



(独) 環境再生保全機構 環境研究総合推進費 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」
2022年 3 月



多様な気候モデル予測から読み取る
将来の日本の異常天候―

温暖化4

暑いだけじゃない



地球温暖化4

！多様な気候モデル予測から読み取る
将来の日本の異常天候！

目次

はじめに	1
マルチモデルを利用した将来予測	3
気候変動予測から影響評価・適応研究へ	5
ユーラシア大陸から伝わる遠隔気候影響	7
広域豪雨とその将来変化	9
上空の大気循環の影響：梅雨の変化	11
中部日本の冬の降水量の変化	12
日本域の降水分布の変化	13
日本近海の夏季異常高温	14
北極海から伝わる遠隔気候影響	15
夏季東アジアの気圧配置	17
コラム1：九州で観測される豪雨の仕組み	19
コラム2：近年の梅雨前線の活発化	20
今後の取り組み	21
記事に関連する成果論文・研究参画機関	22

謝辞：この冊子で紹介した研究は、(独) 環境再生保全機構の環境研究総合推進費(JPMEERF20192004) 課題 2-1904「気候変動影響評価のための日本域の異常天候ストーリーラインの構築」(代表：高薮 縁 東京大学大気海洋研究所) の成果の一部です。

研究に使用したCMIP6実験結果は世界各国の気候モデル開発研究グループの協力の下、集約されたものです。また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)と米国 NASA による熱帯降雨観測計画(TRMM) 衛星、全球降水観測計画(GPM) 主衛星などの衛星観測降水データ、気象庁の全球再解析データ(JRA55) など、様々な機関の協力の下に作成・公開されているデータを使用しています。d4PDF は文部科学省による複数の学術研究プログラム(「創生」、「統合」、SI-CAT、DIAS) 間連携および地球シミュレーターにより作成されたものです。東京大学大気海洋研究所特任研究員の木村詞明博士には、大変貴重なオリジナル写真のご提供をいただきました。

はじめに

2021年8月に国連気候変動に関する政府間パネル(IPCC) は第6次評価報告書(AR6)を発行し、その中で人間活動による気候変動は確実に起こっていると断定しました。地球温暖化に伴う気候変動は、地球全体の平均気温が産業革命以来すでに約1.1度上がったというだけでなく、これまでに経験したことのないような大雨や干ばつを世界の各地に引き起こしています。日本では2018年の西日本豪雨と続く猛暑とが甚大な被害をもたらした後も、2019年東日本台風、2020年の球磨川の氾濫、2021年の熱海の土砂崩れと毎年深刻な豪雨災害が発生し、社会を悩ませています。最近ではドイツや中国でのこれまでにない規模の洪水や、ヨーロッパでの深刻な渇水が報告され、世界でも気候変動の影響の大きさに警鐘が鳴らされています。

このように、気候変動は異常天候の増加という形で既に私たちの生活に甚大な影響をもたらしています。世界経済フォーラムが発行する「グローバルリスクレポート2021」は、これから10年で人間社会と経済に最も深刻な影響を与える2つのトップリスクは、「感染症」と「気候変動対策の失敗」であると指摘しています。気候変動の影響がすでに顕著な現在、その程度をいかに抑制するかの対策に加え、その影響を正しく評価し適切な対策をとることがたいへん重要です。

地球温暖化に伴う将来の気候変動を予測するとき、大気・海洋・陸面を格子化し物理量の予報方程式を時間発展的に解く気候モデルを用いますが、世界から集めた気候モデル実験結果の将来予測には様々な部分に差が見られます。私たちは現在、環境研究総合推進費課題「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」を計画・推進しています。この研究では、CMIP6モデル群(3頁参照)から将来予測のバリエーションを代表できる5モデルを選択する手法を開発しました。その5つのモデルが、日本域の異常天候に関する将来変化についてどのように異なる「ストーリー」をもたらすかを調べています。そしてその情報を地球温暖化影響評価研究者および政策決定者に提供します。私たちの社会が将来どのような気候に適応していかなければならないか、よりの確かな影響評価と適応策を可能にするために、そのバリエーションの様相を含めて伝えていくことが目的です。この冊子では、研究成果の一部をご紹介します。

「暑いだけじゃない地球温暖化4」編集委員長 高薮 縁

東京大学
大気海洋研究所の
広報大使です。
みんなといっしょに
勉強します。

広報大使
メーユ
(ひょうたん島生まれ)

将来の
気候変動について、
分かりやすく
説明していきますね。

解説
ゆかり先生
(気象学者)



マルチモデルを利用した将来予測

気候モデルとは・CMIP6とは

将来気候を予測するためには、気候モデルを使います。気候モデルは物理法則を表す数式のかたまりです。大きく分けて、大気の状態、海の状態、氷や陸面の状態をそれぞれ予測する3つのかたまりとそれらを繋ぐかたまりからできています。たとえば大気モデルは大気を水平方向に約100km×100km、鉛直方向に約1kmの直方体(格子)に分け(図1)、それぞれの格子での現在の風、気温、気圧、湿度の状態から約10分後の状態を予測する数式です。

風の変化を表す数式は、実は運動の第2法則 $ma=f$ (質量 m の物体が力 f を受けるとその力の方向に加速度 a で加速する) です。けれども、投げたボールの落下点をほぼ正確に予測できるのとは異なり、風の場合は、風自身が風を加速

するといった効果をもつため、ある時の状態にほんの少しの違いがあっても、その違いが時間と共にどんどん拡張する癖があり、予測がしにくくなっています。それに加えて、たとえば大気中の塵や雲や雨などはミクロな現象であり、100km に一つの値では表現できません。それが放射熱や潜熱を通じて気候を変えるのでとてもやっかいです。そしてそのような効果を表現する方法はモデルにより様々であるため、モデルの予測する将来はなかなかぴたりとひとつには決まらないのです。

世界では60個以上もの気候モデル(表)が開発されていますが、上のような理由で将来気候の予測結果は少しずつ違います。「第6次結合モデル相互比較計画(CMIP6)」という国際的

大気モデルの格子イメージ

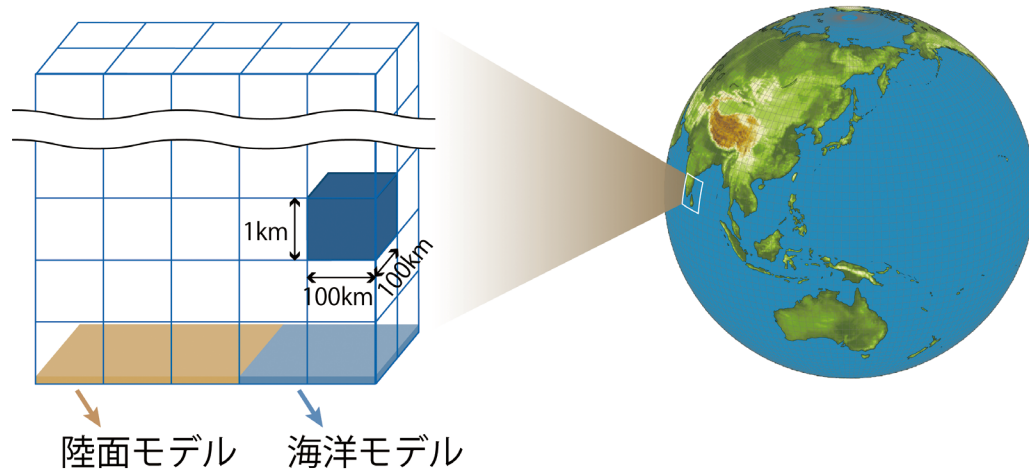
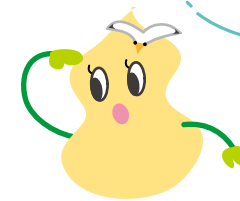


図1：気候モデルの格子イメージ。

これから
解説していくね。

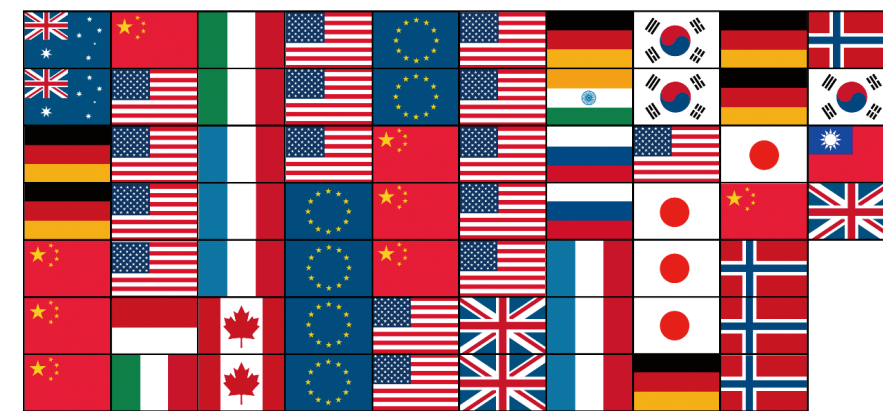


気候モデルって
なあに？



な研究計画は、将来の気候変化をより科学的に確からしく議論するため、これらの多くのモデルで統一的行った実験結果を集約しました。2021年8月に発行された「気候変動に関する

