

課題名 2A-1201 CMIP5マルチモデルを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究

課題代表者名 高藪 縁（東京大学 大気海洋研究所 教授）

研究実施期間 平成24～26年度

累計予算額 138,349千円（うち26年度48,421千円）

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード CMIP5マルチ気候モデル、地球温暖化、梅雨期集中豪雨、海面水温、モンスーン、亜熱帯ジェット、寒気吹き出し、Madden-Julian振動(MJO)、台風、成層圏大規模循環

研究体制

- (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、東京大学 先端科学技術研究センター)
- (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)
- (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)
- (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)
- (5) 対流圏—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 基幹研究領域 統合的気候変動予測研究分野)

研究協力機関

国立極地研究所、名古屋大学、長崎大学、国土交通省気象庁地球環境・海洋部

研究概要

1. はじめに(研究背景等)

地球温暖化に伴う気候変動に対する的確な対策には、温暖化の影響に関する具体的な情報が必要である。国民生活への気候変化の影響は、天気現象(台風、低気圧、梅雨、豪雨、豪雪、干ばつ、熱波など)の変化を通してより顕在化する。また、2011年タイの洪水のように、アジアの様々な地域の気候変化も日本社会・経済に直接的な影響をもつ。第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)気候モデル実験が集約されIPCC 第5次評価報告書(AR5)が発行されたが、アジア域気候の将来変化についての知見は不十分である。特に降水は、20世紀観測結果も将来変化も、地表面気温が全球で上昇傾向を示すのとは対照的に、増加・減少の地域差が複雑で、予測のばらつきも大きい。

そこで本研究課題では、最新のCMIP5マルチモデルデータと最新の観測データとを利用し、地球温暖化に伴って日本の四季およびアジア域の様々な気象がいかに変化するかを調査研究し、成果を分かりやすく発表することを目指した。特に日本の社会生活に直接的な影響があるアジア域の雲・降水に関わる現象に焦点を当てた。また近年成層圏の状態が対流圏の現象に大きな影響を与え得るということが知られているが、CMIP3時代のモデルでは成層圏の鉛直解像度が粗く研究対象とする事は難しかった。CMIP5の一部で初めて可能になったこの問題の解析にも取り組んだ。図1に研究体制を示す。

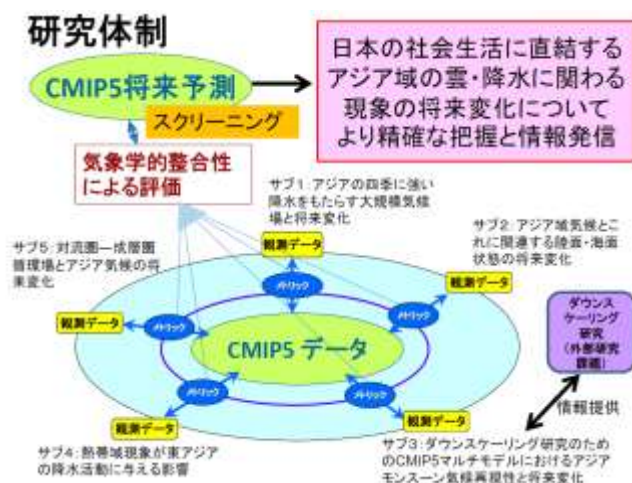


図1: 研究の基本的構想と体制

2. 研究開発目的

アジア域の降水現象およびそれに関わる地球全域の気候状態の将来変化について予測する際、人間社会への影響という観点において効果的な情報を抽出することが重要である。IPCC AR5でも、アジア域の降水の将来変化についての詳細な情報は非常に不足している。そこで、本課題では、CMIP5に集約された世界各国の複数の高性能気候モデルによる予測結果を詳細に分析することによって、日本を含むアジアの気候が温暖化に伴い今後どのように変化していくのかを示し、日常生活、文化活動、経済活動等において地球温暖化への適応策を考案するための支援を行うことを目的とする。その際、時間的に平均した気候分布のみならず、高低気圧や季節進行など、我々の日常生活に直接的な影響を及ぼす日々の変化をもたらす気象に注目し、さらにそのような気象の再現性の良し悪しをもたらす物理的な要因を調べる。各サブ課題は以下の項目に注目して解析を行う。

(1) 梅雨前線に伴う降水の特性とその季節進行、黒潮などの海面水温分布の変化に伴う降雨変化の再現性とその物理的要因を評価し、それに基づいて温暖化時の変化を議論する。東アジアの気候に遠隔影響をもたらす熱帯降水分布やユーラシア大陸上の降水分布の気候モデルバイアスの原因を調査し、将来変化を議論するのに不可欠な気候モデルの性能に関する提言を行う。(2) 日本の季節進行やアジア域気候および関連する海面陸面状態の将来変化について、高い気候再現性を持った予測結果を解析し予測の信頼度を高めるとともに、気候力学的メカニズムを分析することで科学的な理解を進める。(3) ダウンスケーリング研究に影響を与える夏季アジアモンスーンの再現性について統計的・力学的な比較を行う。また、地球温暖化時の寒候期の寒気吹き出し強度の変化について評価する。(4) 台風、熱帯季節内変動などの熱帯域の諸現象について、気候モデル再現性を調べ、将来変化を評価する。さらにテレコネクション等を通して熱帯域の対流活動が東アジアに及ぼす影響とその将来変化を評価する。(5) 観測データ、気候モデル実験、及びCMIP5モデルの20世紀再現実験と将来予測実験のデータ解析を組み合わせ、対流圏－成層圏循環場の再現性の検証と将来予測に関する研究を行う。

3. 研究開発の方法

(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

1) まず、熱帯降雨観測計画 (TRMM) 衛星搭載降雨レーダによる降雨立体観測データ、気象庁再解析気象データを用い、日本付近の梅雨前線の南北での降雨特性の違いを調べた。次に、梅雨とアジア域のジェット気流などの大気大規模循環との関係を調べた。その結果を生かし、Taylorスコアなどを用いて、CMIP5の各モデルの現在気候再現実験の梅雨前線降雨と大規模場の関係の再現性を調べた。そして再現のよいモデルを選択し、CMIP5のRCP4.5将来予測実験結果から、ジェットの変化と大気成層の変化とが梅雨前線に伴う降雨の将来変化にいかなる効果をもつかを調べた。また、55年の気象再解析データ (JRA55) に見られる梅雨前線降雨の近年の長期変動の要因を解析した。

2) アジア域降水活動に遠隔影響をもたらす熱帯対流活動およびユーラシア大陸降水分布の気候モデル再現性には、モデル間で比較的共通のバイアスがあることが長年の問題となっている。CMIP3、及びCMIP5の十数個のマルチ気候モデルのデータを用い、熱帯、ユーラシア大陸上それぞれで、モデル降水の気候平均

(1981-2000年平均)的な分布と、その降水特性とを解析した。モデルの再現性は衛星観測データ(TRMM PR2A25・GPCPの降水量データ、CERESの地表放射フラックスデータなど)、地上観測データ(APHRODITEの降水量データ、Hadley Centerの海面水温(SST)やCRU-UEAの地表気温データ)、再解析データ(NCEP,JRA25,ERA40,MERRA,JRA55)と比較して調べた。モデル再現性を決める要因を明らかにするために、気候モデルの降水を計算する降水パラメタリゼーションの特性解析、モデルの分解能の議論、水・熱収支解析などを行った。

3) 過去100年の海水温変化の解析を行い、最も顕著な海水温上昇が見られたのは、黒潮などの中緯度・亜熱帯の強い暖流域であり、水深の浅い東シナ海でも観測されていることを示した。CMIP3やCMIP5による温暖化予測でも見込まれる顕著な水温上昇が日本付近の降水に与える影響を評価するため、対流性降水の組織化や季節性に現在気候における水温分布が与える影響をデータ解析や3段階にネストした領域大気モデル実験から調査した。また、領域大気モデル実験にて全球気候モデル予測から得られた水温上昇分を与えた実験も行い、温暖化に伴う水温上昇が顕著な降水イベントに与える影響評価を実施した。さらに、黒潮など暖流の強化に寄与する亜熱帯高気圧の強化の可能性についても、CMIP3実験の結果に基づき考察した。

(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

世界各国の気候モデルCMIP5モデルによるアジア降水量再現性の精度向上を確認した上で、温暖化に伴うモンスーン降水の変化について、日本を含むアジアモンスーン域の特徴を定量的に明らかにした。さらに、地球温暖化に伴う東アジアの大気循環の将来変化について解析しメカニズムを明らかにした。また、熱帯太平洋などの海面水温やユーラシア大陸などの陸上気温、海洋循環の変化による北太平洋西部の水位将来変化について解析し、その重要性を明らかにした。この研究課題で主として解析した対象は、CMIP5に参加した大気海洋、大循環モデル(AOGCM)であるが、解析条件により研究毎にモデルを選択している。必要に応じてCMIP3モデルとの比較も行い、その解析結果を比較し信頼性を確認している。さらに、熱帯域の上層発散の弱体化と東アジアの定在波変化の関係について理論的に調査するため、帯状平均場の周りに線形化した数値モデル実験を行った。

(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

アジアモンスーン地域の夏季・冬季平均気象要素について、年々変動の空間パターン類似性の指標となるTaylorダイアグラムを用いてCMIP3およびCMIP5モデル群(各24モデル)の現在気候再現性を評価した。また、寒候期の寒気吹き出し強度の指標として、日別気温差から気温低下強度(daily cooling intensity; DCI)を定義し、月別に算出した。DCIの地理的分布やその季節変化の現在気候再現性と将来変化の特徴やモデル間の分散などを評価した。

(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

熱帯域現象が東アジアの降水に与える影響の解明とその将来変化に関して、CMIP5マルチ気候モデルにおける再現性を評価し、再現性の良いモデルを用いて構造の評価や将来変化を調査すると共に、CMIP3モデルとの比較を行った。まず、熱帯域における顕著な季節内変動現象としてマッデン・ジュリアン振動(MJO: 数千kmの積乱雲の集団が地球スケールの東西循環を伴い赤道を東進する現象で、多くの気候モデルでは未だ再現が困難)に着目し、熱帯域現象の理解に重要な三次元大気場や海面水温の日別値が得られるCMIP5モデルを用いて、観測との比較から現象の再現性を評価した。再現性の良いモデルを抽出することで、MJOの内部構造の再現性や、中緯度東アジア域の温帯低気圧活動への影響、将来気候での変動等を調査した。台風に関しては、発生頻度分布を良く再現するモデルを用いて、将来気候における発生頻度等をCMIP3モデルの結果と比較した。

(5) 対流圏—成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

地点観測データ、衛星観測データ、自身による気候モデル実験とCMIP5モデルの20世紀再現実験と将来予測実験のデータ解析を組み合わせ研究を行った。得られた現象が温暖化に伴うものかどうかを検証する為、温暖化の影響が無いコントロール実験のデータも解析した。力学場・放射場の変化と対応した対流圏—成層圏大規模循環場の平均場と擾乱の相互作用の特徴を記述可能な方程式系を導出し、気候モデル実験で得られたデータ解析に応用した。

4. 結果及び考察

(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

最新のCMIP5マルチモデルデータと最新の観測データを利用し、1)初夏の日本付近における降水特性と大規模場構造の再現性評価と将来変化の推定、2)東アジア気候に遠隔影響を及ぼす熱帯域とユーラシア大陸上の降水過程の気候モデル再現性の評価、3)日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系・低気圧活動に及ぼす影響の評価についての研究を実施し、以下の成果が得られた。

a)衛星観測降雨レーダーデータと大規模場を表現する気象データとを組み合わせた解析により、日本付近の梅雨降雨帯の南側では背の高い対流雲が強い雨を降らせ、北側の層状性降雨と顕著に特性が異なることがわかった。同時に、大規模場の状況から梅雨前線の位置を特定することができることが確認できた。

1-b)CMIP5実験結果の比較解析から梅雨降雨帯とアジア上空ジェットとの位置関係をよく再現するモデルでは、将来、アジアジェットは南偏傾向を示した。海水温上昇と水蒸気量増加による大気不安定化と相俟って、台湾から日本南岸にかけて将来の降水量の増加が予想される。

c)現実の55年データに見られる梅雨の長期変動に、太平洋十年規模変動の影響が大きいことがわかった。

d)東アジア気候に遠隔影響が大きい熱帯降雨分布の気候モデルバイアスについてCMIP3とCMIP5のマルチ気候モデルデータの比較により解析した。典型的なバイアスであるダブルITCZと海面水温冷舌バイアスとは、これまで双方とも海水温分布の再現性に帰着されることが多かったが、前者はモデルの積雲対流の表現方法に、後者は海洋モデルの再現性にと、別々の要因を持つことを初めて明らかにした。

e)東アジア気候に遠隔影響をもつユーラシア大陸の降水バイアスは、気候モデルの雲の過小評価とそれに伴う大陸規模の循環バイアスに帰着されることを解明した。

f)水深の浅い東シナ海水温の季節変化が九州の豪雨発生に与える影響を調査するため、2012年7月の九州北部豪雨を対象にダウンスケールした領域モデル実験を実施した。また、CMIP5の全球温暖化予測から得られた気温と水温上昇分を与えた実験を行った。この結果、梅雨末期の九州の豪雨には東シナ海の夏季(7月)の季節的昇温が影響し、将来気候では6月の豪雨発生の可能性があることを示した。

g)日本東方海上の海洋前線帯において観測された顕著な暖水偏差を与えた大気大循環モデルによる予報実験により、北太平洋上で実際に観測された高気圧性循環偏差が従来にない高い有意性をもって再現された(Okajima et al. 2014; 成果論文)。この結果は、日本東方沖の亜寒帯海洋前線帯の南北変位の正しい表現が、冬季移動性高低気圧経路の表現に重要であることを示した。

h)東方海上の海洋前線帯における水温の10年規模変動が近年弱体化傾向にあることを観測データから見出した(Miyasaka et al. 2014)。10年規模変動の長期変動が温室効果気体濃度を固定した気候モデルでも現れることも確認し、この長期変動が自然変動の揺らぎと解釈できた。

i)CMIP5による温暖化予測データの詳細な解析から、世界各地域での地表面蒸発量の変化の要因と季節変化を明らかにした。

全サブ課題から参加する編集委員会を結成、課題全体の論文発表成果から数編を選択し、温暖化の影響を中高生レベルにわかりやすく噛み砕いて解説するための議論を重ね、小冊子を刊行した。

(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

CMIP5のマルチモデルデータを用いて、1)モンスーン地域の降水変化に対する熱力学的効果と力学的効果についての定量的解析、2)海面水温や陸面温度と関連するアジア域降水量の将来変化についての解析、3)地球温暖化に伴う海洋循環の変化による北太平洋西部の水位将来変化についての解析、4)CMIP5モデルによる梅雨や降水強度の現在気候再現性の研究、5)冬季東アジアにおける大気循環の将来変化についての研究を実施した。

この結果、以下のことがわかった。1)温暖化に伴うモンスーン地域の降水変化は一様ではなく、地域間の違いが大きい。日本を含むアジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱体化による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも大きな降水増加が予測される。2)降水量の将来変化予測は海洋大陸の東西やアフリカのサヘル域でモデル間の符号一致度が小さいが、前者は熱帯海上気温の将来変化と、後者は北半球の大陸高緯度の陸上気温の将来変化と関係している。3)地球温暖化に伴う海洋循環の変化による日本東方など北太平洋西部の領域海面水位上昇は、全球平均海面水位上昇より大きい。4)東アジアの月平均降水量や極端降水量の再現性は、CMIP5モデルがCMIP3モデルより精度が良く、また梅雨の北上傾向がより良く再現されている。5)冬季(12~2月)東アジアにおける循環場の変化の解析と数値実験によれば、地球温暖化による熱帯域対流圏の成層安定化によってウォーカー循環が弱体化し松野-ギル応答が弱まり、東アジアでは亜熱帯ジェットの位置が変化する。これによる日本の南東海上での高気圧性変化はアリューシャン低気圧の南側を弱める方向に寄与するため、日本付近

の冬型気圧配置が弱化して寒波が弱まる。

(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

夏季・冬季平均場は、全般的にCMIP5の現在気候再現性が向上していた。しかし、両季節ともに多雨地域での降水の再現性が水平風の再現性に比べて低い。日本付近においては、南北風将来変化がCMIP5モデル間でも非常に大きな分散を示す。気温低下強度(DCI)も全体傾向としては再現性が向上していたが、高緯度域での低温バイアスに起因して一部地域で過大気味であった。特筆すべき結果として、初春期の東アジアにおいてDCIの強化が顕著に見られた。温暖化するにもかかわらず、日々の気温低下幅が大きく事を意味しており、温暖化の緩和策・適応策を考える際に重要な知見となる。

(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

MJOの再現に関して、CMIP5モデルはCMIP3と比べて改善がみられているが、依然として系統的な誤差が残っている。個別の気象要素毎にMJOの構造を調べると、例えば降水の極大と海面水温の低下、下層の東西風と水蒸気変動との対応等で、現実の大気では成り立っていない関係がみられており、観測とモデルとの間には根本的な相違があることが示唆される。

比較的再現性の良いモデルを用いた解析によると、MJOの中緯度温帯低気圧活動への影響に関しては、MJOがインド洋で活発な時に北太平洋域の温帯低気圧活動の強化がみられた。また、将来気候においては、MJOに伴う熱帯域降水が増加し、中緯度域の擾乱の活動度がさらに強化することが予想された。

台風発生頻度分布に関しても、現在気候における再現性の良いモデルと用いた解析を行い、フィリピン東海上のモンスーントラフが東に伸張することで、台風の主要発生域が東方へ拡大し、日本への台風接近数が減少する可能性があることが示された。この結果はCMIP3での予測とも基本的に整合していた。

(5) 対流圏—成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

東西風観測データを解析し、この60年間で下部成層圏のQBO振幅が30%程度減少している事を世界で初めて発見した。更に同じ解析手法を用いてCMIP5気候モデルデータについて、地球温暖化に伴うQBOと赤道域上昇流の変化を解析した。その結果、QBOを再現する事に成功している複数の気候モデル全てで、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る事が確認された。

気候変動に重要な役割を果たしている成層圏水蒸気の年々変動を、最新衛星観測と気候モデルを組み合わせ精査した。観測データから(1)上部成層圏で時間と共に下方伝播する水蒸気偏差の存在を初めて発見、(2)上部対流圏から下部成層圏にかけて上方伝播する成分が卓越することを示した。次に気候モデル実験を行い(1)と(2)のメカニズムを解明し、(2)に関してはQBO振幅と相関が高いことが分かった。

成層圏を全て含むハイトップモデルと含まないロートップモデルで、東西風の平均構造と年々変動成分を調べた。両者の間には東西風の平均場には統計的に有意な差は見られなかったが、年々変動成分については、成層圏の有無が決定的であり、年々変動の大きさを考察するには成層圏を入れる事が必要不可欠であった。

力学場・放射場の変化と対応した対流圏—成層圏大規模循環場の平均場と擾乱の相互作用の特徴を記述可能な方程式系(GTEM)の導出に成功した。実際の大気大循環場のデータに適用したところ、理論的に予想されていた負の渦拡散を定量的に初めて見積もることが出来た。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

本課題「CMIP5マルチモデルを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究」では、気候モデルの再現性に関して物理的解釈に重点を置いて研究を行った結果、3年間でNature論文を含む33本の査読付一流国際学術誌への掲載発表と、198件の学会等の口頭発表を達成し、この分野における科学的理解の発展に大きく貢献したといえる。また、3回の国際会議を主催して海外のエキスパートを招聘し、CMIP5相互比較によるアジア気候の将来変化研究についての研究情報交換を行ったことも科学的意義が大きい。

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

a) 最新の衛星観測データと大規模気象場とを組み合わせた解析により、前線南北での降水の3次元構造の顕著な違いを世界で初めて明らかにし(Yokoyama et al. 2014)、初夏の日本付近の降水に関する理解を深めた点で科学的意義が大きい。

b) 熱帯太平洋降水分布のダブルITCZと赤道域冷舌バイアスは、世界中の気候モデルに共通して見られる

重要な問題として知られているが、本研究によって世界で初めて、前者は主に大気モデルの積雲対流パラメタリゼーションに起因し、後者は海洋モデル依存性が高いという、バイアス要因が明確分離にされた(Hirota and Takayabu, 2013)点で科学的意義が大きい。さらにダブルITCZバイアスに関して、気候モデルによる感度実験も行い、物理プロセスの理解に基づいて具体的なモデルの改良方法も示した(Hirota et al. 2014)ことも科学的価値が高い。ユーラシア大陸上の降水バイアスも多くモデルが共通して抱える問題であり、その発生メカニズムの解明は科学的価値が高い。

c)九州北部豪雨の解析と数値実験結果は、東シナ海の水温の顕著な季節性が水蒸気供給による大気的不安定化を通じて豪雨に本質的に寄与し得ることを初めて明確に示し、科学的意義が高く、Scientific Reports誌掲載の成果論文(Manda et al. 2014)として記者発表した。

d) Okajima et al. 2014は、従来否定されてきた中緯度海洋変動が大規模大気循環に及ぼす影響を初めて明確に示した点で科学的価値が高い。また、東方海上の海洋前線帯における水温の10年規模変動期変動が自然変動の揺らぎと解釈できたことは、北太平洋域の気候状態の将来変化予測に不確実性をもたらす新たな要因を見出した。

e) Masunaga et al. (2015)は、全球大気モデルにおいても十分な水平解像度があり、水温前線を表現できる水温データを与えれば、日本の東方海上の複雑な水温分布の顕著で局所的な水温勾配が大気境界層のメソ構造や雲・降水系の形成に与える影響を表現できることを示し、科学的価値が高い。

f) 夏季の北極海沿岸ストームトラックの研究(Nishii et al. 2015)は、温暖化の著しい北極海域への熱・水蒸気の輸送の再現性に、IPCCクラスの気候モデルではかなりの過小評価と不確実性があることを指摘し、シベリア域の陸面・植生などの表現の改善の必要性を促す価値がある。

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

a) アジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱化(力学的効果)による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも水蒸気の増加の効果が現れやすく、大きな降水増加が予測されていることがわかった。b) 東アジアにおける月平均降水量や極端降水量の再現性はCMIP5がCMIP3より精度が良く、また梅雨の北上傾向がより良く再現されている。世界の気候モデルによる東アジアの降水量再現性は確実に再現していることが判明した。c) 日本の南東海上での高気圧性変化はアリュシャン低気圧の南側を弱める方向に寄与するため、地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が示唆される。温暖化による熱帯対流圏の成層安定化が東アジアにおける冬の循環の変化に及ぼす影響については、Hori and Ueda(2006)などの先行研究が存在するものの、数は少なく、これまで理解があまり進んでいなかった。そのため、本研究が果たした科学的意義は大きいと考えられる。

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

温暖化により、時期・季節によっては現在気候よりも大きな気温急低下が生じる可能性を示した。ただし、気温低下幅の将来変化はモデル間で大きくばらつき、季節平均などの大気循環場の現在気候再現性とは関連性を見いだすことは困難であった。すなわち、ダウンスケーリング研究で利用する全球モデル選択のためには、季節平均気象要素の再現性だけでなく、短周期変動の再現性も含め、複数の指標を総合した評価基準で選択する必要があることを示した。

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

気候モデルによる再現が難しいとされてきた熱帯季節内変動現象に関し、再現性の評価により信頼性の高いモデルを抽出することで現象の解析を行い、不確実性の低い将来予測情報の抽出が可能となったことは、科学的意義が大きい。

5) 対流圏—成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

地球温暖化の新たなシグナルが、成層圏のQBOという現象に既に現れていることを発見するとともに、大気微量成分を全球に運ぶ極めて重要なBDCの強化を観測データから世界で初めて立証し、気候モデル予測の正当性を示した点は、今後の温暖化予測研究にとっての科学的意義が大きく、Natureに掲載された(Kawatani and Hamilton, 2003)。この知見は、オゾン層将来予測モデルを用いたオゾン層回復時期・程度に関する知見に定量的な示唆を与える可能性もあり、今後のモデル予測精度の向上や、IPCCの科学的知見の収集にも貢献する。大きな放射強制力を持つ故に、気候変動に重要な役割を果たす成層圏水蒸気の年々変動について、その実態を示しメカニズムの解明をしたことや、中高緯度で成層圏から対流圏まで伸び

る東西風の年々変動の再現性には成層圏を含む必要を示した科学的意義は大きい。また、新たなGTEM解析法により、現実的な波動と平均場の相互作用について、理論的に予想された負の渦拡散の効果を初めて定量的に取り扱うことが出来るようになったことの科学的意義も大きい。

(2)環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- 1) 気象庁は、サブ課題2の成果を「異常気象レポート2014」(2015年3月発行)に引用した。
- 2) 2013年に発行されたIPCC AR5には、本課題メンバーによる学術論文17本(同グループによる推進費先行課題S-5-2の成果で本課題に継続している)が引用された。

<行政が活用することが見込まれる成果>

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

- a) 梅雨の雨の特徴は、数百km幅の降雨帯の中で顕著な南北差をもち、前線の南側では激しい積乱雲の雨が多い。ジェット気流などが気候変動に伴い僅かに南北移動すると、豪雨頻度など日本域の雨の様相に急激な変化をもたらす可能性を示唆するもので、防災面における温暖化対策策定の際に重要な知見を与えることが見込まれる。
- b) 本研究の同著者によるダブルITCZの要因についての論文の第一報(先行推進費)は将来予測のための気候モデルの重要な改良策を指摘し、IPCC AR5に引用された。今回はその物理的意味をより明確にした点で、気候モデル改良への指摘にさらに活用されることが見込まれる。
- c) 九州北部豪雨の再現・感度実験は、浅い東シナ海の水温の顕著な季節性の寄与を初めて明確化し、今世紀半ば以降は東シナ海水温の顕著な上昇によって、将来こうした規模の豪雨が6月末にも起こり得る可能性を示唆し、かつ7月ならば現在よりも30%もの降水量増加が見込まれる可能性を示唆するもので、今後の防災・環境政策に役立つ重要な知見を与える。
- d) 日本東方海上などの海洋前線帯の水溫偏差は海洋循環の変動により形成・維持されるため、中高緯度では例外的に大気へ熱力学的強制を及ぼし得る。今回の大気大循環モデル実験の結果は季節予報の精度向上にも寄与し得る成果である。この研究成果の論文はIPCC AR5でも引用されている。
- e) 一般市民向け小冊子「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、本課題で発行された査読つき学術論文の成果から、地球温暖化に伴う身近な気象の変化についてのわかりやすい話題を選び、内容を噛み砕いて編集したものであり、国民に地球温暖化の効果を実感してもらうための活用が役立つと考えられる。

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

本研究で得られた地球温暖化に伴う気候の変化についての情報は、より具体的に国民や関係機関に伝えられることにより、日本社会の様々な分野での影響評価研究に基づく適応策の検討に貢献できる。具体的には、a) 日本を含むアジア域では世界各地域に比べて地球温暖化による大きな降水増加が予測されるため、大雨に対する備えと水の有効利用が必要であること、b) 地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が理論的に明確になったこと、c) 日本付近では大気循環の変化に伴う海面水位変化が大きく、世界平均海面水位の将来変化値による議論のみでは不十分であること、d) 世界の気候モデルの降水量再現性は着実に向上しているが、日本を含むアジアでは観測との絶対比較ではまだまだ不十分であり、陸面温度や海面水温の将来変化に伴う降水量変化の不確実性も認められることから、今後も気候モデルの開発とこれを用いた温暖化予測研究が望まれること、である。

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

寒気吹き出し時の気温低下幅が、東アジアの初春期で特に強くなることを初めて示した。初春期での気温低下幅の強化は、単に気象要素の短周期変動性の変化にとどまらない。東アジアにおいては、a) 黄砂の発生・輸送動態の変調をもたらす、b) 温暖化した気候に適応した品種の農作物に対する低温障害を引き起こす、などの影響が考えられる。この知見はアジア域全体での温暖化適応策の多国間協議の場において特に重要な知見となると期待される。

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

熱帯インド洋から中部太平洋で発達する大規模な雲群(MJO: マッデン・ジュリアン振動)の発達、日本を含む東アジア域における低気圧活動に大きく影響している。将来気候においては熱帯MJOによる中緯度への影響が強化するであろうことが示唆された。日本付近の将来気候変動予測においては、熱帯域現象の再現性や予測精度を向上させることが重要であるという知見を示している。

また、気候モデルにおける将来気候実験では、台風発生に好都合な環境場であるフィリピン沖のモンスーン低圧帯が東に伸張り、台風の主要発生域が東方へ拡大又は移動し、日本域への台風接近数が減少する可能性があることが示唆された。この成果は、IPCC AR5への貢献論文として地球温暖化関連政策に資するとともに、我が国における防災・環境政策にも重要な示唆を与える知見である。

5) 対流圏—成層圏循環場とアジア気候の将来変化に関する研究

地球温暖化による成層圏循環の応答を初めて観測から実証しNature誌に発表した。これは、政策者が地球温暖化の事実の下に政策を行うことをサポートする重要な証拠となる。更に温暖化影響の正確な把握には成層圏現象を正しく表現できる気候モデルの利用が必要不可欠なことを示した。これはオゾンホール回復のための政策にも重要である

6. 研究成果の主な発表状況

(1) 主な誌上発表

<査読付き論文>

- 1) T. MIYAMA, M. NONAKA, H. NAKAMURA and A. KUWANO-YOSHIDA: Tellus A, 64, 18962 (2012)
“A striking early-summer event of a convective rainband persistent along the warm Kuroshio in the East China Sea”
- 2) S. YOKOI, C. TAKAHASHI, K. YASUNAGA, and R. SHIROOKA: SOLA, 8, 137-140 (2012)
“Multi-model projection of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific: CMIP5 results”
- 3) T. MIYAKAWA, S. YOKOI, N. HIROTA, S. HIRAHARA, T. INOUE and Y. N. TAKAYABU: J. Meteorol. Soc. Jpn., 91, 305-321 (2013)
“A summer Eastern Asian metric for CMIP3 climate models: an iterative selection method”
- 4) N. HIROTA and Y. N. TAKAYABU: Climate Dynamics, 41, 2909-2920 (2013)
“Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3”
- 5) N. OSHIMA, M. KOIKE, Y. KONDO, H. NAKAMURA, N. MOTOKI, H. MATSUI, N. TAKEGAWA and K. KITA: J. Geophys. Res., 118, 23, 13175-13198 (2013)
“Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign”
- 6) K. TAKAYA and H. NAKAMURA: J. Climate, 26, 23, 9445-9461 (2013)
“Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves”
- 7) M. HARADA, S. HIRAHARA, S. HAGIYA, H. MURAI, Y. OIKAWA, and S. MAEDA: SOLA, 9, 94-97 (2013)
“Intensification of the South Side of the Asian Jet Stream during the Northern Winter in CMIP5 models”
- 8) A. KITOH, H. ENDO, K. K. KUMAR, I. F. A. CAVALCANTI, P. GOSWAMI and T. ZHOU: J. Geophys. Res., 118, 8, 3053-3065 (2013)
“Monsoons in a changing world: a regional perspective in a global context”
- 9) S. YOKOI and Y. N. TAKAYABU: J. Climate, 26, 973-987 (2013)
“Attribution of decadal variability in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific: A new approach emphasizing the genesis place of cyclones”
- 10) S. YOKOI, Y. N. TAKAYABU, and H. MURAKAMI: J. Climate, 26, 4096-4101 (2013)
“Attribution of projected future changes in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific”
- 11) K. YASUNAGA, T. NASUNO, H. MIURA, Y. N. TAKAYABU, and M. YOSHIKAWA: J. Meteorol. Soc. Jpn., 91A, 217-229 (2013)

