環境省環境研究総合推進費　2A-1201
「CMIP5 マルチモデルデータを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究」
2015 年 3 月

暑いだけじゃない 地球温暖化2

—世界の気候モデルが予測する東アジアと日本の雨—

はじめに

二酸化炭素などのいわゆる「温室効果ガス」は、近年の人間活動によって、たいへん速いペースで大気中に排出されてきました。その影響により地球の気温が上昇していることは、すでに様々な観測データからも指摘されています（IPCC 第 5 次評価報告書、2013）。

地球温暖化は、地球の平均気温を数度上げるというだけでなく、大気や海洋の大きな流れの変化などを通じて、温帯低気圧の経路、台風、豪雨や干ばつの頻度や強度など、様々な大気現象の様相を変化させている可能性があります。特にアジアに住む私たちにとっては、雨の降り方の変化は、生活の安全や食料生産に直接影響する重大な問題です。

気候の将来を予測するため、世界中の様々な機関がそれぞれの「気候モデル」を開発してコンピュータシミュレーションを行っています。実はその結果には、ややばらつきがあります。特に雨をもたらす現象の変化や雨の特性の変化は気候モデルにとって難しいテーマです。私たちは、いろいろな気候モデルの出すいろいろなシミュレーション結果と観測データを比較しながら、私たちの生活の安全に大きく関わるアジアの雨が、将来どのように変化するかを、より精確に読み取るための研究を行ってきました。ここではそのいくつかを紹介します。

「暑いだけじゃない地球温暖化2」編集委員長　高薮　縁

＊注　“プロジェグランメーユ”とは、“東北マリンサイエンス拠点形成事業”に参画している東京大学大気海洋研究所のチーム愛称です。

目次

はじめに …… 1
気候モデルとは …… 3
マルチモデルを利用した将来予測 …… 4
解説：東アジアの四季 …… 5
梅雨 …… 7
集中豪雨 …… 9
台風 …… 11
日本の冬 …… 13
モンスーン …… 15
成層圏 …… 17
【コラム1】IPCC第5次評価報告書から …… 19
【コラム2】CMIP5 vs CMIP3：梅雨 …… 20
今後の取り組み …… 21
参照論文・研究参画機関 …… 22

謝辞：この冊子で紹介した研究は、環境省の環境研究総合推進費課題（2A-1201）「CMIP5 マルチモデルデータを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究」（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 CMIP 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、気候モデル診断･相互比較プログラム(PCMDI) のデータベースに集約されています。大量データの利用にあたっては、文部科学省プロジェクト DIAS の協力をいただきました。また、柏崎美樹様には、オリジナル写真を使わせていただきました。

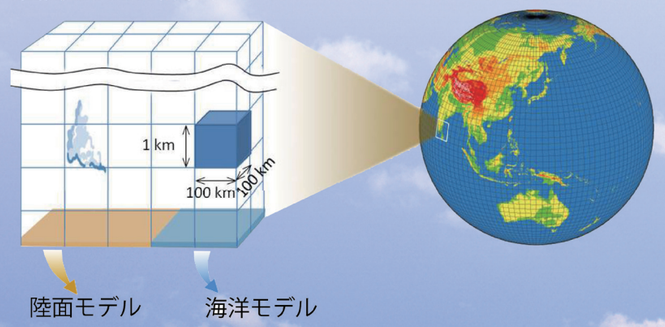
気候モデルとは

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、大気の状態を予測するかたまり、海の状態を予測するかたまり、氷や陸面の状態を予測するかたまりからできています。たとえば大気のモデルは大気を水平方向に約 100㎞× 100㎞、鉛直方向に約 1㎞のサイコロ（格子）に分け（下図）、それぞれのサイコロでの現在の風、気温、気圧、湿度の状態から約 10 分後の風、気温、気圧、湿度の状態を予測する数式です。

風の変化を表す数式は、実は中学で習う運動の第 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の 100㎞に一つの値では表現できないミクロな物質や現象が、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ったりとひとつには決まらないのです。

近年では、コンピュータの性能が向上し、予測計算の始めの状態を少し変化させたり、ミクロな現象の表現の仕方を取り替えたりした多くの実験を行うことができるようになりました。その結果を利用して、より起こりやすい将来を予測する試みや、起こりうる現象の幅の予測などに役立てる試みもされています。

大気モデルの格子イメージ



マルチモデルを利用した将来予測

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」の第 5 次評価報告書は、人間活動などを考慮した将来の気候の予測結果を報告しています。この報告書は将来予測のための科学的根拠として、「第 5 次結合モデル相互比較計画（CMIP5）」という世界中の 50 個以上もの気候モデル（CMIP5 モデル；表）による実験結果を利用しました。20 世紀の気候の再現実験と 21 世紀の気候の予測実験を行い、現在の気候が将来どのように変化するかを調べました。予測実験では、温室効果ガスの排出量の違いにより、複数のシナリオを作って計算を行いました。RCP4.5、RCP8.5 シナリオなどと名付けられ、数字が大きいほど温暖化が進みます。前回の第 4 次評価報告書では、「第 3 次結合モデル相互比較計画（CMIP3）」に参加した気候モデルが使用されました。CMIP5 モデルは、CMIP3 モデルより性能が向上しており、将来予測の信頼性も高くなりました。

気候モデルの中では、雲が出来て雨が降るといった様々な気象の現象が起きています。しかし、前ページに述べた様に、予測結果はモデルごとに違います。そこで、複数のモデル（マルチモデル）を利用した比較研究が行われます。いったい私たちはどの予測結果を信用したらよいのでしょうか。現在の気候を最も良く再現できる気候モデルを最も信頼するのは自然な考え方です。また、気候の予測では、再現性の良い複数のモデルの結果を使った方が、たった一つのモデルを使うより信頼できる予測になるとも考えられています。

梅雨や台風といった私たちの社会に大きな影響を与える現象は、地球温暖化によってどのように変化するのでしょうか?この冊子では、マルチモデルを利用した将来予測の研究例を紹介します。

	ACCESS1.0		CESM1 (WACCM)		GFDL-CM2.1		HadGEM2-AO		MPI-ESM-LR
	ACCESS1.3		CESM1 (FASTCHEM)		GFDL-CM3		HadGEM2-CC		MPI-ESM-MR
	BCC-CSM1.1		CMCC-CESM		GFDL-ESM2G		HadGEM2-ES		MPI-ESM-P
	BCC-CSM1.1(m)		CMCC-CM		GFDL-ESM2M		INM-CM4		MRI-AGCM3.2H
	BNU-ESM		CMCC-CMS		GFDL-HIRAM-C180		PSL-CM5A-LR		MRI-AGCM3.2S
	CanCM4		CNRM-CM5		GFDL-HIRAM-C360		IPSL-CM5A-MR		MRI-CGCM3
	CanESM2		CSIRO-Mk3.6.0		GISS-E2-H		IPSL-CM5B-LR		MRI-ESM1
	CCSM4		EC-EARTH		GISS-E2-H-CC		MIROC4h		NCEP-CFSv2
	CESM1(BGC)		FGOALS-g2		GISS-E2-R		MIROC5		NorESM1-M
	CESM1(CAM5)		FGOALS-s2		GISS-E2-R-CC		MIROC-ESM		NorESM1-ME
	CESM1 (CAM5.1.FV2)		FIO-ESM v1.0		HadCM3		MIROC-ESM-CHEM		