政府間パネル(IPCC)」の第6次評価報告書は、CMIP6の実験結果をひとつの科学的根拠として使っています。



表：CMIP6に参加した67個の気候モデルの国と地域。

d4PDFとは

海面水温や海水分布を入力値として与え、大気モデルシミュレーションを多数回繰り返して作成されたデータセットです。地球全体のシミュレーションデータは気象庁気象研究所の解像度

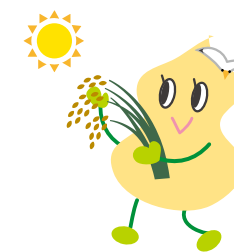
約60kmの大気モデルに基づいており、1951～2011年の条件を与えた過去気候シミュレーション(100回)や、4°C温暖化した世界のシミュレーション(90回)などから構成されています。

ストーリーライン手法とは

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違ってきます。これは特に大気の循環や海洋の流れなどの将来変化の様相が、モデルによって異なりやすいからです。このことは、市民、政策決定者、様々な産業界、影響評価研究者などの利用者に対して気候変動予測の情報を提供する際に、気を付け

なければなりません。つまり、気候モデルによる将来予測のバリエーションについての情報も正しく伝えることによって、情報の利用者が様々な状況に対応できるようにすることが大切です。そのために、起こり得る将来変化について、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伝えることを「ストーリーライン手法」と呼びます。

気候変動予測から 影響評価・適応研究へ



農業や漁業の将来予測
にも役立つのね。

影響評価・適応研究のための代表気候モデルを選ぶ

気候変動の対策という、まず二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量を減らすこと(緩和策)を思い浮かべる方が多いかもしれません。緩和策は問題の原因を直接抑える重要な対策ですが、緩和策を行っても生じてしまう気候変動の影響を低減するための対策(適応策)もまた必要です。例えば、将来、洪水のリスクが上がることが予測されるならば、その予測に基づき、災害を軽減するため前もって河川整備を行うことなどが適応策になります。日本では、気候変動適応法(2018年施行)のもと、おおむね5年毎に気候変動の影響を評価し、気候変動適応計画を変更していくことになりました。

しかし、気候モデルによって気候変動予測の結果には差があります。複数の気候モデルの予測をもとに影響を評価し、対策を考える必要がありますが、たくさんの気候モデルの予測を全

て使って影響評価を行うことは大変ですし、それぞれへの対策を考えるのも困難です。そこで私たちは、CMIP6の多くの気候モデル(3頁参照)の予測の幅を捉えることのできる少数の気候モデルのセットを選択する手法を開発しました。

そうして選ばれた5つの代表モデルが図1において赤と青で色付けした ACCESS-CM2(オーストラリア)、IPSL-CM6A-LR(フランス)、MIROC6(日本)、MRI-ESM2.0(日本)、MPI-ESM1-2-HR(ドイツ)です。わずか5モデルですが、東日本と西日本の気温と降水量の予測に関して、全てのモデルの予測の幅をよく捉えています。気温と降水量のほかに、影響評価でよく利用される日射量、地上風速など全部で8つの変数に関して、気候モデルの予測幅をよくカバーしていることが確認されています。

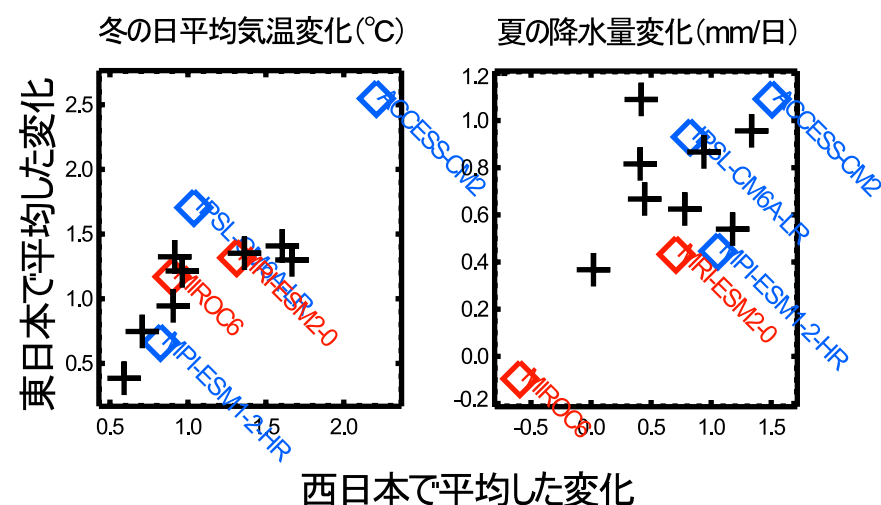


図1: 5つの代表気候モデル(赤と青)とそれ以外のCMIP6モデル(黒)の気温変化(左)と降水量変化(右)のばらつき。代表モデルに含まれる日本で開発された2モデルを赤で示している。

気候シナリオデータ

農業や健康など様々な研究分野で、気候変動の影響を評価するための「影響評価モデル」が開発されてきました。影響評価モデルは、気候モデルの予測データを入力して、例えばお米の収量や熱中症の危険度などの、社会に直結した将来予測データを出力します。国立環境研究所では、入力とする5つの代表気候モデルのデータを使いやすいように加工した「気候シナリオデータ」を2021年5月に公開しました(図2)。このデータは、既に多くの影響評価モデルの共

通の入力データとして利用され始めています。今後、このデータに基づいて様々な分野の影響評価が行われ、それらを基に国や自治体が対策を検討することになります。

5つの代表気候モデルの予測には幅があるため、影響評価にも幅が生じます。本プロジェクトでは、ストーリーライン手法を使って、これらの代表気候モデルが持つ将来変化の幅の意味をより分かりやすく影響評価の研究者に伝えることを目指しています。

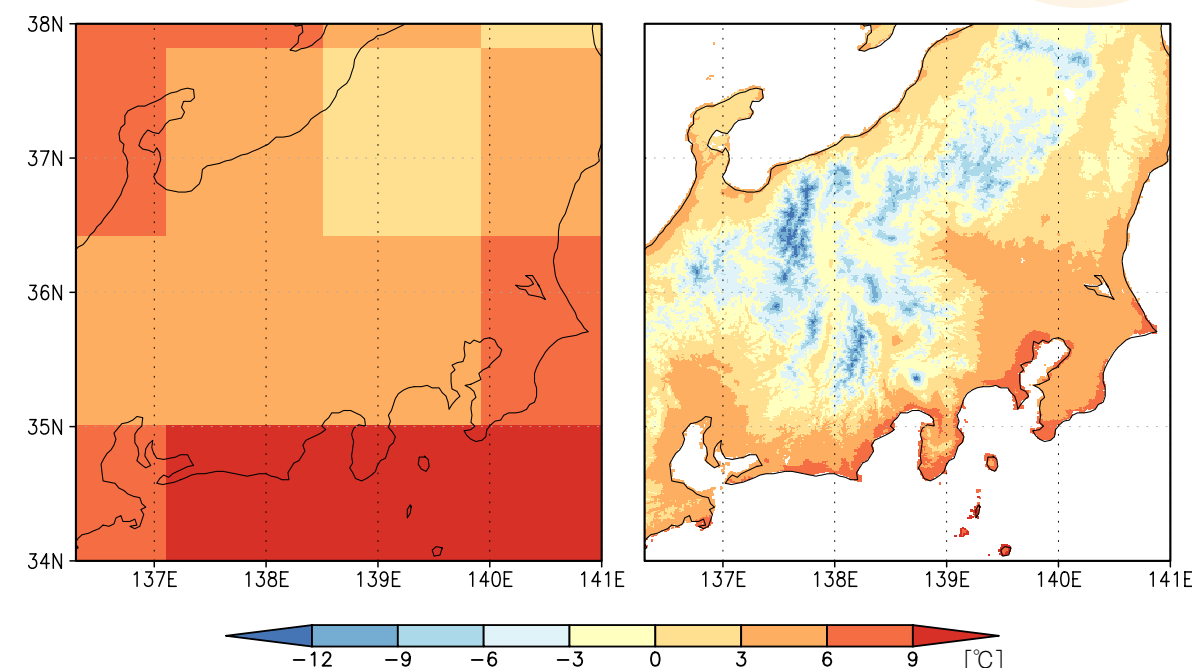


図2: 国立環境研究所で公開されている気候シナリオデータ(気候変動予測データを影響評価モデルで使いやすいように加工したもの)の例。左図は、一つの気候モデルのある日の気温データ。右図は、左図のデータを1km解像度に直した上で、観測データと比較して誤差を修正したもの。影響評価モデルは、気候モデルの予測データそのままではなく、このように加工されたものを入力データとして用います。(https://www.nies.go.jp/whatsnew/20210628/20210628.html)