- “Afternoon precipitation peak simulated in an aqua-planet global non-hydrostatic model (aqua-planet-NICAM)”
- 12) T. MIYAKAWA, S. YOKOI, N. HIROTA, S. HIRAHARA, T. INOUE, and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 91, 305–321 (2013)
 “A summer Eastern Asian metric for CMIP3 climate models: an iterative selection method”
 - 13) Y. KAWATANI and K. HAMILTON: Nature, 497, 478–481 (2013)
 “Weakened stratospheric Quasibiennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling”
 - 14) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU, M. WATANABE, M. KIMOTO and M. CHIKIRA: J. Climate, 27, 8707–8723 (2014)
 “Roles of convective entrainment in spatial distributions and temporal variations of precipitation.”
 - 15) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and S. KANADA: J. Climate, 27, 5872–5890 (2014)
 “A contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan: Part I. TRMM PR observation.”
 - 16) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, B. TAGUCHI and M. NONAKA: Geophys. Res. Lett., 41, 8, 2948–2955 (2014)
 “Multi-decadal modulations of the low-frequency climate variability in the wintertime North Pacific since 1950”
 - 17) A. LAINE, H. NAKAMURA, K. NISHII and T. MIYASAKA: Climate Dynamics, 42, 9–10, 2745–2761 (2014)
 “A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models”
 - 18) S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: J. Climate, 27, 11, 3998–3903 (2014)
 “Assessing the importance of prominent warm SST anomalies over the midlatitude North Pacific in forcing large-scale atmospheric anomalies during 2011 summer and autumn”
 - 19) A. MANDA, H. NAKAMURA, N. ASANO, S. IIZUKA, T. MIYAMA, Q. MOTTEKI, M. YOSHIOKA, K. NISHII and T. MIYASAKA: Scientific Reports 4, 5741, doi:10.1038/srep05741 (2014)
 “Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon”
 - 20) N. SHI and H. NAKAMURA: Tellus A, 66, 22660 (2014)
 “Multi-decadal modulations in the Aleutian-Icelandic Low seesaw and the axial symmetry of the Arctic Oscillation signature, as revealed in the 20th century reanalysis”
 - 21) H. ENDO and A. KITOH: Geophys. Res. Lett., 41, 1704–1710 (2014)
 “Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate”
 - 22) M. HARADA, S. WAKAMATSU, S. HIRAHARA, H. MURAI, Y. OIKAWA, and S. MAEDA: SOLA, 10, 180–184 (2014)
 “Impacts of Slowed Tropical Circulation on Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific”
 - 23) R. MIZUTA, O. ARAKAWA, T. OSE, S. KUSUNOKI, H. ENDO and A. KITOH: SOLA, 10, 167–171 (2014)
 “Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes”
 - 24) T. OGATA and H. UEDA and T. INOUE and M. HAYASAKI and A. YOSHIDA and S. WATANABE and M. KIRA and M. OOSHIRO and A. KUMAI: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 207–225 (2014)
 “Projected future changes in the Asian Monsoon: A comparison of CMIP3 and CMIP5 model Results”
 - 25) C. TAKAHASHI and R. SHIROOKA: J. Geophys. Res., 119, 10663–10683 (2014)
 “Storm track activity over the North Pacific associated with the Madden-Julian Oscillation under ENSO conditions during boreal winter”
 - 26) Y. KAWATANI, J. N. LEE and K. HAMILTON: J. Atmos. Sci., 71, 4072–4985, (2014)
 “Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations”
 - 27) A. NODA: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 411–431, (2014)
 “Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids”

- 28) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: *Climate Dynamics*, 44, 5–6, 1311–1327 (2015)
“Arctic summer storm track in CMIP3/5 climate models”
- 29) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII and Y. TANIMOTO: *J. Climate*, 28, 5, 1764–1787 (2015)
“Separation of climatological imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on the wintertime atmospheric boundary layer: Their sensitivity to SST resolution prescribed for atmospheric reanalysis”
- 30) S. YOKOI: *J. Climate*, 28, 793–808 (2015)
“Multireanalysis comparison of variability in column water vapor and its analysis increment associated with Madden–Julian oscillation”
- 31) S. MINOBE, B. QIU, M. NONAKA and H. NAKAMURA: “Climate Changes: Multidecadal and Beyond”, World Scientific (2015), in press
“Air–sea interaction over the western boundary currents in the western North Pacific”
- 32) H. NAKAMURA, K. NISHII, L. WANG, Y. J. ORSOLINI and K. TAKAYA: “Dynamics and Predictability of Large–Scale High–Impact Weather and Climate Events”, J. Li, R. Swinbank, H. Volkert, R. Grotjahn, Eds., Cambridge University Press (2015), in press
“Cold–air outbreaks over East Asia associated with blocking highs: Mechanisms and their interaction with the polar stratosphere”
- 33) S. KUSUNOKI and O. ARAKAWA: *J. Climate*, (in press)
“Are CMIP5 models better than CMIP3 models in simulating precipitation over East Asia?”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) H. NAKAMURA: *Nature Geoscience*, 5, 11, 768–769 (2012)
“Future oceans under pressure” (News and Views)
- 2) 河谷芳雄: *パリティ*, 丸善, 29, 04, 44–48 (2014)
“クローズアップ「成層圏に地球温暖化シグナルを発見！」”

(2) 主な口頭発表(学会等)

198件 (リスト省略)

[サブ1=76件、サブ2=42件、サブ3=22件、サブ4=38件、サブ5=20件]

7. 研究者略歴

課題代表者: 高薮 縁

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、博士(理学)、国立環境研究所主任研究員、現在、東京大学大気海洋研究所教授

研究分担者

- 1) 中村 尚
東北大学理学部卒業、ワシントン大学大気科学科博士課程修了、学術博士(Ph. D.)、東京大学大学院理学系研究科准教授、現在、東京大学先端科学技術研究センター教授
- 2) 尾瀬智昭
山口大学文理学部卒業、九州大学大学院修士課程修了、理学博士、気象庁気候情報課、現在気象研究所気候研究部第二研究室長
- 3) 植田 宏昭
筑波大学第一学群自然科学類卒業、気象庁気象研究所気候研究部 研究官、現在、筑波大学生命環境系教授
- 4) 城岡 竜一
気象大学校卒業、北海道大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)、農林水産省北海道農業試験場主任研究官、現在、海洋研究開発機構主任技術研究員
- 5) 河谷芳雄
九州大学理学部卒業、東京大学大学院理学研究科博士課程修了、博士(理学)、現在、海洋研究開発機構統合の気候変動予測研究分野主任研究員

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

(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	高薮縁
東京大学 先端科学技術研究センター	中村尚・西井和晃

〈研究協力者〉

東京大学 大気海洋研究所	横山千恵
国立極地研究所	廣田渚郎
名古屋大学 地球水循環研究センター	金田幸恵(平成24年度)
東京大学 先端科学技術研究センター	宮坂貴文(平成24年度)
東京大学 先端科学技術研究センター	Alexandre LAINE (平成24年度)
	(平成27年3月末現在、国立極地研究所)
東京大学 先端科学技術研究センター	小坂 優 (平成26年度)
長崎大学 水産環境学部	万田敦昌 (平成25・26年度)
独立行政法人 海洋研究開発機構	美山 透 (平成24年度)

平成24～26年度累計予算額：59,876千円（うち、平成26年度予算額：21,039千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

地球温暖化に伴う気候変動に対する的確な対策には、温暖化の影響に関する具体的な情報が必要である。国民生活への気候変化の影響は、天気現象（台風、低気圧、梅雨、豪雨、豪雪、干ばつ、熱波など）の変化を通してより顕在化する。また、2011年タイの洪水のように、アジアの様々な地域の気候変化も日本社会・経済に直接的な影響をもつ。第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)気候モデル実験が集約されIPCC 第5次評価報告書(AR5)が発行されたが、アジア域気候の将来変化についての知見は不十分である。特に降水は、20世紀観測結果も将来変化も、地表面気温が全球で上昇傾向を示すのとは対照的に、増加・減少の地域差が複雑で、予測のばらつきも大きい。本研究は、最新のCMIP5マルチモデルデータと最新の観測データを利用し、アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の状態とその将来変化を解明する目的で行った。新たに得られた主な成果を以下に示す。1) 日本付近の梅雨降雨帯の南側では背の高い対流雲が強い雨を降らせ、北側と降雨特性が異なる。2) 梅雨降雨帯とアジア上空ジェットとの関係をよく再現するモデルでは、将来、アジアジェットは南偏傾向、海水温上昇と水蒸気量増加による大気不安定化と相俟って、台湾から日本南岸にかけて降水量の増加が予想される。3) 現実の梅雨の長期変化には、太平洋十年規模変動の影響が大きい。4) 東アジア気候に遠隔影響が大きい熱帯降雨分布の気候モデルバイアスについて、ダブルITCZと海面水温冷舌バイアスとは別要因に帰着される。5) ユーラシア大陸の降水バイアスは気候モデルの雲の過小評価に帰着される。6) 梅雨末期の九州の豪雨には東シナ海の夏季(7月)の季節的昇温が影響し、将来気候では早い季節(6月)の豪雨発生の可能性があ

る。7) 日本東方沖の亜寒帯海洋前線帯の南北変位の正しい表現は、冬季移動性高低気圧経路の表現に重要である。8) 世界各地域での地表面蒸発量の変化の要因と季節変化を明らかにした。9) 課題全体の科学的成果から温暖化の影響をわかりやすく解説した小冊子を刊行。

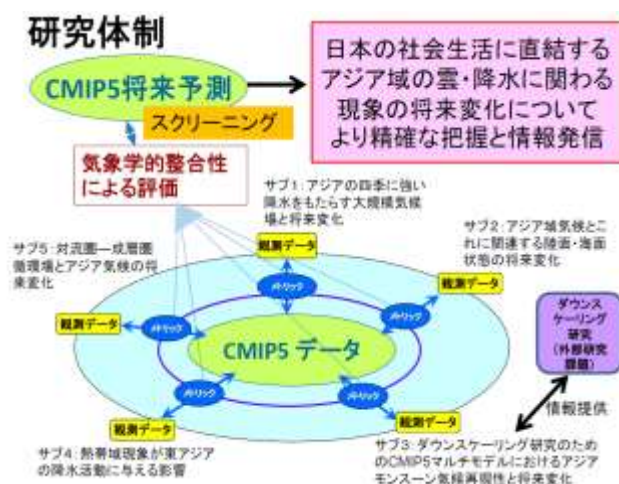
[キーワード]

CMIP5マルチ気候モデル、梅雨前線、降水変化、集中豪雨、海洋前線

1. はじめに

我が国は現在、東日本大震災からの復興、経済復興などの大きな課題を抱えている。また、タイの洪水の影響に代表されるように、日本の気候のみならずアジアの様々な地域の気候変化が日本社会・経済に直接的な影響をもつことが顕在化した。従って地球温暖化による気候変動に対してより一層的確な対策をとる必要がある。そのためには、今後の温暖化の進行に伴ってどのような現象が起こるかについて、できる限り具体的な情報が提供されなければならない。2013年に発行されたIPCC 第5次評価報告書（AR5）のため、世界のより高度化した気候モデル実験結果が第5期結合モデル相互比較実験（CMIP5）の下に集約され公開されている。温暖化に関する国際的議論もCMIP5やAR5が新しい国際標準となった。

本研究課題は、最新のCMIP5マルチモデルデータと最新の観測データとを利用し、地球温暖化に伴って日本の四季およびアジア域の様々な気象がいかに変化するかを調査研究し、成果を分かりやすく発表することを目的として開始した。特に日本の社会生活に直接的な影響があるアジア域の雲・降水に関わる現象に焦点を当てた。また近年成層圏の状態が対流圏の現象に大きな影響を与え得るという事が知られているが、CMIP3 時代のモデルでは成層圏の鉛直解像度が粗く研究対象とする事は難しかったため、CMIP5の一部で初めて可能になったこの問題の解析にも取り組んだ。図(1)-1に研究体制を示す。



図(1)-1 研究の基本的構想と体制。

本サブテーマ1は、「アジアの四季に強い降水をもたらす大規模気候場の仕組みとその将来変化について」を担当し、CMIP5マルチ気候モデル等の最新のデータを利用して調査研究を行った。この調査は、将来に向けた防災・減災のための環境政策の立案のために資する重要なものである。

以下の3つに大きくまとめた研究テーマの中でそれぞれ複数の重要な成果を得た。

- (1) 初夏の日本付近における降水特性と大規模場構造の再現性評価と将来変化の推定
- (2) 東アジア気候に遠隔影響を及ぼす熱帯域とユーラシア大陸上の降水過程の気候モデル再現性の評価
- (3) 日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系・低気圧活動に及ぼす影響の評価

また、本サブテーマ1のもうひとつの役割として、上記の課題全体について総括を行った。

- (4) 課題の総括として、一般向け小冊子の発行、および、各年度1回（計3回）アジア降水や温暖化研究の海外のエキスパートを招待した国際会議を主催した。

2. 研究開発目的

(1) 初夏の日本付近における降水特性と大規模場構造の再現性評価と将来変化の推定

初夏の日本・東アジア域では梅雨前線に伴って多量の雨が降るため、将来の気候変化による梅雨前線降水の変化を知ることは重要である。先行研究において、梅雨明け直前に日本付近の大気下層に高い相当温位の空気が流入することに伴い、背の高い降水が増加することが示され（Takayabu and Hikosaka, 2009¹⁾）、これが梅雨末期の集中豪雨の増加に対応することが示唆された。また、亜熱帯ジェットが梅雨前線の形成に影響することも指摘されている（Kodama 1993²⁾, Sampe and Xie 2010³⁾, Horinouchi 2014⁴⁾）。しかし、梅雨前線の降水特性と大規模場との関係に注目した理解は、未だ不十分である。また梅雨の将来変化予測には気候モデルの利用が必要不可欠であるが、現在の標準的な気候モデルの空間解像度は水平方向に約100km程度と粗いため、気候モデルだけで降水特性の将来変化を議論するのは難しい。そこで、本研究では梅雨前線の降雨特性と気象大規模場の構造に注目し、衛星観測データおよび再解析データの解析で得られた知見も利用しながら、CMIP5マルチ気候モデル群データの再現性および将来変化について様々な観点から評価する。

そのために、まず梅雨前線の降雨特性の空間変化を調べる。梅雨前線は、亜熱帯大気と中緯度大気とが接する境界で生じる停滞前線であり、その南北で大気成層構造が大きく変化している。ここでは、降水特性の梅雨前線の南北での相違について、蓄積された衛星降雨レーダ観測データを用いて解析すると共に、CMIP5マルチ気候モデル群における梅雨前線付近の大規模環境場や降水の再現性を調べる。

次に、1958年以降の55年間以上にわたる気象情報を含む最新の気象庁55年長期再解析（JRA55）を用いて梅雨前線降水の最近の長期変化を調べ、CMIP5マルチ気候モデル群による将来予測結果と対比させて共通点や相違点に注目し、CMIP5マルチ気候モデル群による梅雨前線の将来変化について評価する。

さらに、衛星降雨データから解析された降水特性と大規模環境場との関係についての知見をもとにCMIP5モデルによる梅雨前線降水の再現性の評価方法を考案し、再現性のよいモデルによる初夏の日本付近の降水の将来変化についての水平分布を含めたより詳細な推定を行う。

（２）東アジア気候に遠隔影響を及ぼす熱帯域とユーラシア大陸上の降水過程の気候モデル再現性の評価

日本を含む東アジアの気候には、熱帯域やユーラシア大陸からの遠隔影響があることが知られている(Hirota and Takahashi, 2012⁵⁾、Takahashi et al. 2014⁶⁾ (本課題サブ4成果))。例えば、エルニーニョの発生時には、フィリピン付近の熱帯降水活動は抑制され、対応する凝結加熱の減少は大気大循環に影響し、日本は冷夏になりやすくなる。また、ユーラシア大陸上の大気波動擾乱は、亜熱帯ジェットを蛇行させ、日本に異常気象に強く関わる。従って、日本付近の気候・気象を理解し、その将来変化を考えるうえで、熱帯域やユーラシア大陸上の降水過程を調べることは重要である。ここでは、CMIP5気候モデルによる熱帯域・ユーラシア大陸域における降水再現性を評価し、その再現性を決める要因を明らかにする。

（３）日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系・低気圧活動に及ぼす影響の評価

日本近海では過去100年間の水温上昇が全海洋平均の2倍以上のペースで進んだ事実を、23年度終了の環境政策総合推進費S-5において見出した。その一方、長期的に見れば我が国の夏季において集中豪雨の発生も増加傾向にあるが、日本近海の著しい水温上昇が将来の集中豪雨の発生に与え得る影響については調査されていない。そこで、本サブテーマは日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系、さらには低気圧活動に及ぼす影響も評価する。より包括的な視点から見れば、将来の大気・海洋の温暖化に伴って、海面からの蒸発がどのような過程を通じていかに変化するかを把握することも、将来の水循環や降水予測の評価のために有意義である。

もう1つの重要な目的は、我が国の四季の天候状況に影響を与えうる北極域を含む中高緯度・亜熱帯の大気循環系の季節・経年変動について、気候モデルにおける現在気候再現実験からその再現性を検証し、それに基づき将来変化予測結果に対する各モデルの信頼性を評価し、その物理的・力学的解釈を与えることである。この際、日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系、さらには低気圧活動やジェット気流に及ぼす影響にも着目する。並行して、将来の大気・海洋の温暖化に伴って、海面からの蒸発が如何なる過程を通じて如何に変化するかを、CMIP5モデルの将来予測を基に評価を実施することを目指す。

（４）課題の総括

課題全体の個々の研究を総括し、地球温暖化がアジア域気候に与える影響を一般市民および政策者にわかりやすく伝えることを目的とする。また、毎年度海外からの専門家を招聘し、国際WSを開いて研究情報の交換を行う。

3. 研究開発方法

（１）初夏の日本付近における降水特性と大規模場構造の再現性評価と将来変化の推定

1) 梅雨前線の降水特性と大規模場の南北構造の再現性および将来変化の評価

日本付近の梅雨前線に伴う降水の特性について、熱帯降雨観測 (TRMM) 衛星搭載の降水レーダ観測データ (PR2A25)、JRA-25/JCDAS再解析データ、GPCP降水データおよびCMIP5マルチ気候モデ

ル群による現在気候再現実験出力データを解析する。

CMIP5モデル群の再現性の評価には、梅雨前線の解析に十分な時空間分解能を持つ11のCMIP5気候モデルによる現在気候実験データ（1985-2004年）を用いる。特に、梅雨前線の緯度付近を境に大気成層構造が南北に異なることに着目し、大規模環境場から梅雨前線の緯度を定義する指標を考案し、その指標をもとに梅雨前線南北における大規模環境場および降水特性を比較する。また、梅雨前線の降水分布や降水帯の季節進行の評価も行う。

CMIP5モデル群による将来変化の解析には、RCP4.5シナリオの将来予測実験データ（2080-2099年）を用いる。その際、モデルによる将来変化予測と、気象庁55年長期再解析データ（JRA55）による最近55年の梅雨期降水および大規模環境場の変化とを対比させる。さらに、NOAAの海面水温データ（ERSSTv3b）から太平洋十年規模変動（PDO）を抽出し、最近55年の変化へのPDOの影響についても調べる。

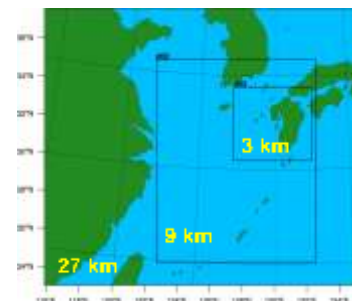
2）初夏の日本付近における降水特性の空間分布と将来変化の推定

まず、TRMM衛星観測データおよびJRA55再解析データを用いて梅雨前線に伴う大規模環境場を解析し、得られた知見に基づいて、18のCMIP5マルチ気候モデル群から梅雨前線をより良く表現できるモデルを選択する方法を考案する。特に、亜熱帯ジェットの構造およびジェットに伴う大規模環境場に注目して調査する。大規模環境場の再現性の高いモデル群による梅雨期の大規模環境場および降水の将来変化を調べ、それ以外のモデル群による結果と比較する。

次に、現実大気における大規模環境場変化と降水特性変化との関係を定量化し、CMIP5モデルによる大規模場の予測結果と組み合わせ、初夏の日本付近における詳細な降水特性の将来変化を推定する。

（2）東アジア気候に遠隔影響を及ぼす熱帯域とユーラシア大陸上の降水過程の気候モデル再現性の評価

2007年のIPCC AR4で用いられたCMIP3、及び2013年のAR5で用いられたCMIP5の十数個のマルチ気候モデルのデータを用いて、モデル降水の気候平均（1981-2000年平均）的な特性を解析する。モデルの再現性は衛星観測データ（TRMM PR2A25・GPCPの降水量データ、CERESの地表放射フラックスデータなど）、地上観測データ（APHRODITEの降水量データ、Hadley Centerの海面水温（SST）やCRU-UEAの地表気温データ）、再解析データ（NCEP, JRA25, ERA40, MERRA, JRA55）と比較して調べる。モデル再現性を決める要因を明らかにするために、気候モデルの降水を計算する降水パラメタリゼーションの特性解析、モデルの分解能の議論、水・熱収支解析などを行う。



（3）日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系・低気圧活動に及ぼす影響の評価

CMIP5やCMIP3に関わる20世紀再現実験及び21世紀期気候予測実験データは、米国の気候モデル診断・相互比較プロ

図(1)-2 領域大気モデルの計算領域。数字はネスティング領域における水平解像度。Manda et al. (2014; 成果論文)による。

グラム(PCMDI)から東京大学のデータ統合・解析システム(DIAS)に移して解析した。再現性検証に用いる全球大気再解析データとしては、気象庁(JRA-25, JRA-55), 欧州中期予報センター(ERA-interim), 米国立環境予測センター(NCEP)によるものを用いた。将来の大気・海洋の温暖化に伴う海面蒸発の変化の評価や夏季北極域における低気圧活動のモデル再現性や将来変化の評価にはこれらのデータを活用した。なお、移動性高低気圧に伴う数日周期の循環変動成分は、モデル出力・現実データともに、日毎のデータ時系列に切離周期8日の高周波フィルタを施すことで抽出した。

日本東方海上の水温変動が大気循環や雲・降水系に与える影響の調査においては、上記の全球大気再解析データに加え、衛星観測に基づく高分解能の海面水温データ(OISST)や衛星海面散乱計(QuickSCAT)に基づく海上風収束・発散観測データ(SCOW)、さらにはTerra/Aqua衛星搭載のMODISセンサーによる雲量・雲頂気圧データや衛星マイクロ波放射計(AMSR-E)により観測された降水量データも併用する。また、大気循環偏差の形成・維持における日本東方海上の水温前線帯の変動に伴う水温偏差の重要性の検証には、地球シミュレータの大気大循環モデル(AFES)を用いた数値実験も併せて活用した。この水温前線帯の10年規模変動の長期変動が大気循環変動に与える影響については、上記の全球大気再解析データに加え、地球シミュレータの大気海洋結合モデルの中解像度版(CFES-mini; 水平解像度大気100km、海洋50km)の長期積分データも併せて解析し、温室効果気体の人為的な増大という外部強制の重要性の有無を評価した。

一方、日本近海の著しい水温上昇が将来の集中豪雨の発生に与え得る影響の調査においては、CMIP5モデル群からの出力データをそのまま利用する訳にはいかない。その理由の1つは、大気モデルの水平分解能の不足から、雲・降水系の形成に重要なメソスケールの現象がきちんと表現されないことである。よって、集中豪雨をもたらす降水系を現実的に表現するには、図(1)-2に示す領域のみを高分解能で計算し、積乱雲を表現可能な領域大気モデルの活用(ダウンスケーリング)が必須である。もう1つの理由は大気のメソ現象の表現に不可欠な境界条件としての海面水温分布が、CMIP実験では海洋モデルの水平分解能不足から必ずしも現実的ではないからである。CMIP実験より短期間ではあるもののより高分解能の海洋モデル実験(Nonaka et al. 2006⁷⁾)から示されたのは、海洋の中規模渦を解像しない限り、黒潮続流や水温前線に伴う顕著で複雑な海水温分布は表現できないことである。また、東シナ海など大陸縁辺海の水温分布も必ずしも現実的ではない。そこで、衛星観測に基づく高分解能の海面水温データOISSTをベースにして、それにCMIP5モデルにて予測される昇温分布を足し込む手法を採る。同様に、将来豪雨をもたらし得る大気循環場の予測にも不確実性が大きいことを鑑み、本研究では2012年7月中旬に九州西部に甚大な被害をもたらした「九州北部豪雨」時に観測された大気循環場をベースとし、それにCMIP5モデルにて各気圧面で予測される昇温分布を米国大気科学研究センターで開発された領域モデル(WRF)に当たる領域内で水平平均した場を足し込む手法を採る。これにより、上記の擬似温暖化実験(Sato et al. 2007⁸⁾)において、温度風平衡を介して豪雨の発生に適した大気循環場が改変されることを防ぐことができる一方、大気層全体の温暖化による飽和水蒸気量増大の効果や成層度の将来変化の影響を取り込むことができる。なお、気温・水温分布は32のCMIP5モデルのうち、領域平均された昇温量の最大値、最小値、並びにアンサンブル平均値の3通りを与えた。

（４）課題の総括

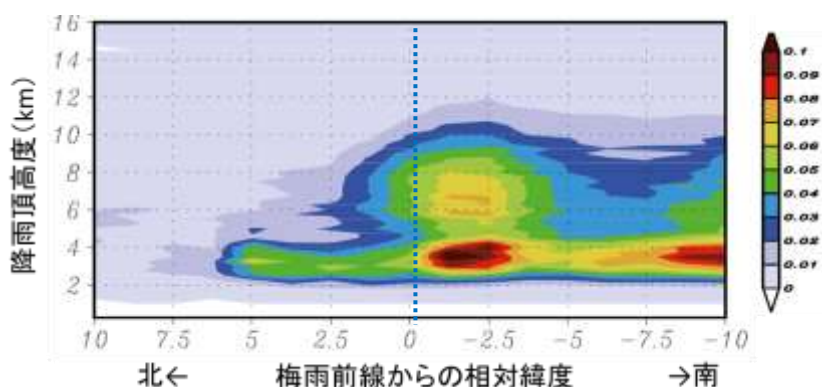
課題全体から論文化した成果のいくつかを抽出して議論し、中高生にも理解できる程度に噛み砕いて編集。温暖化に伴う現象の変化についての一般市民向け小冊子を作成する。国際会議を主催する。

４．結果及び考察

（１）初夏の日本付近における降水特性と大規模場構造の再現性評価と将来変化の推定

１）梅雨前線の降水特性と大規模場の南北構造の再現性および将来変化の評価

現実大気における梅雨前線に伴う大規模環境場および降水特性の調査、およびCMIP5気候モデルによる再現性および将来変化の評価を行った（平成24-26年度）。現実大気において梅雨前線周辺における大規模場と降水特性との関係性を調査するため、大気最下層における相当温位の参照値に基づいて梅雨前線を定義し、



図(1)-3 梅雨前線を中心に合成したTRMM衛星観測による対流性降水の降雨頂高度の頻度分布（％）。1998-2011年6-7月の西日本付近（東経122.5-135度）で解析した。横軸の0が梅雨前線の中心緯度、右が梅雨前線南側、左が北側を表している。

熱帯降雨観測（TRMM）衛星観測による降水特性の合成解析を行った（平成24-25年度）。なお、この梅雨前線指標を決める際には、梅雨前線との対応関係が良いことや、その南北で大気成層構造が大きく変化することを考慮した。その結果、梅雨前線の南側では、北側に比べより強くより背の高い対流性降水が多いこと（図(1)-3）、大規模環境場の南北変化に伴って降水特性が大きく変化することが分かった。梅雨前線南側の強い雨は、主に雲クラスターの特性を持ち、前線北側とは異なるメカニズムで雨が降っていることが示された（Yokoyama et al. 2014、成果論文）。この結果は、将来の大気循環の変化による梅雨前線の平均緯度の少しのずれが、ある特定の場所での雨の降り方を大きく変える可能性があることを意味し、気候変化に伴う災害対策の観点で梅雨前線の将来変化研究の方向性に重要な示唆を与えた。

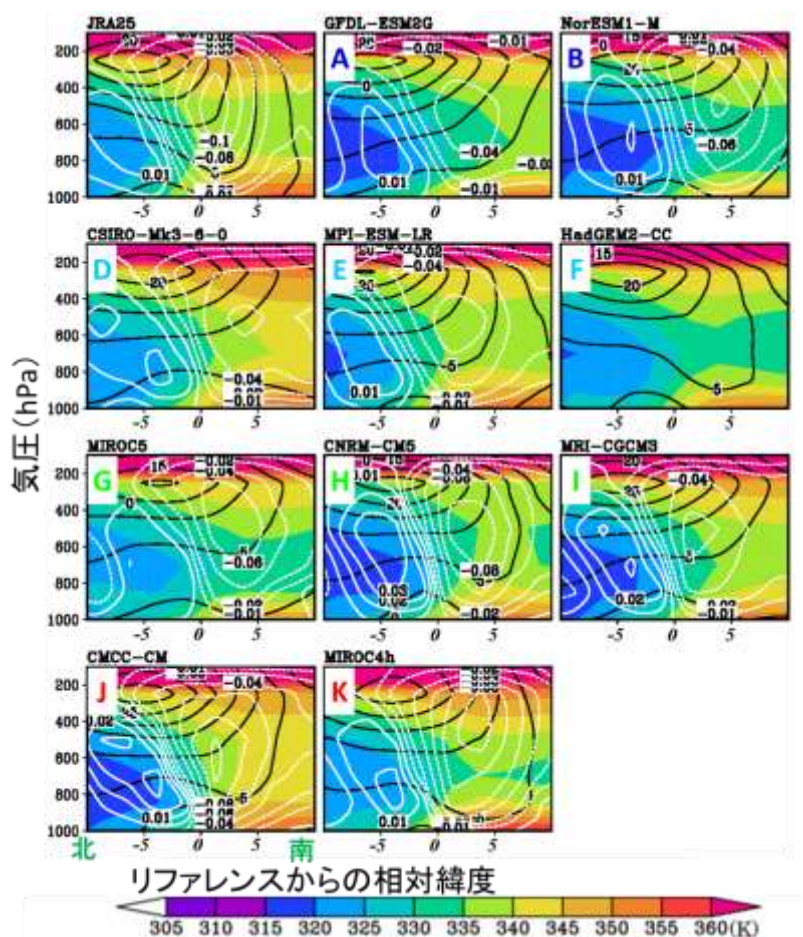
次に、梅雨前線に伴う大規模環境場と降水に関して、11のCMIP5気候モデルを対象に様々な観点から再現性の調査を行った（平成24-25年度）。各モデルの日本付近の月平均降水量の水平分布を評価した結果、6月については特に水平分解能が1.5°より細かいモデル全てで空間相関係数0.70を超える良好な再現性を示した一方で、7月の再現性は総じて低いことが分かった。特に、西日本付近における6月について掘り下げて再現性の評価を行った。梅雨前線降水帯の北上については、降水の緯度時間断面図をもとに評価したところ、観測との相関係数0.70を超えるモデルは1つのみであった。また、梅雨前線南北での大規模環境場および降水変化という観点からも再現性の評価を行った。現実大気の解析から見出された知見を応用し、CMIP5モデルごとに大規模環境場から梅雨前線を日ごとに定義する方法を考案し、大規模環境場や降水の合成解析を行った。その結果、多

くのモデルが、梅雨前線南北での異なる大気成層構造の様子や、梅雨前線の北に亜熱帯ジェットを伴う様子など、梅雨前線周辺の大規模場の状況を概ね良く再現することが明らかになった（図(1)-4）。また、梅雨前線を中心に合成した総降水量の南北分布については、各モデルとも観測で見られた特徴を概ね再現していた。いずれのモデルにおいても、モデル毎に異なる積雲対流スキームを用いているにもかかわらず、梅雨前線南側では北側よりも積雲対流スキームによる降水の割合が大きいことや、降水強度が前線南北で異なるという点では、CMIP5モデルは梅雨前線に伴う降水の特徴を「ある程度」再現できていると言える。一方で、モデルは弱い降水の頻度を過大評価し、中程度以上の強さの降水の頻度を過小評価する傾向があるという問題点が指摘され、このような誤差は比較的高分解能のモデルでは小さい傾向があることも示された。

このようにCMIP5モデルにおいて高解像度化により梅雨期の降水パターンの再現性は向上傾向にある（Kusunoki et al. 2015¹⁰：本課題サブ2成果）ものの、季節進行の再現には依然として課題が残されていることが明らかになった。梅雨前線周辺の大規模環境場という観点では、CMIP5モデルは概ね再現しており、将来の梅雨前線降水の変化について、CMIP5モデルによる大規模環境場の変化から議論できそうである。