表：CMIP5 に参加した 54 個の気候モデルと国

解説

東アジアの四季

◆東アジアは豊かな四季を持つ

東アジアを含む中緯度帯では、上空の強い西風（ジェット気流）が南北に移動し、夏は熱帯から、冬は寒帯から影響を受けるため、四季の変化が明瞭です。さらに、日本を含む東アジアは、広大なユーラシア大陸の東に位置し、大陸と海洋の温まりやすさの違いによって地表付近を吹く季節風（モンスーン）の影響を強く受けるモンスーン気候帯となっています。夏には南寄りの暖かく湿った季節風が、冬は北寄りの冷たい季節風が吹き、季節のメリハリが強いことが東アジアの気候の特徴です。

◆東アジアの夏

夏めいてくると、太陽高度が高くなり地表面が暖められることによって、インド洋や太平洋よりも大陸の方が気温は高くなり、地上の気圧は低くなります。すると、海洋から大陸に向かう季節風が生じます（図 1)。このとき、東アジアには南から暖かく湿った空気が運ばれます。また、チベット高気圧（チベット高原上空の暖かい高気圧）に覆われるユーラシア大陸南部からも暖かく湿った空気が運ばれるようになります。こうして東アジアには梅雨前線が停滞することになります。その後、ジェット気流が北上すると同時に太平洋高気圧が日本の上で勢力を増してくると梅雨明けとなり、本格的な夏となります。

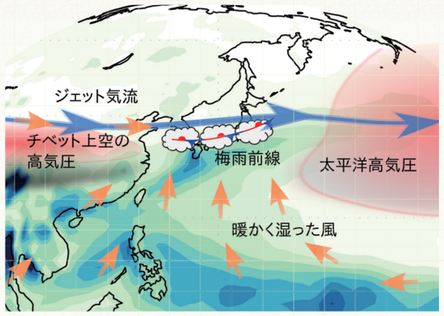
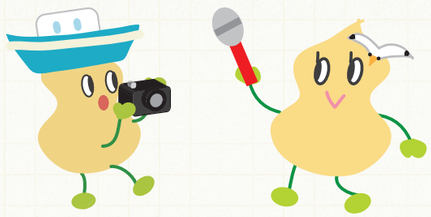


図 1:夏における日本付近の大気の様子。気圧配置、地表風、ジェット気流、梅雨前線のおおよその位置を図示している。地上の陰影は、降水分布。



◆東アジアの秋

秋になると、太平洋高気圧が弱まって、ジェット気流は風速を強めながら今度は南下を開始します。これに伴って、日本周辺には梅雨前線と似た秋雨前線が形成されるようになります。また、日本にとって、秋は台風シーズンです。暖かい熱帯の海上で発生する台風は、秋には太平洋高気圧の縁辺に沿って日本付近に襲来することが多くなります。台風からの湿った風の影響を受けて秋雨前線がさらに活発化することもあります。

◆東アジアの冬

秋から冬にかけては、陸より海の方が冷えにくいため、海上よりも大陸の気温の方が低くなります。ジェット気流は南下し、大陸のシベリア高気圧と海上のアリューシャン低気圧による東西方向の気圧の差が明瞭になってきます。この西高東低の冬型の気圧配置によって、東アジアには北寄りの季節風が吹くようになります（図 2)。この季節風は、暖かい海上で水蒸気を多く含む風となって日本に吹き付け、日本海側の各地に大雪を降らせます。

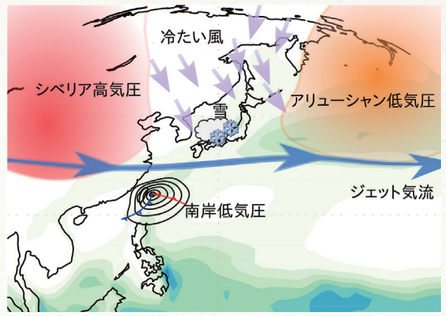


図 2:冬から春にかけての日本付近の大気の様子。気圧配置、地表風、ジェット気流、降雪、南岸低気圧のおおよその位置を図示している。地上の陰影は、降水分布。

◆東アジアの春

春の気配が近づいてくると、冬型の気圧配置に伴う季節風が弱まり、ジェット気流は次第に北上するようになります。このジェット気流との結びつきが強いため、移動性の高・低気圧は、この頃になると黄海や朝鮮半島、日本付近で活発になります。このとき日本では、太平洋側で大雪をもたらす南岸低気圧（図２）がやってきたり、春一番が吹いたりします。こうして低気圧が次々と東アジアを通過しつつ、春が到来します。

梅雨

～ 梅雨明けの時期と雨の降り方 ～

◆梅雨前線とは？

日本では、５月頃から７月頃にかけて梅雨の季節を迎えます。この時期には、梅雨前線に伴って東西方向に長く伸びた帯状の雲が日本付近で頻繁に観測されます。この梅雨前線の形成には、ジェット気流に沿ったユーラシア大陸からの暖気と太平洋高気圧をまわる南からの暖気が関わっています。また、梅雨前線に伴う雨は、前線の南北で異なる性質を持っています。

◆温暖化すると梅雨明けが遅れる？

温暖化すると梅雨前線の北上が鈍くなり、梅雨明けが遅れると考えられています。では、その梅雨明けが遅れる要因は何なのでしょうか。現在のジェット気流の再現性が良いモデルを集めて、将来の予測データを調べたところ、温暖化すると日本付近ではジェット気流の北上が現在よりも遅れることが示されました（図 1）。温暖化すると、大気の循環が変わり、東アジアではジェット気流を北縁に持つチベット高気圧が縮小します。これが日本付近でジェット気流の北上が遅れる理由と考えています。ジェット気流の北上が遅れると、梅雨の期間が長引くことになります。

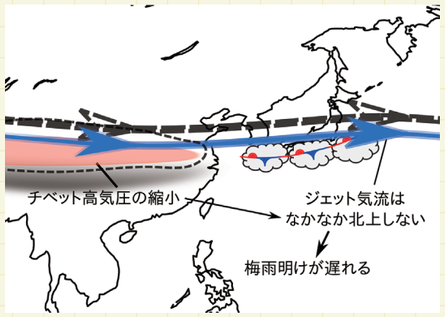


図 1：温暖化した 21 世紀末での夏の模式図。矢印はジェット気流の位置、等値線はチベット高気圧。各々、破線が現在、色が将来。

◆梅雨前線の南北で大きく異なる雨の降り方

梅雨前線に伴う雨の降り方の違いは私たちの生活に影響しますので、どこでどのような性質の雨が降るのかを知ることはとても重要です。私たちは、雨の立体構造が観測できる TRMM（熱帯降雨観測計画）衛星が観測したデータを用いて、梅雨前線に伴う雨の性質を調べました。すると、梅雨前線の南側では、背の高い積乱雲などからザーッと強く降る雨（対流性の雨といいます）が多いことが示されました（図 2a）。対照的に、前線の北側では、層雲などからシトシト降る雨（層状性の雨）が大半を占めていました（図 2b）。