(成果論文 1、2)

ユーラシア大陸から伝わる 遠隔気候影響

ジェット気流の蛇行と日本の夏の異常天候

夏に日本に異常天候をもたらす要因の一つに「ジェット気流の蛇行」があります。ジェット気流とは、高度10～12kmを中心とし、亜熱帯～中緯度域に強風軸をもつ強い東向きの風です。図1は、猛暑となった2018年7月のある期間に観測された上空の風速を描いたもので、地中海から日本列島まで吹く「アジアジェット」の蛇行が明瞭です。朝鮮半島付近ではジェット気流が大きく北偏し、これに伴い地表の太平洋高気圧が本州付近に張り出したことで、7月23日には熊谷市で日本の歴代最高記録となる気温41.1℃を記録しました。これに先立つ7月上旬には西日本を中心に甚大な被害となった※気象庁により「平成30年7月豪雨」と命名されています。

2018年西日本豪雨※が発生していますが、そのとき、ジェット気流は図1とは対照的に朝鮮半島付近で南偏するように蛇行していました。

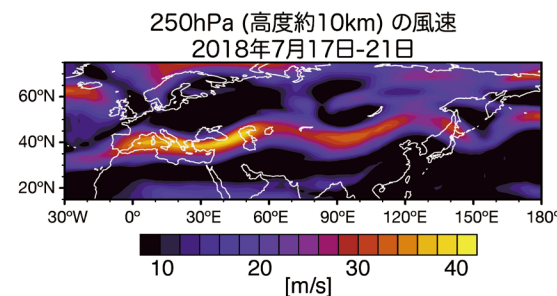


図1: 2018年7月17～21日の高度約10kmでの平均風速。

シルクロードテレコネクションとその将来変化

このようなジェット気流の蛇行は、「ロスビー波」と呼ばれる大気の変動をもたらします。さらにジェット気流には、光ファイバーのように、ロスビー波を捉えて西から東へと効率よく伝播させる性質があります。このため、地中海やヨーロッパでの大気循環の揺らぎは、アジアジェットを伝わるロスビー波の形で日本にまで影響します。一般に、ある場所での大気変動が、そこから遠く離れた場所での大気変動を駆動する現象を「テレコネクション」と呼びます。特に、夏のアジアジェットに沿って伝わるロスビー波が、ジェット気流の蛇行を伴って引き起こすテレコネクションは「シルクロードテレコネクション」と呼ばれます。

シルクロードテレコネクション自体は温暖化とは無関係に起こる自然変動ですが、温暖化した世界では、その振幅、持続性などの特性が変わる可能性があります。CMIP6気候モデルによる予測では、5つの代表気候モデル(5頁参照)を含むほとんどで、温暖化に伴ってシルクロードテレコネクションが弱まることわかりました(図2)。ただし弱化的程度にはモデル間でかなりの違いがあります。

大気循環モデルシミュレーションデータセットd4PDF(4頁参照)の解析から、弱化的要因として以下が示されています。①シルクロードテレコネクションの発達には、上空のジェット気流の蛇行と対流圏下層の高・低気圧との鉛直

遠く離れたヨーロッパのお天気が、
日本のお天気にも影響するよ。

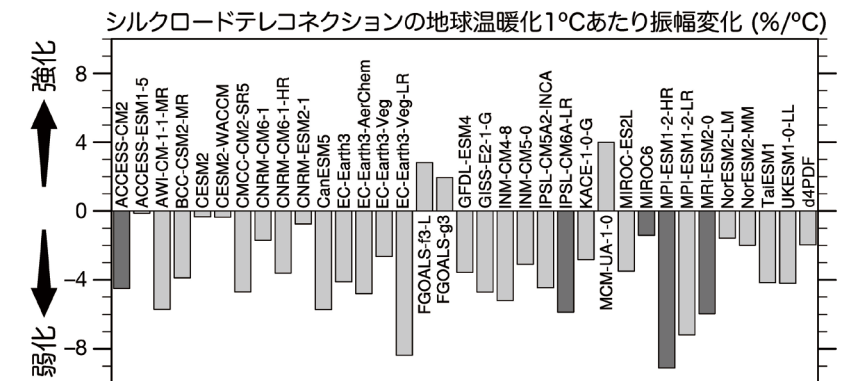
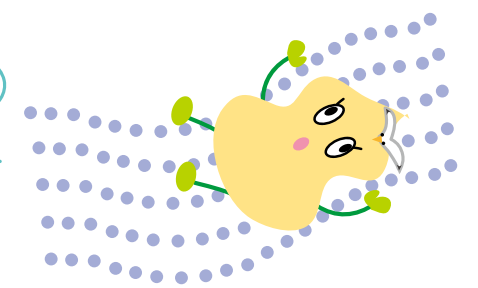


図2: CMIP6モデル及びd4PDFにおけるシルクロードテレコネクション(6～8月平均、高さ約12km)の地球温暖化1℃あたりの振幅変化(％/℃)。5つの代表気候モデルを濃色で示す。

d4PDFによる現在気候シミュレーションにおけるジェット気流とその変動、及びそれらの温暖化に伴う変化

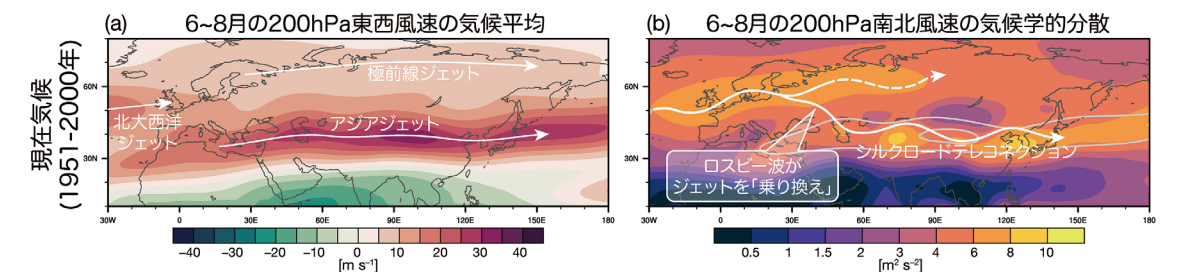


図3: d4PDFにおけるジェット気流とその蛇行の振幅。6～8月の200hPa(高度約12km)における50年間の(a)平均東西風速と(b)南北風速の分散(年ごとの揺らぎの大きさ)。(b)の灰色の等値線は(a)の平均東西風速に対応し、アジアジェットの位置を表す。現在の気候では、(b)に示したようなロスビー波の「乗り換え」がシルクロードテレコネクションを発生させることがあるが、温暖化すると北大西洋ジェットとアジアジェットが南北に離れるため、乗り換えしにくくなる。

方向の相互作用が重要です。温暖化すると、地表よりも対流圏上空の方が大きく昇温するとともに、ジェット気流の高度が上昇します。これは上空のジェット気流と下層の高・低気圧との相互作用をしにくくするため、シルクロードテレコネクションが発達しにくくなります。②シルクロードテレコネクションは、上流の北大西洋ジェットから伝わるロスビー波がヨーロッパ付近でアジアジェットに「乗り換え」ることで発達することがよくあります(図3)。温暖化に伴って、北大西洋ジェットは北上し、一方でアジアジェッ

トが南下することをモデルは示しています。これによって2つのジェット気流が離れ、乗り換えが起こりにくくなると考えられます。以上のような仕組みで、将来のシルクロードテレコネクションが弱まること予測されます。

なお、シルクロードテレコネクションに伴う上空の大気循環変動が弱まったとしても、その日本への影響は必ずしも弱まるとは限りません。特に日本付近の降水への影響は、ほとんどのCMIP6モデルで、温暖化によって強まることがわかりました。

(成果論文 3)

広域豪雨とその将来変化



梅雨期の広域豪雨をもたらす環境

大雨が広範囲に長時間降り続くと、浸水被害や土砂災害が広域的・同時多発的に発生する可能性が高まり、より甚大な被害に繋がる恐れがあります。2018年西日本豪雨はその極端な例です。私たちは42年間の気象庁アメダスデータを利用することによって、過去の大規模な豪雨に共通する気象パターンを調べました。