次に、CMIP5マルチ気候モデル群による梅雨期降水に伴う大規模環境場の将来変化を評価するため、JRA55再解析データによる最近55年間の長期変化と対比させ、両者の類似点および相違点の調査を行った（平成25-26年度）。その結果、近年

（1993-2012年平均）6月中旬から7月初旬の梅雨前線降水帯は、以前（1958-1977年平均）に比べ北偏傾向であることが分かった。これと関連して、近年、日本付近の亜熱帯ジェットも北偏していた。一方、下層の対流不安定度の大きな領域も北偏傾向であり、梅雨前線付近での積雲対流が重要となる（積雲パラメタリゼーションによる）降水量の割



図(1)-4 現在気候の6月の西日本において梅雨前線を中心に合成した各CMIP5マルチ気候モデルデータおよびJRA25再解析データによる大規模環境場の緯度-気圧断面。色が相当温位（K）、黒等値線が東西風（m/s）、白等値線が上昇流（Pa/s）を示す。

合の大きな領域も、より北に広がっていることが分かった。これらの近年の変化への自然変動による影響を調べるために、6月について太平洋十年規模振動（PDO）の負位相年平均と正位相年平均とを比較した。その結果、PDO正位相年のときに負位相年に対して、亜熱帯ジェット気流は有意な北偏を示した。PDO正位相年の梅雨前線降水帯は、負位相年に比べ、日本域西側で全般に降水が減少していた。特に、降水帯の南縁で一貫した減少が見られることから、亜熱帯ジェットの北偏と整合的であり、PDOに伴うジェット・降水帯の位置変化は、最近55年間の変化と同じ方向にずれていることが分かった。つまり、近年の変化には、温暖化だけでなく、自然変動に伴う変化も現れていることが示唆された。

一方、梅雨期（6月）降水の将来変化（RCP4.5シナリオ（2080-2099）の現在気候（1985-2004）からの差）を調べ、近年の変化と対比させたところ、亜熱帯ジェットは梅雨前線降水帯とは一定の位置関係を保って変化しており両者に強い結びつきがあること、また、下層の対流不安定度は降水特性を変化させることが見出された。将来の大気循環変化（ジェットの南偏）と大気成層構造変化（下層対流不安定の強化）の効果の重ね合わせにより、結果的にマルチモデル平均では、梅雨前線付近では全般に降水量は増加し、特に現在（1985-2004年）の梅雨前線南側で降水量が大きく増加するだろうことが示された。特に、台湾から日本南岸にかけては、多くのモデルが降水量の増加を予測している。

ただし、梅雨期降水の将来変化予測には、地域によってモデル間のばらつきが大きいところもあることが明らかにされた。多くのモデルが西日本の太平洋側や南海上において将来の降水量増加を示す一方で、西日本の日本海側における予測結果はモデル間で大きくばらついていた。亜熱帯ジェットの将来変化の様子に応じて、降水量の将来変化分布は異なっていた。即ち、ジェットが南偏傾向のモデルは、太平洋側で大きく降水量が増加し、日本海側で減少あるいは小さな変化を示したが、現在と同様の位置（日本上空）でジェットが強まる傾向のモデルは、日本海側で顕著な降水増加を示した。さらに、両タイプのモデルには亜熱帯ジェットの構造の再現性に違いが見られ、前者のタイプのモデルの方が、梅雨前線付近の亜熱帯ジェットの軸が下層南方へ伸長するという現実大気の特徴をより良く再現していた。このジェットの再現性の違いは、対流圏中下層の水蒸気収束分布を通して降水分布に影響を及ぼしていた。つまり、亜熱帯ジェットの鉛直構造の再現性が梅雨降水帯の変化に効く可能性が示唆され、より現実的なモデルでは、将来気候におけるジェットは南偏し、梅雨降水帯も南偏する可能性が高いことが分かった。

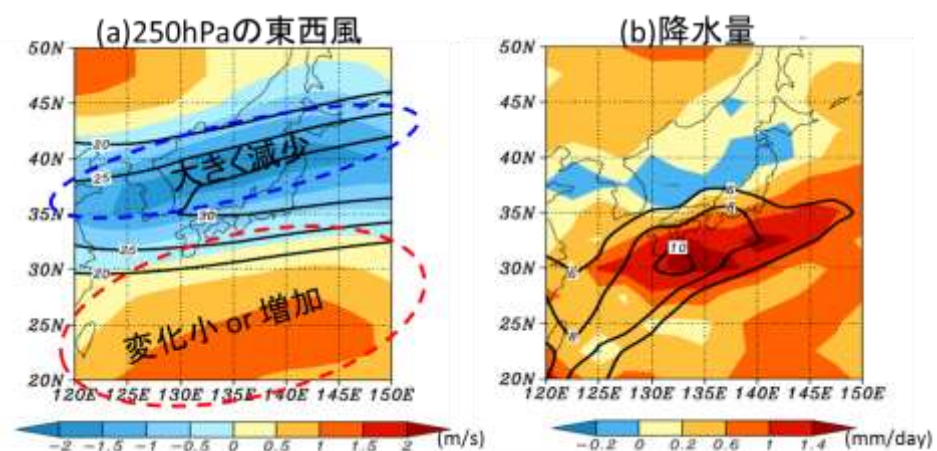
上述の通り、亜熱帯ジェットは梅雨前線降水の将来変化を決める重要な要素の一つであるが、その変化は全球平均とは大きく異なっている。例えば、全球平均のジェットは北偏傾向であり、特に欧米などを含む西半球における傾向が強く現れていたのに対し、アジア域では全般に南偏傾向であり、日本付近ではさらに局所的な変化を示していた。また、全球平均では近年の変化と将来変化とがともに北偏傾向で一致するのに対し、日本付近では逆向きの傾向を示していた。このことは、梅雨前線に伴う亜熱帯ジェットの変化が非常に複雑であることを示しており、モデルにおいて梅雨前線降水の将来変化の分布がばらつく一因となっていることに留意すべきである。

2）初夏の日本付近における降水特性の空間分布と将来変化の推定

梅雨前線に伴う降水変化を詳細に推定するため、18のCMIP5マルチ気候モデル群から、梅雨前線をより良く表現できるモデルを選択する方法を考案し、将来変化の調査を行った（平成26年度）。

まず、現実大気における亜熱帯ジェットと梅雨降水帯との関係をより詳細に把握するため、6-7月の亜熱帯ジェットを中心とした大規模環境場およびTRMM衛星観測による降水特性の合成解析を行った。その結果、大規模環境場は亜熱帯ジェットの南北で大きく異なり、ジェットの南側は上昇流域であり、北側よりも深い水蒸気収束場が存在し対流圏中下層がより湿っていることが示された。これらの特徴は、亜熱帯ジェットの鉛直構造と関連して生じていると考察された。一方、対流性降水・層状性降水ともジェットを横切って顕著な増加が見られ、ジェットの南6.25度付近で総降水量はピークを示した。特に、強い雨をもたらすような背の高い対流性降水の頻度は、亜熱帯ジェットの南5度以南で大きく増加しており、梅雨前線南北で降水特性が異なることを指摘した Yokoyama et al. (2014) の結果と整合的な変化を示していた。これらの結果は、将来の大気循環変化に伴って梅雨前線の降水特性がいかに変化しうるのかを推定するうえでも重要である。

現実大気の解析で得られた知見に基づき、CMIP5モデルによる日本付近の亜熱帯ジェットの鉛直構造、中層での上昇流、下層湿度および中層湿度に関して、再現性の度合いの示すスキルスコア (Taylor 2001⁹⁾) を調べ、4要素全てにおいてスコア

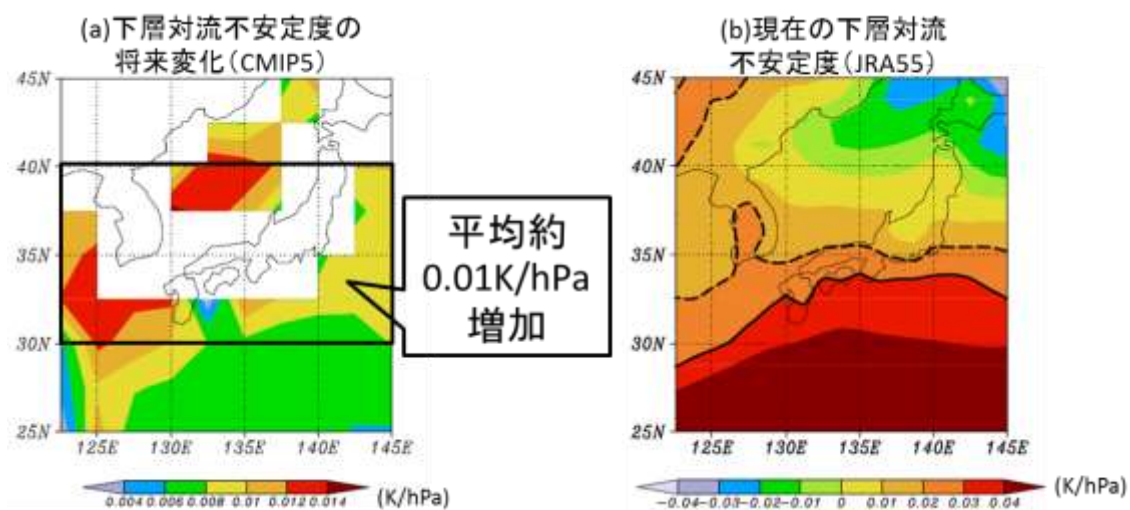


図(1)-5 大規模環境場の再現性の高い7モデルで平均した(a)250hPaの東西風 (m/s) および(b)降水量 (mm/day)。黒等値線が現在気候平均、色が将来変化(将来-現在)。

アがマルチモデル平均よりも高い7モデルを選択した。このように選択された7モデル中の5モデルでは梅雨期(6月)の降水の再現性も高く、大規模環境場の再現性を客観的に評価することによって、梅雨前線降水の再現性の高いモデルを選び出すことに成功した。これらの7モデルによる6月の将来予測結果を調べたところ、対流圏上層の東西風は現在の亜熱帯ジェットの北端で大きく減少し、南側では変化が小さいか増加することが示された(図(1)-5a)。この亜熱帯ジェットの南偏に伴って対流圏中下層の湿度は日本の南海上で大きく増加し、将来は日本の太平洋側および南海上で降水量が増加し、日本海側および日本海上では降水量の変化が小さいか減少することが示された(図(1)-5b)。一方で、他の11モデルでは、亜熱帯ジェットや梅雨前線降水の位置に明瞭な変化は見られなかった。

また、温暖化による対流圏下層の対流不安定化も、降水特性の将来変化を考えるうえで重要な要素である。ここでは、CMIP5モデルによる予測結果に加え、TRMM衛星データと再解析データ解析による知見を組み合わせることで定量的に見積もった。現実大気における梅雨前線付近では、対流性降水量が全降水量に占める割合(対流雨量比)は下層対流不安定度(1000hPa面での相当温位から700hPa面での相当温位を引いた値)と良い相関関係(相関係数0.76)にあり、下層対流不安

定度が増加すれば対流雨量比も増加し、強い対流性降水が多くなる。一方、大規模環境場の再現性の高い7モデルの平均によると、将来の下層対流不安定度は日本付近で約0.01K/hPa増加すると見積もられた（図(1)-6a）。現在の下層対流不安定度分布（JRA55再解析データ）にこの増加分を考慮すると、将来は日本付近の下層対流不安定度が底上げされ、全般に対流性降水が増加すると考えられる。特に、現在は九州南から四国の南にかけて伸びている下層対流不安定度の線に注目すると、将来はこの境界が北緯35度まで北進し、平均的には西日本域の気象は現在より下層対流不安定度で覆われると考察される（図(1)-6b）。現在のところ梅雨期の豪雨は九州南や西日本の一部で時折生じている。しかし、将来は、そのような豪雨に関連した大規模環境場が北に拡大することにより、梅雨前線に伴う豪雨が西日本全域で増加する可能性が示唆される。



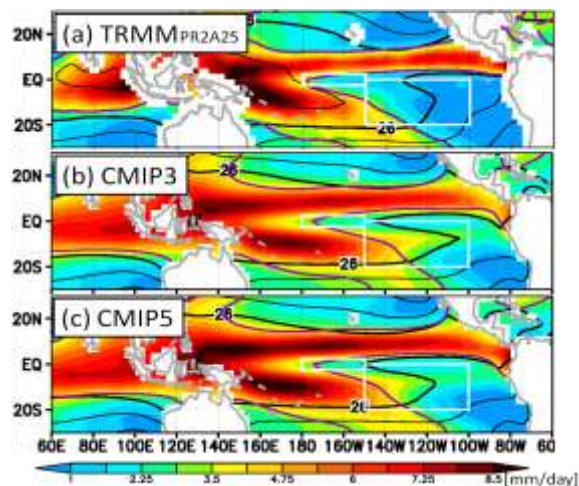
図(1)-6 (a)再現性の高い7モデルによる下層対流不安定度(K/hPa)の将来変化(将来-現在)。黒い四角では平均約0.01K/hPa増加する。(b)JRA55再解析データによる現在の下層対流不安定度。黒実線は現在の0.03K/hPa等値線、黒破線は将来のCMIP5の結果から考察される現在の0.03K/hPa等値線。

(2) 東アジア気候に遠隔影響を及ぼす熱帯域とユーラシア大陸上の降水過程の気候モデル再現性の評価

1) 熱帯域における降水過程の気候モデルによる再現性

CMIP3、CMIP5マルチ気候モデルによる熱帯海上の降水分布を観測データと比較して、その再現性を調べた。図(1)-7に示される様に、西部太平洋にSSTが高く降水が多い対流活発域が存在し、そこから東と南東に、それぞれ熱帯収束帯(ITCZ)と南太平洋収束帯(SPCZ)と呼ばれる降水帯が延びる。CMIP3、CMIP5モデルは、西太平洋の対流活発域や、降水帯をある程度再現している。しかし、その詳細構造を調べると、多くの気候モデルのSPCZは南東ではなく、より東へ延び、東部熱帯南太平洋(150°-100°W, 20°-0°S)で降水が過大評価されている。また、赤道付近では東太平洋の低温域が西に延び、対応して降水が抑制されている地域が存在するが、モデルは観測に比べてその地域がより西に広がっている(26°C等値線が観測は130°W付近でモデルは150°W付近)。これらはCMIP3以前からよく知られている問題で、それぞれ”ダブルITCZバイアス”と”Cold Tongueバイアス”と呼ばれている。CMIP3に比べてCMIP5では、ダブルITCZバイアスは少し改善されたが、Cold

Tongueバイアスはほとんど改善されていないことがわかった。



図(1)-7 (a) 観測(TRMM_PR2A25/HadISST/JRA25)、(b) 15個の CMIP3マルチモデル平均、(c) 17個のCMIP5マルチモデル平均の降水量(色;mm/day)、海面水温(等値線; °C)、500hPa鉛直流のゼロ線(下降流域と上昇流域の境界; 紫線)。

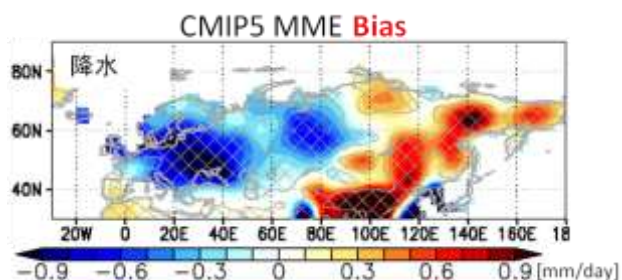
気と混ざり具合を決めるエントレインメントパラメータを変更する感度実験を行った。対流パラメタリゼーションにおけるエントレインメントパラメータが小さい実験ではダブルITCZ問題が現れるが、エントレインメントを大きくした実験ではダブルITCZが改善された。

一方で、Cold Tongueバイアスは、積雲パラメタリゼーションの湿度依存性には関係せず、むしろ海洋モデルの分解能と有意な関係があることがわかった。分解能が高いモデルでは、海洋循環、温度構造、小さい渦構造などがより適切に表現され、Cold Tongueバイアスが改善されていると考えられる。つまり熱帯降水分布のよい再現には、積雲対流の環境場湿度に対する感度を適切に表現すること、及び高分解能の海洋モデルを利用することが重要であることを解明した。

2) ユーラシア大陸上における降水過程の気候モデルによる再現性

次に、CMIP5マルチ気候モデルによるユーラシア大陸における降水分布再現性を調べた。解析した全てのCMIP5モデルは、降水を西ユーラシアで過小、東ユーラシアで過大評価している。図(1)-8に、CMIP5マルチモデル平均(MME)のGPCP観測からのバイアスを示す。ユーラシア西部に負の降水バイアス、ユーラシア東部に正の降水バイアスが見られる。水収支解析から、これは大陸ス

次に、ダブルITCZバイアスの原因を調べた。ダブルITCZバイアスについて、我々は推進費の先行プロジェクト(S-5-2)において、CMIP3のダブルITCZバイアスはモデルの積雲対流の対流圏湿度に対する感度の悪さに原因があることを解明した。現実大気では、東部熱帯南太平洋は大変乾燥しているため、深い対流が発達しようとしても、対流空気塊に乾燥空気が混ざることによって浮力が失われて対流が抑制される。しかし、気候モデルの対流パラメタリゼーションはこの乾燥した環境場における対流抑制効果の表現が不十分で、降水を過大評価してしまう。この研究では、この傾向はCMIP5モデル間でも同様であることが確認された。ただし、CMIP5では、この積雲対流抑制効果がCMIP3に比べ改善されたモデルが増えており、全体としてダブルITCZバイアスが改善されたこともわかった。更に、AORI/NIES/JAMSTECで共同開発している我々の気候モデルMIROC5を用いて、対流と環境場の空



図(1)-8 CMIP5マルチモデル平均(MME)による降水のGPCP観測からのバイアス(mm day⁻¹)。

ケールの低気圧循環バイアスに伴い、大陸東部で湿った南風、西部で乾いた北風になることと対応することが分かる。

MMEの低気圧循環バイアスは、ユーラシア大陸上に存在する高温バイアスと対応する。地表面熱収支解析を行い、高温バイアスの原因を調べる。全天と晴天時の短波放射加熱の差で定義される短波放射雲強制力(SCRf)を評価し、CERES衛星観測と比較すると、大陸の大部分で正バイアスであり、MMEは雲量を過小評価し、太陽光が大陸を温めすぎていることが分かる。また、この降水バイアスは、蒸発—降水による水蒸気のリサイクリングによって増幅されていると考えられる。リサイクリング強度を、降水と蒸発の年々変動における関係性のインデックスを用いて評価すると、大陸の全域で過大であり、MMEではERA-Interim再解析に比べリサイクリングがより活発である。

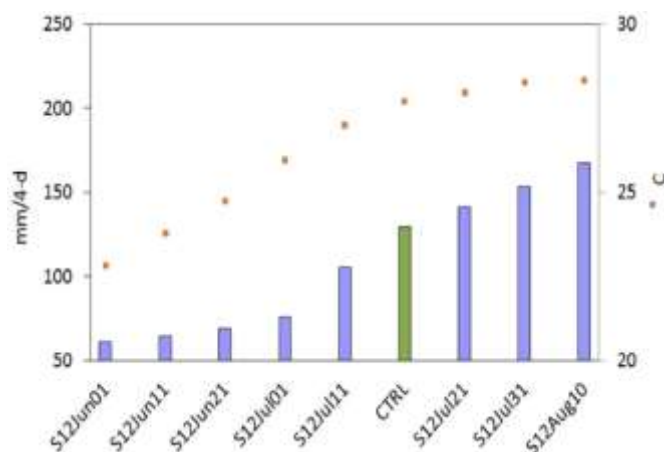
これらの気候モデルにおける雲量や水蒸気のリサイクリング強度の問題は、先行研究で指摘されているものとも整合的である。例えば、雲スキームにおける雲の寿命を延ばすことや、陸面モデルにおける蒸発効率を下げることで、夏季北ユーラシアの降水を改善できる可能性が示唆される。

(3) 日本近海の季節的・長期的な温暖化や海流の長期変動が、雲・降水系・低気圧活動に及ぼす影響の評価

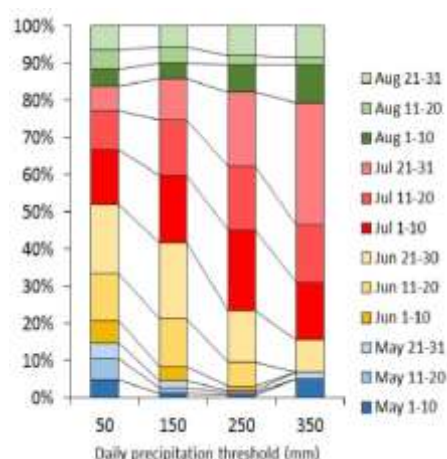
1) 東シナ海の季節的・長期的温暖化が九州の集中豪雨に及ぼす影響

水深が浅い東シナ海は冬季に季節風で強烈に冷やされた後、真夏にかけて水温が急激に上昇する。この水温の季節変化が九州の豪雨発生に与える影響を評価するため、2012年7月中旬に甚大な被害をもたらした九州北部豪雨を対象に領域大気モデル実験を実施した。境界条件として7月中旬に観測された東シナ海の水温を与えると、WRFモデルは豪雨の非常に高い再現性を見せた(図(1)-9)。7月中旬の水温平年値を与えても再現性はかなり高いが、豪雨時の大気場であっても6月の水温に替えると降水量が顕著に低下した。この数値実験結果は、雨量観測データの解析から得られる「九州西部の集中豪雨が7月中・下旬に特に多い」傾向(図(1)-10)とも整合的であり、東シナ海水温の季節的昇温が梅雨末期の九州での集中豪雨発生に対する本質的な影響を示唆する。

さらに、CMIP5の全球温暖化予測から得られた気温と水温上昇分を現在の気候平均水温場に加えた感度実験で、顕著な降水量の増加が見られた(図(1)-11)。例えば、もし今世紀半ば以降に九州北部豪雨時と同様な大気循環場が発現したら、7月では現在気候に比べ約30%もの降水量の増加が見込まれることや、6月下旬に発現しても九州北部豪雨に匹敵する雨量となる可能性が得られた。これに対し、気温上昇分のみ与えた実験では大気境界層内の成層が安定化するために対流性降水の増加はやや抑えられ、温暖化に伴う東シナ海の水温上昇が将来の豪雨の発生に重要なことが示された。



図(1)-9 (緑棒：CTRL) 領域大気モデルWRFにより再現された「九州北部豪雨」期(2012年7月11～14日)の積算雨量の九州域平均値(mm;左軸)。(青棒)大気状態を「九州北部豪雨」期の状態に保ったまま、海面水温(赤丸;右軸)のみ各旬(横軸)の平年値を与えた感度実験における4日降水量(mm;左軸)。Manda et al. (2014; 成果論文)による。



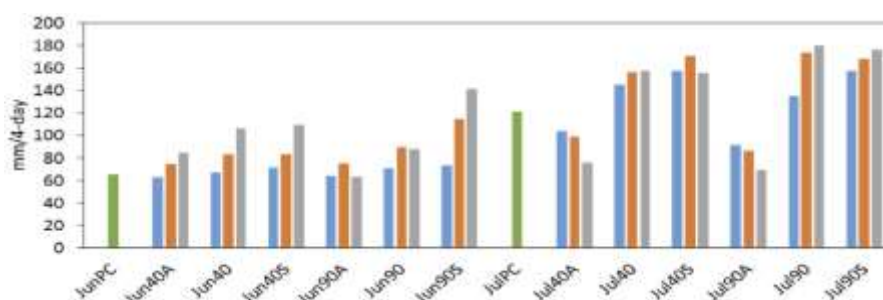
図(1)-10 九州西部の気象官署・AMeDASデータに基づき閾値別に集計した降水の旬毎の発生頻度。横軸は日降水量(mm)の閾値。褐色系は6月、赤系は7月。Manda et al. (2014; 成果論文)による。

なお、梅雨期の初期から中盤にかけては、熱帯からの暖湿気流は南西諸島周辺に留まっていることが多い。それでも暖湿気流が東シナ海を流れる暖かい黒潮上を吹く際に熱と水蒸気の供給を受け、対流不安定性が局所的に増す傾向にある。これにより、積乱雲が黒潮沿いに列を成して組織化され、その北方に位置する梅雨前線に伴う降水帯とは別の降水帯を形成するケースを見出し、領域大気モデルに黒潮沿いの水温極大が表現される高分解能の水温データとそれを人為的に平滑化した水温場を与えた2つの実験から、対流雲の組織化に黒潮の高い水温が重要であることを明示した(Miyama et al. 2012; 成果論文)。

2) 日本東方海上の水温前線とその変動が大気循環や雲・降水系に及ぼす影響

最新の全球大気再解析データERA

Interimには1979年からの大気観測データが同化されているが、その際に境界条件として与える海面水温データの解像度が前半と後半で大きく異なる特徴がある。2001年の末までは緯度経

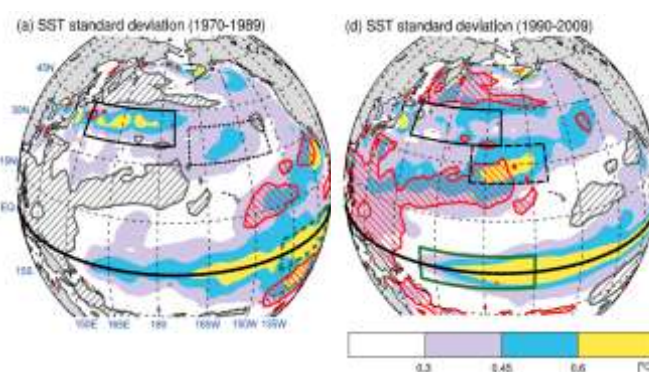


図(1)-11 領域大気モデルWRFによる「九州北部豪雨」に関する擬似温暖化実験。左軸は「九州北部豪雨」期(2012年7月11～14日)の積算雨量の九州域平均値(mm)。大気循環を「豪雨」期の状態に保ったまま、6月・7月の平年値の水温を与えた現在気候実験(緑棒; PC)。大気状態を変えずに各月の平年水温分布に2040・90年代に見込まれる水温上昇分を加えた実験(40S・90S)、各月の平年水温分布を変えずに、2040・90年代に見込まれる各月の各気圧面で領域平均された気温上昇分のみを加えた実験(40A・90A)、並びに水温上昇・気温上昇ともに加えた実験(40・90)。各実験で32のCMIP5モデルの気温・水温上昇分の最小値(青棒)、最大値(灰色棒)、及びアンサンブル平均(赤棒)を与えた結果。なお、水温・気温とも各月半ばの状態であることに注意。Manda et al. (2014; 成果論文)による。

度 1° の解像度なのに対し、2002年の初めからは緯度経度 0.5° 以上の分解能を持つ衛星観測による水温データに変更となり、日本東方海上の黒潮続流と親潮ジェットに伴う2つの水温前線がきちんと分離して表現されるようになった。よって、これらの水温前線が大気境界層の流れや熱構造、雲や降水分布に与え得る影響について、2001年以前と2002年以降のERA Interim平均場を比較することにより評価することが可能である(Masunaga et al. 2015; 成果論文)。その比較から、冬季において従来船舶観測データから確認されていた黒潮続流に沿った海面気圧の極小(気圧の谷)に加え、親潮ジェットに伴う水温前線の暖水側にも弱い気圧の谷が新たに確認された。これらの気圧の谷は、水温前線の冷水側に比して暖水側でより多くの顕熱が海洋から供給されることに対する境界層の圧力調節過程の現れと解釈できる。実際、これらの気圧の谷に伴っては地表傾圧帯が形成され、海上気温勾配が局所的に強化されていることが確認された。但し興味深いことに、これらの地表傾圧帯の形成・維持過程は互いに本質的に異なる事が見出された。親潮ジェット沿いの傾圧帯の形成・維持は、水温前線を横切る海洋からの顕熱供給の顕著な南北差に因るのに対し、黒潮続流沿いの傾圧帯は流軸から南偏し、その形成・維持には気圧の谷へ摩擦収束する海上風による温度移流が重要であることを見出した。さらに、両水温前線の暖水側では、顕熱供給極大による成層度低下に伴って乱流混合が活発化し、混合層厚の極大が見られるとともに、気圧の谷への摩擦収束に伴う上昇流に伴い、雲量が局所的に増大し、対流性降水も増加していることが見出された。こうして2002年以降に全球再解析データに表現された雲・降水や海上風収束への2つの水温前線の影響は、同時期に得られた衛星観測とも整合するものである。即ち、十分な解像度をもつ海面水温場を境界条件に与えてデータ同化を行えば、日本東方沖の黒潮続流や親潮ジェットに伴う2つの水温前線の暖水側における雲・降水量の局所的増大という衛星観測で捉えられる傾向を再現できることを初めて明確に示した(Masunaga et al. 2015; 成果論文)。

一方、大気大循環モデルAFESを用いたアンサンブル予報再現実験から、日本東方沖の亜寒帯海洋前線帯の南北変位に伴う水温偏差が海盆規模の大気循環に及ぼし得る影響を調査した(Okajima et al. 2014; 成果論文)。2011年10月に亜寒帯海洋前線帯で観測された顕著な暖水偏差(平年比最大 $+3^{\circ}\text{C}$ 以上)のみを境界条件として与えた実験では、平年値の水温分布を与えた実験との差で応答を定義すると、北太平洋上で実際に観測された高気圧性循環偏差が非常に高い有意性をもって再現された。この高い再現性は水温前線の北

偏に伴って大気地表傾圧帯も北上した結果、移動性高低気圧の経路も北上し、それら移動性擾乱からのフィードバック強制が停滞性の高気圧性循環偏差の維持に最も重要なことを見出された。さらに、同様な暖水偏差が観測された他の年に比べ、2011年10月は西方からの停滞性ロスビー波の入射が無く、水温偏差への大気応答が現れ易かったことも分かった。なお、当時熱帯太平洋は



図(1)-12 冬季平均海面水温の十年規模変動成分の標準偏差(色)。(左)1970~1989年、(右)1990~2009年。ハッチは両期間での分散比検定が85%で有意な領域(赤:増大傾向、灰色:減少傾向)。矩形領域は変動の作用中心。1990年以降の亜寒帯前線の変動弱化和亜熱帯前線の変動強化が見られる。Miyasaka et al. (2014; 成果論文)による。

ラニーニャ気味で弱い冷水偏差が赤道上に広がっていたが、熱帯域の水温偏差のみを与えた追加アンサンブル実験から、熱帯からの遠隔影響の影響は北太平洋上の高気圧性偏差を維持するよう働くものの、その振幅は中緯度の暖水偏差への応答の半分に満たないことも示された。

このように、日本東方沖にある亜寒帯海洋前線帯の南北変位に伴う持続的な水温偏差が大気循環変動を強制することが示された。その前線帯の南北変位は海盆中央部における海上風の変動に対する海洋循環系の応答と考えられ、北太平洋大気海洋結合系の10年規模変動を特徴付ける顕著な水温偏差をもたらすことが知られてきた¹⁾。しかし、1950～2009年の60年に亘る観測データを解析したところ、亜寒帯海洋前線帯で水温の10年規模変動が活発だったのは1980年代までで、1990年代以降は亜寒帯前線帯の南東に位置する亜熱帯海洋前線帯における水温変動が活発化したことを見出され（図(1)-12）、北太平洋の10年規模変動が過去数十年の間に長期変調したことが観測データから示された(Miyasaka et al. 2014; 成果論文)。さらに、比較的高解像度の大気海洋結合モデルCFES-miniにおいて温室効果気体の濃度を固定した長期積分においても、亜寒帯海洋前線帯と亜熱帯海洋前線帯における水温の10年規模変動が長期的変調し、水温変動の作用中心が期間により異なって現れることが確認できた。これは観測された北太平洋10年規模変動が自然変動の長期的な揺らぎであることを示唆するものである(Miyasaka et al. 2014; 成果論文)。そこで、CMIP5モデルの長期積分データに対して同様の解析を行うことで10年規模変動の長期変調のメカニズムについて考察を試みた。海洋前線帯を表現するに十分な解像度のモデルが少ないことや、多くのモデルで亜熱帯海洋前線帯の再現が難しいことなどを反映して、観測と類似した水温の10年規模変動の空間分布が再現できるモデルはかなり少なかった。具体的には、地球温暖化の影響を含まない長期シミュレーションでさえ解析したCMIP5モデルの約40%、それより期間が短い現在気候再現(historical)実験においては16%のモデルしか再現し得なかった。これら再現性の良い少数のモデルからの出力データに見られる10年規模変動の振幅変調を調べたところ、20世紀後半における変調のタイミングが再現できないこと、20世紀と21世紀で10年規模変動の振幅とその変調がモデル間誤差に抗して有意にはないことが判った。そして地球温暖化の影響を含まない長期積分においても同様な変調が起こることから、10年規模変動の長期変調は地球温暖化の影響ではなく自然変動の揺らぎとして起こり得ることが示された。

