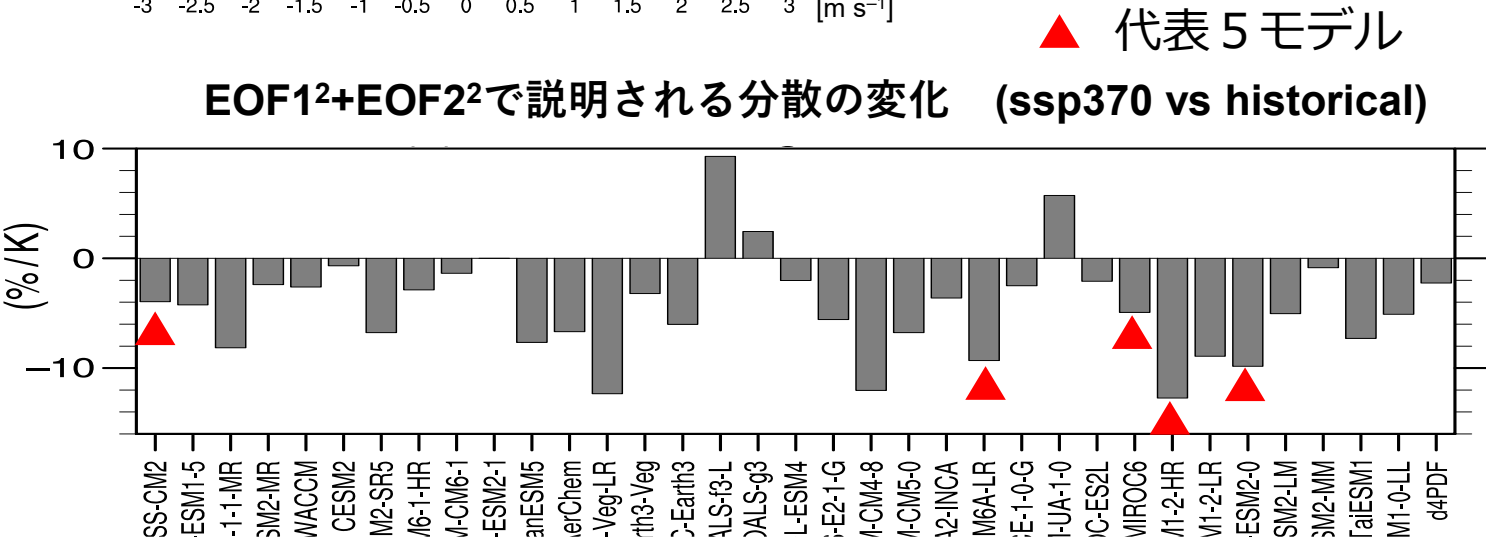
- CMIP6モデル群＋衛星
- ◎局地的豪雨（小面積）
日本全域・全モデルで増加
 - ◎広域豪雨（組織化）
東日本は全モデルで増加
西日本は半々

代表 5 モデル（△）はCMIP6 のばらつきをカバー
➡ ストーリーラインを構築

5-1.成果(サブ|ハイライト) シルクロードパターンの温暖化に伴う弱化: CMIP6解析



アジアジェット域上部
対流圏における夏季季
節平均南北風速の経年
変動に対する経験的直
交関数 (EOF) 解析



▲ 代表 5 モデル

⑤ **シルクロードパターン**
夏季アジアジェットの蛇行
東アジアにおける夏季異常気象
の主要因の一つ

6-8月平均場の**経年変動**を解析し、
シルクロードパターンの将来変化
についてストーリーラインを構築



代表5モデルを含むほとんどの
**CMIP6モデルで、シルクロード
パターンに伴う上空の大気循環偏
差は温暖化に伴い弱化**

しかし、シルクロードパターンが
もたらす**日本付近の地表気温・降
水変動は必ずしも弱化しない**

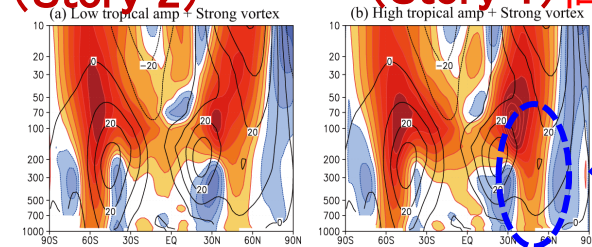
5-1.成果 (サブ2ハイライト) 日本域冬季・夏季の降水への成層圏・上部対流圏の遠隔影響ストーリーライン