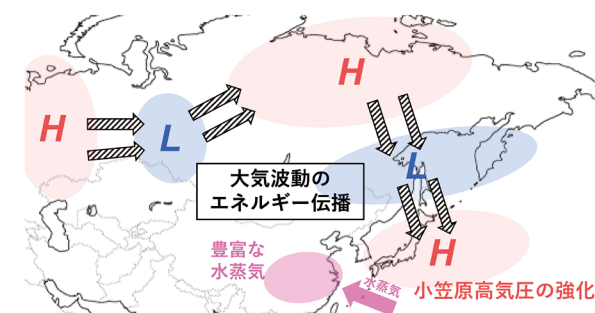
広域な豪雨発生の一週間以上前と発生数日前において、それぞれ特徴的な気象パターンが見つかりました。まず現象発生14日前から3日前には(図1a)、高気圧(H)・低気圧(L)の列を伴う大気の波(ロスビー波、7頁参照)が、ヨーロッパからシベリア高気圧を経由してエネルギーを運搬し、日本の南海上の小笠原高気圧を強めていたことが分かりました。強められた小笠原高気圧は南から湿った空気を運び、中国大陸上の大気を湿らせませす。豪雨をもたらす低気圧は、大陸上の豊富な水蒸気に伴う対流活動に伴って発生・発達し、勢力を強めながら梅雨前

線に沿って東に移動していたことが分かりました(図1b)。特に低気圧の発生・発達・移動の仕組みには、「中国大陸上の豊富な水蒸気」と「梅雨前線」の双方の存在が重要であることが分かりました。

この結果は、今後日本で発生する可能性のある広域豪雨現象の理解に貢献できます。また広域豪雨の将来変化には、大気中の水蒸気量の増加だけではなく、梅雨前線の強さや位置の将来変化についても考える必要があることを示しています。



(a) 広域豪雨発生14日前～3日前



(b) 発生2日前～発生直前

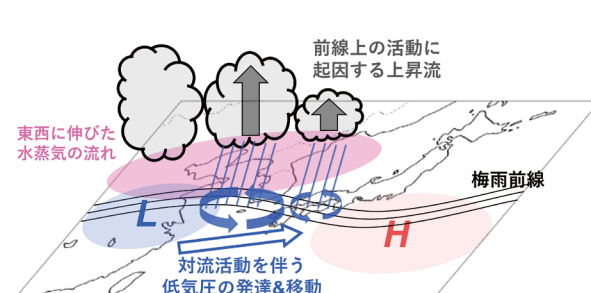


図1：西日本域で発生する広域豪雨に共通する気象パターンの概念図。それぞれ(a)広域豪雨発生14日前～3日前、(b)発生2日前～発生直前。

広域豪雨の将来変化予測

広域豪雨は、線状降水帯などの組織化した降水システムによってもたらされます。私たちは、全球降水観測(GPM)主衛星による観測データと気候モデル予測データとを組み合わせることにより、組織化した降水システムによる雨の将来変化の推定を行っています(暑いだけじゃない温暖化3参照)。最新の19個のCMIP6気候モデルを用いた予測結果が図2です。日本海側や東北地方、関東など、日本の多くの地域では、将来、組織化した降水システムによる広域豪雨の増加が見込まれています。

組織化した降水システムによる雨について地

域別に詳しく調べると、東日本と西日本(図2ボックス)とでは将来の予測結果に違いが見られます(図3)。東日本では、どのモデルでも増加予測となっています。現在は、広域豪雨は西日本で多いですが、将来は、東日本でも現在の西日本と同程度くらいまで増加する可能性があります。一方、西日本では、組織化した降水システムによる広域豪雨の予測結果はモデルごとに違っています。この予測の違いは上空のジェット気流の変化の仕方に大きく依存していることが、私たちの解析から分かってきました。

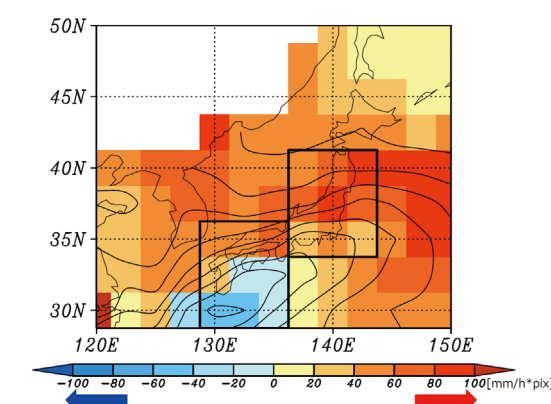


図2：GPM主衛星搭載降水レーダ観測と19個のCMIP6気候モデル予測とを組み合わせ推定した、線状降水帯などの組織化した降水システムによる現在の雨量(黒等値線：1980～2005年平均)とその将来変化(色：2075～2100年平均と現在の差)。19個のモデル平均値が示されている。

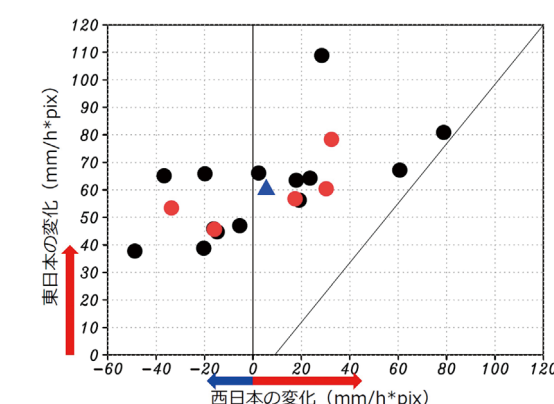
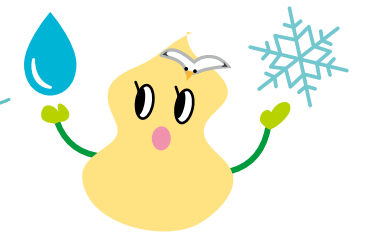


図3：各CMIP6気候モデルとGPM主衛星搭載降水レーダ観測から推定された、組織化した降水システムによる雨量の将来変化。図2の四角で囲まれた西日本(横軸)と東日本(縦軸)の変化。●は5つの代表気候モデルの値(5頁参照)、●はその他のモデルの値、▲は19個のモデル平均値を示す。

(成果論文 4、5、6)

上空の大気循環の影響

温暖化が進むと雪の
予測が難しくなりそう…



気候モデル群が予測する梅雨の変化

日本の四季の中で、梅雨は雨季という独特の位置を占めています。それは恵みの雨をもたらす一方で洪水を引き起こすこともあります。温暖化の進行に伴って梅雨はどのように変化するのでしょうか。

地球全体の平均で見ると、温暖化が1℃進むと年間の降水量は、1～2% 増えるの見積もられています。しかし、降水の増え方は一様ではなく、もともと多いところで増えやすいことが、気候モデルによる予測や理論により指摘されています。梅雨はその余計に増えやすい側にあるのですが、気候モデルは多様な将来予測を示し、梅雨の雨がむしろ減る予測をしているモデルもあります。

私たちの研究により、梅雨の将来変化の気候

モデル間の違いは、日本の南海上の南風の将来変化の違いとよく関係していることが明らかになりました(図1左)。ではどうして日本南海上の南北風の将来予測には幅があるのでしょうか。私たちは、それがユーラシア大陸から伸びる上空の長大な大気の波の列に影響されていることを突き止めました(図1右)。つまり、梅雨期の日本域上空の風が現在より南風になるような将来変化パターンを示す気候モデルほど、将来の梅雨の降水量がより増加すると予測しているということです。このように、日本の降水量の将来変化の幅は、遠方と繋がる大気の上空のパターンの現れ方とも密接に関係していることが示されました。

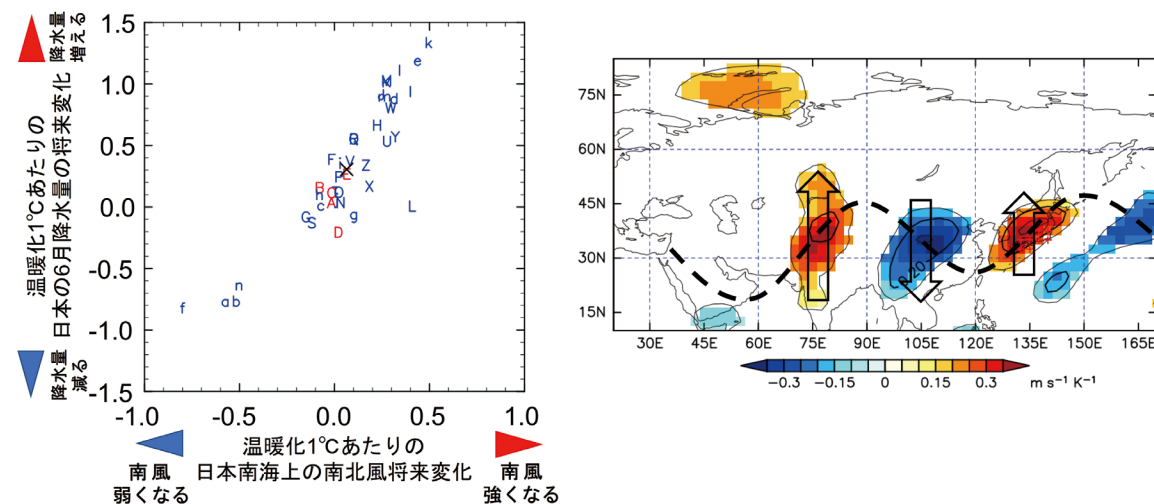


図1左：6月の九州から関東にかけての降水の将来変化(縦軸：単位は $\text{mm day}^{-1} \text{K}^{-1}$)と日本の南海上の南北風の将来変化(横軸：単位は $\text{m s}^{-1} \text{K}^{-1}$)の関係。アルファベットは、CMIP6のそれぞれのモデルの値。×印はマルチモデル平均。
図1右：日本の降水量が将来増加する気候モデルでみられる、大気上空(高度約10km)の南北風の将来変化の空間構造。暖色系は現在より南風傾向、寒色系は北風傾向(中抜き矢印で示す)。太破線は大陸上を伝わる波の様子を示す。