一般に、下層が暖かく湿っている大気は、不安定で対流性の雨が降りやすい状態にあります。梅雨前線は南側の暖かく湿った気団と、北側の冷たく乾いた気団とが接する境界にあり、前線の南側の大気は北側よりも不安定なため、雨の降り方に違いが生じるのです。

このように、梅雨前線の南北では雨の性質が大きく異なるため、前線の位置が南北に少し変化すれば、同じ場所での雨の降り方ががらりと変わります。

◆雨の将来変化は？

ジェット気流は梅雨前線の位置を決める要因の一つであるため、その将来変化を精確に把握することが重要です。また、温暖化によって海水温（海面の水温） が上昇すると、大気の下層は今よりも暖かく湿ると考えられます。そうなると、現在のところは梅雨前線の南側で頻繁に見られる強い雨が、将来は前線の北側でも増えるかもしれません。私たちは、衛星観測で得られた知見や複数の気候モデルによる予測結果などを総合しながら、梅雨前線に伴う雨が将来どのように変化するかについてさらに研究を進めています。

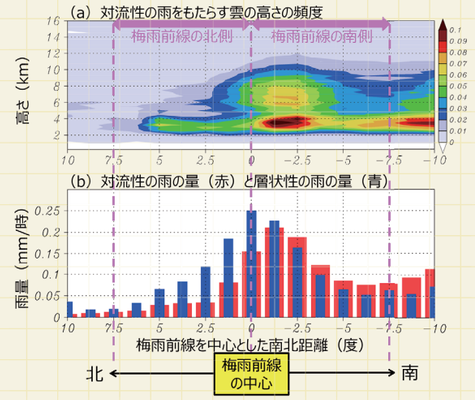
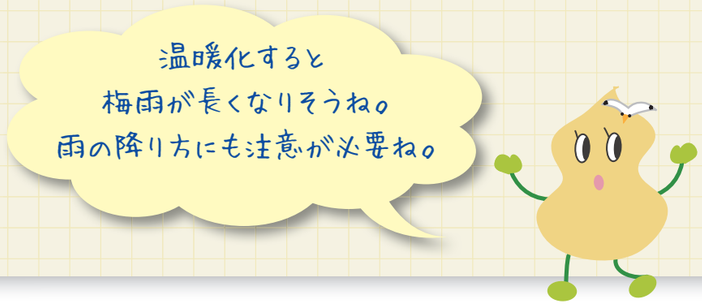


図 2：(a) 西日本付近における対流性の雨をもたらす雲の高さの頻度。梅雨前線を中心とした南北分布を示す（右側が南、左側が北）。縦軸は地表にもたらされる雨がどの高さから降るかを示す。(b) 対流性の雨の量(赤色棒グラフ) と層状性の雨の量(青色棒グラフ)。



（参照論文 1, 2）

集中豪雨

～ 海水温上昇の効果 ～

◆九州地方での梅雨明け直前の集中豪雨

九州地方は平年には７月中旬に梅雨が明けますが、梅雨明け直前に集中豪雨に見舞われることが少なくありません。例えば「平成 24 年７月九州北部豪雨」では（図 1a）、各地で洪水や土砂崩れが生じ 30 名以上の死者・行方不明者を出す大きな被害がもたらされました。このような集中豪雨が梅雨末期におきやすいのはなぜでしょうか？

前ページで見たように梅雨前線の南側では強い雨が降りやくなっています。特に九州地方の豪雨の多くは、北側に停滞する梅雨前線に向けて南側から暖かく湿った気流が、東シナ海を通って流れ込む時に起こります（図 1c）。梅雨の前・中期より末期の方が東シナ海は暖かいため、この気流は海面から熱や水蒸気をより多く受け取り、集中豪雨の原因となる積乱雲を九州地方で発達させます。

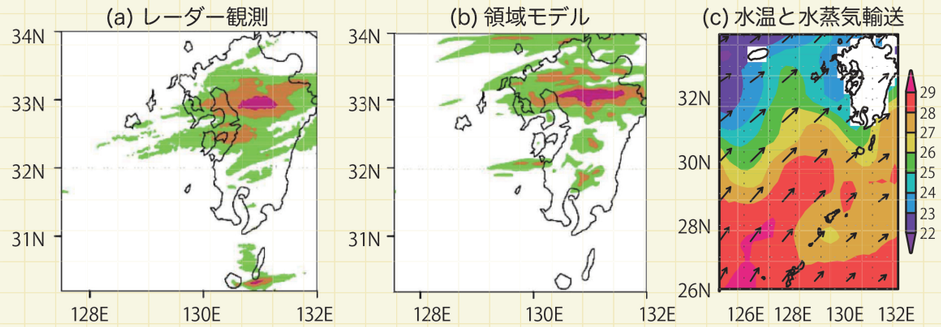


図 1：九州北部豪雨前半（2012 年７月 11 日）の日雨量分布（色は 50,100,200 mm）。(a) レーダー観測、(b) 領域モデル。(c) 九州北部豪雨時（2012 年７月 11 ～ 14 日平均）の大気下層での水蒸気輸送（矢印）と海水温（色，度）。

◆集中豪雨の将来予測

地球温暖化によって、海水温は上昇を続けており、今後さらに上昇すると予測されています。もし、この九州北部豪雨を引き起こした気象条件、つまり、梅雨前線に向けて暖かく湿った風が東シナ海を吹く状態が、温暖化した時に再び現れたらどうなってしまうでしょうか？

CMIP5 モデルは、コンピュータ能力の限界のため、大気を約 100km 四方より細かく分割できず、集中豪雨のような局所的な強い雨を直接表現できません。そこで、予測したい地域のみを細かく分割した大気モデル（領域モデル）を別に用意します。海水温分布や、その地域のすぐ外側の風や気温などの情報を領域モデルに与えると、集中豪雨をシミュレートすることができます。実際に、九州周辺のみ 3 km 四方で大気を細かく区切った領域モデルは、観測された雨量分布（図 1a）を良く再現しています（図 1b）。

さらに、CMIP5 モデルにより予測された現在から 2090 年代までの海水温や気温の上昇分（図 2）を、九州北部豪雨発生時の気象条件に足し合わせて領域モデルに与えたところ、この４日間に九州に降る雨が現在より 40% 近くも増加しました（図 3）。つまり、温暖化した将来、集中豪雨が起きる気象条件が整うと、現在よりも雨量が増加し、より大きな災害が起きる可能性が高まることを意味しています。また、６月の海水温も現在よりも高くなるため、７月のみならず６月にも集中豪雨の発生数が増える可能性が考えられます。