① 成層圏・上部対流圏の変化によるストーリーラインを作成。
リモートドライバが日本の冬季の気象に及ぼす影響を調べた。

- ・ Tropical warming 熱帯上部対流圏温度変化
高度300hPa, 15S-15N平均の ΔT : 正ほど温度が高
- ・ Stratospheric vortex strength 成層圏極渦変化
高度10hPa, ΔU (60N-70N) - (50N-60N)、正: 極渦が高緯度でより強化

東西風の変化 (緯度—高度断面)

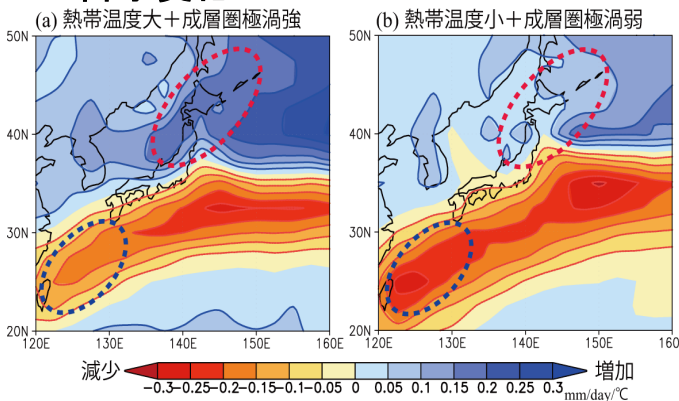
(Story 2) CMIP6 (Story 1) 高 ΔT_{300} & 強 Δ 成層圏極渦



成層圏-対流圏結合が強い
(25N-60N)

Story 1
降水変化

Story 3
降水変化

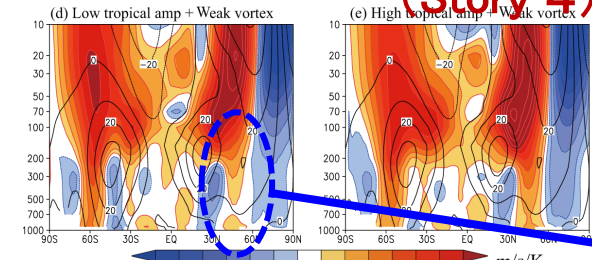


冬の日本域の降水変化にも差

MPI

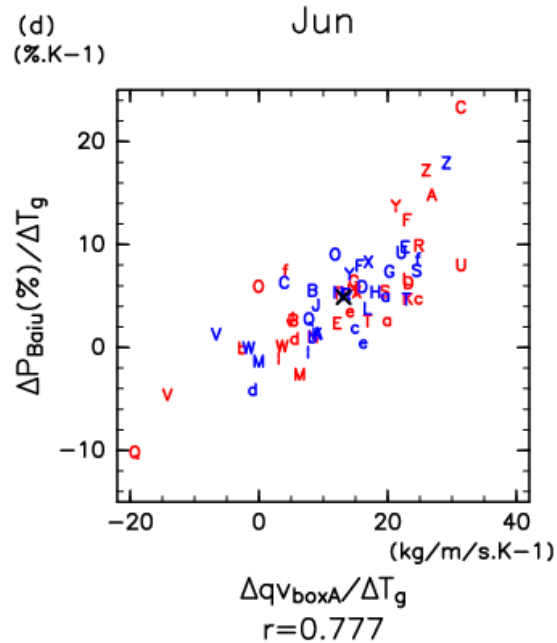
MIROC6,
ACCESS
マルチモ
デル平均

(Story 4)