温暖化に伴う中部日本の冬の降水量の変化

中部日本の日本海側や山地の冬季(12～2月)の降水は、多くが雪として降ります。この地域の冬季の降水量(雨+雪)は、寒冬年で多く暖冬年で少ない傾向があります。では、地球温暖化に伴って中部日本の冬季の降雪量は減るのでしょうか。

CMIP6モデル群の予測は、中部日本の冬季において将来降水量が増えるモデル群(Aグループ)と、ほとんど変わらないか、やや減少するモデル群(Bグループ)の2つに分かれます。5つの代表気候モデル(5頁参照)については、IPSL-CM6A-LRはBグループ、それ以外の4モデルはAグループに入ります。

それぞれのグループでの降水量の将来変化を平均すると、図2のような結果になります。どちらのグループも広域では高緯度側で降水量が

増加し低緯度側で減少する傾向があるものの、日本付近の比較的狭い範囲(白枠)においては両グループの予測に違いが生じていることが分かります。このような違いは、温帯低気圧活動の変化が両グループで微妙に異なるためであると考えられます。

温暖化すると雪が雨に変わることも考慮する必要があります。Bグループではそもそも降水量が減るので、雪は減少するでしょう。しかし、降水量が増えるAグループでは、気温変化の度合い次第で雪が増加すると考えられます。このように、雪の変化は降水量と気温の両方の影響を受けるので予測が難しいのですが、雪が増える可能性も考慮して対策を準備しておく必要があるでしょう。

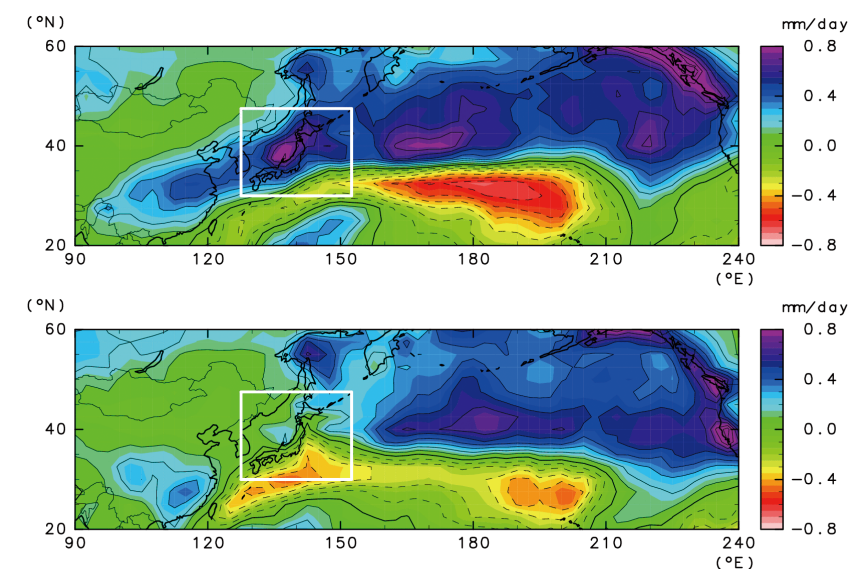


図2：冬季(12～2月)の降水量変化。地球温暖化にともなう100年あたりの変化を表す。上はAグループのモデル、下はBグループのモデルによる予測。青色系が増加、黄色から赤色系が減少する場所。

(成果論文 7、8)

上空の大気循環の影響

はるか上空の大気と日本域の降水分布の変化

私たちは、温暖化に伴うはるか上空の大気の変化が降水分布に与える影響について調べています。上空の大気の変化については、熱帯の高度約10km付近(上部対流圏)の温度の変化と、高度30km付近で北極を一周する大規模な西風の流れ(成層圏極渦)の変化とに着目してCMIP6モデルの予測結果を調べました。その結果、全てのモデルが熱帯の高度10km付近の温度上昇を予測していましたが、その上昇幅はモデルによって大きく異なっていました。極渦の将来変化に関しては、弱まると予測するモデルと強まると予測するモデルが混在していました。はるか上空の大気の将来変化にはこのように大きな不確実性があります。

次にストーリーライン手法(4頁参照)を用いて、温暖化に伴うはるか上空の大気の変化が、冬季日本域の平均降水量の変化とどのように関連しているか調べてみました。熱帯上空の温度上昇が大きい/小さい、成層圏極渦が強く/弱くなる、の

組み合わせでは、4種類のストーリーに分けて考えることができます。図3は、(a)熱帯上空の温度上昇が大きい+極渦が強くなる、(b)熱帯上空の温度上昇が小さい+極渦が弱くなる、の2つのストーリーでの降水量変化を示します。北日本(赤点線枠)の降水量は、(a)「温度上昇大+極渦強まる」の方が(b)「温度上昇小+極渦弱まる」に比べて顕著に増加しているのに対して、南西諸島(青点線枠)の降水量は(b)の方が(a)に比べて大きく減少していることが分かります。温暖化に伴う冬季日本域の降水変化は、はるか上空の大気を指標に取ったストーリーに強く依存していることが分かりました。さらに、その幅は地球全体の平均気温の上昇に依存しています。なお、私たちが着目している5つのCMIP6代表気候モデル(5頁参照)については、上記4種類のストーリーの中では、温度上昇が小さく極渦が弱まるストーリーに分類されるモデルはありませんが、それ以外の3種類のストーリーをカバーしています。

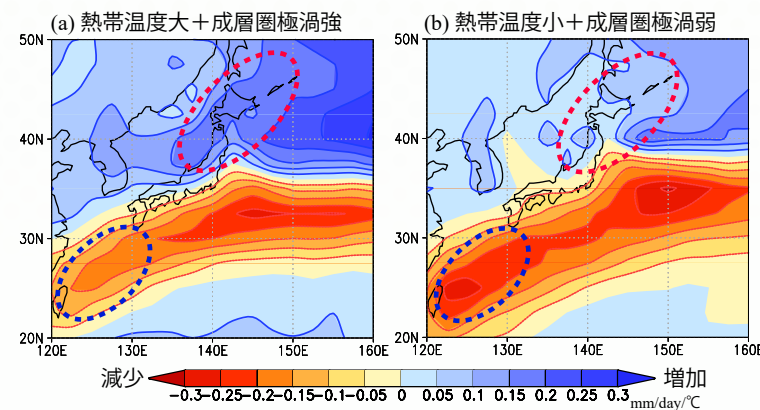
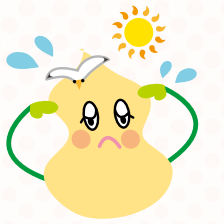


図3：全球平均気温1度上昇あたりの冬季(12～2月)日本域降水量変化。地球温暖化にともない、(a)熱帯の高度約10km付近(上部対流圏)の温度上昇が大きく、高度約30kmの成層圏極渦が強くなると予測するモデル群、(b)熱帯上空の温度上昇が小さく、極渦が弱くなると予測するモデル群による結果。青色が降水量増加、赤色が減少する場所。点線枠は(a)と(b)の差が特に大きな場所を示す。

(成果論文 9)

日本近海の夏季異常高温



記録的な異常高温

2020年8月、日本の南方沖を含む北西太平洋の海面水温は観測史上で最も高くなりました。特に、日本の南側で海面水温が30℃を超え、台風の強化やサンゴの白化などが懸念されました。

私たちは、様々なCMIP6気候モデルによるたくさんの数値シミュレーションから、この異常高温に対する過去の人間活動による地球温暖化の影響を見積もりました(図1)。この異常高

温は2001～2020年において、人間活動による温暖化がなければ(非温暖化実験、図1赤破線)1000年に一度も起こらないほど極めて珍しいもので、工業化前(図1緑破線)や20世紀での発生頻度(図1灰実線)と同程度でした。しかし、温暖化に伴い約15年に一度の頻度で起きようになったことがわかりました(過去再現実験、図1赤実線)。