3) 地球温暖化に伴う海面蒸発と北極域の低気圧活動の将来変化

CMIP5による温暖化予測データの詳細な解析から各地域の地表面蒸発の変化をもたらす要因とその季節性を詳細に分析した(Laine et al. 2014; 成果論文)。殆どの海域では、水温上昇による飽和水蒸気圧の増加が蒸発の増加に最も重要な寄与をするが、水温上昇幅を上回る気温上昇の効果がそれを蒸発量の増加を軽減させる傾向があり、これは特に寒冷な亜寒帯海域で顕著なことを見出された。さらには、熱帯・亜熱帯域では海上風の弱化によっても蒸発量増加が軽減される傾向が見出された。

CMIP3・CMIP5モデル群について、現代気候再現の出力データに基づき北極域の低気圧活動のモデル再現性を比較したところ、気候モデルの改善に向けた取り組みにも拘わらず、多くのCMIP5モデルにおいても依然として夏季北極域の低気圧活動が過小評価され、かつモデル間の差異が相当に大きいことが判明した(Nishii et al. 2015; 成果論文)。移動性高低気圧が下層に西風加速をもたらすことと整合的に、モデルにおける下層の西風強度も過小評価され、かつ両者のモデル間

差異が正相関を持つことが見出された。また、将来変化として、多くのモデルは夏季北極海上の低気圧活動と下層西風の強化を予測する傾向にあることも示された。これは、温暖化に伴う夏季の気温上昇が北極海に比ベシベリア大陸上でより大きい傾向を反映し、シベリア沿岸沖で南北の気温差が拡大し、低気圧の発達に有利になるためと解釈できる（Nishii et al. 2015, 成果論文）。

（４）課題の総括

1）一般向け小冊子の作成

課題全体から論文化された科学的成果を選択して解説を編集し、本課題の目的と成果を一般に理解してもらうための小冊子を作成した（図(1)-13）。

（ダウンロードURL <http://ccsr.aori.u-tokyo.ac.jp/~takayabu/pamphlet.html> ）



図(1)-13 一般向けの小冊子による成果の発信。

2）国際会議の主催

各年度末の時期に、海外からのエキスパートを招聘して合計3回の国際会議を主催し、アジア域気候の将来変化に関するCMIP5研究についての情報交換を行った。

- 2013.3.26-27: International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba
- 2014.1.13-14: “The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia” jointly held with “The 4th Global Precipitation Measurement (GPM) Asia Workshop on Precipitation Data Application Technique”, Tokyo

- c) 2015.3.27: “The 3rd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia”, Tokyo

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 梅雨前線付近の大規模場の再現性を客観的に評価することにより、梅雨前線降水の再現性の高いモデルをうまく選び出す手法を考案したことは、初夏の日本付近の降水に関する理解を深めると同時に、より精確な将来予測を可能にするものと考えられ、科学的意義が大きい。また、衛星データや再解析データ解析から得られた降水特性-大規模場の関係を、気候モデルによる大規模場の予測結果と組み合わせることで、モデルでは直接表現できない降水特性の将来変化を定量的に推定する試みは新しく、科学的意義が大きい。

2) CMIP5マルチ気候モデルの梅雨に伴う降水の再現性に関して、これまでは梅雨前線南北での降水特性の変化という観点では確認されていなかった。本研究成果により、CMIP5気候モデルは、観測で見られるような梅雨前線付近の大規模環境場の状況を再現できることが示され、実際に前線南北で降水強度などの降水特性も変化していることを確認した。しかしながら、観測に比較して弱い降水の頻度が過大、中程度以上の降水の頻度が過小評価であるなど、現状の気候モデルでは再現できていない点も確認された。また、将来の降水変化の気候モデル間のばらつきが、亜熱帯ジェット鉛直構造の再現性に起因する可能性を示唆したことは、今後のモデル改良に役立つ情報であり、科学的意義が大きい。

3) 日本を含む東アジアの気候には、熱帯域やユーラシア大陸からの遠隔影響があることが知られている(Hirota and Takahashi, 2012⁵⁾)。例えば、エルニーニョの発生時には、フィリピン付近の熱帯降水活動は抑制され、対応する凝結加熱の減少は大気大循環に影響し、日本は冷夏になりやすくなる。また、ユーラシア大陸上の大気波動擾乱は、亜熱帯ジェットを蛇行させ、日本に異常気象に強く関わる。従って、日本付近の気候・気象を理解し、その将来変化を考えるうえで、熱帯域やユーラシア大陸上の降水過程を調べることは重要である。

熱帯域におけるダブルITCZとcold tongueバイアスは、世界中の気候モデルに共通して見られる熱帯降水の重要な問題として知られている。従来の研究では、双方の問題とも海面水温との関係が重要視され、原因が明確に分離されてこなかった。CMIP5とCMIP3とを双方利用した本研究によって初めて、前者は主に大気モデルの積雲対流パラメタリゼーションに起因し、後者は海洋モデル依存性が高いことが指摘され、明確な分離が可能となった。ダブルITCZバイアスに関しては、実際に我々の気候モデルを用いてエントレインメントパラメータを変更する感度実験も行い、具体的なモデルの改良方法も示している。気候モデルのダブルITCZバイアスとCold Tongueバイアスとが別の物理的要因に帰着されることを示したのはこの研究が初めてである。これらの物理プロセスの深い理解は具体的なモデル改良方法を提案するものであり、科学的利用価値が高い。この研究成果は国際誌で発表し、その論文はIPCC AR5でも引用されている。また、ユーラシア大陸上の降水バイアスも世界中のモデルが共通して抱える問題であり、その発生メカニズムを詳細に議論し、改善方法を提案することは科学的に重要である。

4) 記者発表したScientific Reports誌掲載の成果論文(Manda et al. 2014)においては、九州西部に甚大な災害をもたらした歴史的豪雨災害が7月後半に最も起こり易いという季節性を統計

的に確認し、かつ数値実験の結果は浅い東シナ海の水温の顕著な季節性が水蒸気供給による大気成層の不安定化を通じて豪雨に本質的に寄与し得ることを初めて明確に示した科学的意義の高い成果である。さらに、温暖化に伴う将来の東シナ海水温の顕著な上昇によって、こうした歴史的な豪雨に匹敵し得るケースが6月下旬でも起こるようになること、7月に発生すれば現在よりも降水量が30%近くも増大する可能性を示唆するものである。

一方、日本東方海上の海洋前線帯において観測された顕著な暖水偏差を与えた大気大循環モデル実験では、北太平洋上で実際に観測された高気圧性循環偏差が従来にない高い有意性をもって再現された(Okajima et al. 2014; 成果論文)。これは、従来否定されてきた中緯度海洋変動が大規模大気循環に及ぼす影響を初めて明確に示した結果である。また、東方海上の海洋前線帯における水温の10年規模変動が近年弱化傾向にあることを観測データから見出した成果論文(Miyasaka et al. 2014)では、10年規模変動の長期変動が温室効果気体濃度を固定した気候モデルでも現れることも確認されることから、長期変動が自然変動の揺らぎと解釈でき、北太平洋域の気候状態の将来変化予測に不確実性をもたらす新たな要因が見出された。さらに、我が国の東方海上の複雑な水温分布が大気及ぼす影響に関する成果論文(Masunaga et al. 2015)においては、全球大気モデルにおいても十分な水平解像度があり、かつ水温前線を表現できる水温データを与えれば、黒潮続流前線や親潮前線に伴う顕著で局所的な水温勾配が大気境界層のメソ構造や雲・降水系の形成に与える影響を表現し得ることを明示した。これにより、水温前線に対する大気境界層内の熱・循環構造の応答やそれに伴う雲・降水系の形成力学の解明が可能になった。

一方、夏季に北極海沿岸に形成されるストームトラックの気候モデル再現性と将来変化に関する成果論文(Nishii et al. 2015)においては、温暖化の著しい北極海域に熱や水蒸気を輸送する温帯低気圧の活動についての再現性が、IPCCクラスの気候モデルにおいては未だかなりの過小評価と相当な不確実性が見られるため、その将来予測にも不確実性が見込まれることを示したもので、シベリア域の陸面・植生などの表現の改善の必要性を促すものである。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

1) 梅雨の雨の特徴は、数百km幅の降雨帯の中で顕著な南北差をもち、前線の南側では激しい積乱雲の雨が多い。ジェット気流などが気候変動に伴い僅かに南北移動すると、豪雨頻度など日本域の雨の様相に急激な変化をもたらす可能性を示唆するもので、気候変動の具体的な影響についての知見を与え、温暖化対策策定の際に役立つことが見込まれる成果である。

2) 九州北部豪雨の再現・感度実験は、歴史的な豪雨災害が7月後半に特に起こり易いという傾向に、浅い東シナ海の水温の顕著な季節性が本質的に寄与することを初めて明確化したものである。さらに、今世紀半ば以降は東シナ海水温の顕著な上昇によって、こうした歴史的なケースに匹敵する豪雨が6月末にも起こり得る可能性を示唆し、かつ7月に起きれば現在よりも30%もの降水量増加が見込まれる可能性を示唆するもので、いずれも今後の防災・環境政策に役立つ重要な知見を与えるものである。

3) 日本東方海上などの海洋前線帯の水溫偏差は海洋循環の変動により形成・維持されるため、中高緯度では例外的に大気へ熱力学的強制を及ぼし得るものである。今回の大気大循環モデル実験の結果は季節予報の精度向上にも寄与し得る成果である。

4) 一般市民向け小冊子「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、本課題で発行された査読つき学術論文の成果から、地球温暖化に伴う身近な気象の変化についてのわかりやすい話題を選び、内容を噛み砕いて編集したものであり、国民に地球温暖化の効果を実感してもらうための活用が役立つと考えられる成果である。

6. 国際共同研究等の状況

(1) 高薮のグループは、2013年より米国ユタ大学のEd Zipser教授および米国Texas A&M大学のChuntao Liu准教授と衛星降雨観測データを用いた極端降雨についての共同研究を行っている。

(2) 中村のグループは、ノルウェー大気研究所やハワイ大学との共同研究を進めており、前者との共同研究の成果として Nishii et al. (2015)を国際学術誌に発表した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) T. MIYAMA, M. NONAKA, H. NAKAMURA and A. KUWANO-YOSHIDA: Tellus A, 64, 18962 (2012)
“A striking early-summer event of a convective rainband persistent along the warm Kuroshio in the East China Sea”
- 2) N. OSHIMA, M. KOIKE, Y. KONDO, H. NAKAMURA, N. MOTEKI, H. MATSUI, N. TAKEGAWA and K. KITA: J. Geophys. Res., 118, 23, 13175-13198 (2013)
“Vertical transport mechanisms of black carbon over East Asia in spring during the A-FORCE aircraft campaign”
- 3) K. TAKAYA and H. NAKAMURA: J. Climate, 26, 23, 9445-9461 (2013)
“Interannual variability of the East Asian winter monsoon and related modulations of the planetary waves “
- 4) T. MIYAKAWA, S. YOKOI, N. HIROTA, S. HIRAHARA, T. INOUE and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 91, 305-321 (2013)
“A summer Eastern Asian metric for CMIP3 climate models: an iterative selection method”
- 5) N. HIROTA and Y. N. TAKAYABU: Climate Dynamics, 41, 2909-2920 (2013)
“Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3”
- 6) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU, M. WATANABE, M. KIMOTO and M. CHIKIRA: J. Climate, 27, 8707-8723 (2014)
“Roles of convective entrainment in spatial distributions and temporal variations of precipitation.”

- 7) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and S. KANADA: J. Climate, 27, 5872-5890 (2014)
 "A contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan: Part I. TRMM PR observation."
- 8) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, B. TAGUCHI and M. NONAKA: Geophys. Res. Lett., 41, 8, 2948-2955 (2014)
 "Multi-decadal modulations of the low-frequency climate variability in the wintertime North Pacific since 1950"
- 9) A. LAINE, H. NAKAMURA, K. NISHII and T. MIYASAKA: Climate Dynamics, 42, 9-10, 2745-2761 (2014)
 "A diagnostic study of future evaporation changes projected in CMIP5 climate models"
- 10) S. OKAJIMA, H. NAKAMURA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: J. Climate, 27, 11, 3998-3903 (2014)
 "Assessing the importance of prominent warm SST anomalies over the midlatitude North Pacific in forcing large-scale atmospheric anomalies during 2011 summer and autumn"
- 11) A. MANDA, H. NAKAMURA, N. ASANO, S. IIZUKA, T. MIYAMA, Q. MOTTEKI, M. YOSHIOKA, K. NISHII and T. MIYASAKA: Scientific Reports 4, 5741, doi:10.1038/srep05741 (2014)
 "Impacts of a warming marginal sea on torrential rainfall organized under the Asian summer monsoon"
- 12) N. SHI and H. NAKAMURA: Tellus A, 66, 22660 (2014)
 "Multi-decadal modulations in the Aleutian-Icelandic Low seesaw and the axial symmetry of the Arctic Oscillation signature, as revealed in the 20th century reanalysis"
- 13) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: Climate Dynamics, 44, 5-6, 1311-1327 (2015)
 "Arctic summer storm track in CMIP3/5 climate models"
- 14) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII and Y. TANIMOTO: J. Climate, 28, 1764-1787 (2015)
 "Separation of climatological imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on the wintertime atmospheric boundary layer: Their sensitivity to SST resolution prescribed for atmospheric reanalysis"
- 15) S. MINOBE, B. QIU, M. NONAKA and H. NAKAMURA: "Climate Changes: Multidecadal and Beyond", World Scientific (2015), in press
 "Air-sea interaction over the western boundary currents in the western North Pacific"
- 16) H. NAKAMURA, K. NISHII, L. WANG, Y. J. ORSOLINI and K. TAKAYA: "Dynamics and Predictability of Large-Scale High-Impact Weather and Climate Events", J. Li, R. Swinbank, H. Volkert, R. Grotjahn, Eds., Cambridge University Press (2015), in

press

“Cold-air outbreaks over East Asia associated with blocking highs: Mechanisms and their interaction with the polar stratosphere”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) H. NAKAMURA: Nature Geoscience, 5, 768-769 (2012)
“Future oceans under pressure” (News and Views)

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) NHK「そなえる防災」コラム (2013)
「第1回：世界的な異常気象と地球温暖化」
- 2) 中村 尚：新潮 45 (11月号)、新潮社、128-131 (2013)
「猛暑とゲリラ豪雨は今後も激化する」
- 3) NHK「そなえる防災」コラム (2013)
「第2回：猛暑の後は厳冬か？ 猛暑と寒波の関係とは」
- 4) 中村 尚：プレジデント (2014年1月13日号)、プレジデント社、44-44 (2013)
「ゲリラ豪雨、台風、竜巻・・・一番危険な地域は？ 北海道や東北でもスーパー豪雨に警戒」
- 5) NHK「そなえる防災」コラム (2014)
「第3回：極渦がもたらす異常気象」
- 6) 中村 尚：地球温暖化－そのメカニズムと不確実性－、公益社団法人日本気象学会地球環境問題委員会編、85-89 (2014)
「7.3 日本の気候にかかわる地理的環境と大気海洋循環」
「7.4 地球温暖化に伴う冬季天候の変化」
「7.5 地球温暖化に伴う夏季天候の変化」
- 7) 高薮 縁：地球温暖化－そのメカニズムと不確実性－、公益社団法人日本気象学会地球環境問題委員会編、89-91 (2014)
「7.6 日本域の梅雨期降雨特性の変化」
- 8) 高薮縁、横山千恵 他：環境省環境研究総合推進費 2A-1201 編、22 頁、(2015)
「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－」
- 9) 高薮縁：中学生からの大学講義 3 科学は未来をひらく、ちくまプリマー新書 桐光学園＋ちくまプリマー新書編集部編 99-120 (2015)
「宇宙から観る熱帯の雨－衛星観測のひもとくもの－」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) 廣田渚郎、高薮縁：日本気象学会2012年度春季大会 (2012)
「CMIP5における対流の環境場湿度に対する感度」
- 2) 中村 尚：日本地球惑星科学連合 2012 年大会 (2012)
スペシャルレクチャー「異常気象と気候変動の科学」 (invited)
- 3) T. Miyasaka：2012 JpGU Assembly, May 2012, Chiba, Japan, 2012

- “Long-term modulations in the decadal climate variability over the North Pacific”
- 4) H. Nakamura : AMS 18-th Conference on Air-Sea Interaction, Boston, U.S.A., 2012
 “Long-term modulations in North-Pacific decadal climate variability as revealed in observations and a coupled model simulation”
 - 5) H. Nakamura : ICDM/IAMAS Workshop on Dynamics and Predictability of High-impact Weather and Climate Events, Kunming, China, 2012
 “Cold-air outbreaks over East Asia associated with blocking highs: Mechanisms and their influence on the polar stratosphere” (invited)
 - 6) K. Nishii : ICDM/IAMAS Workshop on Dynamics and Predictability of High-impact Weather and Climate Events, Kunming, China, 2012
 “Geographical dependence observed in blocking high influence on the stratospheric variability through enhancement and suppression of upward planetary-wave propagation”
 - 7) H. Nakamura: 2012 AOGS Assembly, Singapore, 2012
 “Air-sea interactions associated with midlatitude ocean fronts: multi-scale impacts of the ocean on the atmosphere” (invited)
 - 8) 宮坂貴文 : 日本気象学会 2012 年度秋季大会 (2012)
 「北太平洋十年規模気候変動の長期変調」
 - 9) 廣田渚郎、高薮縁 : 日本気象学会2012年度秋季大会 (2012)
 「CMIP5気候モデルによる高緯度陸上降水の再現性」
 - 10) 横山千恵、Edward Zipser、Chuntao Liu : 日本気象学会2012年度秋季大会 (2012)
 「Large-scale meridional circulations in three reanalysis datasets associated with TRMM-observed precipitation properties over the eastern Pacific」
 - 11) N. Hirota and Y. N. Takayabu : AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2012
 “Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi-climate models compared to CMIP3”
 - 12) H. Nakamura : AGU Chapman Conference on The Agulhas System and its Role in Changing Ocean Circulation, Climate, and Marine Ecosystems, Stellenbosch, South Africa, 2012
 “Air-sea interactions associated with the Agulhas system: Regional, basin-scale and hemispheric impacts” (invited)
 - 13) 宮坂貴文 : 京都大学防災研究所特定研究集会「週間及び 1 か月予報における顕著現象の予測可能性」 (2012)
 「北太平洋十年規模気候変動の長期変調」
 - 14) 西井和晃 : 京都大学防災研究所特定研究集会「週間及び 1 か月予報における顕著現象の予測可能性」 (2012)
 「梅雨・秋雨の対比とそのモデル再現性・将来変化」
 - 15) Y. N. Takayabu and N. Hirota : 2013 International Conference on Climate Change, Taipei, Taiwan, 2013
 “Factors affecting the distribution of tropical precipitation in CMIP5 models and their effects to future projections” (invited)

- 16) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵：名古屋大学地球水循環研究センター平成 24 年度共同研究集会
「衛星による陸上の高精度降水推定技術の開発とその水文学への利用の研究企画のための集会」 (2013)
「TRMM PR データを用いた梅雨期における日本付近の降水特性変化の解析」
- 17) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada : 2013 NASA Precipitation Measurement Missions (PMM) Science Team Meeting, Annapolis. U.S.A., 2013
“A TRMM PR analysis on a contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan for evaluations of CMIP5 models “
- 18) K. Nishii : ISAR-3, Tokyo, Japan, 2013
“Projected changes in Arctic summer storm-track activity by CMIP3 climate models”
- 19) H. Nakamura : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Potential influence of the future warming of the East China Sea on the occurrence of heavy rainfall events over western Japan in the Baiu/Meiyu season: An assessment through regional model experiments “
- 20) K. Nishii : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Large-scale East-Asian rainbands in early summer and autumn simulated in CMIP5 models”
- 21) A. Laine : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“A diagnostic study of future evaporation changes simulated in IPCC-AR4 climate models”
- 22) Y. N. Takayabu : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Introduction to “International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia” ”
- 23) M. Watanabe : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Equatorial mean precipitation and ENSO: Its diversity and causes of errors in CMIP5 ensemble”
- 24) N. Hirota and Y. N. Takayabu : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 compared to CMIP3”
- 25) S. Kanada, C. Yokoyama and Y. N. Takayabu : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“An intercomparison of CMIP5 simulations on a contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan”
- 26) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba,

- Japan, 2013
- “A study on a contrast in precipitation characteristics across the Baiu front near Japan using TRMM PR data”
- 27) N. Hirota and Y. N. Takayabu: EGU General Assembly 2013, Vienna, Austria, 2013
- “Seasonal variations and horizontal distribution of precipitation over extratropical continental regions in the CMIP5”
- 28) K. Nishii : 4th WGNE Workshop on Systematic Errors in Weather and Climate Models, Exeter, U.K., 2013
- “Precipitation bias in early summer and autumn over East Asia in CMIP5 models”
- 29) H. Nakamura : KIAPS International Workshop on the Technology and Future Prospects in the NWP Model Development, Seoul, Korea, 2013
- “Natural climate variability and related uncertainties in projected climate changes: A case of the PJ pattern” (invited)
- 30) H. Nakamura : 50th Anniversary Spring Meeting of the Korean Meteorological Society, Seoul, Korea, 2013
- “Multi-scale impacts of the extratropical ocean on the atmosphere: Roles of the western boundary currents and associated frontal zones” (invited)
- 31) 西井和晃 : 日本気象学会 2013 年度春季大会 (2013)
- 「秋雨期の大規模循環場の特徴とその CMIP5 モデルによる再現性」
- 32) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵 : 日本気象学会 2013 年度春季大会 (2013)
- 「梅雨期における日本付近の降水特性変化 : TRMM PR 観測から」
- 33) 金田幸恵、高薮縁、横山千恵 : 日本気象学会 2013 年度春季大会 (2013)
- 「梅雨期における日本付近の降水特性変化について～CMIP5 から～」
- 34) Y. N. Takayabu, C. Yokoyama and S. Kanada: AOGS 10th Annual Meeting, Brisbane, Australia, 2013
- “Variations of rainfall characteristics with a passage of Baiu-front around Japan observed from TRMM PR, and comparisons with reanalysis and CMIP5 data”
- 35) H. Nakamura : AOGS Assembly, Brisbane, Australia, 2013
- “The Western Pacific teleconnection pattern: Its structure, dynamics and influence on the East Asian winter monsoon” (invited)
- 36) H. Nakamura : DACA-13, Davos, Switzerland, 2013
- “Long-term modulations in the decadal climate variability over the North-Pacific: Observations and a coupled model simulation”
- 37) K. Nishii : DACA-13, Davos, Switzerland, 2013
- “Projected changes in Arctic summer storm-track activity by CMIP3 climate models”
- 38) H. Nakamura : Workshop on Climate Implications of Frontal-Scale Air-Sea Interaction, Boulder, U.S.A., 2013
- “Multi-scale impacts of the midlatitude ocean on the atmosphere: Roles of the western boundary currents and associated frontal zones” (invited)

- 39) H. Nakamura : NCAR Brown Bag Seminar, Boulder, U.S.A., 2013
 “Some impacts of the North Pacific SST on the atmospheric boundary layer and free troposphere”
- 40) H. Nakamura : International Symposia on Recent progress in Climate Variability Study: Scale Interactions in Climate Variability, Yokohama, Japan, 2013
 “Impacts of the North Pacific SST on the atmospheric boundary layer and free troposphere” (invited)
- 41) 宮坂貴文 : 日本気象学会 2013 年度秋季大会 (2013)
 「大気海洋結合モデルにおける北太平洋十年規模変動の長期変調」
- 42) 廣田渚郎、高菽縁 : 日本気象学会2013年度秋季大会 (2013)
 「CMIP5気候モデルにおける北ユーラシア夏季降水バイアスの原因」
- 43) 横山千恵、高菽縁 : 日本気象学会2013年度秋季大会 (2013)
 「JRA-55データを用いた梅雨前線に伴う降水の長期変化傾向に関する研究」
- 44) N. Hirota, Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto and M. Chikira: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013
 “The roles of convective entrainment in spatial distributions and temporal variations of precipitation over tropical oceans”
- 45) Y. N. Takayabu, C. Yokoyama and S. Kanada: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013
 “A contrast in the precipitation characteristics across the Baiu front near Japan: TRMM and CMIP5” (invited)
- 46) 宮坂貴文 : 長期予報研究連絡会「長期予報と大気大循環」(2013)
 「北太平洋十年規模気候変動の長期変調」
- 47) H. Nakamura : 6th OFES Workshop, Honolulu, U.S.A., 2013
 “Multi-scale impacts of midlatitude oceanic frontal zones on the atmosphere” (keynote talk)
- 48) H. Nakamura : The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia”, Tokyo, Japan, 2014
 “Potential influence of the future warming of the East China Sea on the occurrence of heavy rainfall events over western Japan in the Baiu/Meiyu season”
- 49) N. Hirota, Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto and M. Chikira: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
 “The roles of convective entrainment in spatial distributions and temporal variations of precipitation over tropical oceans”
- 50) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
 “A study on long-term variations in current climate and future changes in precipitation

- of the Baiu front using JRA55 and CMIP5 simulations”
- 51) 廣田渚郎、高薮縁、濱田篤：GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会 (2014)
「CMIP5 気候モデルによるユーラシア高緯度における夏季降水の再現性」
 - 52) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵：GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会 (2014)
「梅雨期の降水の現在気候における長期変動と将来変化に関する研究—TRMM PR、JRA55、CMIP5 マルチ気候モデルデータを用いて—」
 - 53) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada: International Workshop on Climate System Modeling -Climate 2014-, Honolulu, U.S.A., 2014
“Changes in precipitation of the Baiu front: Lon-term variations in JRA55 vs. future changes in CMIP5 models”
 - 54) H. Nakamura : Ocean Sciences Meeting, Honolulu, U.S.A., 2014
“Potential importance of a midlatitude oceanic frontal zone in the atmospheric annular-mode variability”
 - 55) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵：日本気象学会 2014 年度春季大会 (2014)
「梅雨期の降雨変化に関する研究: JRA55 再解析データによる長期変化と CMIP5 マルチ気候モデルデータによる将来変化」
 - 56) H. Nakamura : EGU General Assembly 2014, Vienna, Austria, 2014
“Potential importance of a midlatitude oceanic frontal zone in the annular variability of the westerlies and its vertical connectivity” (invited)
 - 57) H. Nakamura : Norway-Japan Marine Science Week, Tokyo, Japan, 2014
“Extratropical ocean-atmosphere interactions and their climatic impacts” (invited)
 - 58) Y. N. Takayabu : Norway-Japan Marine Science Week, Tokyo, Japan, 2014 (invited)
“Precipitation measurements from satellites and implications for climate studies”
 - 59) H. Nakamura : Workshop on Predictability of Climate in the North Atlantic Sector, Bergen, Norway, 2014
“Multi-scale climatic impacts of midlatitude oceanic frontal zones” (invited)
 - 60) Y. N. Takayabu, Y. Mori, and A. Hamada : 7th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Hague, Netherlands, 2014.
“What kind of systems bring us extreme precipitation? - Observation from 12 years of TRMM PR data”
 - 61) N. Hirota and Y. N. Takayabu : 7th International Scientific Conference on the Global Energy and Water Cycle, Hague, Netherlands, 2014.
“Precipitation processes over northern Eurasia simulated by CMIP5 climate models.”
 - 62) H. Nakamura : 2014 AOGS Assembly, Sapporo, Japan, 2014
“Potential importance of a midlatitude oceanic frontal zone in the atmospheric annular-mode variability as revealed in idealized numerical experiments”
 - 63) H. Nakamura : 2014 AOGS Assembly, Sapporo, Japan, 2014
“Potential influence of the future warming of the East China Sea on the occurrence of heavy rainfall events over western Japan in the Baiu/Meiyu season” (invited)

- 64) T. Miyasaka : 2014 AOGS Assembly, Sapporo, Japan, 2014
 “Long-term modulations of the decadal climate variability over the North Pacific in CMIP5 models”
- 65) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada : Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 11th annual meeting, Sapporo, Japan, 2014.
 “Variations in precipitation associated with the Baiu front: TRMM PR observation and CMIP5 future projections.”
- 66) 廣田渚郎、高菰縁：「平成 26 年 8 月豪雨」に関する研究会（2014）
 「平成 26 年 8 月広島豪雨の大規模場に関する事例解析」
- 67) 高菰 縁、森 祐貴、濱田 篤：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
 「降水観測衛星による極端降雨解析研究」
- 68) 廣田渚郎、高菰縁、濱田篤：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
 「CMIP5 気候モデルにおける夏季ユーラシア降水の日変動」
- 69) 横山千恵、高菰縁、金田幸恵：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
 「CMIP5 データを用いた梅雨期降雨の将来変化と環境場の関係」
- 70) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada : 7th Workshop of the International Precipitation Working Group (IPWG), Tsukuba, Japan, 2014.
 “Future changes in precipitation associated with the Baiu front in CMIP5 simulations.”
- 71) C. Yokoyama, Y. N. Takayabu and S. Kanada: American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, U. S. A., 2014.
 “A study on future changes in precipitation associated with the Baiu front using CMIP5 simulations.”
- 72) H. Nakamura : Polar-Lower Latitudes Linkages Workshop, Barcelona, Spain, 2014
 “Extreme amplification of cold continental anticyclones associated with wintertime blocking highs” (invited)
- 73) C. Yokoyama : Third International Workshop on Studies on Future Climate Projection of the Asian Region Utilizing the CMIP5 Multi-Model Ensemble Data, Tokyo, Japan, 2015
 “A study on future changes in precipitation of the Baiu front, using TRMM PR data, JRA55 reanalysis data, and CMIP5 data”
- 74) H. Nakamura : 27th Conference on Climate Variability and Change, American Meteorological Society, Phoenix, U.S.A., 2015
 “Potential Importance of a midlatitude oceanic frontal zone for the atmospheric annular-mode variability: Inter-basin differences in the annular-mode signature over the Southern Oceans”
- 75) H. Nakamura : 19th Conference on Air-Sea Interaction, American Meteorological Society, Phoenix, U.S.A., 2015
 “Multi-scale impacts of midlatitude oceanic frontal zones on the atmosphere” (invited)

- 76) H. Nakamura : Workshop on Dynamics of Atmosphere-Ice-Ocean interactions in the High-Latitudes, Rosendal, Norway, 2015

“Potential importance of a midlatitude oceanic frontal zone in the annular-mode variability”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 「江戸川区子ども未来館」にて講演（西井和晃）「チョウのはばたきが天気をかえる？～バタフライ効果と天気予報～」（2012年5月5日、小学生約30名）
- 2) 「江戸川区子ども未来館」にて講演（中村 尚）「入道雲と偏西風のはなし ～台風・竜巻・異常気象～」（2012年8月25日、小学生約30名）
- 3) スーパーサイエンスハイスクール講演会（高薮 縁），茨城県立並木中等教育学校（2012年10月、中学生約160名）
- 4) 一般公開シンポジウム 「水惑星の安心を支える」にて講演（高薮 縁）「日本のレーダーが世界で初めて宇宙から雨の立体構造を見た。それは何を教えてくれたか」（2012年12月、聴衆232名）
- 5) Briefing at the Foreign Press Center/Japan（中村 尚）「What caused extreme warmth and rainfall over Japan in summer 2013?」（2013年9月24日、外国人ジャーナリスト約20名）
- 6) 「東京大学駒場リサーチキャンパス公開」公開講演会（中村 尚）「異常気象：その仕組みと地球温暖化との関係」（2014年6月7日、聴衆約100名）
- 7) 東京大学先端科学技術研究センター「DO-IT-Japan」特別講義（中村 尚）「異常気象：その仕組みと地球温暖化との関係」（2014年8月5日、障がいをもつ中高生と保護者約15名）
- 8) 一般公開シンポジウム 「水惑星の安心を見守る～熱帯降雨観測（TRMM）衛星17年間の成果～」にて講演（高薮 縁）「熱帯降雨観測計画17年がもたらした降水科学の新展望」（2015年2月19日、聴衆194名）
- 9) スーパーサイエンスハイスクール特別実習での講義（高薮 縁）茨城県立並木中等教育学校（2015年2月22日 中学生20名＋教員1名）

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表（26年7月18日、Manda et al. (2014)の成果について、於東京大学先端科学技術研究センター）
- 2) 日本経済新聞（全国版）・朝日新聞（西部版）・読売新聞（九州版）・西日本新聞・共同通信・長崎新聞・熊本日日新聞・宮崎日日新聞・大分合同新聞・京都新聞（26年7月19日）「東シナ海の水温上昇が梅雨期に九州で起こる集中豪雨の発生に影響」
- 3) NHK総合テレビニュース（26年7月19日、Manda et al. (2014)の成果について2分ほど紹介）

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Takayabu, Y. N., and K. Hikosaka (2009): A statistical analysis of oceanic rainfall characteristics in the Baiu season utilizing TRMM PR data, J. Meteor. Soc. Japan, 87A, 341-354.
- 2) Kodama, Y. (1993): Large-scale common features of sub-tropical convergence zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ and the SACZ) Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs. J. Meteor. Soc. Japan, 71, 581-610.
- 3) Sampe, T., and S.-P. Xie (2010): Large-scale dynamics of the meiyu-baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet. J. Climate, 23, 113-134.
- 4) Horinouchi, T. (2014): Influence of upper tropospheric disturbances on the synoptic variability of precipitation and moisture transport over summertime East Asia and the Northwestern Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 92, 519-541.
- 5) Hirota, N. and M. Takahashi (2012): A tripolar pattern as an internal mode of the East Asian summer monsoon. Climate dynamics 39.9-10, 2219-2238.
- 6) 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.
- 7) Nonaka, M., H. Nakamura, Y. Tanimoto, T. Kagimoto and H. Sasaki, (2006): North Pacific decadal variability in SST and frontal structure simulated in a high-resolution OGCM. J. Climate, 19, 1970-1989.
- 8) Sato, T., F. Kimura and A. Kitoh, (2007): Projection of global warming onto regional precipitation over Mongolia using a regional climate model. J. Hydrol., 333, 144-154.
- 9) Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. J. Geophys. Res., 106, 7183-7192.
- 10) Kusunoki, S. and O. Arakawa, (2015): Are CMIP5 models better than CMIP3 models in simulating precipitation over East Asia? J. Climate, (in press).