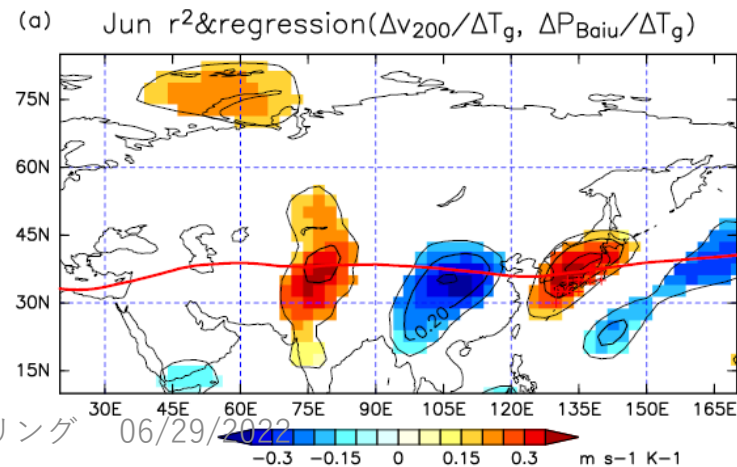


(Story 3) 低 ΔT_{300} & 弱 Δ 成層圏極渦 成層圏-対流圏結合が弱い

② リモートドライバが梅雨に及ぼす影響のストーリーラインを作成。



- ・ 縦軸: 梅雨降水の将来変化 (全球昇温1Kあたりの%) : 平均的には増だが減るものも
- ・ 横軸: 日本の南の海上の水蒸気フラックスの変化 (ほぼ下層の南風の変化と対応) : 降水の将来変化と良く対応。温暖化による降水増が増幅されるかの鍵 (Storylineの軸)



- ・ 梅雨の変化を左右するシルクロードパターン: (ジェット上の停滞波動の変化の重要性)

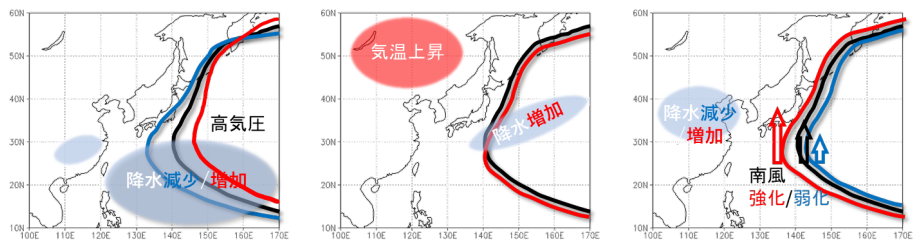
5-1.成果 (サブ3ハイライト) 日本域異常天候におよぼすアジアモンスーン気候パターンのストーリーライン

(Ose et al. 2022, JMSJ)

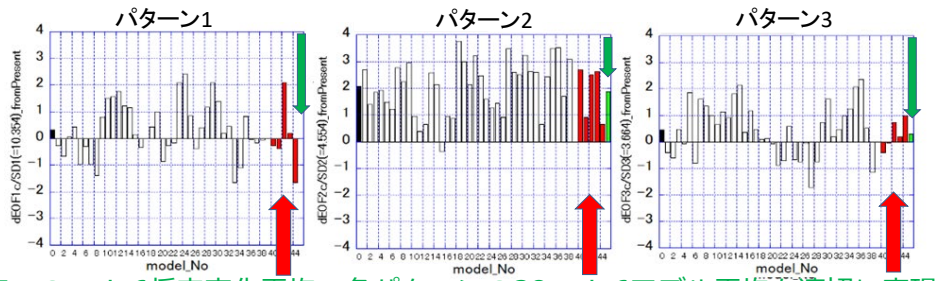
①**循環場からのモデル選択評価**：CMIP6多数気候モデルによる地球温暖化予測に対して統計解析を実施し、21世紀末の夏季東アジア海面気圧配置について**確かな将来変化パターンと不確実なパターンおよびこれらの要因について明らかにした**。影響評価モデルで用いる目的で**選択された5つのCMIP6気候モデルが**、日本付近の将来変化の観点で、多数モデルによる平均気圧配置パターンおよびそのまわりの**不確実性の幅を適切に表現していることがわかった**。