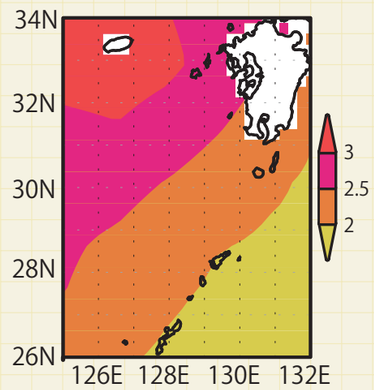


図２：海水温上昇量（度）。

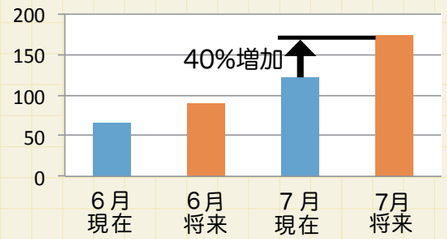
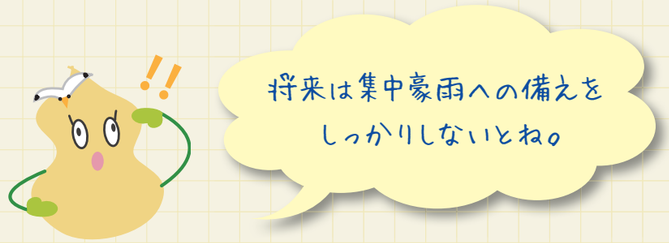


図 3：九州上で平均した九州北部豪雨時の４日間雨量（mm）。“6月（7月）現在”は現在の海水温と気温を与えたシミュレーション。“6月（7月）将来”は 2090 年代平均の海水温と気温上昇分を足したシミュレーション。



（参照論文 3）

台風

～ 接近数の将来変化 ～

台風は毎年のように日本に接近・上陸して暴風雨をもたらし、洪水や高潮を引き起こして人命を脅かします。そのため、地球温暖化により台風の強さや接近数がどう変化するか予測することは、わが国の長期的な防災計画を立てる上でも重要です。ここでは、接近数の将来予測研究の成果を紹介します。

◆台風の発生域と平均的な経路

台風接近数の変化には、発生しやすい地域の変化とともに、発生後の経路の変化が関わってきます。現在の気候では、台風は主に南シナ海からフィリピン東海上で発生した後（図１の赤色）、平均的には西ー北西方向に進みます（同緑矢印）。一部はそのままインドシナ半島や中国南岸に上陸して消滅しますが、その他は北緯 30 度付近で進路を北ー北東方向に変え（「転向」といいます）、いくつかは日本を含む東アジア諸国に接近します。台風はもともと北西方向に移動しやすいという性質がありますが、これに加えて台風を取り巻く大規模な風により流されるため、地域によって移動方向が異なるのです。

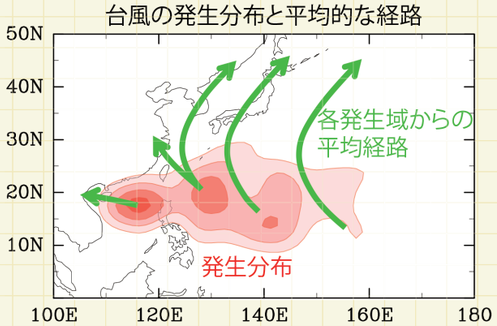


図１：台風の発生分布（陰影：濃いほど発生数が多い）と平均的な経路（緑矢印）。

◆経路の将来変化予測

私たちは、現在の気候における台風の発生分布や経路の再現性が高い７種類の気候モデルを用いて、平均的な経路が将来どのように変化するのかを調べました（図２）。日本のすぐ南海上では、現在の移動方向は北北東ー北東向きですが、これが将来はより東寄りになると多くのモデルが予測しています。つまり、現在では図２の緑矢印のような経路をとっている台風が、将来は橙色矢印のような経路をとることになります。この変化は、東北地方付近の上空を中心にして流れる西風ジェット気流が将来はやや南側に移るという予測と関係があります。ジェット気流の変化によって日本の南海上で西風が強まり、台風はこれに流される格好でより東寄りの進路をとるというわけです。

◆接近数はどう変化するか？

日本の南海上での移動方向がより東寄りに変化すると、現在では朝鮮半島や西日本に上陸する台風のうちのいくつかは、将来には東日本に上陸するか日本の東海上を進むようになると考えられます。すなわち、経路の変化は、西日本への接近数を減らし、東日本への接近数を増やす方向に働くことになります。

一方、発生数については、西太平洋域の西半分で減少し（図２青破線域）、東半分でやや増加する（図２赤破線域）という予測が得られています。日本に接近する台風の多くは西半分で発生したものであるため、この発生分布の変化は日本への接近数を減らす方向に働きます。発生分布の変化と経路の変化を総合すると、西日本へ接近する台風はおそらく減少すると予測できます。東日本に関しては、これら２つの変化が互いに打ち消し合う関係になっているため、接近数が増えるか減るか、現段階でははっきりしたことは言えません。

このように、熱帯や中緯度の様々な要因が接近数の将来変化に影響を及ぼし、その予測を困難なものにしています。しかし、ここで行っているように、要因をひとつひとつ丁寧に調べていくことで、より信頼できる予測情報を提供できると考えています。

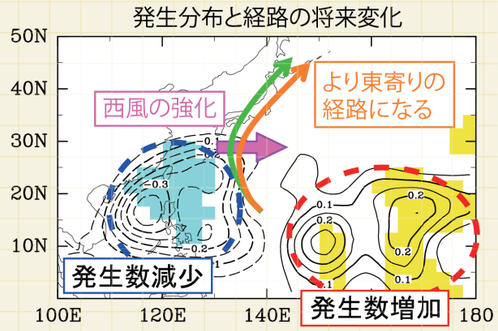
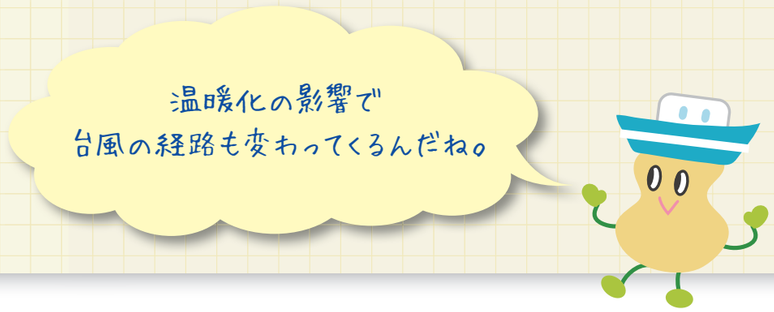


図２：台風の発生分布と、日本付近での経路の将来変化の模式図。発生分布の変化は等値線で表わされ、モデルの予測傾向が一致する地域に黄・水色をつけて示してある。発生分布は５種類の CMIP3 モデルの、経路変化はそれらに加え２種類のより台風の表現にすぐれた気象庁気象研究所 20km 格子高解像度大気モデルの将来予測結果に基づく。



（参照論文 4, 5, 6）

日本の冬

～ 熱帯からも影響 ～

◆冬の特徴

冬は、大陸のシベリア高気圧と海上のアリューシャン低気圧による東西方向の気圧の差が明瞭になります。これによって、北西からの季節風が吹くようになり、日本海側の各地に雪を降らせます。また、春の気配が近づくころには、ジェット気流の北上に伴って、日本の南岸にも低気圧（南岸低気圧）が通るようになり、太平洋側でも大雪がもたらされることがあります。これらの冬独特の気圧配置や低気圧の活動には、熱帯での大規模な雲活動も影響しています。