将来予測される変化

多様な気候モデルによる将来予測を平均すると、工業化以降の地球温暖化が1.5℃を超えるであろう2031～2050年までに、2年に一度は北西太平洋がこの異常高温を上回ると推定されます(図1の黒線)。つまり、この異常高温は遠くない未来に「新たな日常」となる見込みです。温暖化を抑えるだけでなく、気候の変化へ適応する準備を速やかに実施することも大切です。

将来予測は、気候モデルの特性により異なり

ます。例えば、温暖化の影響評価・適応研究で主に用いられる5つの代表気候モデル(5頁参照)を比べてみましょう(図1箱ヒゲ図)。モデルBが予測する水温は31モデルの平均と同程度ですが、CとDではより高く、AとEではより低くなっています。このように多様な気候モデルによる予測の幅を考慮することで、私たちは温暖化の最悪なシナリオにも備えることができます。

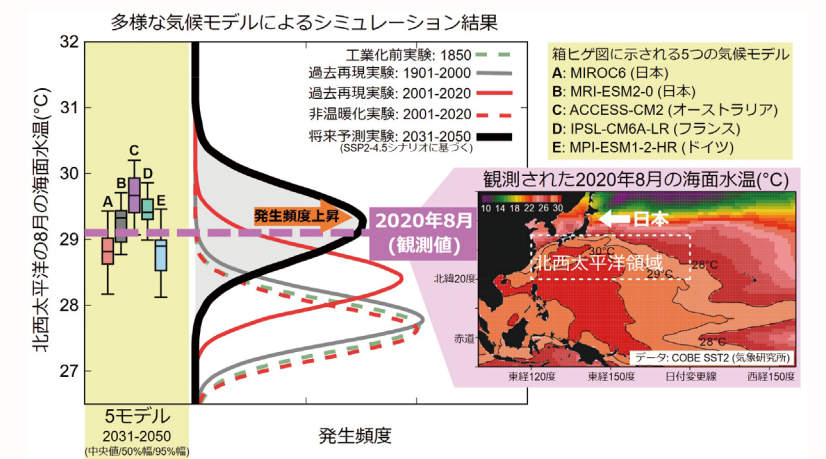


図1：2020年8月に観測された海面水温分布(ピンク色枠内)と、様々な気候モデルシミュレーションによる北西太平洋の8月の海面水温の頻度分布。ピンクの点線は2020年8月の観測値。グラフは異なる実験・期間での発生頻度。黄色枠内の箱ヒゲ図は5つの代表気候モデルによる将来予測の分布幅(中央値・50%幅・95%幅)。

(成果論文 10)

北極海から伝わる 遠隔気候影響

北極域が一番温暖化が進んで
いるなんて…困ったね。



北極海で海水面積が縮小している

地球温暖化の進行に伴って北極海の海水面積が年々縮小しています。一年のうち最も海水が後退する9月の海水面積の2010～2019年平均値は、1979～1988年平均に比べて約40%も減少しています。一年のうち最も海水域が拡大する3月においても約10%減少しており、全ての月で海水面積が縮小しています(図1:1月の例)。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の最新の評価報告書(AR6)によると、最も厳しい温暖化対策がなされる将来シナリオであっても、9月の北極海氷は2050年までに少なくとも一度はほとんどなくなる可能性があると予測されています。

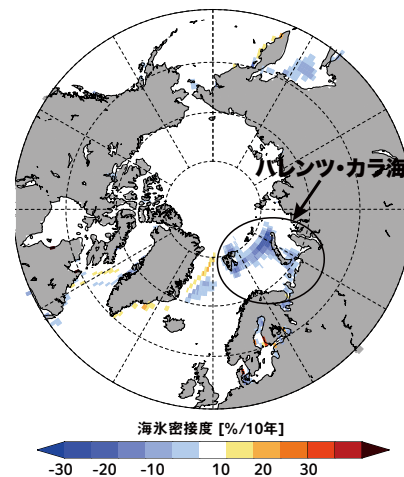


図1: 1月の海水密度度(値が高いほど海水に覆われている)の長期変化傾向(1980～2020年、%/10年)。北極海は冬季に海水で覆われるが、その縁辺海であるバレンツ・カラ海で特に著しい減少が見られる。

海水減少と北極温暖化

地球温暖化によって、どの季節・どの場所でも同じように気温が上がっているわけではありません。地球上で最も急速に温暖化が進んでいるのが冬の北極域です。北極域の海水が減少することで、海面(約マイナス2℃)から大気(冬の場合、約マイナス30℃)へ大量の熱が放出さ

れ、温暖化がより加速されるからです。この北極温暖化増幅現象と呼ばれる急激な気候変動が、我々の住んでいる日本などの中緯度域の気象や気候にも影響を与えていることが分かっています。

海水減少と東アジア中緯度域の寒波・寒冬

北極域での急激な温暖化とは対照的に、ユーラシア大陸の中央部から日本を含む東アジア中

緯度域では近年、異常寒波や寒冬が頻繁に発生しています。そのため、長期的な変化傾向(1980

～2020年)を見ると、特に寒波の頻度が増えているユーラシア大陸の中央部では温暖化ではなく逆に寒冷化しています(図2:北緯40～60度、東経60～90度)。これはシベリア高気圧と呼ばれるユーラシア大陸上を覆う地上の高気圧が西側で年々強まっている(図2等値線)ことと関係しています。高気圧の強まりに伴う時計回りの風が、北極の冷たい空気を中緯度域へ運ぶからです。この寒気は東アジアまで伝わり、ときに日本にも影響を与えます。では、どうしてシベリア高気圧は強まっているのでしょ

うか? 海水が減少していること(北極温暖化が強まっていること)がその理由ではないか?ということが近年指摘され、世界中で盛んに研究されています。私たちもCMIP6気候モデルを使った解析により、北極温暖化が強いシミュレーションほど、ユーラシア大陸中央部が寒冷化する傾向にあることを見出しました。しかし一方で、CMIP6気候モデルによるシミュレーションは、全体的に北極温暖化やユーラシア大陸の寒冷化の程度を過小評価していることも分かりました。

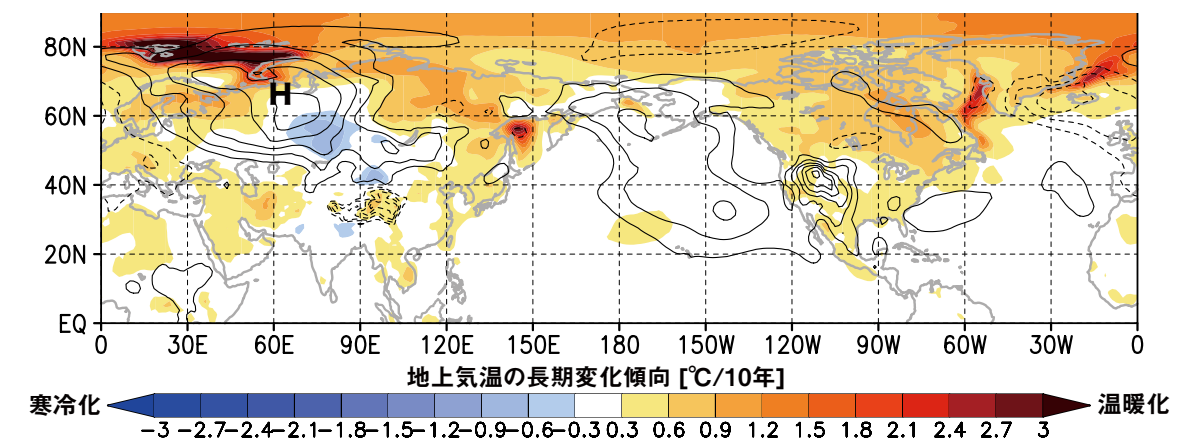


図2: 1980～2020年のデータを用いた1月の地上気温の長期変化傾向(陰影、℃/10年)と海面の高さに合わせこんだ気圧の長期変化傾向(等値線: hPa/10年、0.3hPa間隔、実線が高気圧化、破線が低気圧化)。

今後どうなるのか?