（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 尾瀬智昭

楠昌司・安田珠幾・仲江川敏之・遠藤洋和

〈研究協力者〉

国土交通省 気象庁

地球環境・海洋部 前田修平・及川義教・石原幸司・若松俊哉・原田昌・村井博一

平成24～26年度累計予算額：18,281千円（うち、平成26年度予算額：6,282千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

第5期結合モデル相互比較計画the Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)のマルチモデルデータを用いて、（１）モンスーン地域の降水変化に対する熱力学的効果と力学的効果についての定量的解析、（２）海面水温や陸面温度と関連するアジア域降水量の将来変化についての解析、（３）地球温暖化に伴う海洋循環の変化による北太平洋西部の水位将来変化についての解析、（４）CMIP5モデルによる梅雨や降水強度の現在気候再現性の研究、（５）冬季東アジアにおける大気循環の将来変化についての研究を実施した。

この結果、以下のことがわかった。（１）温暖化に伴うモンスーン地域の降水変化は一様ではなく、地域間の違いが大きい。日本を含むアジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱化による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも大きな降水増加が予測される。（２）降水量の将来変化予測は海洋大陸の東西やアフリカのサヘル域でモデル間の符号一致度が小さいが、前者は熱帯海上気温の将来変化と、後者は北半球の大陸高緯度の陸上気温の将来変化と関係している。（３）地球温暖化に伴う海洋循環の変化による日本東方など北太平洋西部の領域海面水位上昇は、全球平均海面水位上昇より大きい。（４）東アジアの月平均降水量や極端降水量の再現性は、CMIP5モデルがCMIP3モデルより精度が良く、また梅雨の北上傾向がより良く再現されている。（５）冬季（12～2月）東アジアにおける循環場の変化の解析と数値実験によれば、地球温暖化による熱帯域対流圏の成層安定化によってウォーカー循環が弱化し松野-ギル応答が弱まり、東アジアでは亜熱帯ジェット的位置が変化する。これによる日本の南東海上での高気圧性変化はアリューシャン低気圧の南側を弱める方向に寄与するため、日本付近の冬型気圧配置が弱化して寒波が弱まる。

〔キーワード〕

モンスーン、海面水温、海面水位、梅雨、亜熱帯ジェット

1. はじめに

（１）熱帯地域に風や降水の明瞭な季節変化をもたらすモンスーンは、太陽加熱の季節変化による海陸間の温度コントラストにより駆動されている。温暖化に伴い海陸間の温度コントラストは

増大するため、単純に考えると、温暖化に伴いモンスーン循環は強化され、降水は増加する。また、温暖化に伴う大気中の水蒸気増加も、モンスーン地域の降水を増加させる方向に働くと考えられる。一方で、温暖化に伴い熱帯の平均的な鉛直循環は弱化すると考えられており（Held and Soden 2006¹⁾）、これは上述の降水増加効果の一部または多くを相殺すると考えられる。このように、温暖化に伴う降水変化を理解する際には、水蒸気の変化（熱力学的効果）と大気循環の変化（力学的効果）の両方を考える必要がある。温暖化に伴い、全球規模のモンスーンについては、降水量と降水強度はともに増加し、モンスーンの影響を受ける領域は拡大すると予測されている（Hsu et al. 2012²⁾）。地域規模のモンスーンについては、多くのモンスーン地域で降水量が増加するが、変化の仕方は一様ではなく地域差が大きいことが指摘されている（Kitoh et al. 2013³⁾）。

（２）温暖化に伴う降水変化の力学的効果には、平均的な鉛直循環の弱化的効果に、温暖化に伴う海陸間の温度コントラストの変化や海面水温の地理的分布の変化による効果も加わるため、陸面温度や海面水温の変化に関係した降水の変化も考慮する必要がある。

（３）海洋の状況に注目すると、日本は北太平洋亜熱帯・亜寒帯循環系の境界で黒潮と親潮が交わる緯度帯に位置し、日本周辺における海面水位（以下、水位）の変動・変化は、これらの海洋循環の変動・変化の影響を受け、さらには地球規模の大気循環の変化と関係していることが指摘されている。このような観点で、地球温暖化に伴い日本付近の海面水位がどのように変化するかを調査することは重要な課題と言える。

（４）この研究課題で主として解析した対象は、第5期結合モデル国際比較計画the Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5)に参加した大気海洋大循環モデルAtmosphere-Ocean General Circulation Model (AOGCM)（表(2)-1）であるが、その地上気温と降水量の再現性は、第3期結合モデル国際比較計画(CMIP3)に参加した前世代のモデルに比べ明らかに向上している。アジアの夏のモンスーンの再現性については、Sperber et al. (2012)⁴⁾が調査しており、様々な観点でCMIP5がCMIP3より優れていることを報告している。Ogata (2014)⁵⁾は冬と夏のアジアのモンスーンについてCMIP5の優位性を指摘している。Sperber et al. (2012)⁴⁾とOgata (2014)⁵⁾の研究は、アジアの広域の地上気温と降水量の再現性を対象としており、東アジアに特有な梅雨や降水強度の再現性を調査していない。Kusunoki and Arakawa (2012)⁶⁾は、CMIP3モデルが東アジアの降水強度を過小評価していることを報告している。

（５）東アジアの季節進行の変化に深く関わりのある現象の一つに、海洋大陸付近における対流活動の変化がある。この海洋大陸付近には太陽放射による陸面加熱や世界一温暖な海洋による水蒸気供給によって活発な対流が発生しており、ハドレー循環やウォーカー循環といった大規模な循環の駆動源となっている。これらの循環は東アジアの循環場に影響しており、例えばハドレー循環の強弱は亜熱帯ジェットの高さや位置に影響を与え、ウォーカー循環に伴う対流圏上層の発散風の強弱は冬季において日本の南に形成される高気圧性定在波の強さに影響を及ぼしている。これらの大規模な循環の弱化的に伴い日本付近の循環場がどのように変化するかを調査することは、科学的観点のみならず社会的観点からも非常に重要な課題である。日本には四季折々の季節が存在する。夏季（6～8月）に関しては、本推進費の前身プロジェクトにおいて、熱帯成層の安定化に伴う水平発散の弱化的がチベット高気圧の変調を介して日本付近でのジェット気流の北上を遅らせ、梅雨の期間を将来長引かせる可能性があることが指摘されている（Hirahara et al. 2012)⁷⁾）。

表(2)-1 31個のCMIP 5 モデル

通 番 号	記 号	モデル名 IPCC (2013)のTable 9.A.1	大気モデル 水平分解能 ^a	大気モデル格子数		35°Nにおける 東西格子間隔 (km) ^b
				経度	緯度	
1	a	ACCESS1.0	G63L17	192	145	171
2	b	ACCESS1.3	G63L17	192	145	171
3	c	BCC-CSM1.1	T42L17	128	64	256
4	d	BCC-CSM1.1(m)	T106L17	320	160	102
5	e	BNU-ESM	T42L17	128	64	256
6	f	CanESM2	T42L22	128	64	256
7	g	CCSM4	T95L17	288	192	114
8	h	CESM1(BGC)	T95L17	288	192	114
9	i	CESM1(CAM5)	T95L17	288	192	114
10	j	CMCC-CESM	T32L33	96	48	342
11	k	CMCC-CM	T160L17	480	240	68
12	l	CMCC-CMS	T63L33	192	96	171
13	m	CNRM-CM5	T85L17	256	128	128
14	n	CSIRO-Mk3.6.0	T63L18	192	96	171
15	o	EC-EARTH	T106L16	320	160	102
16	p	FGOALS-g2	T42L17	128	60	256
17	q	GFDL-CM3	G47L23	144	90	228
18	r	GFDL-ESM2G	T47L17	144	90	228
19	s	GFDL-ESM2M	T47L17	144	90	228
20	t	INM-CM4	G59L17	180	120	182
21	u	IPSL-CM5A-LR	T31L17	96	96	342
22	v	IPSL-CM5A-MR	T47L17	144	143	228
23	w	IPSL-CM5B-LR	T31L17	96	96	342
24	x	MIROC5	T85L17	256	128	128
25	y	MIROC-ESM	T42L35	128	64	256
26	z	MIROC-ESM-CHEM	T42L35	128	64	256
27	A	MPI-ESM-LR	T63L25	192	96	171
28	B	MPI-ESM-MR	T63L25	192	96	171
29	C	MRI-CGCM3	T106L23	320	160	102
30	D	MRI-ESM1	T106L23	320	160	102
31	E	NorESM1-M	T47L17	144	96	228

^a Gは格子モデル。Gの後の数字はスペクトルモデルに換算した球面調和関数の最大波数。Lの後の数字は鉛直層の数。

^b 全てのモデル平均は193km。

2. 研究開発目的

世界各国の複数の高性能気候モデルによる予測結果を詳細に分析することによって、日本を含むアジアの気候が温暖化に伴い今後どのように変化していくのかを示し、日常生活、文化活動、経済活動等において地球温暖化への適応策を考案するための支援を行う。具体的には、

(1) 温暖化に伴うモンスーン降水の変化について、日本を含むアジアモンスーン域の特徴を定量的に明らかにする、(2) 熱帯太平洋などの海面水温やユーラシア大陸などの陸上気温の将来変化と関連する、アジア域の降水量将来変化の不確実性を明らかにする、(3) 地球温暖化に伴う海洋循環の変化による北太平洋西部の水位将来変化についてCMIP5マルチモデルによる地球温暖化予測実験結果を解析し、その重要性を明らかにする、(4) CMIP5モデルの梅雨や降水強度の再現性について調査し、CMIP3モデルと比較することにより、世界各国の気候モデルによる東アジア降水量再現性の精度向上を確認する、(5) 地球温暖化に伴う冬季(12～2月)東アジアの大気循環の将来変化について、CMIP5のデータセットを用いて解析し、さらに線形化モデル実験を用いてそのメカニズムを明らかにする、である。

3. 研究開発方法

この研究課題で主として解析した対象は、第5期結合モデル国際比較計画(CMIP5)に参加した大気海洋大循環モデル(AOGCM)であるが、解析条件により研究毎にモデルを選択している。

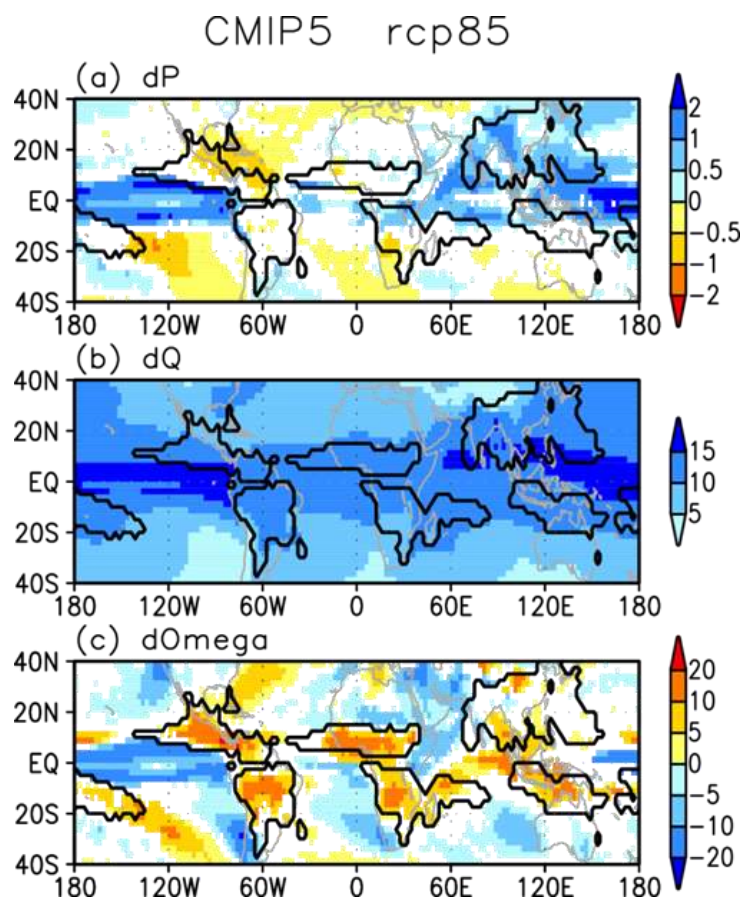
4. 結果及び考察

(1) モンスーン地域の降水変化に対する熱力学的効果と力学的効果についての定量的解析

1) 解析結果

CMIP5 に提出されたモデルのうち、月平均値と日平均値が解析可能な 20 個のモデルを解析した。現在気候は、過去再現実験 (historical) の 1986~2005 年平均、将来気候は、RCP8.5 シナリオの 2080~2099 年平均とした。詳細は Endo and Kitoh (2014)⁸⁾を参照されたい。

図(2)-1 は、降水量、鉛直積算水蒸気量、500hPa 上昇流の将来変化 (夏季) である。降水量は、熱帯域では概ね増加し、特に海面水温 (SST) 上昇が大きい太平洋赤道域での増加が顕著である。モンスーン地域では、増加する地域と減少する地域がある。例えば、アジアモンスーン地域では増加傾向にあるのに対し、北アメリカモンスーン地域では減少傾向にある。水蒸気量は、熱帯域を中心に増加しており、地域間の違いは比較的小さい。一方、平均的な上昇流の強さは、モンスーン地域では弱体化傾向にある。ただし、アジアモンスーン地域では弱体化傾向が不明瞭である。



図(2)-1 CMIP5 モデルにおける夏季の将来変化。(a) 降水量(mm day^{-1})、(b) 鉛直積算水蒸気量($10^{-3} \text{ kg m}^{-2}$)、(c) 500hPa 上昇流($10^{-3} \text{ Pa s}^{-1}$)。現在気候は 1986~2005 年、将来気候は 2080~2099 年。RCP8.5 シナリオに基づく。北半球は 5~9 月平均、南半球は 11~3 月平均。将来変化の符号が 2/3 以上のモデルで一致した変化のみ陰影で示す。太実線はモンスーン領域。

熱力学的変化と力学的変化を定量的に議論するため、以下に示す線形化した水蒸気収支式を用いて各項を評価した。

$$\delta P = \delta E + \delta TH + \delta DY + \delta TE + Res \quad (1)$$

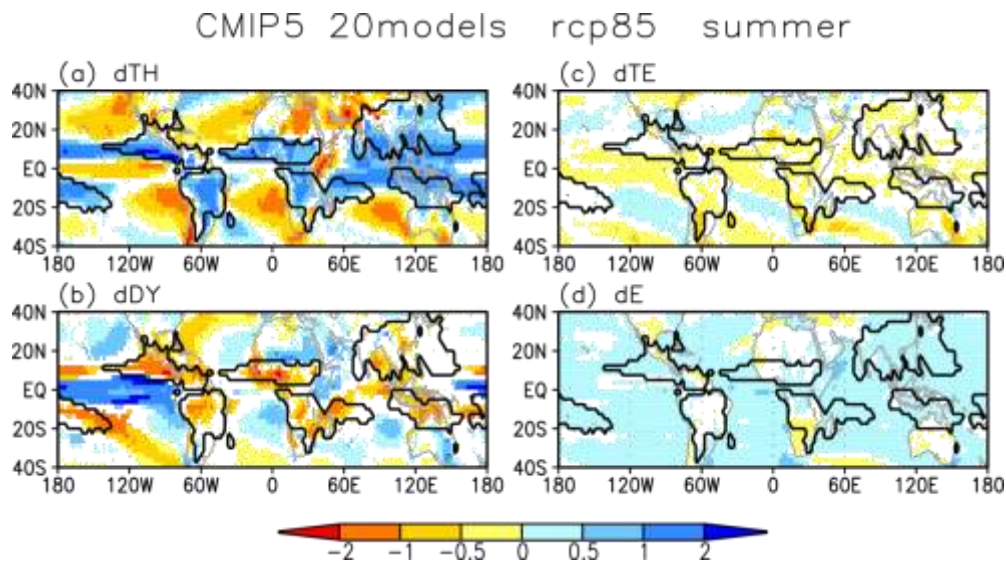
$$\delta TH = -\frac{1}{\rho_w g} \int_0^{\bar{p}_{s20}} \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_{20} [\delta \bar{q}]) dp \quad (2)$$

$$\delta DY = -\frac{1}{\rho_w g} \int_0^{\bar{p}_{s20}} \nabla \cdot ([\delta \bar{\mathbf{u}}] \bar{q}_{20}) dp \quad (3)$$

$$\delta TE = -\frac{1}{\rho_w g} \int_0^{\bar{p}_{s20}} \nabla \cdot \delta(\bar{\mathbf{u}} \bar{q}') dp \quad (4)$$

$$\delta(\cdot) = (\cdot)_{21} - (\cdot)_{20} \quad (5)$$

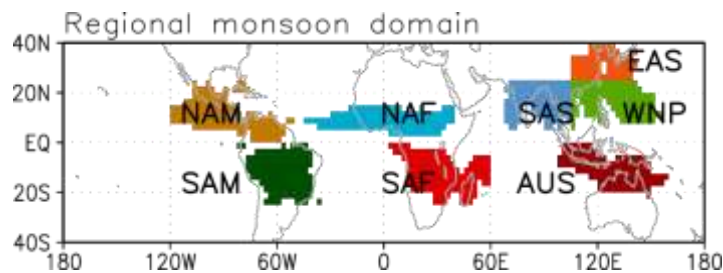
ここで、式(1)の δP は降水量変化、 δE は蒸発量変化、 δTH は水蒸気変化による項（熱力学的効果）、 δDY は平均風の変化による項（力学的効果）、 δTE は高周波擾乱の変化による項である。高周波擾乱は日平均値の月平均値からの差として定義した。添え字の 20 (21) は 20 (21) 世紀の略で、現在（将来）気候を意味する。



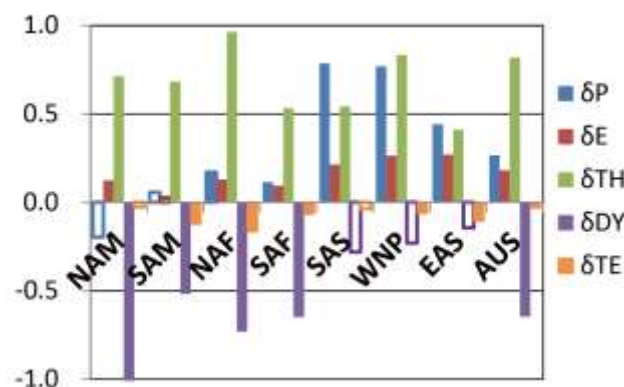
図(2)-2 水蒸気収支式の各項の変化 (mm day^{-1})。 (a) 熱力学的変化 (δTH)、 (b) 力学的変化 (δDY)、 (c) 高周波擾乱の変化 (δTE)、 (d) 蒸発の変化 (δE)。その他は図(2)-1と同じ。

図(2)-2に水蒸気収支式の各項の変化を示す。4つの項の中では、 δTH と δDY の項が支配的である。 δTH は、モンスーン地域など、現在気候の対流圏下層収束域では正の符号である。この項は「wet-get-wetter 効果」(Held and Soden, 2006¹⁾)に相当する。一方 δDY は、熱帯域では平均鉛直循環の弱化に伴い δTH の効果を打ち消す作用をしている。このため、モンスーン地域では負の符号である。SST 昇温が周辺海域より大きい太平洋赤道域などでは、下層収束が強化されているため、 δDY は正の符号である。これは「warmer-get-wetter 効果」(Xie et al. 2010⁹⁾)と呼ばれる。

次に、モンスーン地域を8つに区分し（図(2)-3）、地域ごとに水蒸気収支式の各項を評価した（図(2)-4）。 δTH は全地域で正の符号である。中緯度に位置する東アジアモンスーン（EAS）は他よりも変化がやや小さいものの、この項の地域差は小さい。 δDY は全地域で負の符号である。地域間の違いが大きく、北アメリカモンスーン地域（NAM）で最も大きく、アジアモンスーン地域（SAS, EAS, WNP）で小さい傾向が見られる。 δE は全域で正の符号で、アジアやオーストラリアのモンスーン地域（SAS, EAS, WNP, AUS）でやや大きな値を示す。 δTE の項はいずれの地域でも小さい。



図(2)-3 地域モンスーン領域の区分。観測（GPCP）の雨季と乾季の降水量差が 2.5 mm day^{-1} 以上の領域をモンスーン領域と定義した。



図(2)-4 地域モンスーン領域（図(2)-3）における水蒸気収支式の各項の変化。将来変化の符号が 2/3 以上のモデルで一致する場合に色塗り棒グラフで示す。

2) まとめと考察

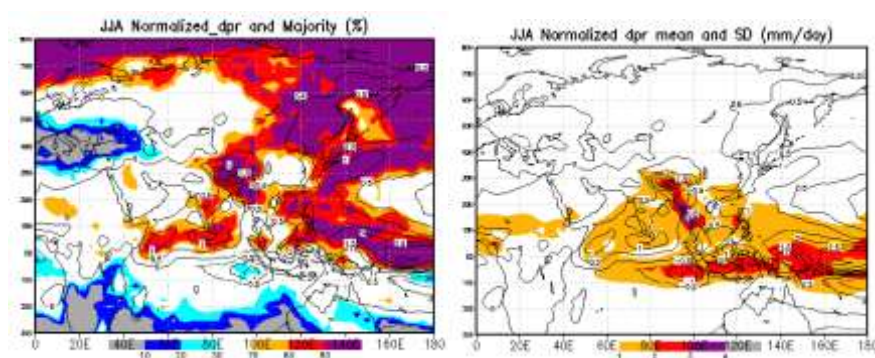
CMIP5 モデルアンサンブル解析によれば、温暖化に伴うモンスーン地域の降水変化は、一様ではなく地域間の違いが大きい。アジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱化（力学的効果）による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも大きな降水増加が予測されている。同様の傾向は、CMIP3 モデルアンサンブルによる予測でも見られる（図略）。

アジアモンスーン地域における降水増加が他地域よりも大きい理由について、Wang et al. (2014)¹⁰⁾は、①北半球は南半球よりも昇温が大きく、②ユーラシア大陸は周辺海域よりも昇温が大きいため、その結果、アジアモンスーン地域では下層収束が強化される、と考察している。そのほかに、チベット高原、ヒマラヤ山脈、ベンガル湾東岸の山脈群、などのローカルな地形効果がこれに寄与している可能性も考えられる。これらについて、数値モデル実験等を通して今後さらに詳しく調べる必要がある。

（２）海面水温や陸面温度と関連するアジア域気候の将来変化についての解析

解析したモデル実験は、CMIP5の現在気候（1975-1999年）実験とRCP8.5シナリオの21世紀末（2075-2099年）実験であり、6-8月25年平均値を解析した。Mizuta et al. (2014)¹¹が用いた28個のCMIP5モデルのうち、標高値データが整備されていた24個のCMIP5モデルの現在気候の地上気温を2.5度×2.5度上に内挿し、さらに同一の標高値に換算して解析を行った。

図(2)-5(左)は、24個のCMIP5モデルによる夏季降水量将来変化値およびその符号一致度(%)を示す。アジア・太平洋域では降水量の増加を示し、北極域、東シベリア、インド北東部、日本南海上、西部太平洋の赤道域とフィリピン東海上で、符号一致度が高い。一方、地中海や南半球亜熱帯域では、降水量減少でモデルは一致する。しかし、アフリカ大陸から中央アジア、東南アジア、中国中部、海洋大陸では、一致度が小さい。図(2)-5(右)は、24個のCMIP5モデルによる夏季降水量将来変化値およびその標準偏差を示す。東南アジア、そして海洋大陸東西のインド洋上から西部太平洋にかけての地域や、アフリカでは北緯10度付近で将来変化の標準偏差が大きい。



図(2)-5 (左) 24個のCMIP5モデルrcp8.5実験による夏季(JJA)降水量将来変化値(mm/日)。24個のCMIP5モデル全球地上気温平均値で規格化。符号一致度(%)を色で示す。(右)標準偏差(mm/day)を色で示すほかは、左図と同じ。

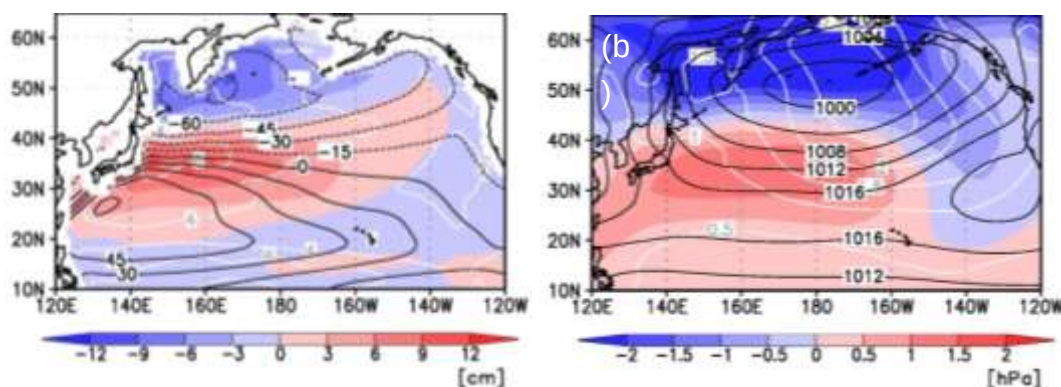
アジアモンスーンに係わる降水分布の将来変化と2つの境界条件（陸面温度と海面水温）の将来変化との関係を、24個のCMIP5モデル実験の解析から調査した。実際の指数としては、陸面地上気温と海洋上気温の差、海洋上の上層下層の気温差の2つの指数の将来変化を使う。各モデルの将来変化値は、マルチモデル平均の全球地上気温将来変化値で規格化している。

図(2)-6は、（東経30-165度、南緯15度-北緯60度）の海洋上の上層下層気温差の将来変化（規格化後モデル平均値5.8度、標準偏差0.90度）を指数として、地上気温および降水量将来変化との相関係数と回帰係数（指数の標準偏差に対応した値）を示す。海洋上の上層下層の気温差の将来変化が大きいモデルは、熱帯海上気温の将来変化が高く、特にインド洋西部や西部赤道太平洋で大きい。このようなモデルでは、西部赤道太平洋で降水量が増加、インド洋東部から海洋大陸で降水量が減少する傾向が強い。

一方、図(2)-7には、（東経30-165度、南緯15度-北緯60度）の陸上気温と海上気温の差の将来変化（規格化後モデル平均値2.2度、標準偏差0.39度）を指数として、地上気温および降水量将来変化との相関係数と回帰係数（指数の標準偏差に対応した値）を示す。陸上気温と海上気温の差の将来変化が大きいモデルは、北半球大陸北部の地上気温将来変化が大きいモデルであり、こ

は20cmに達する。このような水位変化の空間分布は、亜熱帯・亜寒帯循環系が強化し黒潮続流が強化（＋北上）するためである。これらの将来変化は、アリューシャン低気圧及び中緯度偏西風の強化・北上が原因である（図(2)-8b）。

黒潮続流の緯度を150-165Eにおける海面高度の南北勾配が最大となる緯度で定義し、強度は30Nと45Nでの海面水位の南北差で定義すると、黒潮続流が強化するモデルと北上するモデルがあることがわかる（図略）。これは、CMIP3の16モデルでも確認できる。黒潮続流の強度変化はアリューシャン低気圧の気圧変化が大きいほど大きく、黒潮続流の緯度変化は偏西風の緯度変化に比例する（図略）。北太平洋西部における海面水位の将来変化のモデル間の違いは、アリューシャン低気圧に関係した北太平洋上の海上風の将来変化のモデル間の違いによって生じている。



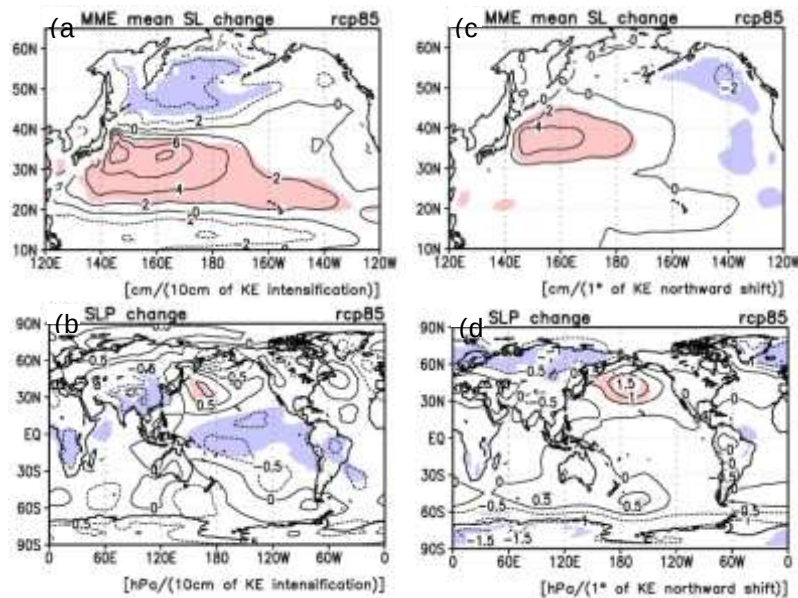
図(2)-8 25モデルで平均した (a) 領域海面水位変化と (b) 海面気圧の将来変化（カラー）。海面水位は北太平洋平均からの相対値を表す。黒線：20世紀気候値、白線：モデル間標準偏差。単位は(a) cm、及び(b) hPa。