38CMIP6モデルの東アジア(10-50N, 110-160E)夏季海面気圧将来変化の統計解析

(a) パターン1: 高気圧が日本の南で変化する (b) パターン2: 高気圧の北への張り出しが弱くなる (c) パターン3: 高気圧全体の強さが変化する



38CMIP6各モデルの夏季海面気圧将来変化のEOF係数

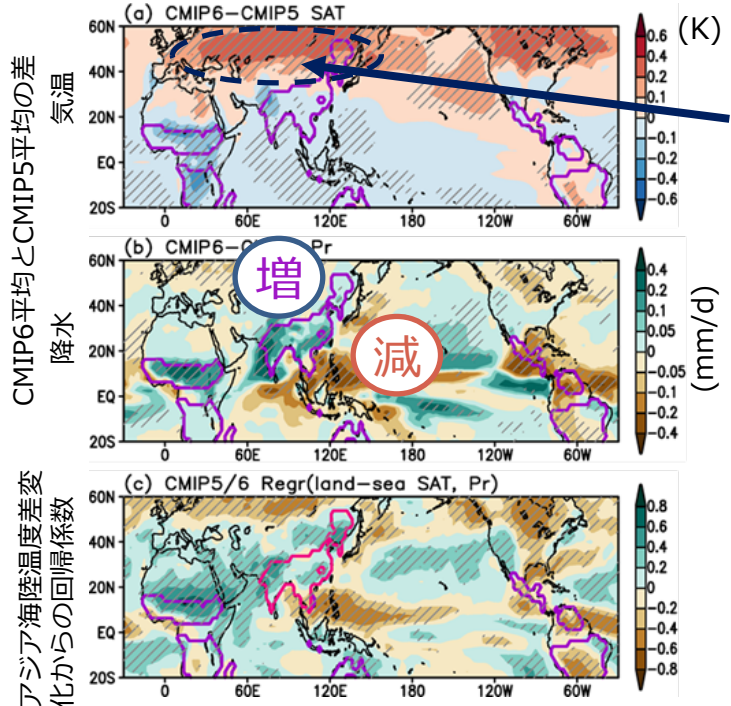


□ 38のcmip6モデルの各将来変化
■ 38のcmip6モデルの将来変化の平均

■ 5つのcmip6将来変化平均：各パターンの38cmip6モデル平均を適切に表現
■ 5つのcmip6 将来変化：正負を含めて、多様なモデルが選択されている

尾瀬

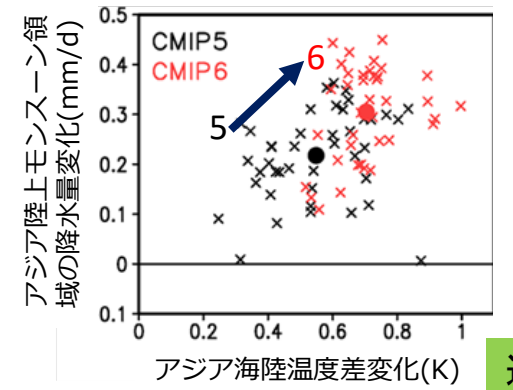
②**夏季東アジア降水量のCMIP5/6予測の違い**：東アジアではおおむね増加傾向が予測される点は共通だが、**CMIP6予測では大陸上で降水量増加が明瞭化する一方、海洋上（日本付近を含む）では降水量増加が抑制されていた**。この背景要因としてユーラシア大陸の大きな昇温の影響が示唆された。すなわち、CMIP6予測では**ユーラシア大陸昇温による海陸温度コントラストの増大により、アジアのモンスーン循環が相対的に強化され、その結果、東アジアでは降水量増加域の中心が大陸上にシフトしたと考えられる**。



いずれも、6～9月平均、全球1℃昇温相当

CMIP5に比べ**CMIP6**でユーラシア大陸の昇温量が増大

海陸温度差の増大
→ 陸上降水増大



遠藤

5-2. 環境政策等への貢献 (施策へ活用できる知見1)