もし海水減少が東アジア中緯度域の寒波や寒冬に影響しているとする、さらなる海水減少によって(シベリア高気圧のさらなる強まりによって)、東アジアの寒波・寒冬のリスクがこれからますます増えることが予期されます。しかしその一方で、地球温暖化による気温上昇が、

いずれこの効果を相殺すること考えられます。今後の冬季東アジアの異常天候リスクの評価を精度良く行うためには、気候モデルのさらなる改良を進めると同時に、北極からの遠隔影響のメカニズムの理解を進展させていく必要があります。

(成果論文 11)

夏季東アジアの気圧配置



夏季東アジアの気圧配置と気候の将来変化

地球温暖化による温度上昇は、大陸と海洋、高緯度と熱帯、地表面付近と上空の間で異なり、気圧配置と大気の流れ、そして地域の気候に変化をもたらします。

38個のCMIP6気候モデル平均によって再現された東アジアの夏季の地上気圧配置(図1aの等値線)を見ると、高気圧が太平洋から西に広がる一方、大陸は低気圧で、日本では南風が卓越する夏の天気図をよく再現しています。図1aの陰影は、CMIP6モデルが予測する気圧配置の将来変化(将来と現在の差)の平均値です。ここで紹介する将来の気候は、地球平均で4度上昇した世界を仮定しています。太平洋の高気圧の日本から北への張り出しは弱くなり、日本の南

では強くなる予測です。ただし、西日本付近では高気圧はやや北に張り出す傾向が見られます。現在気候の降水量とその将来変化を図1bに示します。大陸での降水量増加に比べると日本付近の増加は小さく、むしろ現在の降水帯の南側で大きくなっています。

CMIP6気候モデルの将来予測にはモデルによる違いがあり、場所によっては変化の正負が逆になることがあります。予測の信頼度も考えて利用するためには、予測の共通点とともに異なる点についても知っておく必要があります。

CMIP6モデルが予測する38通りの夏季の気圧配置の将来変化を東アジア全体で比較して、代表的な空間パターンを統計的に取り出しまし

た。その特徴を、関係する降水量変化とともに図2に示します。

パターン1では、日本の南側での太平洋高気圧の変化が大きく、雨量はそれに伴って変化します。パターン2では、北日本を中心に高気圧の北への張り出しが弱くなり、日本の南東海上で雨が増えます。パターン3では、太平洋高気圧全体の強さとともに、南風の強さが変わります。パターン1と3は将来変化の方向がモデ

ル間で一致しませんが、パターン2はほとんどすべてのモデル予測で共通して見られます。パターン2では、大陸上で気温上昇が大きいことの影響が日本付近まで広がって高気圧が弱くなり、降水が増えます。このように、38個のCMIP6モデルの気圧配置の予測には共通点とともに様々な違いがありますが、5つの代表気候モデル(5頁参照)はそれらの多様性を適切に表現できています。

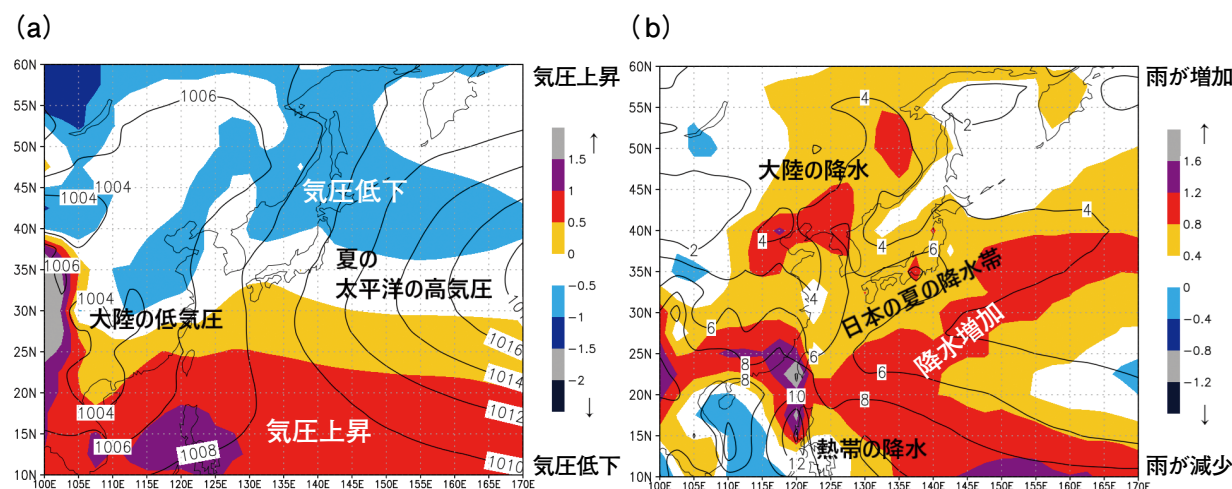
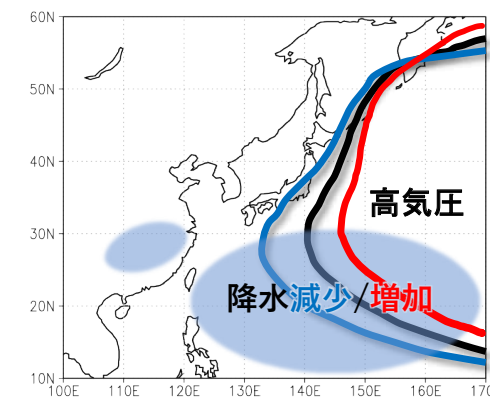
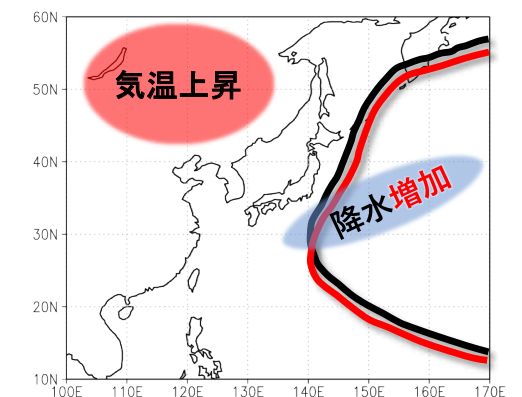


図1：38個のCMIP6モデル平均の気候。夏季(6～8月平均平均)の(a)現在の地上気圧配置(等値線：単位はhPa)とその将来変化(陰影：赤系が将来気圧上昇、青系が低下)、(b)現在の降水量分布(等値線：単位はmm/day)とその将来変化(陰影：赤系が将来雨が増加、青系が減少)。

(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

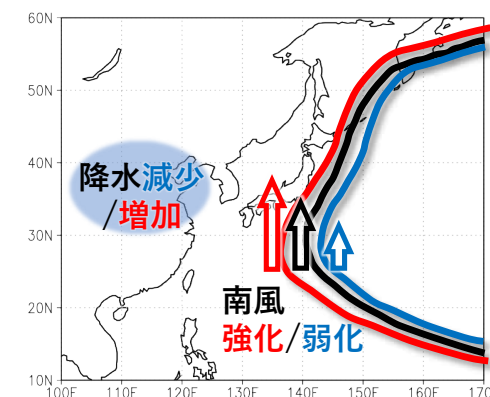


図2：38個のCMIP6モデルによる夏季気圧配置の将来変化予測に見られる、代表的な空間パターン1～3および降水量将来変化の概念図。黒線は現在の高気圧の位置、赤線と青線は、異なるモデルで将来に予測されている高気圧の位置を示す。将来、赤線のようになる場合は灰色のシェード位置で降水が増加し、青線のようになる場合には降水が減少する。(b)のパターンでは、ほぼ全てのモデルが赤線の変化方向に変化する。(c)の矢印は、南風の強化/弱化を示す。

COLUMN 1

九州で観測される豪雨の仕組み

九州地方では、近年、毎年のように大きな被害をもたらす豪雨災害が発生しています。一般的に豪雨は、雷雲のような背が高く激しい上昇流を伴う雲(図1a)からもたらされると考えられてきました。その場合、大気的不安定性や大気境界層(高度1000mよりも下の層)における水蒸気流入が重要となります。しかし、例えば2018年西日本豪雨の研究などから、豪雨は必ずしも雷雲を伴わないこと、大気中下層(2000~3000mの上空)が非常に湿った条件で生じることが明らかになりました(図1b)。これは、豪雨の発生には大気境界層だけでなく上空まで含めた水蒸気流入が重要であることを示しています。

私たちは気象庁の数値予報に利用されるデータを15年分用いて九州地方の豪雨を解析しました。その結果、豪雨に1日程度先行して大気中下層で水蒸気流入が増加し、九州地方で非常に湿った状況が作られていることが示されました。この水蒸気流入により大気中下層には湿度がほぼ100%の状況で生じる湿潤絶対不安定層(モール)が作られて対流が立ちます。このことが、大量の雨をもたらす線状降水帯などの組織化した降水域(メソスケール降水域)を維持するのに役立ちます。メソスケール降水域への流れによって水蒸気が供給され続けることでモールは維持され、降水が持続します。また、降水量が多い場合ほど高い頻度でモールが出現していることも示されました。実際に、2018年西日本豪雨や2020年7月の球磨川での豪雨災害時にも、上空の水蒸気流入やモールの存在が確認されています。