図(2)-9は、CMIP5の25モデルにおける黒潮続流の強度及び緯度の変化に回帰させた海面水位と海面気圧である。黒潮続流の強度変化は、熱帯太平洋の気圧（海面水温）変化と関係する（図(2)-9a, b）。黒潮続流の緯度変化は、全球高緯度域の気圧変化と関係がある（図(2)-9c, d）。このことは、大気循環場の将来変化がモデルによって異なることによって、その海洋応答として現れる海面水位にモデル間で違いが生じることを示唆する。

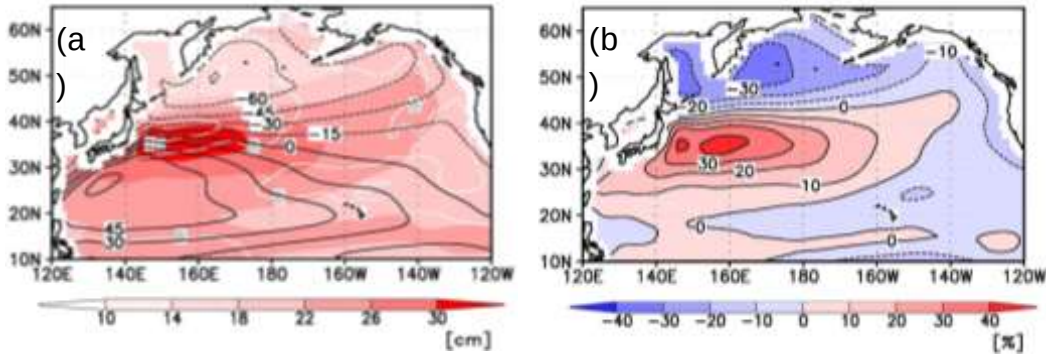
最後に、北太平洋西部の領域海面水位変化と、海面水位の将来変化の要因の一つである「海洋密度変化（主に海洋熱膨張）による全球平均海面水位変化」との比較を行った（15モデル）。図(2)-10aは、領域海面水位変化（図(2)-8a）に「海洋密度変化による全球平均海面水位変化」を加えたものである。北太平洋西部の領域海面水位変化は、海洋密度変化による全球平均海面水位上昇より最大30%高くなる（図(2)-10b）。一方、北緯40-60度の亜寒帯循環系では海洋密度変化による全球平均海面水位上昇より約30%低くなる（図(2)-10b）。このように、北太平洋西部の海面水位の将来変化を評価する上で、領域海面水位変化を無視することはできない。

本研究では、日本東方を含む北太平洋西部の領域海面水位上昇が全球平均海面水位上昇より大きくなることが示された。しかしながら、CMIP5で使用された大気海洋結合モデルでは、海洋モデルの空間解像度が粗く、黒潮続流の再現性が十分とは言えない。また、我が国が直面すると考えられる沿岸の海面水位を陽に表現することはできない。今後は、日本沿岸における海面水位上

昇を予測するために、高解像度海洋モデルによる予測や統計的ダウンスケーリング手法の開発などを進める必要がある。



図(2)-9 CMIP5の25モデルにおける黒潮続流の強度変化に回帰させた (a) 海面水位と (b)海面気圧、及び、黒潮続流の緯度変化に回帰させた (c) 海面水位と (d) 海面気圧、カラーは95%以上の有意水準を満たす領域を示す。 単位は、(a) cm/10cm、(b) hPa/10cm、(c) cm/1°、及び (d) hPa/1°。



図(2)-10 (a) 15モデルで平均した海面水位の将来変化[領域海面水位変化+海洋密度変化による全球平均海面水位変化] (カラー)。 単位はcm。 (b) [領域海面水位変化]/[海洋密度変化による全球平均海面水位変化]×100 (%)。

(4) CMIP5モデルの梅雨や降水強度の現在気候再現性の研究

表(2)-1の31個のCMIP5モデルを解析対象とした。この中には、生物化学的循環や炭素循環を組込んだ地球システムモデル Earth System Model (ESM)も含む。対象期間は20世紀再現実験(historical)の1981年から2000年までの20年間である。CMIP3モデルでは15個のモデルを解

析対象とした。対象期間は CMIP5 モデルと同じ期間である。モデルの検証に用いた降水量の観測データは、定量的な精度評価には GPCP 1dd データを用いた。期間が 1997 年以降に限られるが、極端降水現象には日降水量が必要なためである。降水量の観測値には不確実性があるので、GPCP 1dd 以外の様々な観測値を用いた。詳細は、Kusunoki and Arakawa (2015)¹³⁾を参照してほしい。

1) 月平均降水量の地理分布

CMIP5 モデルと CMIP3 モデルの精度を比べるため、各月の RMSE を MME と AVN について図示したものが図 (2)-11 である。上左側に印があれば、CMIP5 が CMIP3 より精度が良い。すべての月で、MME と AVN ともに CMIP5 が CMIP3 より精度が良い。A, B, C などの寒い季節は原点から近いところに印が位置しているところから、6～8 月の暖かい季節に比べ RMSE が小さく精度が良い。また、個々の月に注目すると MME (赤) の方が AVN (緑) より精度が良い傾向がある。

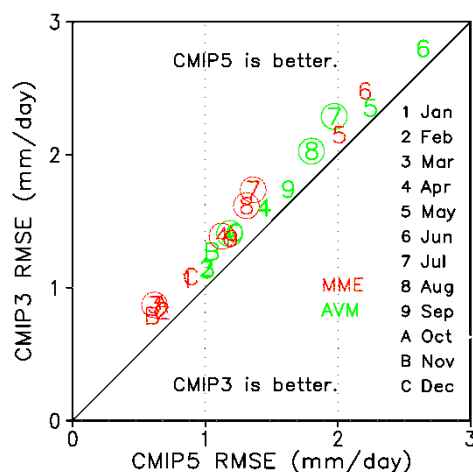


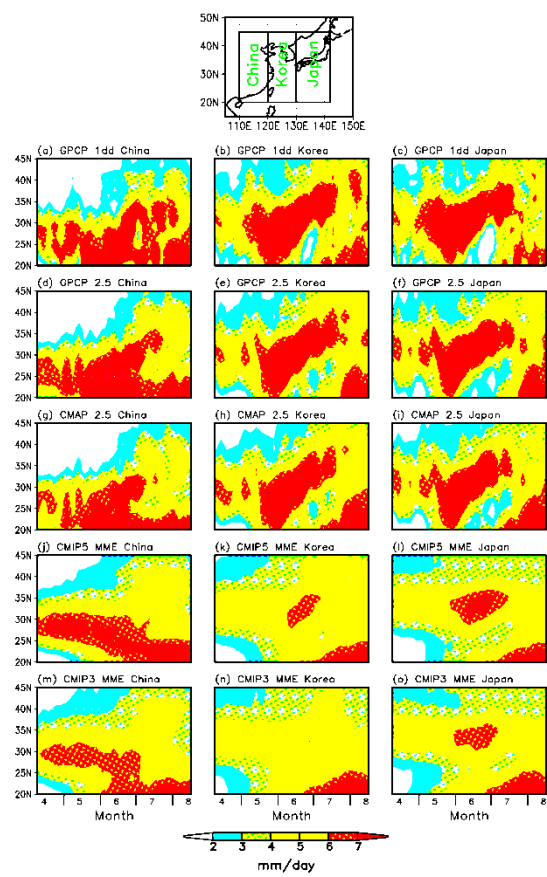
図 (2)-11 CMIP5モデルとCMIP3モデルの月平均降水量分布のRMSEの比較、数字とアルファベットのABCは月を示す。赤はMME、緑はAVN。○は、ブートストラップ法による検定で、RMSEの違いが90%有意水準を超えていることを示す。

2) 梅雨の季節進行

図 (2)-12 は梅雨の季節進行の観測値とモデルの MME とを中国、韓国、日本付近で比較したものである。図 (2)-12(a-i) の観測を見ると、どの地域も降雨帯の北上が顕著である。CMIP3 モデル(m-o)では降水量が少ないだけでなく、梅雨の北上がほとんど再現できていない。CMIP5 モデル(j-l)では CMIP3 モデルに比べ降水量が多くなっており、梅雨の北上傾向が若干再現されている。厳しく評価すると、CMIP5 モデルでも梅雨の季節進行が再現できていないとは言えない。

3) 極端な降水現象

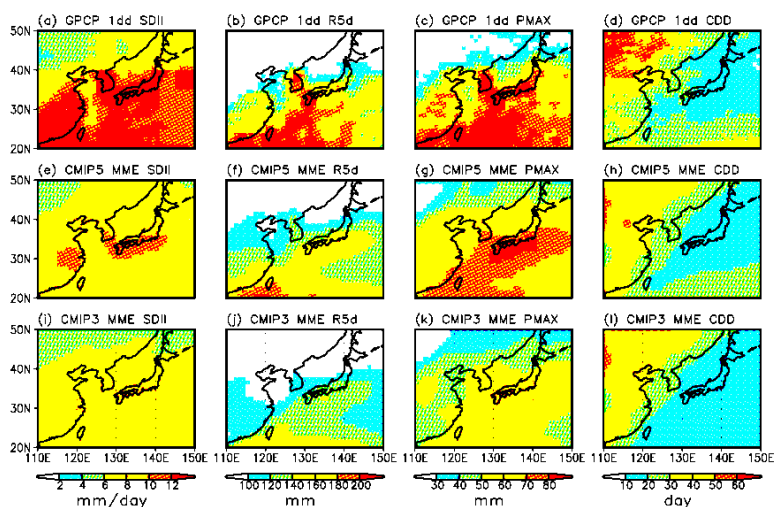
極端な降水現象の指標には様々な種類があるが、ここでは表 (2)-2 で定義した 4 つの指標 SDII, R5d, PMAX, CDD を用いた。これらは通年の統計値である。図 (2)-13 は極端な降水指標の観測値とモデルの MME とを比較したものである。SDII についてみると、CMIP3 モデル(i)は降水強度が足りない。CMIP5 モデル(e)では日本付近、朝鮮半島などで降水強度が増加して、CMIP3 モデルより観測値に近づいている。同様に R5d, PMAX でも CMIP5 モデルで改善がみられるが、観測に比べると強度が足りない。旱魃の指標である CDD については、CMIP3 モデル CMIP 5 モデルともに中国大陸北部で乾燥日数が足りない。モデルではこの地域で弱い雨が降りすぎていると思われる。



図(2)-12 半月平均降水量(mm/day)の時間-緯度断面、中国(110-120E, 20-45N)。韓国(120-130E, 20-45N)、日本(130-142E, 20-45N)。期間は第20半月(4月6-10日)から第46半月(8月14-18日)。(a)観測値GPCP 1ddによる中国。(b)(a)と同じだが韓国。(c)(a)と同じだが日本。(d-f)(a-c)と同じだが GPCP 2.5格子データ。(g-i)(a-c)と同じだが CMAP 2.5格子データ。(j-l)(a-c)と同じだが CMIP5 MME。(m-o)(a-c)

表(2)-2 極端降水現象の指標

略号	名称	定義	単位
SDII	単純日降水量強度指標	総降水量／雨日数、雨日：降水量1mm以上の日	mm day ⁻¹
R5d	最大5日降水量	年最大5日連続降水量	mm
PMAX	最大日降水量	年最大日降水量	mm
CDD	連続乾燥日	最大連続乾燥日、乾燥日：降水量1mm未満の日	day



図(2)-13 極端降水現象(表4)の分布。(a) SDII(mm/day)、観測値 GPCP 1dd。(b) (a)と同じだが R5d (mm)。(c) (a)と同じだが PMAX (mm)。(d) (a)と同じだが CDD (day)。(e-h) (a-d)と同じだが CMIP5 MME。(i-l) (a-d)と同じだが CMIP3 MME。

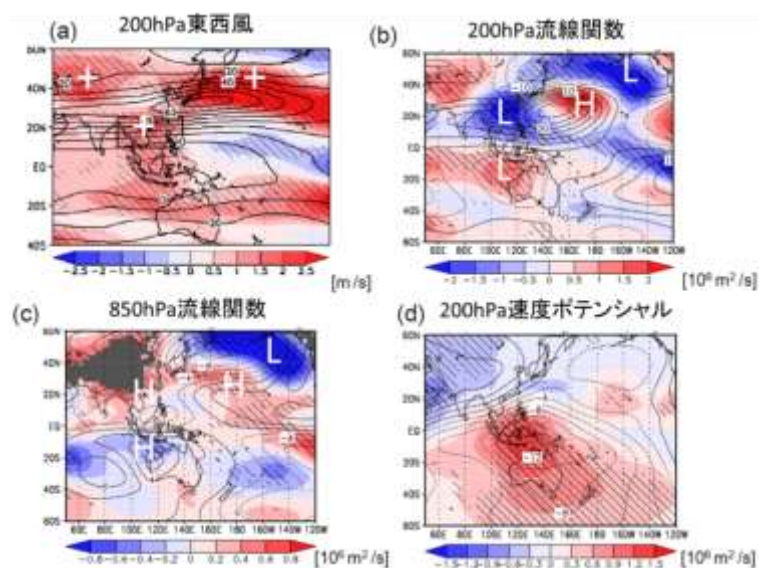
(5) 冬季(12~2月)東アジアにおける大気循環の将来変化についての研究

1) CMIP5マルチモデルによる循環場の将来変化

現在気候を20世紀末(1981~2100年)の平均、将来気候を21世紀末(2081~2100年; RCP4.5シナリオ)の平均とし、この将来気候と現在気候との差を将来変化として定義する。また、冬季は12~2月の平均として定義する。まず、CMIP5気候モデル群の中で、インド洋から西太平洋にかけての熱帯域における上層発散の再現性が良いと評価された27モデルを用いて、アジア域のジェット気流の将来変化を解析した。このとき、予測された変化がモデル間で共通して見られる傾向かどうかを確認すること(符号検定)で不確実性の評価を行った。

図(2)-14は、熱帯での循環場の再現性が良いCMIP5モデルのマルチモデル平均によって予測された、将来気候(RCP4.5シナリオ)における循環場の将来変化である。図(2)-14(d)に示される熱帯域の200hPa速度ポテンシャルでは、海洋大陸付近での上層発散の弱化が見られており、将来気候におけるウォーカー循環は弱まっていることがわかる。図(2)-14(a)に示される200hPa東西風速からは冬季の対流圏上層におけるジェット気流の将来変化を見ることができるが、ここからは、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多くのCMIP5気候モデルが示していることが把握できる。このジェット気流の変化は、図(2)-14(b)に示される上層の流線関数に見られる波列パターン(南シナ海付近で低気圧性、日本の南東海上で高気圧性、北太平洋では低気圧性)に対応している。図(2)-14(b)(c)から上層と下層の循環場の将来変化を見ると、まず、赤道付近の上層(下層)においては、上層発散が弱化する海洋大陸付近の北西及び南西の領域に、赤道を挟んでほぼ対称な低気圧性(高気圧性)の循環偏差が見られる。また、中緯度においては、上層下層ともに、日本の南東海上に高気圧性循環の変化、その北東のアリューシャン列島の南に低気圧性循環の変化という、低緯度から中緯度まで等価順圧な鉛直構造を持つ波列状のパターンが確認できる。

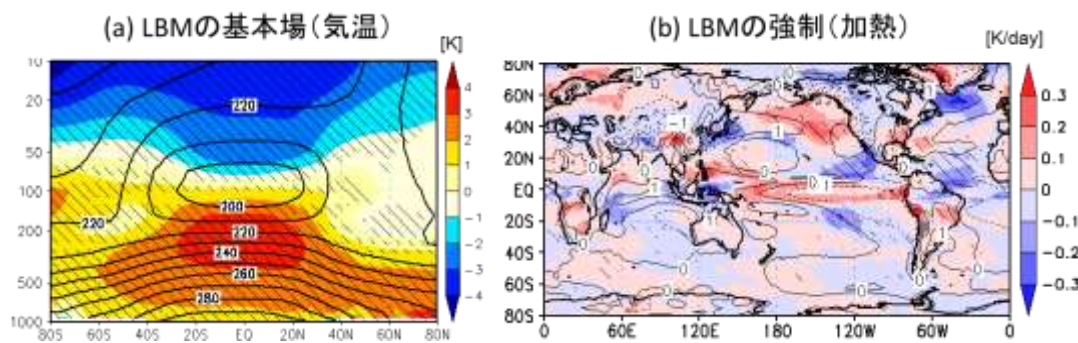
これら循環場の将来変化は、その波列パターンの構造から判断するに、海洋大陸付近での上層発散によって励起されている傾圧的な赤道ロスビー波と中高緯度に伝播する等価順圧な定常ロスビー波の将来変化を見ていると推察される。上層発散の変化と前述の循環場の変化の関連性を複数のCMIP5モデルから統計的に評価すると、水平発散の弱化量と波列パターンの振幅の変化量の間には線形的な比例関係が見られた (Harada et al. 2013)¹²⁾。つまり、CMIP5のマルチモデルデータ解析から、ウォーカー循環の弱화에応答して松野-ギル応答が弱まり亜熱帯ジェット的位置が変化することと、低緯度から高緯度へのロスビー波の伝播の変化によって日本付近の定在波が変化することが示唆された。



図(2)-14 CMIP5 モデルによる将来変化 (冬平均)。27 モデルのアンサンブル平均。等値線は現在気候、カラーは将来変化を表し、斜線は符号検定において変化が 95%信頼度で有意な領域である。(a)における+は、将来変化が正偏差の領域すなわちジェット気流が将来気候において蛇行してくる位置を示している。(b)(c)におけるH及びLは、将来変化が高気圧性及び低気圧性であることを示している。

2) LBMを用いた循環場の将来変化のメカニズム解析

次に、熱帯域の上層発散の弱化と東アジアの定在波変化の関係についてさらに調査するため、带状平均場の周りに線形化した傾圧モデル(LBM; Watanabe and Kimoto 2000¹⁴⁾)を用いた数値実験を行った。使用したLBMは、解像度T42L20のプリミティブモデルを基本場の周りに線形化したものである。基本場は、本調査で用いた27のCMIP5気候モデル平均による带状平均場を使用した。このLBMに、熱力学方程式の時間変化項と力学的な温度変化項の残差の平均として求められる加熱強制を、熱帯(南緯30度～北緯30度)のみに与えて定常解を求めた。これは、地球温暖化による循環場の変化を、加熱強制に対する線形定常応答問題の枠組みで理解しようとする試みである。LBMに与える基本場と加熱強制の将来変化は、海洋大陸付近における成層の安定化と、熱帯域における加熱の東偏をそれぞれ示している(図(2)-15)。

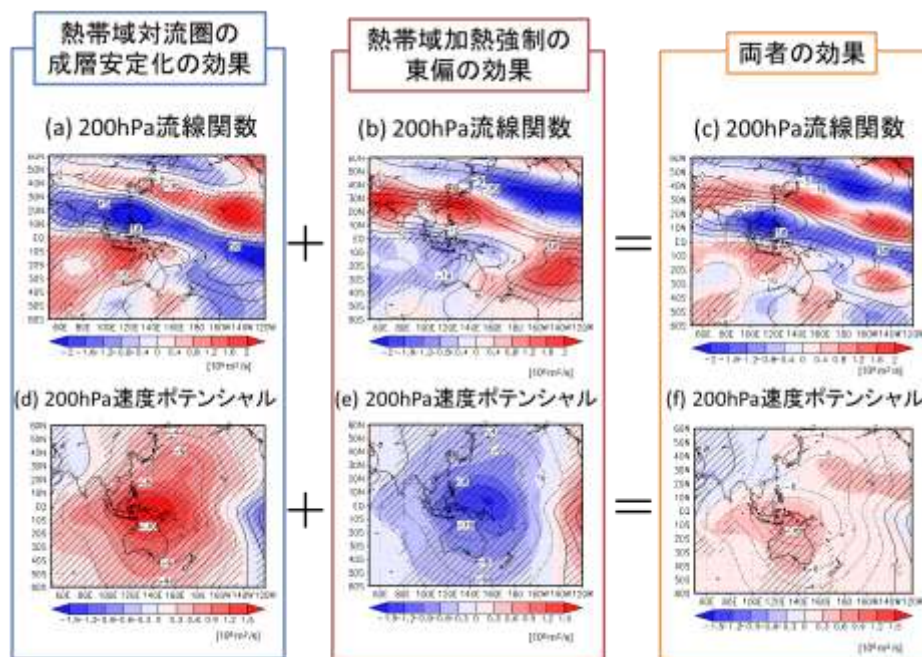


図(2)-15 CMIP5 モデルによる LBM の基本場と加熱強制の将来変化（冬平均）。 27モデルのアンサンブル平均。等値線は現在気候、カラーは将来変化を表し、斜線は符号検定において変化が 95%信頼度で有意な領域である。(a) 気温の将来変化。東西平均として示している。LBM には基本場として与える。(b) 加熱強制の将来変化。1000hPa から 100hPa までの鉛直平均を、東西平均からの偏差として示している。LBM には加熱強制として与える。

LBMを用いた数値実験の結果を図(2)-16に示す。LBMは線形モデルであるため、基本場及び加熱強制の変化に伴う応答の変化（図(2)-16(c)(f)）の要因を、基本場と加熱強制それぞれの変化に伴う応答の変化（基本場の変化；図(2)-16(a)(d)、加熱強制の変化；図(2)-16(b)(e)）として切り分けて評価することが可能となっている。実験結果を見ると、地球温暖化に伴う基本場の変化（熱帯域対流圏の成層安定化；図(2)-15(a)）が日本付近での大気循環の変化において支配的な要因である（図(2)-16(a)(d)）が、熱帯域における加熱強制の東偏（図(2)-15(b)）も一定の役割を果たしている（図(2)-16(b)(e)）ことがわかる。両者の効果を足し合わせると図(2)-16(c)(f)となり、変化量や位置にやや違いが見られるものの、海洋大陸上空での水平発散の弱化及びそれを起源とする波列パターン状の変化という、CMIP5による将来予測（図(2)-14(b)）において見られた特徴をある程度説明できていることがわかる。

なお、LBM実験における他の強制として、地形による強制と移動性擾乱による渦強制が存在するが、地形による強制の効果をLBM実験から算出して足し合わせると、線形定常応答のパターンは将来予測（図(2)-14(b)）により近づいたため、地形強制も定常波の変化に寄与していることが示唆された。

以上の解析から、地球温暖化に伴う熱帯循環の変化が冬季東アジアの定在波に与える影響としては、熱帯域対流圏の成層安定化が支配的に寄与しているものの、熱帯域における加熱強制の東偏や地形強制、移動性擾乱による渦強制の効果も一定の役割を果たしていることがわかった。



図(2)-16 成層安定化と加熱強制の変化による LBM 実験の将来変化（冬平均）。熱帯域対流圏の成層安定化の効果を表す実験（基本場は将来気候、強制は現在気候）、熱帯域加熱強制の東偏の効果を表す実験（基本場は現在気候、強制は将来気候）、両者の効果を表す実験（基本場と強制ともに将来気候）の応答をそれぞれ示している。等値線は現在気候、カラーは将来変化を表し、斜線は符号検定において変化が 90%信頼度で有意な領域である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) アジアモンスーン地域では、他地域よりもモンスーン循環の弱化（力学的効果）による降水量へのマイナス効果が小さく、蒸発量が多い。このため、他地域よりも水蒸気の増加の効果が現れやすく、大きな降水増加が予測されていることがわかった。

2) 東アジアにおける月平均降水量や極端降水量の再現性はCMIP5がCMIP3より精度が良く、また梅雨の北上傾向がより良く再現されている。世界の気候モデルによる東アジアの降水量再現性は確実に再現していることが判明した。

3) 日本の南東海上での高気圧性変化はアリューシャン低気圧の南側を弱める方向に寄与するため、地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が示唆される。温暖化による熱帯対流圏の成層安定化が東アジアにおける冬の循環の変化に及ぼす影響については、Hori and Ueda (2006)¹⁵⁾などの先行研究が存在するものの、数は少なく、これまで理解があまり進んでいなかった。そのため、本研究が果たした科学的意義は大きいと考えられる。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

気象庁は、本研究の成果を「異常気象レポート2014」（2015年3月発行）に引用した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

この研究で得られた地球温暖化に伴う気候の変化についての情報が、より具体的に国民や関係機関に伝えられることにより、日本社会の様々な分野での影響評価研究に基づく適応策の検討に貢献できる。具体的には、

- 1) 日本を含むアジア域では世界各地域に比べて地球温暖化による大きな降水増加が予測されるため、大雨に対する備えと水の有効利用が必要であること、
- 2) 地球温暖化に伴って日本付近の冬型気圧配置が弱化してユーラシア大陸を起源とする寒波が弱まるという将来像が理論的に明確になったこと、
- 3) 日本付近では大気循環の変化に伴う海面水位変化が大きく、世界平均海面水位の将来変化値による議論のみでは不十分であること、
- 4) 世界の気候モデルの降水量再現性は着実に向上しているが、日本を含むアジアではまだ不十分であり、陸面温度や海面水温の将来変化に伴う降水量変化の不確実性も確認できることから、今後も気候モデルの開発とこれを用いた温暖化予測研究が望まれること、である。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) M. HARADA, S. HIRAHARA, S. HAGIYA, H. MURAI, Y. OIKAWA and S. MAEDA: SOLA, 9, 94-97 (2013)
 “Intensification of the South Side of the Asian Jet Stream during the Northern Winter in CMIP5 models”
- 2) A. KITOH, H. ENDO, K. K. KUMAR, I. F. A. CAVALCANTI, P. GOSWAMI and T. ZHOU: J. Geophys. Res., 118, 3053-3065 (2013)
 “Monsoons in a changing world: a regional perspective in a global context”
- 3) H. ENDO and A. KITOH: Geophys. Res. Lett, 41, 1704-1710 (2014)
 “Thermodynamic and dynamic effects on regional monsoon rainfall changes in a warmer climate”
- 4) M. HARADA, S. WAKAMATSU, S. HIRAHARA, H. MURAI, Y. OIKAWA and S. MAEDA: SOLA, 10, 180-184 (2014)
 “Impacts of Slowed Tropical Circulation on Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific”
- 5) R. MIZUTA, O. ARAKAWA, T. OSE, S. KUSUNOKI, H. ENDO and A. KITOH: SOLA, 10, 167-171 (2014)

“Classification of CMIP5 future climate responses by the tropical sea surface temperature changes”

- 6) S. KUSUNOKI and O. ARAKAWA: J. Climate, 28 (2015)

“Are CMIP5 models better than CMIP3 models in simulating precipitation over East Asia?”
 “ (accepted)”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 前田修平, 中村尚:地球温暖化ーそのメカニズムと不確実性, 日本気象学会地球環境問題委員会編 朝倉書店, 86-87 (2014)
 「地球温暖化に伴う冬季天候の変化」
- 2) 前田修平, 中村尚:地球温暖化ーそのメカニズムと不確実性, 日本気象学会地球環境問題委員会編 朝倉書店, 87-89 (2014)
 「地球温暖化に伴う夏季の天候変化」
- 3) 安田珠幾・鈴木立郎・野崎太・三上正男:地球温暖化ーそのメカニズムと不確実性, 日本気象学会地球環境問題委員会編 朝倉書店, 118-130 (2014)
 「海面水位上昇」
- 4) A. KITOH and H. ENDO: The Global Monsoon: Research and Forecast 3rd Edition (2015)
 “Monsoon Precipitation in a Future Warmer World” (submitted)
- 5) H. ENDO and A. KITOH: The Monsoons and Climate Change: observations and modeling, L. M. V. CARVALHO and C. JONES (eds.) Springer (2015)
 “Projecting Changes of the Asian Summer Monsoon through the 21st Century” (submitted)

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) H. Endo, A. Kitoh, K. K. Kumar, I. F. A. Cavalcanti, P. Goswami and T. Zhou: AGU Fall meeting, San Francisco, USA, 2012
 “Monsoons in a changing world: a regional perspective in a global context”
- 2) S. Kusunoki and O. Arakawa: Bjerknes Center 10-year anniversary conference: Climate change in high latitudes, Bergen, Norway, 2012
 “Precipitation simulated by CMIP5 models”
- 3) T. Yasuda and M. Sueyoshi: 3rd International Conference on Earth System Modelling, Hamburg, Germany, 2012
 “The 20th century climatology and 21st century change in the North Pacific sea level pattern in CMIP3 and CMIP5 climate models”
- 4) M. Harada, S. Hirahara, H. Ohno, S. Hagiya, H. Murai, Y. Oikawa and S. Maeda: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2012
 “Future changes in seasonal development in East Asia: southward strengthening of the

jet stream in summer in CMIP3 and CMIP5 models”

- 5) 遠藤洋和、鬼頭昭雄、荒川理：日本気象学会 2012 年度秋季大会（2012）
「CMIP5マルチ気候モデルによるモンスーン降水の再現性と将来変化」
- 6) 尾瀬智昭、荒川 理：日本気象学会2012年度秋季大会（2012）
「CMIP5モデルによる21世紀末降水量変化と海面水温変化」
- 7) 楠 昌司、荒川 理：日本気象学会 2012 年度秋季大会（2012）
「CMIP5モデルによる梅雨の再現性」
- 8) 安田珠幾：日本気象学会 2012 年度秋季大会（2012）
「西部熱帯太平洋における1990年代以降の海面水位上昇」
- 9) 安田珠幾：第 10 回環境研究シンポジウム（2012）
「地球温暖化に伴う北太平洋西部における海面水位変化」
- 10) 原田昌、平原翔二、大野浩史、萩谷聡、村井博一、及川義教、前田修平：研究集会「週間及び1か月予報における顕著現象の予測可能性」（2012）
「CMIP5マルチ気候モデルを用いた日本付近の季節進行の将来変化予測」
- 11) H. Endo, A. Kitoh, K. K. Kumar, I. F. A. Cavalcanti, P. Goswami and T. Zhou : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparison for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Changes in global and regional monsoon rainfall projected by CMIP5 models”
- 12) S. Kusunoki and O. Arakawa: Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Reproducibility of Precipitation over East Asia by CMIP5 models CMIP5, International Workshop on CMIP5 Model”
- 13) S. Kusunoki and O. Arakawa: Sixth China-Korea-Japan Joint Conference on Meteorology, Nanjin, China, 2013
“Reproducibility of precipitation over East Asia by CMIP5 model”
- 14) M. Harada, S. Hirahara, S. Yasui, H. Murai, Y. Oikawa, and S. Maeda : Fifth International Workshop on Monsoons (IWM-V), Macao, China, 2013
“Projected changes in winter stationary eddies over Asia in CMIP5 models”
- 15) Y. Oikawa, H. Murai, S. Hagiya, And M. Harada: International Conference on Regional Climate (CORDEX 2013), Po-P2-54 (poster), Brussels, 2013
“Projected changes in extreme weather events for the Japanese Archipelago under IPCC A1B scenario”
- 16) M. Harada, S. Hirahara, S. Yasui, H. Murai, Y. Oikawa, and S. Maeda: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2013
“Projected changes in winter stationary eddies over Asia in CMIP5 models”
- 17) M. Harada, S. Hirahara, S. Hagiya, H. Murai, Y. Oikawa and S. Maeda : International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Projected changes in winter stationary eddies over Asia in CMIP5 models”

- 18) 安田珠幾：三重県気候変動適応セミナー（2013）
「気候変動の現状と予測－海洋における変化」
- 19) 安田珠幾：2013 年度日本海洋学会春季大会（2013）
「日本沿岸水位の過去及び将来における変動と変化」
- 20) 尾瀬智昭：日本気象学会2013年度春季大会（2013）
「21世紀末熱帯海面水温・降水量変化と中高緯度の海面気圧変化」
- 21) 楠 昌司、荒川理：日本気象学会2013年度春季大会（2013）
「CMIP5モデルによる梅雨の再現性」
- 22) 遠藤洋和、鬼頭昭雄：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「温暖化気候下における地域モンスーン降水の変化 ～熱力学的効果と力学的効果～」
- 23) 遠藤洋和、吉田康平、鬼頭昭雄、荒川理：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
「高解像度MRI-AGCMによるモンスーン降水の再現性」
- 24) 安田珠幾： 2013 年度日本海洋学会秋季大会（2013）
「北太平洋海面水位の将来変化予測」
- 25) 安田珠幾、石井正好、足立恭将、行本誠史：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「MRI-CGCM3 十年規模予測実験における北太平洋西部海面水位変化」
- 26) 安田珠幾：研究会「長期予報と大気大循環」（2013）
「日本沿岸水位の十年規模変動と長期変化傾向」
- 27) 原田昌、前田修平、平原翔二、村井博一、及川義教、安井壯一郎：研究集会「異常気象と気候システム変動のメカニズムと予測可能性」（2013）
「地球温暖化による海洋大陸での上昇流弱化的の日本付近の循環場への影響（冬）」
- 28) 前田修平：研究集会「急発達する低気圧の実態・予測・災害軽減に関する研究集会」（2014）
「2014/15エルニーニョか？」
- 29) 原田昌、平原翔二、萩谷聡、村井博一、及川義教、前田修平：日本気象学会2013年度春季大会（2013）
「CMIP5モデルにおける冬季アジアジェットの将来変化」
- 30) 原田昌、平原翔二、安井壯一郎、村井博一、及川義教、前田修平：日本気象学会2013年度秋季大会（2013）
「冬季東アジア域における定常波の将来変化～CMIP5モデルによる解析～」
- 31) S. Kusunoki and O. Arakawa: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, 13 January 2014, Tokyo, Japan.
“Reproducibility of precipitation over East Asia by CMIP5 models”
- 32) T. Ose : The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, 13 January 2014
“Tropical sea surface temperature change patterns and East Asian climate under global warming”
- 33) S. Kusunoki and O. Arakawa: 7th International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle, 16 July 2014