1. 影響評価・適応策研究では、多数の気候モデルの予測データを全て使うことは難しい。そこで、多数の気候モデルの間の**予測のばらつきを偏りなくカバーする少数の代表モデルを客観的に選ぶ**手法を開発し、CMIP6モデル群から5つの代表気候モデルを選択した。代表モデルの予測データが、S-18プロジェクトをはじめ**日本の多くの影響評価・適応研究の共通気候シナリオとして活用**されている。
2. 日本域の広域豪雨の仕組みは局地的な雷雨と異なり、**大気上空までの深い層の水蒸気収束をモニターし大気の湿潤絶対不安定を検出することが重要**であることを指摘した。これは、防災施策の適切な策定に活用できる。
3. **集中豪雨**発生将来変化について、**東日本と西日本とで異なるストーリーライン**が示された。従来、集中豪雨が比較的少なかった東日本で、全てのモデルが一致して西日本並みの増加を警告している。西日本については、増加・減少を予測するモデルが半々であった。西日本の豪雨の変化は近傍の上空西風ジェットの変化に依存する。代表5モデルは、CMIP6全体のばらつきをよく捉えている。
東日本における広域豪雨の増加に備える施策の必要を示すと同時に、西日本の変化 については、大循環の変化をより精確に表現する気候モデル開発の重要性を示した。
4. 気候変動に伴う降水の変化の精確な把握は非常に困難であるが、**継続的な衛星降雨レーダ観測**は、長期変動を適切に捉えることができるため重要である。

5-2. 環境政策等への貢献 (施策へ活用できる知見2)

5. 我が国に暑夏・渇水や冷夏・コメ不作等をもたらす大気変動の遠隔影響のひとつに「シルクロードパターン」がある。これは欧州と我が国の夏季異常気象の連関を表し、ユーラシア大陸上空の偏西風の持続的蛇行で特徴付けられる。温暖化が進んだ世界ではこの偏西風蛇行自体は弱まる一方、それが日本の天候に与える影響は弱化せず、降水への影響は寧ろ強まることを指摘した。
6. 日本の夏季の降水、冬季の降水それぞれに対して、成層圏の極渦や上部対流圏の昇温の大規模な南北構造、上部対流圏の亜熱帯ジェットやその上の停滞波動などが、重要な役割を果たしていることがわかり、それぞれいくつかのストーリーラインに整理された。我が国の異常天候の将来変化に備える際に、成層圏や上部対流圏の循環をきちんと再現できるモデル選択の重要性が指摘された。
7. 冬季のバレンツ・カラ海の水氷減少に伴い冬季日本に異常寒波をもたらす「WACE (Warm Antarctic/Cold Eurasia) パターン」が世界のほぼ全ての気候モデルで過小評価されていることを指摘した。世界の気候モデルは、このような大規模場のバイアス解消のため、さらなる研究開発が必要である。
8. アジア気候の将来変化について、アジア域の気圧変動パターンを指標とすると、モデルの将来変化を適切にグループ分けできることが示された。

5-2.
一般向けパンフレット発行



今後の取り組み

新規課題2-2202
「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」

—気候変動に伴う異常天候の適切な評価と適応策に向けて—

世界の気候モデルが予測する将来変化のバリエーションを、様々な現象に焦点をあてて調べてみました。その中で例えば、短時間の豪雨と広域豪雨とは予測される将来変化が異なること：広域豪雨は東日本ではどのモデルでも増加が予測される一方で、西日本の広域豪雨は、モデルによって増加が予測される場合も減少が予測される場合もあることなどが見えてきました。また、遠くヨーロッパで発生する大気上空の大規模な波が東アジアまで伝わる様子がモデルによって異なるため、東アジアの大雨や熱波の将来予測の様相もモデルによってバリエーションがあることもわかりました。

社会が気候変動の影響を適切に評価して的確な適応策をとるためには、できる限り精度を高めた将来予測情報が必要となります。産業革命以降すでに一世紀半余が過ぎ、また、人工衛星による全球的な地球観測データが得られるようになってから50年ほどの時間が経ちました。現在、私たちは長期の観測データと気候モデル実験データとの双方を用いて、過去