◆温暖化すると冬型の気圧配置と南岸低気圧はどう変わる？

温暖化によって冬の将来の気候はどのように変化するのでしょうか。多くの気候モデルは、ユーラシア大陸や北太平洋などの広い範囲でジェット気流が現在よりも北側で強まる一方、インドシナ半島から南シナ海、台湾付近の一部地域では現在よりも南側で強まるという予測をしています（図 1）。このジェット気流の影響で、温暖化すると南岸低気圧は台湾付近で成長しやすくなると考えられます。また、アリューシャン低気圧が南側で弱まることも気候モデルは予測しています。これにより西高東低の冬型の気圧配置が弱まるため、温暖化するとユーラシア大陸からやってくる寒波が弱まりそうです。以上のような冬の気候の変化は、温暖化に伴って、熱帯域の積乱雲の活動が平均的に弱くなることに関係しています。

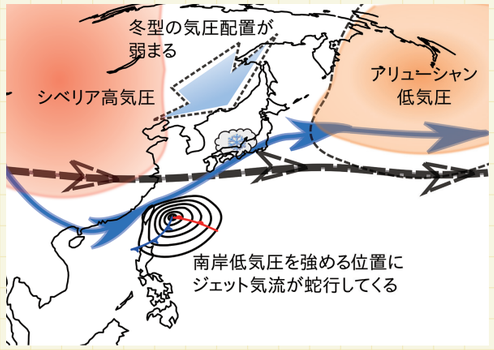


図 1：温暖化した 21 世紀末での冬の模式図。長い矢印はジェット気流の位置、等値線は気圧配置。各々、破線が現在、色が将来。

◆マッデン・ジュリアン振動（MJO）と冬季温帯低気圧

熱帯域には、インド洋から中部太平洋へと数千キロメートルに及ぶ大規模な雲域が約 1 ～ 2 か月周期でゆっくりと東進する「マッデン・ジュリアン振動（MJO）」と呼ばれる現象があります。MJO は熱帯のみならず、日本を含む亜熱帯～中緯度の天気にも影響を及ぼします。

冬の北太平洋上では西風ジェット気流があり、その北側で温帯低気圧が頻繁に発達を繰り返しています。MJO がインド洋からインドネシア域で発達すると（図 2 左）、温帯低気圧はいつもより発達し、日本付近では暖かく湿った南風が多く入り、降水が多くなります。一方、MJO が熱帯西部から中部太平洋域で発達すると（図 2 右）、反対に温帯低気圧が発達しにくくなり、日本付近では大陸からの北寄りの季節風が強まります。この様に MJO は約 1 ～ 2 か月周期で、亜熱帯～中緯度域の気圧と気温を変動させ、日本付近の天候に影響しているのです。

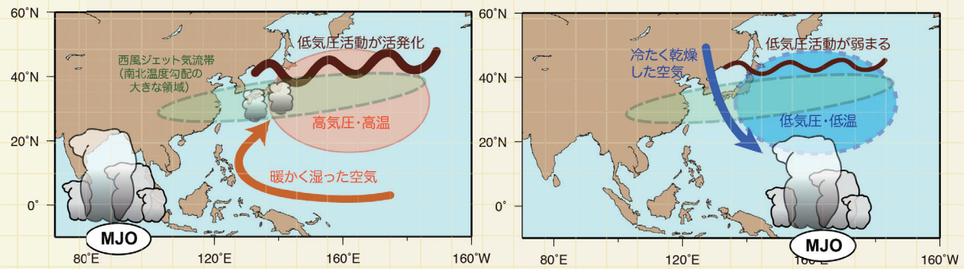


図 2：現在の冬季 MJO と MJO による亜熱帯・中緯度への影響の模式図。MJO が（左）東部熱帯インド洋で、（右）西部～中部熱帯太平洋域で発達している場合。

◆ MJO の効果の将来変化は？

CMIP5 モデルのうち、MJO が特に良く再現されているモデルは、温暖化すると MJO は東部インド洋から中部太平洋域でより活発になることを予測しています。その結果、MJO がインド洋域で発達している時には、日本付近で現在より温帯低気圧活動が活発になり降水も増加し、西太平洋域に来ると低気圧活動がより抑制されるようになります。つまり熱帯の影響が強くなるということです。しかしながら、MJO の気候モデルでの再現はいまだ難しく、今も世界中の機関で MJO のメカニズムについての研究が進められています。

（参照論文 7, 8, 9）

モンスーン

～ 増加するアジアの雨 ～

◆世界のモンスーン

夏は湿った風が海洋から大陸に、冬は乾いた風が大陸から海洋に向けて吹く季節風（モンスーン）の影響を受け、雨季と乾季を交代で迎える気候をモンスーン気候といいます。北半球に位置するアジア、北アフリカ、中央アメリカは５～９月、南半球に位置するオーストラリアなどオセアニア、南アフリカ、南アメリカは 11 ～３月に雨量が多いモンスーン地域です（図１斜線の地域）。これらの地域では、雨季と乾季の対照的な天候が１年の中で交代し、人々の生活や産業に大きく影響します。

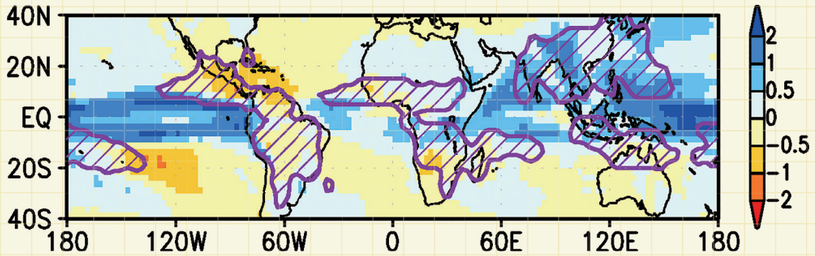


図1：雨季と乾季の降水量の差（mm/ 日）が温暖化によってどのように変化するかを示したもの。
寒色系は雨季の雨量が将来増加することを表し、暖色系は減少することを表す。

◆温暖化すると、夏のモンスーンの雨はどうなるの？

モンスーンに伴う夏の降水量は、地球温暖化がさらに進むと、どのように変化すると予測されているのでしょうか？

多数の気候モデルによる予測の結果をみると、日本を含むアジアのモンスーン地域では雨はほぼ全域にわたって増加していますが、中央アメリカのモンスーン地域では減少し、その他のモンスーン地域では雨の変化は大きくありません（図1）。

温暖化によって、気温は上昇し、空気の中に含まれる水蒸気の量が増加します。水蒸気が増加する場所はどこでも雨が増えてもおかしくないはずです。なぜモンスーンの雨は地域により増えたり減ったりするのでしょうか？

これは、水蒸気量の変化だけでなく、将来の風の地域的な変化が関係していると考えます。将来の風の変化は、大規模な季節風の変化に海水温の分布や山岳の影響も加わって地域的な特徴が顕著です。中央アメリカでは上昇流がやや弱くなり、アジアでは逆に強くなるところもあると予測されています。このことにより、中央アメリカとアジアのモンスーン地域での雨の変化の違いがもたらされます。