“Reproducibility of precipitation over East Asia by CMIP5 models”

- 34) T. Yasuda, M. Adachi, M. Ishii And S. Yukimoto: 2014 Ocean Sciences Meeting, Honolulu, U.S.A., 24-28 February, 2014

“Decadal prediction of sea level in the western midlatitude North Pacific”

- 35) T. Yasuda, M. Adachi, M. Ishii And S. Yukimoto: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), Sapporo, Japan, 2014

“Decadal prediction of sea level in the western midlatitude North Pacific”

- 36) M. Harada, S. Hirahara, H. Murai, S. Yasui, Y. Oikawa and S. Maeda : The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014

“Future Changes in Winter Stationary Wave in East Asia and the North Pacific”

- 37) S. Wakamatsu, M. Harada, S. Hirahara, H. Murai, Y. Oikawa and S. Maeda: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2014

“Future Changes in Winter Stationary Wave in East Asia and the North Pacific”

- 38) 若松俊哉、原田昌、平原翔二、村井博一、石原幸司、及川義教、前田修平：日本気象学会2014年度秋季大会（2014）

「熱帯循環の変化が冬季東アジアの定在波に与える影響～線形傾圧モデルによるメカニズム解析～」

- 39) T. Ose: Asian monsoon Hydroclimate Review of MAHASRI and Beyond, Nagoya, 2015

“Present-day’ s Surface Air Temperature and Precipitation and their Future Changes in Asia Monsoon System in CMIP model”

- 40) 仲江川敏之：日本気象学会 2015 年度春季大会（2015）（予定）

「CMIP5 実験における土壌水分の将来変化原因の統計推定（I）」

- 41) 尾瀬智昭：日本気象学会2015年度春季大会（2015）（予定）

「CMIP5モデルの陸上気温・降水の再現バイアスと将来予測」

- 42) 楠 昌司：日本気象学会2015年度春季大会（2015）（予定）

「温暖化で雨の降り方が変わるのは何年ころか？」

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

特に記載すべき事項はない。

（５）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) M. Held And B. J. Soden: J. Climate., 19, 5686-5699 (2006)
- 2) P.-C. Hsu, T. Li, J.-J. Luo, H. Murakami, A. Kitoh and M. ZHAO: Geophys. Res. Lett., 39, L06701 (2012)
- 3) A. Kitoh, H. Endo, K. Krishna Kumar, I. F. A. Cavalcanti, P. Goswami And T. Zhou: J. Geophys. Res. Atmos., 118, 3053-3065 (2013)
- 4) K.R. Sperber, H. Annamalai, I.-S. Kang, A. Kitoh, A. Moise, A. G. Turner, B. Wang and T. Zhou: Climate Dyn., 41, 2711-2744 (2012)
- 5) T. Ogata, H. Ueda, T. Inoue, M. Hayasaki, A. Yoshida, S. Watanabe, M. Kira, M. Ooshiro and A. Kumai: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 207-225 (2014)
- 6) S. Kusunoki and O. Arakawa: Climate Dyn., 38, 2055-2072 (2012)
- 7) S. Hirahara, H. Ohno, Y. Oikawa And S. Maeda: J. Meteor. Soc. Japan, 90, 663-671 (2012)
- 8) H. Endo And A. Kitoh: Geophys. Res. Lett., 41, 1704-1710, (2014)
- 9) S.-P. XIE, C. DESER, G. A. VECCHI, J. MA, H. TENG and A. T. WITTENBERG: J. Climate., 23, 966-986 (2010)
- 10) B. Wang, S.-Y. Yim, J.-Y. Lee, J. Liu and K.-J. Ha: Clim. Dyn., 42, 83-100 (2014)
- 11) R. Mizuta, O. Arakawa, T. Ose, S. Kusunoki, H. Endo and A. Kitoh: SOLA, 10, 167-171 (2014)
- 12) M. Harada, S. Hirahara, S. Hagiya, H. Murai, Y. Oikawa and S. Maeda: SOLA, 9, 94-97 (2013).
- 13) S. Kusunoki and O. Arakawa: J. Climate, (accepted) (2015)
- 14) M. Watanabe and M. Kimoto: Quart. J. R. Met. Soc., 126, 3343-3369 (2000)
- 15) E. H. Hori and H. Ueda: Geophys. Res. Lett., 33, L03713 (2006).

（３）ダウンスケーリング研究のためのCMIP 5 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

植田宏昭

〈研究協力者〉

筑波大学 生命環境系

早崎将光（平成25～26年度）

平成24～26年度累計予算額：25,144千円（うち、平成26年度予算額：8,700千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

第3期および第5期結合モデル国際比較プロジェクト（phase 3 and 5 of the Coupled Model Intercomparison Project; CMIP3, CMIP5）の実験結果を用いて、アジア域における現在気候再現性の評価をおこなった。夏季・冬季の季節平均場は、広域アジアモンスーン地域全体で見ると限りでは、CMIP5の方がCMIP3よりも現在気候再現性が向上していた。しかし、降水量の再現性は大気循環場の再現性と比べて低く、各季節の多雨地域において夏季では過小評価、冬季には過大評価をしていた。また、冬季の日本付近に限定すると、現在気候で再現性が良好であった循環場であっても、将来変化傾向がモデル間で大きく分散していた。

さらに、寒候期の寒気吹き出し強度の指標として、気温低下強度（Daily Cooling Intensity; DCI）についても現在気候再現性と将来変化傾向を評価した。季節平均場と同様、CMIP5の方が現在気候再現性は向上していたものの、観測値よりもDCIを過大評価していた。これは、最新の全球モデルであっても既知の問題として指摘されている、高緯度地域における低温バイアスに起因すると考えられる。DCIの将来変化傾向は、高緯度で正偏差（気温低下幅の縮小）、中緯度で負偏差（気温低下幅の拡大）がみられた。気温低下幅の拡大は、初春期の東アジアで特に大きく、多くのモデルが同様の変化傾向を示した。初春期は砂塵嵐の多発時期・農耕の開始時期に当たるため、温暖化時の気温低下幅の拡大は、砂塵嵐の多発や農作物の寒冷障害など、社会的インパクトの大きな影響を及ぼす可能性がある。

〔キーワード〕

アジアモンスーン、寒気吹き出し、低温バイアス

1. はじめに

日本を含むアジア域は、卓越風向や降水量が大きく季節変化する、いわゆるモンスーン気候に属している。ただし、一括りにモンスーン気候といっても、降水や風向などの短周期変動（ここでは数日程度の周期変動を指す）やその季節変化は、地域により大きく異なる。例えば暖候期のインドモンスーン地域の場合、インド洋からのモンスーン西風が卓越し、モンスーン期で年間降水の大部分がもたらされる。日本などの東アジアでは、モンスーン西風の下流部にあたる地域でメイユ・梅雨などの前線帯が形成され、その前線帯近傍でまとまった降水となる。さらに、季節

変化の視点では、熱帯西太平洋の季節変化に伴う海面水温上昇は、海洋大陸域での対流活発域の時空間不連続変化（対流ジャンプ）を生じ、さらにその遠隔応答として東アジアにおける梅雨前線の北上（梅雨明け）をもたらす（Ueda et al. 1995¹⁾）。

寒候期になると、インドモンスーン域では内陸部起源の北東風が卓越し、顕著な乾燥状態となる。東アジア、特に中緯度域では、ユーラシア大陸高緯度を起源とする寒気の吹き出しが卓越する。寒気の吹き出しに伴う強い北西季節風は、日本列島という地域規模では日本海側の悪天候・多降水（多降雪）と太平洋側での晴天・乾燥という顕著な空間コントラストをもたらす。また、黒潮・黒潮続流域などの海洋前線帯近傍では、地表面から下部対流圏において顕著な水平温度差（傾圧帯）を形成し、上層のジェット気流に沿って移動する上層渦と相互作用することで、低気圧の急発達をもたらされる。

近年の大気海洋結合モデル（ないし地球システムモデル）の改良・発展により、地域・季節ごとに特徴的なアジア気候の再現性が大きく向上したとされている（例えば Kitoh and Uchiyama, 2006²⁾）。しかしながら、それら地域的なモデル性能・将来変化の評価は、個々の気候モデル開発グループにより実施されることが多いため、比較に用いる指標（メトリック）が異なる。したがって、世界に多数存在する気候モデルの性能評価は、できる限り均質な条件で計算されたものを、同一の計算手順で作成した共通指標で比較するのが望ましい。

全球気候モデルの継続的な改良発展と世界的な比較プロジェクト（CMIP3、CMIP5）の実施により、温暖化に伴う全球的な将来変化についての理解は大きく進歩した。一方で、温暖化に対する緩和策・適応策などの政治的・社会的観点からは、生活に密接に関連する地域スケール気候の将来変化に関する情報が必要とされている。地域スケール気候の将来変化を評価する方法の一つが、領域気候モデルを利用した力学的・統計的ダウンスケーリングである。このうち、力学的ダウンスケーリングで将来変化を見積もるには、全球気候モデルで得た将来気候場を領域気候モデルの境界条件として与える。できる限り信頼性の高い領域スケール気候の将来変化を評価するためには、この境界条件が高い信頼性をもつ必要がある。

2. 研究開発目的

本サブグループの研究目的は、領域モデルに利用すべき全球気候モデルの性能評価を試みることである。具体的には、夏季・冬季モンスーン気候において鍵となる気象要素について、現在気候再現性と将来変化のモデル間のばらつきを評価した。第一段階としては夏季・冬季の季節平均場の再現性などを検討した。第二段階では、将来の昇温傾向が顕著な寒候期に特に着目し、寒候期の東アジアで卓越する寒気の吹き出しの活動動態の性能評価をおこなった。

3. 研究開発方法

CMIP3およびCMIP5（両者とも24モデル）の現在気候実験の20世紀末（1981-2000年）の月平均値を用いて、夏季・冬季アジアモンスーンの現在気候再現性を調査した。気候再現性の評価指標には、空間変動パターン類似性の指標となる Taylor ダイアグラムを用いた（Taylor, 2001³⁾）。評価対象としたのは、アジアモンスーン活動の指標として使われる基本的な気象要素（海面気圧、下層風、降水など）である。

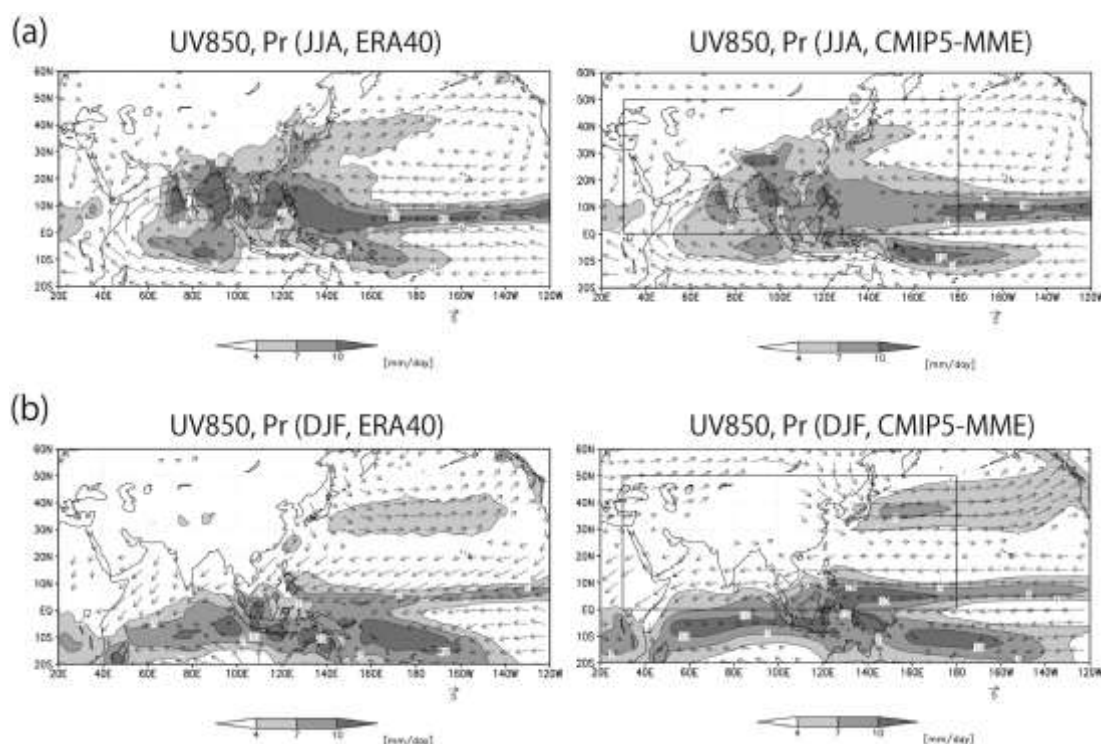
また、日別値が利用可能なCMIP3およびCMIP5 モデル（それぞれ9, 21モデル）について、日平

均地上気温の前日からの気温差を用いて日スケール気温変動を評価した。これら日別気温差を20世紀末の20年間で月別に集計（月別のサンプル数：約600個）し、期間ごとの統計値（2, 5, 10パーセンタイル値）を気温低下強度（daily cooling intensity, 以後DCIと表記）と定義した。DCIの水平分布やその季節変化に着目して、現在気候再現性を調査した。さらに、DCIの将来変化（将来気候実験（2081-2100年。使用シナリオは、CMIP3: SRES-A1B, CMIP5: RCP4.5およびRCP8.5）と現在気候実験との差）を各モデルで評価し、それらの水平分布・季節性やモデル間のばらつきについて検討した。

4. 結果及び考察

（1）夏季・冬季平均気候場の再現性

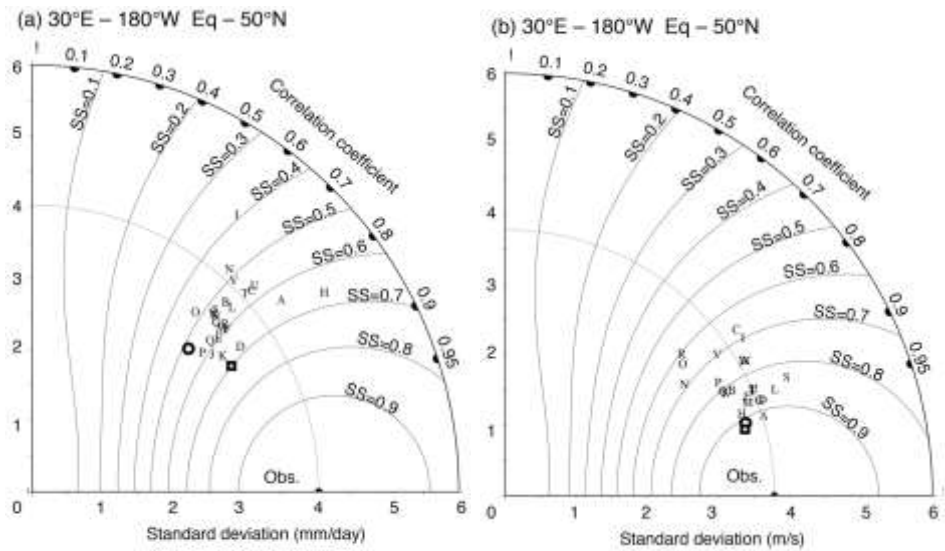
夏季（6-8月）および冬季（12-2月）のアジアモンスーンに関連する気象要素について、季節平均場の現在気候再現性を調査した。季節平均降水および対流圏下層（850 hPa面；高度約1500 mに相当）の地理的分布は、観測値として参照した衛星観測に基づく降水（CMAP）や長期再解析データ（ERA40）による風系とよく対応していた（図(3)-1）。



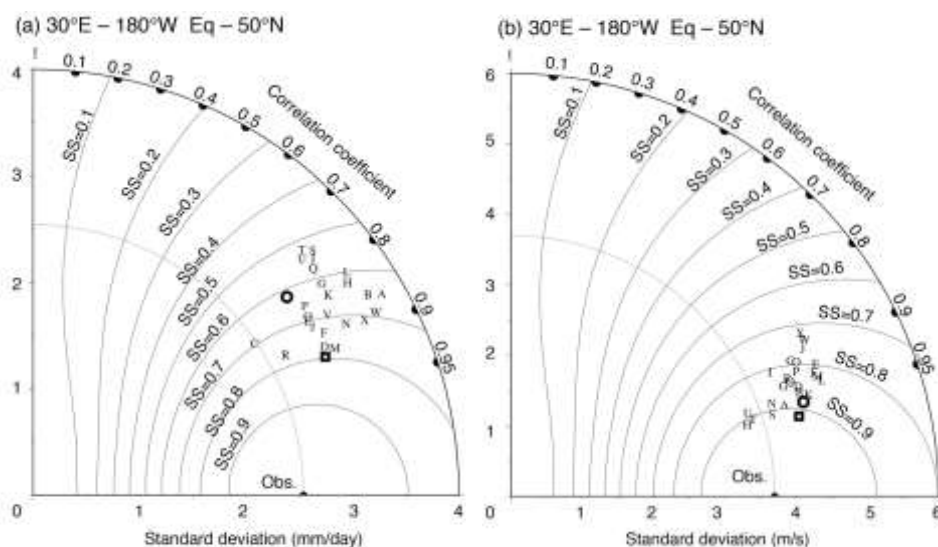
図(3)-1 夏季・冬季の季節平均降水（陰影）および対流圏下層（850-hPa面）水平風（ベクトル）。左：参照値（CMAP および ERA40）、右：CMIP5全モデル平均。上段が夏季（6-8月）平均、下段が冬季（12-2月）平均。右列の図中枠は、図(3)-2、(3)-3で使用した広域アジアモンスーン地域。

ただし、全モデル平均で見た場合、夏季では南アジア・東南アジアから西太平洋にかけての多雨地域において観測値よりも降水量が過小であった。南アジアモンスーン域や西太平洋を含む広域アジアモンスーン地域（赤道～50° N、30° E～180°）を対象としたTaylorのスキルスコア（図(3)-2

中のSSの等値線の値）をみると、CMIP5（例えば降水のSS=0.70）の方がCMIP3（同じく SS=0.52）よりも改善傾向が見られるものの、降水量の年々変動パターン（CMIP5: SS=0.70。図(3)-2a）は対流圏下層風のそれ（CMIP3, CMIP5 とともに SSは 0.9 以上。図(3)-2b）に比べて再現性が低い。年々変動の空間コントラストの大きさ（Taylorダイアグラムの原点から見て動径方向の大きさ）についても、過大となるモデルも一部にある（I: CNRM-CM5、H: CMCC-CM）ものの、過小評価するモデルも多い。このため、全球結合モデルでは特に多雨地域での降水の再現性向上を目指して今後も継続的な改良発展する必要がある。



図(3)-2 CMIP5モデルの広域アジアモンスーン地域（赤道～50° N、30° E～180°）の夏季（6-8月）平均気象要素に関する Taylorダイアグラム。(a) 降水量、(b) 対流圏下層（850-hPa面）水平風。図中アルファベットがCMIP5モデル識別子、丸印がCMIP3平均、四角印がCMIP5平均。横軸上の黒半円（Obs）に近いほど、観測値との類似性が高いことを現す。



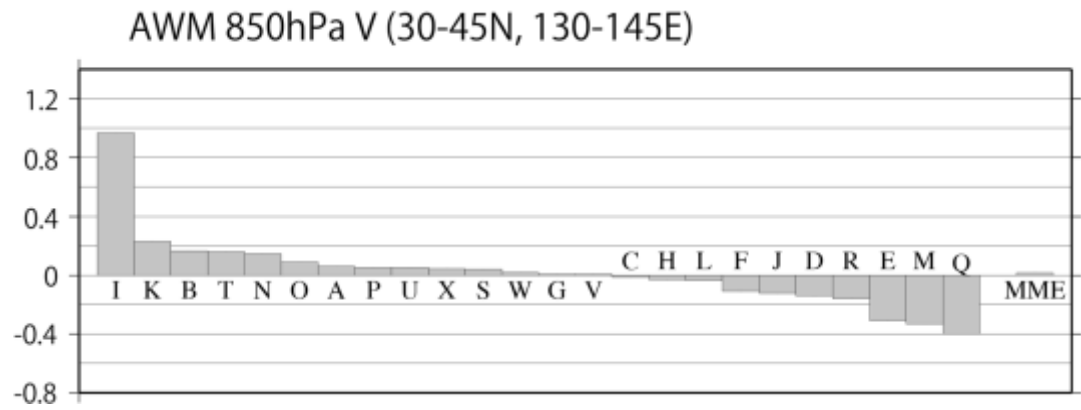
図(3)-3 図(3)-2と同様。ただし冬季平均(a)降水量および(b)対流圏下層水平風のTaylorダイアグラム。

一方、冬季モンスーンについても同様の解析をおこなったところ、夏季と同様にCMIP5の方がCMIP3に比べ再現性が向上した。冬季には熱帯域の多降水地域が南半球にシフトするため、夏季よりもSSが高くなりやすいと考えられる。しかし、降水の年々変動の大きさは、夏季とは逆に観測よりも過大である（図(3)-3）。平均値の過大傾向を反映して、年々変動の大きさも観測に比べ過大である（図(3)-3a）。水平風については、夏季よりも空間変動が過大気味であるものの、降水量に比べれば良好な再現性を示す（CMIP5平均の水平風のSSは0.9以上）。広域アジアモンスーン地域に関する全般的傾向として、CMIP5は降水・水平風ともにCMIP3よりも年々変動の空間パターン再現性は良好となっている（SSが高くなる）ものの、両者ともに観測よりも大きな振幅が出やすい傾向にある。これら季節平均気象要素の年々変動の過大評価の要因は未だ明らかとなっておらず、今後さらなる検討が必要である。

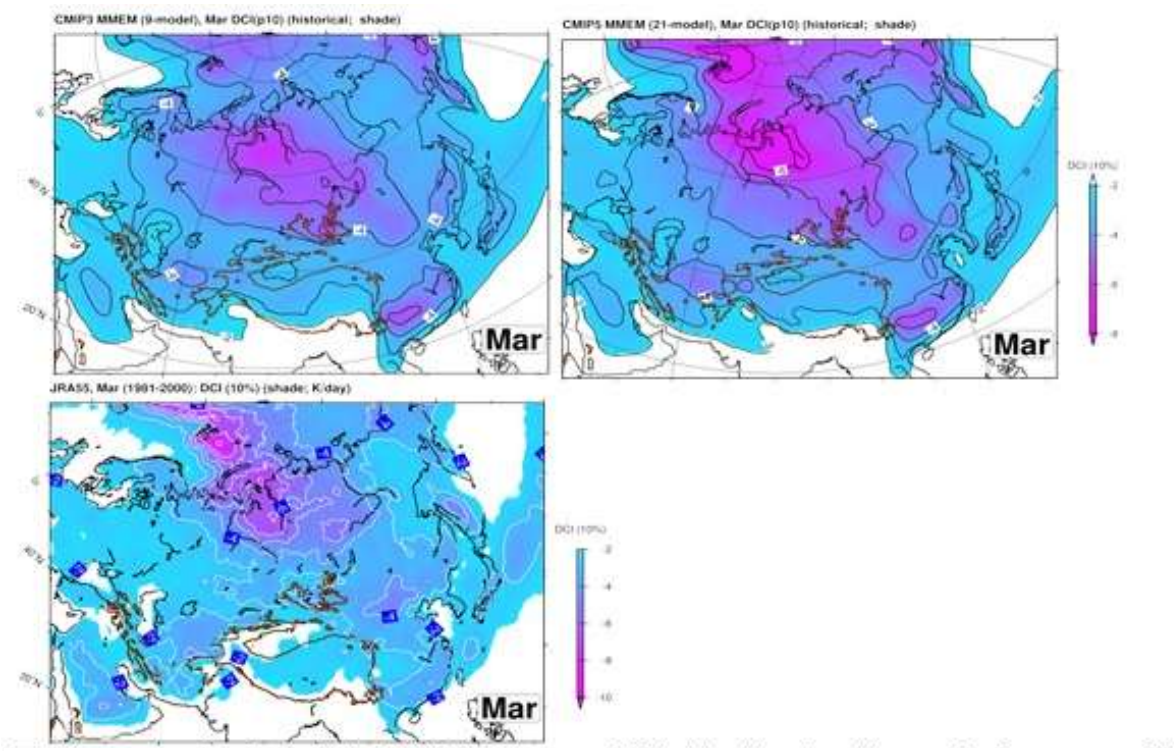
季節平均場に関して、CMIP5ではCMIP3に比べ現在気候の再現性は向上しているが、このことは将来変化傾向の信頼性が増していることと必ずしも直結しない。ここで、空間規模を限定し日本周辺域（30°～45°N、130°E～145°E）での温暖化に伴う将来変化を検討する。図(3)-4は、日本付近の寒候期の寒暖を大きく左右する対流圏下層の南北風の将来変化について、モデル別に評価した例を示す。全モデル平均では、領域平均南北風の将来変化はほぼゼロであるが、比較したCMIP5の24個のモデル間で一貫した傾向が見られるわけではない。正偏差（南風の強化）・負偏差（北風の強化）となるモデル数がほぼ拮抗している。

1節でも述べたように、日本の天候（降水、気温など）の将来変化を検討するには、領域気候モデルによる力学的ダウンスケーリングが有効な研究手段となる。しかし、最新のCMIP5であっても、日本付近における冬季の大気循環場は、将来変化の符号すら判定が困難なほどモデル間でのばらつきが大きい事が明らかとなった。したがって、冬季の日本付近を対象としたダウンスケーリング実験においては、使用する全球モデルの選択如何により結果が大きく異なる可能性が高く、使

用モデルの選択には細心の注意を払う必要がある。



図(3)-4 日本周辺地域における領域平均南北風の将来変化。図中アルファベットはCMIP5モデルの識別子。最も右側の値は全モデル平均（MME）。



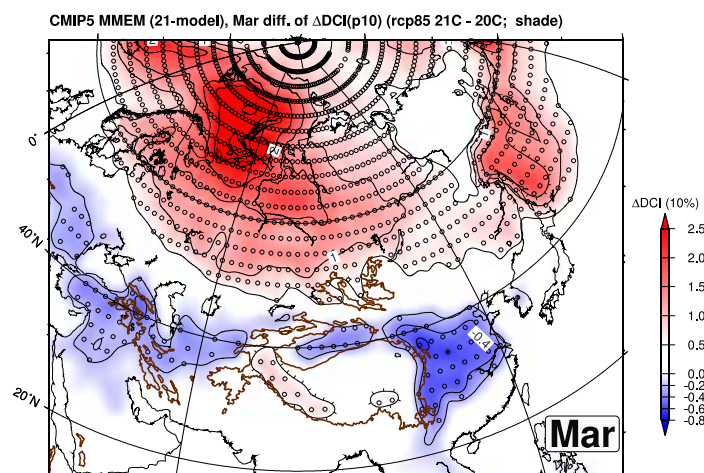
図(3)-5 3月における気温急低下指標(DCI, 日平均気温の前日との差の10パーセントイル値)。上段左：CMIP3(9モデル平均)、上段右：CMIP5(21モデル平均)、下段：参照値(JRA55)

(2) 寒候期の日スケール気温変動

前節では、季節平均の気候場でみれば、CMIP5の方がCMIP3よりも良好な再現性を示した。しかし、季節平均場の再現性だけを基準としてダウンスケーリング研究で使用可能な全球モデルを選択するのは危険である。冬季東アジアモンスーンは、ユーラシア大陸高緯度のシベリア高気圧と

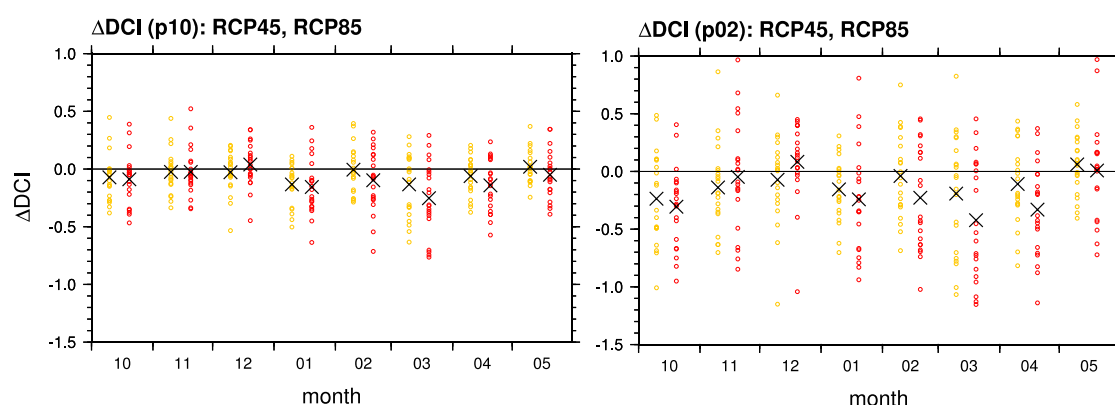
北太平洋のアリューシャン低気圧という2つの作用中心の存在で特徴付けられる。それらの水平気圧傾度により、季節平均で見れば北西季節風が卓越する。しかしながら、周知の通りこのような大気循環場は定常的に存在するものではなく、数日から1週間程度のサイクルで北西風の強弱が生じる。特に、日本付近では、強い寒気の吹き出しに伴う気温の急低下・北西風の強化が日本海側の降水（降雪）と太平洋側での晴天・乾燥という顕著な空間コントラストを生じさせる。

このような冬季東アジアモンスーン活動の再現性評価と信頼性の高いモデル選択のために、寒気吹き出し時の気温急低下に相当する気温低下指標（DCI）について解析をおこなった（CMIP3：9モデル、CMIP5：21モデル）。参照値として使用した気象庁55年再解析データ（JRA55）において、DCIを下回るような気温急低下時の各種気象要素（気温、水平風など）をみたところ、（1）気温急低下地域がシベリアを起源として南東方向の東アジアに進行、（2）気温急低下後の東アジア地域では北寄りの風が卓越、など寒気吹き出し時の特徴をよく捉えていた（図略）。DCIの現在気候再現性について、JRA55と比較したところ、CMIP5の多くのモデルがJRA55のDCIよりも低く、CMIP5平均でも観測値に比べて低いDCI、すなわち気温低下強度を過大評価していた（図(3)-5）。DCI過小評価（気温低下強度の過大評価）は、多くのCMIP5モデルでみられる高緯度大陸上における顕著な低温バイアス（Sillmann et al. 2013⁴⁾）の反映と考えられる。ただし、CMIP5とCMIP3とを比較すると、北大西洋から北極海、シベリア北西部でのDCIが観測値に近く、特にノルウェー海からバレンツ海にかけての北極海海氷の縁辺部における改善が顕著である。これらはCMIP5において海氷の張り出し地域などの再現性が向上したことに起因すると考えられる。東アジアにおいては、長期再解析との乖離が大きくなったCMIP5モデルが多く、結合モデルの冬季の気候再現性を向上させるために、高緯度域での低温バイアス改善が必要であると考えられる。