の気候変動の再現性とメカニズムとを確認し、物理的により合理的な振る舞いをするという視点から予測実験を選択することができるようになっていと考えられます。モデルの粗い格子点では表現しきれない豪雨などの現象の変化の幅もそのメカニズムをより明快にしてモデルを選択することができるようになれば、よりの確な適応策をとるために役立つことが期待されます。

また一方で、異常天候がどのように変化するかという現象的な側面のみならず、それがどこでどのような洪水や渇水を引き起こすかという、より社会に繋がる水文モデルも構築されています。ただし、入力される気象情報が精確でないと予測される災害情報も正しく表現されないのは言うまでもありません。物理的により合理性のあるモデルからの予測情報を選択して水文モデル等に繋げ、より社会生活に密着した情報を出す方法を探ることも今後の重要な取り組みです。

5-3. 研究目標の達成状況

(全体)「目標を大きく上回る成果を上げた」 下記のように政策と科学双方に貢献した。

- 課題遂行中の比較的早い段階でCMIP6モデル群からモデル間のばらつきをカバーする5つの代表モデルを数理統計的に選択し、情報を影響評価研究者に渡した。
- これに基づく気候シナリオが推進費S-18等で共通気候シナリオとして採用され、多くの影響評価・適用研究で利用されるものとなった。
- 様々な異常天候の将来予測に関して、5代表モデルのばらつきについて物理プロセスを調査・解明しストーリーラインを構築・提供できた。
- 科学的成果を62報の査読誌に発表。報道発表109。一般向けのパンフレットを作成・公開した。

サブ1:「目標を大きく上回る成果をあげた」 豪雨、猛暑・干ばつ、異常寒波の将来変化についてストーリーラインを構築。課題を効果的に総括して影響評価研究者等に成果を繋げるための貢献をした。

サブ2:「目標を上回る成果をあげた」 対流圏上部や成層圏の循環の変化が日本の夏季・冬季の降水に与える遠隔影響についてCMIP6モデルのストーリーラインを構築。課題の総括に協力した。

サブ3:「目標を上回る成果をあげた」 ユーラシア大陸やチベット気候に注目し、気候シナリオおよび影響評価に差をもたらす不確実性の大きい気候場の温暖化応答パターンを明らかにしてストーリーラインを構築。課題の総括に協力した。

サブ4:「目標を大きく上回る成果をあげた」 課題遂行中の早い段階でCMIP6 を代表する5モデルを数理統計的に選択し、これに基づく気候シナリオがS-18等で共通気候シナリオとして採択された。影響評価研究者との連携に主要な役割を果たし、課題の総括に貢献した。

6. 活動報告・研究成果の発表状況

- 研究会議開催

- ◎研究打ち合わせ会議 2019/4/16, 2019/7/18, 2020/3/19, 2020/3/31, 2021/6/25

- ◎アドバイザリー会合 2019/11/13, 2020/11/12, 2021/9/9

- ◎環境省との意見交換会 2021/7/13

- ◎国内会議主催

- ・ 2021.12.6 三重大学 日本気象学会2021年度秋季大会 専門分科会
「気候変動に伴う異常天候のストーリーライン構築について」

- ◎国際会議主催

- ・ 2020.7.12-7.16 JpGU-AGU Joint Meeting 2020, Virtual, A-AS02 Session
“Abnormal weathers and disasters in urban environments in East Asia related to climate change”
- ・ 2021.2.22, 2.24 Online International Workshop 2021（7か国、56名参加）
“Storyline Approach on Regional Extreme Weather and Their Future Change for Better Adaptations to the Climate Change”

- アウトリーチ活動（一般向け講演他）「国民との対話」82件+パンフレット発行

- マスコミ等への公表・報道等 新聞・テレビ報道 109件 豪雨、猛暑など異常天候、および気候変動について

- 研究成果発表

- ◎査読付国際学術誌論文 62報 /3年 Impact Factor>5.0誌 23報

- ◎口頭発表（学会等） 156件

- IPCC AR6 引用 6報 （参画メンバー論文の総引用数：106報）

- 受賞 5件