◆アジアの夏のモンスーンはどうなる？

もう少し詳しく、アジアでの夏のモンスーンの変化をみてみましょう（図２）。

夏季に降水量の多い南アジアから東南アジアにかけての地域では、強い西寄りの風（モンスーン西風）が吹き、このモンスーン西風が、インド洋から南アジア・東南アジアを経由して東アジアへと大規模な水蒸気の輸送を行っています。温暖化が進むと、海面からの水蒸気の供給が大きくなり、大陸側ではモンスーンの西風が強まると予測されています。また、北インド洋での海水温も大きく上昇すると予測されていて、これらの影響でアジアでの夏のモンスーンの雨が増えると考えられます。

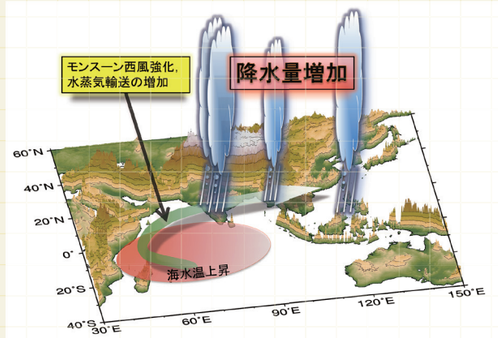
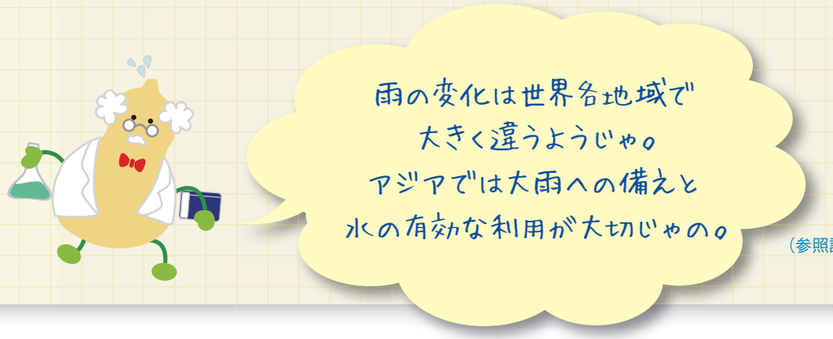


図2：夏のアジアモンスーンの将来変化の模式図。北インド洋西部で海水温が上昇し、インドからインドシナ半島にかけての地域ではモンスーン西風が強まる。

実は、これら最新の研究は CMIP3 による温暖化予測とは逆になっています。この違いを生んだ原因は未だわかっていません。モンスーンの将来変化予測の信頼性を高めるためには、観測データ解析やモデル改良などをさらに推進する必要があります。



（参照論文 10, 11）

成層圏

～ 地球温暖化の新たな証拠 ～

◆雲より高い成層圏

私たちが住んでいる対流圏の上空には、積乱雲も届かない青々とした空が広がっています。そこは成層圏と呼ばれ、高度とともに気温が上がるなど対流圏とは随分異なる特徴を持ちます。成層圏で新たに発見された地球温暖化のシグナルについて説明します。

◆成層圏大気の流れ

成層圏には、赤道域で上昇し、そこから南北両半球に広がり、高緯度で下降する、ブリューワー・ドブソン循環（BD 循環）と呼ばれる大規模な流れがあります（図 1a）。赤道域で主に生成されるオゾンは BD 循環に沿って中緯度や高緯度まで運ばれるため、BD 循環はオゾンホールの変動にも深く関わっています。世界中の主要な気候モデルのほぼ全てが、地球温暖化に伴って BD 循環が強まると予測しています。しかしながら、BD 循環に伴う赤道域の上昇流は非常に弱く観測が困難なため、気候モデルの予測が正しいかどうかは十分に確かめられていませんでした。

赤道域の成層圏には東西方向にも大規模な大気の流れがあり、約 28 ヶ月の間に西風と東風が交互に現れます（図 1b）。この振動現象は赤道準 2 年振動（QBO）と呼ばれています。QBO はまず高い場所に現れ、時間とともに低い場所へ移動し（図 1c）、BD 循環に伴う上昇流の影響を強く受けます。このため、地球温暖化に伴って成層圏の上昇流が強まると、QBO が対流圏界面付近まで十分に下りる事が出来なくなり、対流圏界面より少し高い場所（高度約 19km）での QBO は弱くなるはずです。

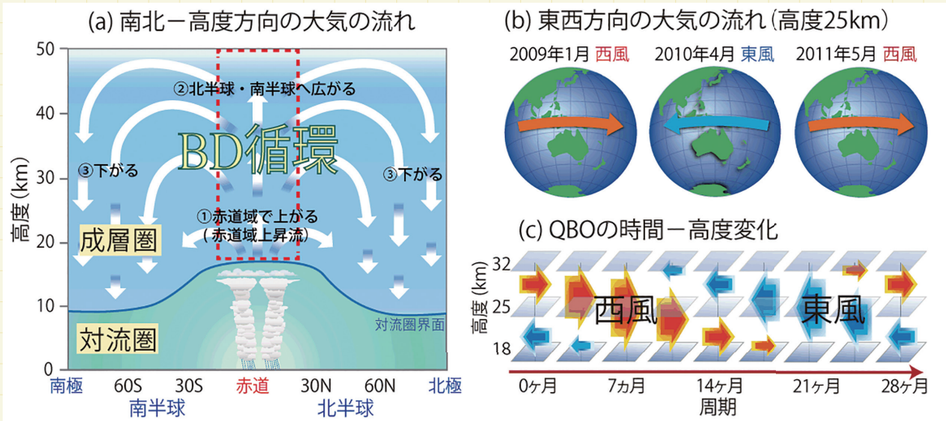


図 1：（a）高度約 50km までの南北ー高度方向の大気の流れ。緑色の大気層は対流圏、青色は成層圏、その境界は対流圏界面と呼ばれる。赤点線は QBO が存在する領域。（b）赤道域成層圏の東西方向の大気の流れ。赤が西風、青が東風。（c）高度毎に見た QBO の時間変化。右へ行くほど時間が進む。矢印が大きいほど風が強い事を示す。西風と東風は、時間の経過とともに高い場所から低い場所へ移動し、対流圏界面付近（高度約 18km）で消滅している。

◆成層圏に地球温暖化シグナルを発見！

図 2a は、東西風の観測データから計算された高度 19km 付近での QBO の強さの時間変化を示します。この 60 年間に QBO の強さが 3 割以上減少している事が分かります。次に現実的な QBO を再現したドイツ、イギリス、日本の 4 種類の CMIP5 モデルによる、高度 19km での QBO 強度と赤道域の上昇流の変化を図 2c、d に示します。これら全てのモデルで 20 世紀から 21 世紀にかけて QBO が弱まり、赤道上昇流が強まっています。一方、温室効果ガスを増加させない実験では、これらの変化は見られず、QBO の弱まりと赤道上昇流の強まりは地球温暖化が原因である事が裏付けられました。BD 循環の強まりは将来のオゾンホールの回復とも関連します。より確かな気候変動の解明の為には、成層圏の現象も表現できる高精度な気候モデルと最新観測データ解析を組み合わせた検証を続けていく必要があります。