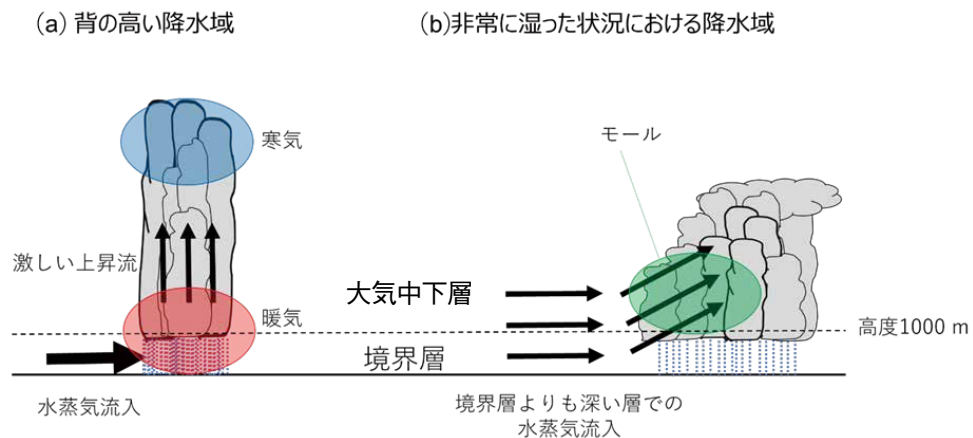
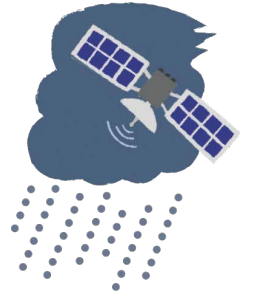


図1: (a) 背の高い降水域と(b)非常に湿った状況における降水域。

(成果論文 13)

COLUMN 2

近年の梅雨前線の活発化



近年、梅雨末期の甚大な豪雨災害が多く報道されていますが、実際に大雨の頻度は増しているのでしょうか。私たちは、梅雨前線帯において実際に強い雨が増えていることを、長期間の人工衛星の降水レーダーデータにより、初めて明らかにしました。

図1は、人工衛星搭載降水レーダーが捉えた、海上も含めた梅雨前線上の降水活動の過去22年の変化を示しています。2000年代(1998~2008年)よりも2010年代(2009~2019年)は明らかに活発になっていることが分かります(図1のオレンジの点線)。これは、私たちが最近感じている梅雨期の豪雨災害が増えていることに対応していると考えられます。

この近年の梅雨前線付近の豪雨の増加は、(1)太平洋高気圧の西縁に沿った、南からの水蒸気の流れが強いこと、(2)亜熱帯ジェット気流上の波列に伴い、日本の西方に気圧の谷が生じることと関係があります。2020年に九州地方に甚大な被害をもたらした令和2年7月豪雨でも、これら2つの特徴がはっきりと見られました。

梅雨前線活動には、太平洋高気圧の張り出しが関わっていますが、それは同時にフィリピン海付近(モンスーントラフと呼ばれる台風が多く発生する領域)で台風の卵となる熱帯低気圧活動にも影響します。図2は、2010年代と2000年代の低気圧活動度の差を示します。梅雨前線活動が活発化すると同時にフィリピン東方の熱帯低気圧活動が減少していることが分かります。このように、日本の梅雨と遠く離れた熱帯の雨の降り方が関係して変化していることも分かります。

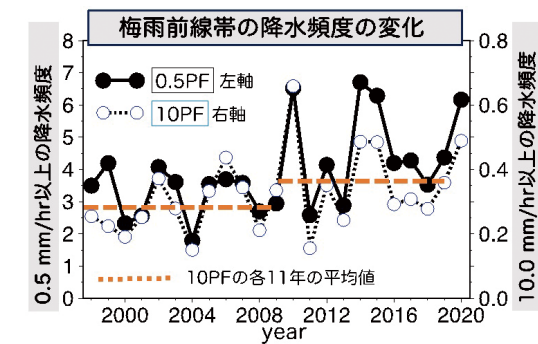


図1: 降水頻度の時系列。実線(破線)は、0.5(10.0)mm/hr以上の降水頻度。オレンジの破線は、10.0mm/hr以上の降水頻度の11年平均値。2010年代に平均値が高くなっている。

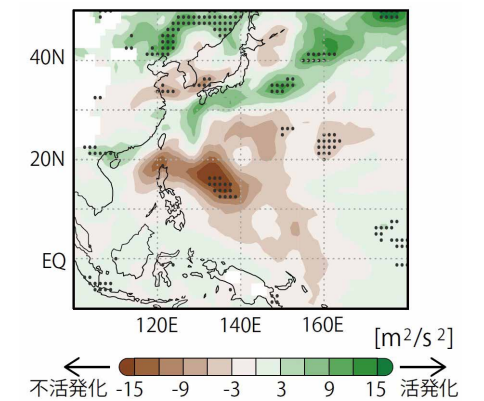


図2: 低気圧活動度(日本付近では主に前線活動、熱帯では台風を含めた熱帯低気圧)の2000年代から2010年代への変化。梅雨前線付近では近年の活発化、フィリピン海周辺では不活発化がわかる。

(成果論文 14)

今後の取り組み

—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で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。

〈記事に関連する成果論文〉

1. Shiogama, H., N. N. Ishizaki, N. Hanasaki, K. Takahashi, S. Emori, R. Ito, T. Nakaegawa, I. Takayabu, Y. Hijioaka, Y. N. Takayabu, and R. Shibuya, 2021: Selecting CMIP6-based future climate scenarios for impact and adaptation studies. *SOLA*, 17, 57–62, doi:10.2151/sola.2021-009.
2. Hayashi, M., and H. Shiogama, 2022: Assessment of CMIP6-based future climate projections selected for impact studies in Japan. *SOLA*, accepted.
3. Kosaka, Y., and Y. Uchida, 2022: Weakening of the interannual Silk Road teleconnection pattern under global warming in GCM simulations. in preparation.
4. Shibuya, R., Y. N. Takayabu, and H. Kamahori, 2021: Dynamics of widespread extreme precipitation events and the associated large-scale environment using AMeDAS and JRA-55 data. *J. Climate*, 34, 8955–8970, doi:10.1175/JCLI-D-21-0064.1.
5. Shibuya, R., Y. N. Takayabu, and C. Yokoyama, 2021: Objective classification of controlling factors for the occurrence of the widespread extreme precipitation events during Baiu season over western Japan. *SOLA*, 17, 251–256, doi:10.2151/sola.2021-044.
6. Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, O. Arakawa, and T. Ose, 2019: A study on future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments. *J. Climate*, 32, 5251–5274, doi:10.1175/JCLI-D-18-0656.1.
7. Horinouchi, T., S. Matsumura, T. Ose, and Y. N. Takayabu, 2019: Jet-precipitation relation and future change of the Mei-yu-Baiu rainband and subtropical jet in CMIP5 coupled GCM simulations. *J. Climate*, 32, 2247–2259, doi:10.1175/JCLI-D-18-0426.1.
8. Sato, N., T. Horinouchi, and Y. Kawatani, 2022: Bimodal distribution found in the multimodel climate prediction over central Japan in winter. *SOLA*, in preparation.
9. Kawatani, Y., T. Horinouchi, and N. Sato, 2022: Storylines of projected climate changes around Japan associated with upper troposphere and stratosphere responses. *SOLA*, in revision.
10. Hayashi, M., H. Shiogama, S. Emori, T. Ogura, and N. Hirota, 2021: The northwestern Pacific warming record in August 2020 occurred under anthropogenic forcing. *Geophys. Res. Lett.*, 48, doi:10.1029/2020GL090956.
11. Mori, M., and Y. Kosaka, 2022: Underestimation of the impact of Arctic sea-ice reduction on the atmosphere in CGCM simulations. in preparation.
12. Ose, T., H. Endo, Y. Takaya, S. Maeda, and T. Nakaegawa, 2021: Robust and uncertain sea-level pressure patterns over summertime East Asia in the CMIP6 multi-model future projections. *J. Meteor. Soc. Japan*, submitted.
13. Tsuji, H., Y. N. Takayabu, R. Shibuya, H. Kamahori, and C. Yokoyama, 2021: The role of free-tropospheric moisture convergence for summertime heavy rainfall in western Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 48, doi:10.1029/2021GL095030.
14. Takahashi, H. G., and H. Fujinami, 2021: Recent decadal enhancement of Meiyu-Baiu heavy rainfall over East Asia. *Sci. Rep.*, 11, 13665, doi:10.1038/s41598-021-93006-0.

〈研究参画機関(サブリリーダー)〉

- (1) 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
東京大学大気海洋研究所(高藪 縁)
東京大学先端科学技術研究センター(中村 尚)
- (2) 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
北海道大学地球環境科学研究院(堀之内 武)
- (3) 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
国土交通省気象庁気象研究所 応用気象研究部(仲江川 敏之)
- (4) 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
国立研究開発法人国立環境研究所地球システム領域(江守 正多)

「暑いだけじゃない地球温暖化4」編集者・執筆者

高藪縁・濱田篤・横山千恵・澁谷亮輔・辻宏樹・小坂優・森正人・堀之内武・河谷芳雄
佐藤尚毅・尾瀬智昭・高橋洋・塩竈秀夫・林未知也・藤田温子・岩上麻里絵
写真：木村詞明 キャラクター：渡部寿賀子 印刷：株式会社 アズディップ