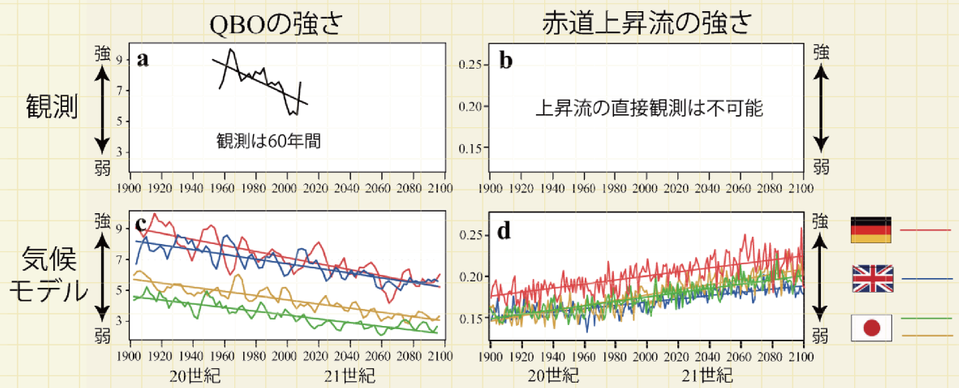
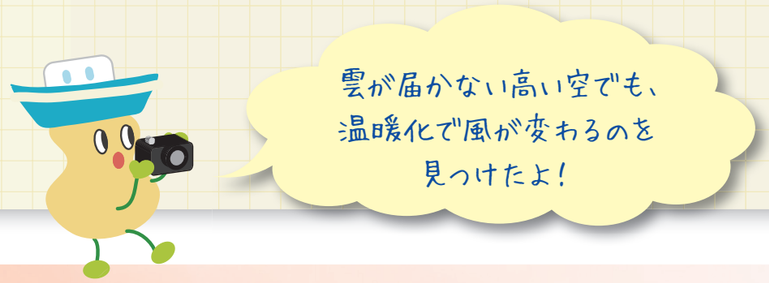


図 2:高度約 19km における（左）QBO と（右）赤道域上昇流の変化。（a, b）が観測、（c, d）が 4 種類の CMIP5 モデルの結果。20 世紀から 21 世紀にかけて QBO は弱まり、赤道域上昇流は強まっている。



（参照論文 12）

column 1 【IPCC 第 5 次評価報告書から】

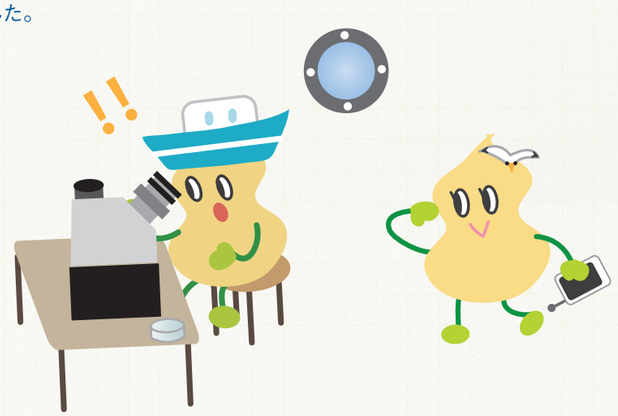
—東アジアに降る雨の将来変化—

「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第 5 次評価報告書」のうち、気候変動研究について最新の知見をまとめた報告書が 2013 年に公表されました。この冊子で述べている私たちの研究成果も多く引用されています。このコラムでは、地球温暖化の進行に伴って降水はどのように変化するのかという点に関して、報告書の内容を簡単に紹介します。

地球規模では、地表気温の上昇とともに降水量も増加することがほぼ確実であると報告されています。しかし、気温に比べて、降水量は変化の地域差が大きく、減少が予測されている所もあります。中緯度の大陸のほとんどの地域や湿潤な熱帯域では、大雨の頻度や強度が増加する可能性が非常に高くなっています。

次に、私たちの暮らす東アジアに注目してみましょう。東アジアの夏は雨季にあたり、「モンスーン」と呼ばれる現象によって暖かく湿った季節風が吹き、多量の雨がもたらされます。日本で馴染み深い梅雨もその一部です。報告書によると、将来の夏季東アジアでは、モンスーンに伴う大気の循環は現在よりも強まり、雨量も増加する可能性が高いと予測されています。また、強い雨の頻度が増加する可能性が非常に高いことや、モンスーンの雨季が今よりも長くなることが予測されています。

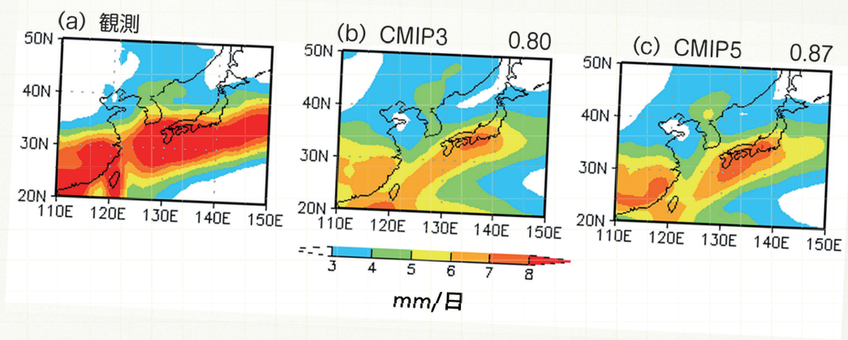
台風もまた、東アジア域に多量の雨をもたらす現象の一つです。東アジアに影響を及ぼす台風の多くは北西太平洋で発生します。将来は、北西太平洋での強い台風の頻度がどちらかと言えば増加するだろうと予測されています。私たちは、アジアの雨に関係する現象のメカニズムに踏み込んで将来変化を論じました。



column 2 【CMIP5 vs CMIP3 : 梅雨】

梅雨期に降る雨は、人間生活や農業に不可欠な水資源として貴重です。一方、梅雨期には集中豪雨が起きやすいので、土砂崩れや洪水などの自然災害が発生しやすくなります。従って、地球温暖化によって梅雨がどのように変化するかを知ることは重要です。将来変化を調べる前に、気候モデルが現在の梅雨をどの程度正しく再現できるかを知っておくことが大切です。現象を正しく再現できるモデルによる将来予測は、信頼できると考えられます。

図は日本の梅雨期である6月の雨量分布を示しています。観測値（a）を見ると中国大陸から東シナ海、西日本、東日本、日本の南海上に雨の多い地域が広がっています。これが梅雨前線です。CMIP3 モデル（b）では、梅雨前線の雨域が再現されていますが、観測に比べ雨が少ないことがわかります。CMIP5 モデル（c）では、CMIP3 モデルより梅雨前線の雨量が増えて、観測に近づいています。現実の梅雨前線の中には細かい気象現象があるのですが、CMIP3 モデルでは水平方向の計算間隔が粗いために細かな構造が表現できませんでした。CMIP5 モデルではスーパーコンピューターの性能の向上や、雲や雨の計算方法の改良などにより、梅雨前線の中の気象現象をより現実的に再現できるようになりました。その結果、CMIP5 モデルでは梅雨前線の再現性が向上し、梅雨の将来予測もより信頼できるものになりました。



図：6月の日本付近の雨量分布（mm/ 日）。1981-2000 年の平均。（a）観測値、（b）CMIP3 モデル、（c）CMIP5 モデル。（b）と（c）の外側の右上にある数字は観測値にどの程度似ているかを表す数値（相関係数）で、1 に近いほど類似。

（参照論文 13）

今後の取り組み

ー東アジア域降水の将来変化を理解するためにー

2014 年の日本は、甲府盆地での過去の記録を2倍有余に上回る積雪災害、通常は寡雨の瀬戸内・広島での豪雨災害、低気圧の連続的な急発達による北海道・北陸地方での豪雪災害など、降水による数々の甚大な被害に見舞われました。地球温暖化に伴う気候の異変がいよいよ現れてきたのではないかという声も多く聞かれるようになりました。地球温暖化に伴って日本や東アジア域に降水の異変は起きるのでしょうか？私たちは、今後どのような降水の変化に備えなければならないのでしょうか？これらの問題に答えるため、私たちはまず世界の気候モデル実験結果を利用した研究に取り組みました。

2013 年に発行された IPCC の第 5 次評価報告書作成のため、第 5 次結合モデル相互比較計画（CMIP5）という国際的な研究計画のもと、世界の気候モデルによる実験結果が集約されました。計算機の性能向上もあり、6 年前の CMIP3 計画に比較して、モデルの解像度はよくなり、条件も様々に設定された膨大な数の実験結果が提出されました。世界中のモデル開発研究者による努力の積み重ねともいえます。

今回は、この CMIP5 実験結果を利用して、東アジア域の雨の特徴が将来どのように変化するかという、私たちの生活の安全に直接重要な、しかしながら気候モデルにとっては比較的難しい問題に焦点を当てて研究を進めました。梅雨の雨の降り方、東アジアの雨の変化の特徴、熱帯の現象との関係などの研究を行いました。これらの研究を通じて、雨の降り方の「特徴」のいくつかは、大規模な循環で決められることがわかりました。一方で、西のアジア大陸、東の太平洋に挟まれた東アジアは、大陸地形や海洋からの影響を複雑に受ける特有な場所にあり、このような地域での大規模場の変化を予測すること自体の難しさも一層はっきりしました。

世界中の気候モデルを比較研究してみると、気候モデルの得手不得手も浮かび上がってきます。私たちは、将来の降水変化に対する社会のより具体的な対策に資するため、気候モデルに加え、雲や雨を詳細に表現する雲解像モデル、気象観測や最新の衛星観測などの現実データを組み合わせた解析により、降水現象の特性と気候との関係をさらに深く理解することに、今後さらに力を注いでいく計画です。

〈参照論文〉

1. Hirahara, S., H. Ohno, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2012: Strengthening of the southern side of the jet stream and delayed withdrawal of Baiu season in future climate. J. Meteor. Soc. Japan, 90, 663-671, doi:10.2151/jmsj.2012-506.
2. Yokoyama, C., Y. N. Takayabu, and S. Kanada, 2014: A contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan. Part I: TRMM PR observation. J. Climate, 27, 5872-5890, doi:10.1175/JCLI-D-13-00350.1.
3. Manda, A., H. Nakamura, N. Asano, S. Iizuka, T. Miyama, Q. Moteki, M. Yoshioka, K. Nishii, and T. Miyasaka, 2014: Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon. Scientific Reports, 4, 5741, doi:10.1038/srep05741.
4. Yokoi, S., and Y. N. Takayabu, 2009: Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the Western North Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 525-538, doi:10.2151/jmsj.87.525.
5. Yokoi, S., C. Takahashi, K. Yasunaga, and R. Shirooka, 2012: Multi-model projection of tropical cyclone genesis frequency over the Western North Pacific: CMIP5 results. SOLA, 8, 137-140, doi:10.2151/sola.2012-034.
6. Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and H. Murakami, 2013: Attribution of projected future changes in tropical cyclone passage frequency over the Western North Pacific. J. Climate, 26, 4096-4111, doi:10.1175/JCLI-D-12-00218.1.
7. Harada, M., S. Hirahara, S. Hagiya, H. Murai, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2013: Intensification of the south side of the Asian jet stream during the northern winter in CMIP5 models. SOLA, 9, 94-97, doi:10.2151/sola.2013-021.
8. Harada, M., S. Wakamatsu, S. Hirahara, H. Murai, Y. Oikawa, and S. Maeda, 2014: Impacts of slowed tropical circulation on winter stationary waves in East Asia and the North Pacific. SOLA, 10, 180-184, doi:10.2151/sola.2014-038.
9. Takahashi, C., and R. Shirooka, 2014: Storm track activity over the North Pacific associated with the Madden-Julian Oscillation under ENSO conditions during boreal winter. J. Geophys. Res., 119, 10663-10683, doi:10.1002/2014JD021973.
10. Endo, H., and A. Kitoh, 2014: Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate. Geophys. Res. Lett., 41, 1704-1710, doi:10.1002/2013GL059158.
11. Ogata, T., H. Ueda, T. Inoue, M. Hayasaki, A. Yoshida, S. Watanabe, M. Kira, M. Oshiro, and A. Kumai, 2014: Projected future changes in the Asian monsoon: A comparison of CMIP3 and CMIP5 model results. J. Meteor. Soc. Japan, 92, 207-225, doi:10.2151/jmsj.2014-302.
12. Kawatani, Y., and K. Hamilton, 2013: Weakened stratospheric Quasibiennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling. Nature, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140.
13. Kusunoki, S., and O. Arakawa, 2015: Are CMIP5 models better than CMIP3 models in simulating precipitation over East Asia? J. Climate, accepted.

〈研究参画機関（サブリーダー）〉

（1） アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の解明とその将来変化についての研究
東京大学大気海洋研究所（高薮）
東京大学先端科学技術研究センター（中村）

（2） アジア域気候とこれに関連する陸面・海面状態の将来変化の研究
国土交通省気象庁気象研究所 気候研究部（尾瀬）
国土交通省気象庁地球環境・海洋部気候情報課（前田）

（3） ダウンスケーリング研究のためのCMIP5マルチモデルにおけるアジアモンスーン気候再現性と将来変化の研究
筑波大学 生命環境系（植田）

（4） 熱帯域現象が東アジアの降水活動に与える影響の解明とその将来変化の研究
独立行政法人海洋研究開発機構 大気海洋相互作用研究分野（城岡）

（5） 対流圏ー成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究
独立行政法人海洋研究開発機構 総合的気候変動予測研究分野（河谷）

「暑いだけじゃない地球温暖化2」編集者・執筆者

高薮縁・横山千恵・廣田渚郎・西井和晃・尾瀬智昭・楠昌司・石原幸司・若松俊哉
早崎将光・高橋千陽・横井覚・河谷芳雄・濱田篤・小松崎礼子
写真：柏崎美樹　キャラクター：渡部寿賀子　印刷：株式会社 アズディップ