図(3)-6 3月における寒気活動指標（日平均気温の前日との差の10パーセンタイル値；DCI(10%)の将来変化（将来気候-現在気候。各々2081-2100年、1981-2000年平均）のマルチモデル平均（21モデル）。図中丸印：マルチモデル平均と同符号偏差となるモデル個数が15以上の格子点。

図(3)-6に、DCIの将来変化（・DCI=DCI(21C)-DCI(20C)；21世紀末と20世紀末との差）を示す。北大西洋～ユーラシア北西部の高緯度域やオホーツク海では、全モデル平均で現在気候よりもDCIが正偏差（気温低下幅の縮小）となった。これら地域は、現在気候での海氷縁辺部かつ将来気候での海氷消失域とよく対応していた。すなわち、北大西洋～ユーラシア北西部における気温低下



図(3)-7 中国東部 (25° -40° N、100° -120° E) の領域平均DCIの将来変化 (ΔDCI、21世紀末と20世紀末の各20年統計値の差)。寒候期(10月-5月)の月別統計値に基づく。黄(赤)色がRCP4.5 (RCP8.5) シナリオ。丸印が個別モデル(21モデル)、×印が全モデル平均。左がΔDCI(10%)、右がΔDCI(2%)。

幅の弱化は、海水域の高緯度側への後退に伴って海水面が露出するために日々の地上気温の変動性が小さくなったことを反映していると考えられる。極・高緯度域においてDCIが弱化する一方、中緯度域、とりわけ中国東部においては多くのモデルでDCIの強化が予測されていた。DCI強化傾向は、CMIP5モデル平均では1月から4月にかけてみられ、特に初春期(3月)で最大となる(図(3)-7)。DCI強化傾向は選択基準となるパーセンタイル値を変更しても結果に本質的な違いは無く、より極端な気温低下幅を選択した場合(例として2パーセンタイル値。約2年に一度程度の発生頻度に相当)には、将来変化幅が更に拡大した(図(3)-7右)。さらに、より強い温暖化が進行するRCP8.5シナリオの方がRCP4.5シナリオのそれよりもDCI強化が大きい。これらの結果は、温暖化すると初春期の日々の気温変動が大きくなり、特に極端な気温低下イベントの際には現在のそれよりも大きな気温低下となる可能性が高いことを示している。

一方で、DCIの強弱がモデル間で大きくばらつく事に関して、日本付近における冬季平均南北風の将来変化傾向(図(3)-4)と比較したが、南北風の強弱とDCIの強弱とは一貫した対応をしていなかった。この結果は、季節平均場の将来変化傾向が日々の変動性の将来変化と必ずしも対応しないことを意味する。したがって、例えば季節平均大気循環場の再現性が良好なモデルをダウンスケーリング研究に用いた場合であっても、日々の大気変動の再現性が良好とは言えない気象要素が領域気候モデルへの境界条件として取り込まれる可能性がある。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

温暖化により、時期・季節によっては現在気候よりも大きな気温急低下が生じる可能性を示した。ただし、気温低下幅の将来変化はモデル間で大きくばらつき、季節平均などの大気循環場の現在気候再現性とは関連性を見いだすことは困難であった。

（２）環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

寒気吹き出し時の気温低下幅が、東アジアの初春期で特に強くなることを初めて示した。この知見は、温暖化緩和策・適応策を考える際に重要な知見となる。これまで、温暖化時の気温に関する将来変化は、期間平均気温や極端な低温・高温頻度などの指標で比較されてきた。これらの評価方法では、温暖化時の日々の気温変動幅がどう変化するかを評価出来ない。将来気候で現在より急激な気温低下が生じるならば、例えば農業に関していうと、温暖化時の高温状態に適応した農作物を栽培した場合、寒冷障害による被害を受けやすくなる可能性がある。さらに、日々の気温低下幅の増幅は、寒気吹き出し先端部における寒冷前線強度（水平温度傾度）の強化に対応する。このため、初春期の寒気吹き出し時に多発する砂塵嵐の強さや発生頻度にも影響が現れる可能性がある。砂塵嵐は下流域への大規模黄砂輸送をもたらし、近年特に関心が持たれている。この結果は、将来的な温暖化への緩和策・適応策を東アジア諸国全体で考える必要があることを示しており、国際的な協議の場においても重要視されるべき知見であると言える。

6．国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7．研究成果の発表状況

（１）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) H. UEDA, T. INOUE, A. KIBE and M. SAITOH: Int. J. Climatol., DOI: 10.1002/joc.4032 (2013)
“Snowfall variations in Japan and its linkage with tropical forcing”
- 2) T. OGATA, H. UEDA, T. INOUE, M. HAYASAKI, A. YOSHIDA, S. WATANABE, M. KIRA, M. OOSHIRO and A. KUMAI: J. Meteorol. Soc. Jpn., 92, 207-225 (2014)
“Projected future changes in the Asian Monsoon: A comparison of CMIP3 and CMIP5 model Results”

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

- 1) 植田宏昭、尾形友道、井上知栄、吉田あい、渡邊茂、吉良真由子、大城萌美、熊井暖陽：日本気象学会 2013 年度春季大会（2013）

- 「CMIP3/CMIP5 における夏季・冬季アジアモンスーンの再現性と将来予測」
- 2) 植田宏昭：日本地球惑星科学連合 2013 年大会（2013）
「グローバルモンスーンの形成 -過去と未来の対比-」
 - 3) 植田宏昭：2013 年度日本海洋学会秋季大会（2013）
「新たな学際的視点としての大気海洋相互作用」
 - 4) 早崎将光、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「CMIP5 による東アジア冬季モンスーン活動の再現性とその将来変化」
 - 5) 大城萌美、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「過去 1,000 年の気温およびアジアモンスーンの変動について」
 - 6) 吉良真由子、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「地球軌道変化による太陽入射量の緯度・季節変化に対する気候応答」
 - 7) 熊井暖陽、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「積雲対流パラメタリゼーションの違いによる気候再現の差異」
 - 8) 三木友梨紗、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「地球温暖化に伴う熱帯域の降水特性変化」
 - 9) 渡邊茂、植田宏昭：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「温暖化時の南アジア域冬季降水量変動要因」
 - 10) M. Haysaki and H. Ueda: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
“Future projections of winter monsoon activities in East Asia using CMIP5”
 - 11) 植田宏昭：総合地球環境学研究所 高分解能古気候学と歴史・考古学の連携による気候変動に強い社会システムの探索（2014）
「古気候プロキシ研究と気候モデリングの接点」
（招待講演）
 - 12) 大城萌美、植田宏昭：総合地球環境学研究所 高分解能古気候学と歴史・考古学の連携による気候変動に強い社会システムの探索（2014）
「中世温暖期および小氷期における夏季アジアモンスーン」
 - 13) 早崎将光、植田宏昭：日本気象学会 2014 年春季大会（2014）
「東アジア冬季モンスーン活動および低気圧活動の将来変化」
 - 14) Ueda, H.: Murakami Memorial Symposium (Honolulu, USA, 2014)
“Important factors for the development of the Asian-Northwest Pacific summer monsoon”
 - 15) Hayasaki, M. and H. Ueda: AOGS 11th annual meeting, Sapporo, Japan, 2014,
“Future projections of cyclone and cold surge activities over East Asia”
 - 16) 植田宏昭：日本地理学会秋季学術大会（2014）
「冬季日本の降雪変動と熱帯からの遠隔強制」.
 - 17) 植田宏昭, 早崎将光, 釜江陽一, 鬼頭昭雄, 三木友梨紗, 熊井暖陽, 渡邊茂: 日本気象学会 2014 年秋季大会（2014）
「モンスーン循環に見られる近年の気候ハイエイトスと温暖化予測」
 - 18) 渡邊茂、植田宏昭：日本気象学会 2014 年秋季大会（2014）

「南アジア夏季モンスーンの将来予測における CMIP3-CMIP5 間の不確実性に寄与する要因」

19) 早崎将光, 植田宏昭: 日本気象学会 2014 年秋季大会 (2014)

「CMIP5 で再現された東アジア冬季モンスーンの季節進行とその将来変化」

20) 熊井暖陽・植田宏昭: 日本気象学会 2014 年秋季大会 (2014)

「積雲対流スキームに起因する夏季アジアモンスーン気候再現の差異」

21) 三木友梨紗・植田宏昭: 日本気象学会 2014 年秋季大会 (2014)

「地球温暖化に伴う熱帯域の対流特性変化」

22) 早崎将光, 野木友里香, 植田宏昭: 急発達する低気圧の実態・予測・災害軽減に関する研究集会 (京都, 2014)

「日本海低気圧・南岸低気圧の将来変化」

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

1) 兵庫県立龍野高校模擬授業 (2013 年 8 月 6 日、筑波大)、地球温暖化に関する模擬授業と研究プロジェクト紹介

(5) マスコミ等への公表・報道等

1) NHK スペシャル「巨大災害」第 1 集「異常気象」取材協力、2014 年 8 月 30 日

2) TBS ニュース 23 (2014 年 12 月 15 日放送、電話取材にて急発達する低気圧に関するコメント)

(6) その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) Ueda, H. and T. Yasunari and R. Kawamura (1995): Abrupt seasonal change of large-scale convective activity over the western Pacific in the northern summer. J. Meteor. Soc. Japan, 73, 795-809.
- 2) Kitoh, A. and T. Uchiyama (2006): Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. J. Meteor. Soc. Japan, 84, 247-258.
- 3) Taylor, K.E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. J. Geophys. Res., 106, 7183-7192.
- 4) Sillmann, J. and Kharin, V. V. and Zhang, X. and Zwiers, F. W. and Bronaugh, D. (2013): Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. J. Geophys. Res., 118D, 1716-1733.

（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 城岡竜一
横井 寛
佐藤尚毅
安永数明

<研究協力者>

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 高橋千陽

平成 24(開始年度)～26 年度累計予算額：27,652 千円
(うち、平成 26 年度予算額：9,400 千円) 予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

熱帯域の対流活動が東アジアに及ぼす影響に関して、熱帯で顕著な現象でありながら、気候モデルにおける再現が難しい季節内変動や台風に注目し、現象そのものの再現性、テレコネクション等による中緯度への影響、将来気候における変化等を評価した。

熱帯域における代表的な季節内変動として MJ0 に着目し、CMIP5 マルチ気候モデルにおける再現性を評価したところ、全体的にみて MJ0 の再現性は CMIP3 よりも改善されていることがわかった。再現性の良いモデルによる MJ0 の空間構造においても改善がみられているが、いまだに系統的な誤差も残っていることが明らかになった。また、MJ0 が東アジアに及ぼすテレコネクションとして、冬季 MJ0 に伴う東アジア～北太平洋域におけるストームトラック活動、降水変動、温帯低気圧発達率の将来変化を調べた。MJ0 再現性の良いモデルの平均では、冬季 MJ0 の降水振幅は中・東部インド洋と太平洋域で増加し、MJ0 降水に起因する中緯度ロスビー波応答として北太平洋域の循環・気温偏差振幅が増加していた。MJ0 がインド洋で活発な時は、総観規模擾乱の運動エネルギーと南北熱フラックスがより増大し、東アジア域での季節内振動周期の水蒸気フラックス収束が増加する事により、擾乱の南北水蒸気フラックスと降水振幅も増加していた。これらにより、MJ0 による東アジア～北太平洋域への影響は、将来気候ではより増大すると考えられる。西太平洋域における台風発生頻度の将来予測に関しても、現在気候における発生頻度の再現性の良いモデルを選定し、それらの将来予測実験との比較を行った。それら全てのモデルにおいて、現在はフィリピン東海上に位置する台風最多発生域が、将来は東に移動するとの予測が得られた。この変化は、台風発生の好環境であるモンスーン低圧帯が東方に伸長するという予測に起因すると考えられる。

[キーワード]

熱帯大気海洋相互作用、季節内変動、MJ0、台風発生、テレコネクション

1. はじめに

赤道域における主要な降水システムである MJ0 は日本を含む東アジア域の気候にも影響を与えていることが予想される。しかし、一方で、CMIP3 マルチモデルデータの解析結果によると、気候モデルにおける MJ0 の再現性は全体的には十分ではないとされていることから、まず、CMIP5 マルチ気候モデルにおける MJ0 の再現性を評価する必要がある。

また、熱帯における対流活動が中緯度東アジア域に及ぼす影響として、北半球冬季にみられる、東アジア域から北太平洋域における温帯低気圧活動（ストームトラック活動）の、MJ0 の影響を受けた活発化が知られている。MJ0 降水活動は北半球冬季に最も活発となり、インド洋から西太平洋域に東方伝播する。MJ0 降水活発域がインド洋にある時、ストームトラック活動が活発化し、西太平洋に移動するとストームトラック活動は抑制される。将来気候において、MJ0 活動がどのように変化し、それに伴って中緯度域のストームトラック活動がいかに変動するかを調べることは、熱帯中緯度相互作用の観点からも気候変動予測にとって重要である。

台風は我が国をはじめ東南アジアや東アジアの沿岸諸国に豪雨や暴風、高潮などの災害をもたらすとともに、社会に必須な水資源の供給源でもあるため、各国に接近・上陸する台風の個数が将来どのように変化するかを予測することは社会的にも重要である。接近頻度の地域的な予測を行う際には、地球全体や海盆全体での発生頻度の変化のみならず、海盆内での発生頻度の空間分布の変化を予測することが必要になってくる。CMIP3 マルチモデルを用いた解析では、台風発生頻度分布を良く再現する 5 種のモデルを用いた結果として、現在はフィリピン東海上に位置する台風最多発生域が、将来はやや東方に移動するとの予測がなされていた。これらの結果に関して、さらに多くのモデルの気候実験データを解析し、予測の不確実性を評価する必要がある。

2. 研究開発目的

CMIP5 マルチ気候モデルデータを用いて MJ0 の再現性評価を行い、特に、再現性のスコアが比較的高いモデルにおいて、どのような系統的誤差があるかを検討する。中緯度への影響評価として、冬季 MJ0 に伴う東アジア域～北太平洋域におけるストームトラック活動、降水活動、温帯低気圧発達率の将来変化について調査する。また、西太平洋域における台風発生頻度分布の将来変化について、CMIP3 と CMIP5 での比較を行う。

3. 研究開発方法

はじめに、CMIP5 の各モデルについて MJ0 の再現性のスコアを計算し、MJ0 再現性の比較的高いモデルを抽出した。ここでは、赤道域の日降水量データに、時間、東西方向にフィルターをかけることによって MJ0 成分を抽出している。MJ0 成分に対する降水分布の回帰を計算し、観測との類似性の大小からスコアを計算した。次に、スコアの高いモデルを選んで、モデルが再現した MJ0 の空間構造を調べた。ここでは、降水、海面気圧、東西風、比湿、海面水温などの赤道上での断面に注目した。

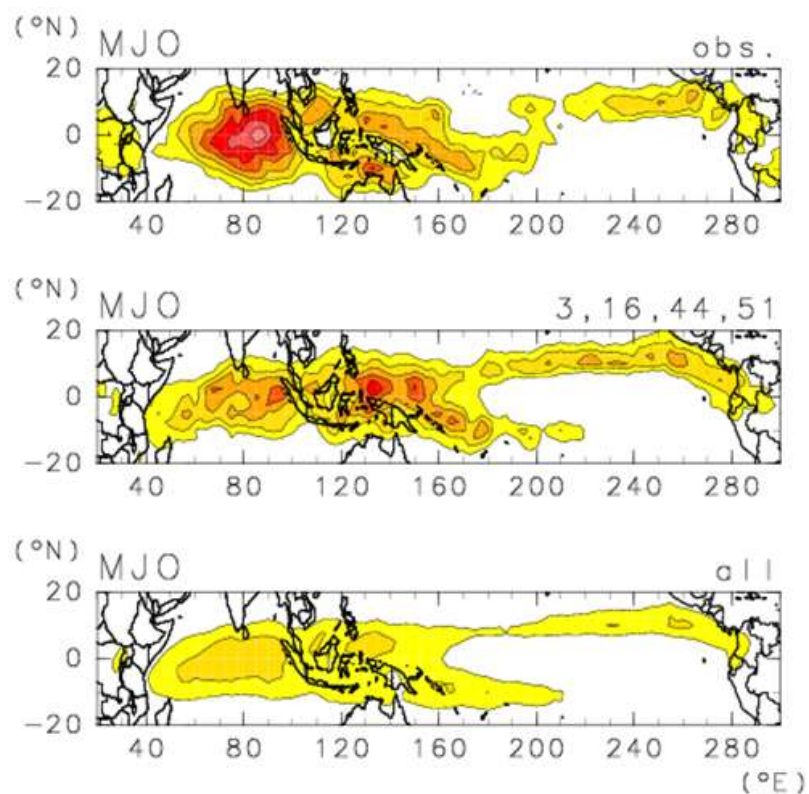
中緯度ストームトラック活動に影響する MJ0 活動度の指標（MJ0 index）としては、20～80 日周期、波数 1～5 で時空間フィルターをかけた日降水偏差の時系列を計算した。インド洋域（85-90E, 10S-10N）、西太平洋域（155-170E, 10S-10N）で領域平均した index をそれぞれ MJ0-I0 index、MJ0-WP index として回帰係数を計算した。ストームトラック活動度は、総観規模擾乱（2～8 日周

期成分)の鉛直平均運動エネルギー(EKE)と南北熱・水蒸気フラックスを指標として用いた。急発達する温帯低気圧として、1 hPa/hr以上の発達率を示す低気圧を抽出した。計算期間は、現在気候は1981-2000年、将来気候は2081-2100年の20年間の冬季(12, 1, 2月)である。将来変化は、将来気候から現在気候を引いた差分を用いた。

台風に関しては、CMIP5に参加した気候モデル群のうち、大気の水平解像度が2度よりも細かく、研究開始時点で台風型渦擾乱の検出に必要な三次元大気場の日別値が公開されていた7モデルを対象とした。まず、40年分(1965-2004年に相当)の現在気候実験データを解析し、Yokoi and Takayabu (2009)¹⁾で用いられている台風型渦擾乱の定義を各モデルに合わせて調整した。調整済の定義を用いて台風型渦擾乱を抽出し、その発生頻度の空間分布を観測と比較して再現性能の高いモデルを選別した。続いて、選別されたモデルの40年分(2061-2100年に相当)のRCP4.5将来予測実験データについても同様に台風型渦擾乱を抽出し、発生頻度を現在気候実験の結果と比較することでマルチモデル将来予測を行った。

4. 結果及び考察

MJOの再現性に関して、観測およびCMIP5マルチ気候モデルにおける降水分布のMJO成分を図(4)-1に示す。観測においては、東部インド洋や西部太平洋でMJO成分が大きくなっていることが確かめられる。再現性のスコアの高い4つのモデルが再現したMJO成分には、観測との一定の類似性が認められる。インド洋での再現性に注目すると、モデルでは西部インド洋におけるMJO成分が過大に再現され、逆に東部インド洋でのMJO成分は観測より過小になっている。このような系統的



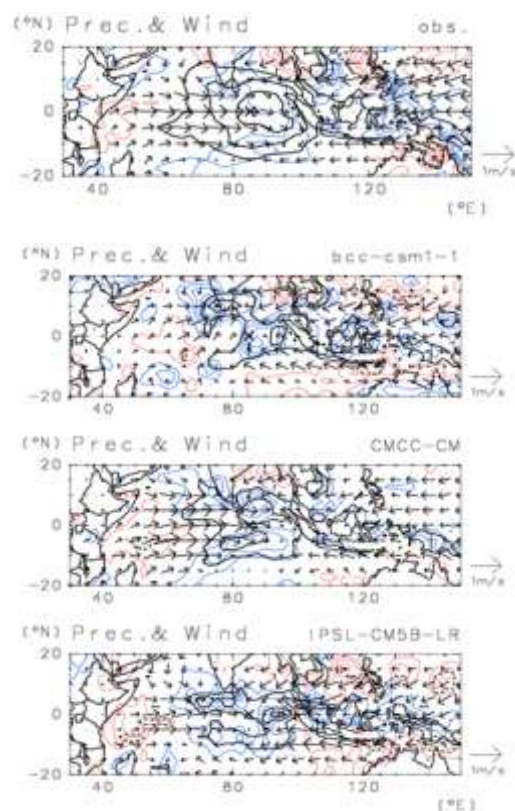
図(4)-1 降水のMJO成分。上から、観測、再現性の高いモデル、すべてのモデルの平均。

誤差はCMIP3においてもみられたが、CMIP5においては観測との相違は小さくなっており、この点ではCMIP5モデルはCMIP3と比べて改善されているといえる。しかし、全モデルの平均においては、依然としてMJOは観測と比べて大幅な過小評価となっている。このことは、依然として多数のモデルにおいてMJOの再現性が著しく低いことを意味している。MJOの影響を受けるような気候要素の予測において、単純な全モデル平均を用いることはCMIP5においても適切ではないと

考えられる。次に、赤道、東経 85 度における降水変動の MJ0 成分に対して、降水、地上風の回帰を計算し、観測とスコアの高いモデルについて結果を示した(図(4)-2)。観測においては、地上風の収束は、降水の極大よりもかなり東まで広がっており、モデルにおいては、地上風の収束は、観測よりも降水極大の近くに位置している。

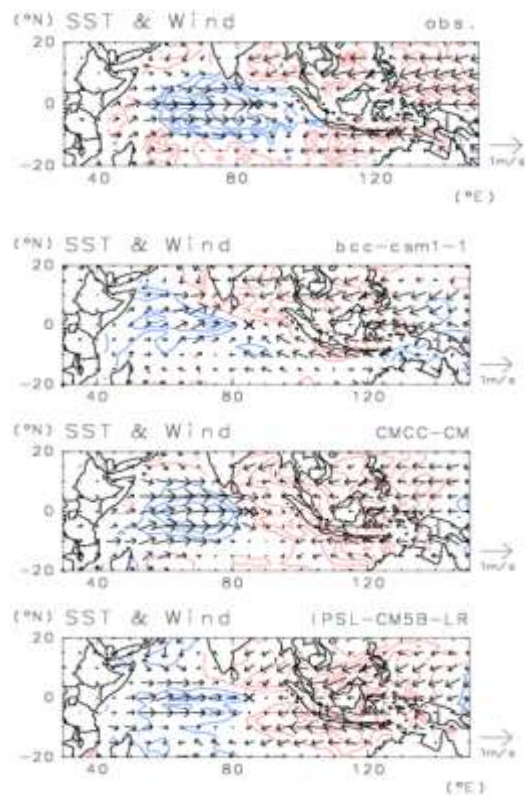
CMIP5 では日別 SST が利用可能となったので、MJ0 成分に対する SST の回帰を計算した(図(4)-3)。観測では、降水の極大付近やその西側で SST が低下している。それに対して、モデルでは、SST の負偏差が西に後退し、降水極大のすぐ東側において SST 偏差が正になっている。観測では、西風偏差が生じるよりも前に SST の低下が始まっているが、モデルでは、強い西風偏差がみられるようになってから SST が低下している。別の見方として、観測では、SST が低下しても MJ0 に伴う正の降水偏差は持続するが、モデルにおいては、SST の低下が始まると降水がすぐに弱くなると言うこともできる。このような傾向は個々のモデルにおいて共通してみられる傾向であり、SST 偏差の成因や、SST 偏差が降水活動に与える影響という観点から詳細に検討していく必要がある。

次に、赤道、東経 85 度における降水変動の MJ0 成分に対する、降水量、下層の東西風、海面気圧、比湿、SST の回帰をモデルごとに計算し、南緯 10° から北緯 10° の平均を図(4)-4 に示した。観測では、降水の正偏差に比べて、海面気圧の負偏差が東に広がっている。これは、図(4)-2 で水平収束域が東に広がっていることと対応していると考えられる。それに対して、モデルでは海面気圧の負偏差が降水の正偏差域と同程度の広がりになっていて、東への拡大は明瞭ではない。東西風に関しても同様の傾向がみられる。下層の水蒸気量の極大は、観測においては、降水の極大よりもかなり東に位置しているが、モデルでは降水極大の付近にみられる。また、SST と比湿との関係に注目すると、観測では、比湿の極大は水蒸気量の極大よりも東に位置し、時間的に先行しているといえる。しかし、モデルでは、比湿の極大は水蒸気量の極大よりも西にずれていて、降水極大の付近に位置する。モデルにおいては、SST の上昇、水蒸気量の増加、降水の増加という順に時間進行しているといえる。これは、高い SST が水蒸気の増加をもたらす、結果として降水が増えるという単純な考察に合致するが、現実の大気ではそのような時間進行は成り立っておらず、観測とモデルの間には根本的な相違があることを示唆する。

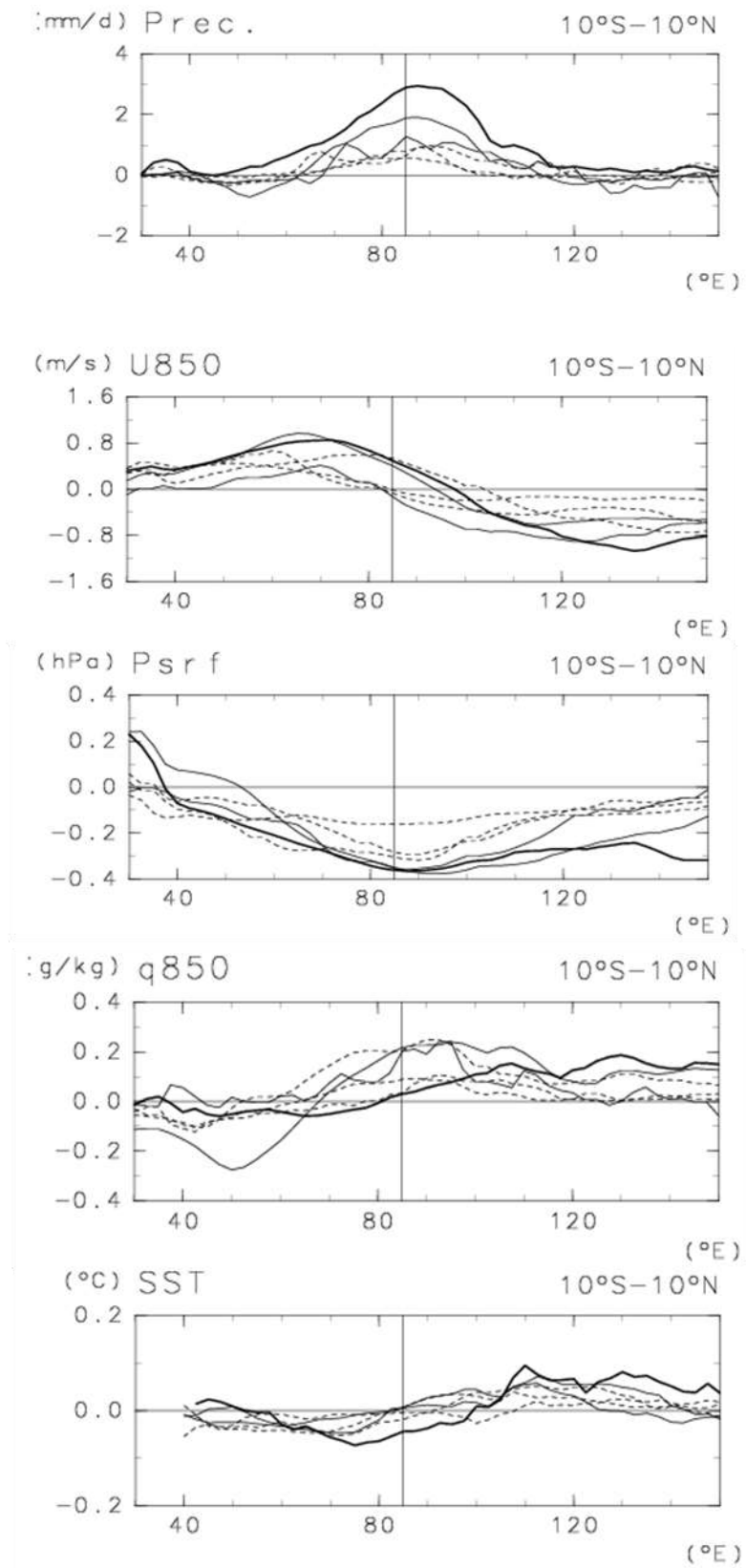


図(4)-2 赤道、東経 85 度における降水変動の MJ0 成分に対する、降水量(太い実線)と地上風(矢印)、地上風の発散(色実線)の回帰。上は観測、下は上位 3 モデル。等値線間隔は 1mm/day と $0.2 \times 10^{-6}/s$ 、ゼロの等値線は省略、負の値は点線と青線。

全体的にみて、CMIP3 と比べて、CMIP5 気候モデルにおいては MJ0 再現性のスコアは向上している。しかし、スコアの高いモデルに限定しても、いまだに系統的な誤差が残っているといえる。これらの誤差は MJ0 の本質的なメカニズムに関係している可能性があり、気候モデルの結果を利用するときには注意が必要である。



図(4)-3 赤道、東経85度における降水変動のMJ0成分に対する、降水量(太い実線)と地上風(印)、SST(色実線)の回帰。上は観測、下は上位3モデル。等値線間隔は 1mm/day 0.02K、ゼロの等値線は省略、負の値は点線と青線。



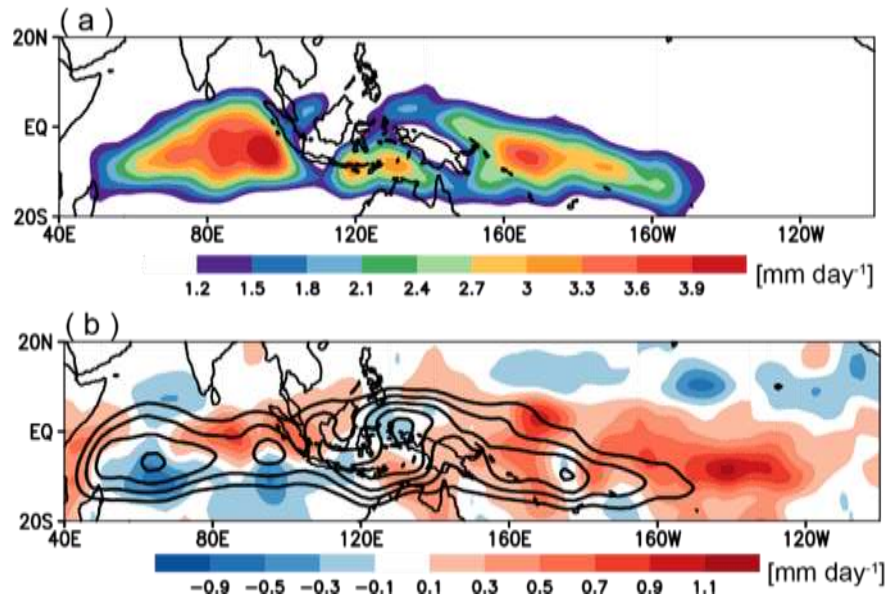
図(4)-4 赤道、東経 85 度における降水変動の、MJ0 成分に対する、降水量、下層の東西風、海面気圧、比湿、SST の回帰（南緯 10 度から北緯 10 度の平均）。太い実線は観測、細い実線は再現性の高いモデル、点線は再現性がやや高いモデル。

中緯度ストームトラック活動への影響に関しては、CMIP5 の 33 個のモデル群から 40E-200E 領域の MJ0 降水再現性の比較的良い 5 つのモデルを抽出した。これらのモデル (BEST モデル) で平均した冬季 MJ0 降水振幅とその将来変化を図 (4)-5 に示す。モデルは、観測と比較して西部インド洋域と海大陸域で正の降水バイアス、東部インド洋域と西インド洋域で負の降水バイアスが存在する。冬季 MJ0 降水活動は、中部インド洋と太平洋域で将来増加を示した。インド洋域の MJ0 に対する大気応答と中緯度降水変動を図 (4)-6 に示す。インド洋域の MJ0 降水による非断熱加熱に起因し、亜熱帯ジェット帯で増幅し、北東へ伝播する中緯度ロスビー波列が東アジア～北太平洋域に形成される (図 (4)-6a, b)。この時、北西太平洋域は、高気圧性循環偏差かつ高温偏差となる。将来気候では、インド洋の降水正偏差、太平洋域の降水負偏差がより強まる (降水振幅が増加する) ため、ロスビー波列応答として北太平洋域の循環・気温偏差の振幅が増大する (図 (4)-6c, d)。

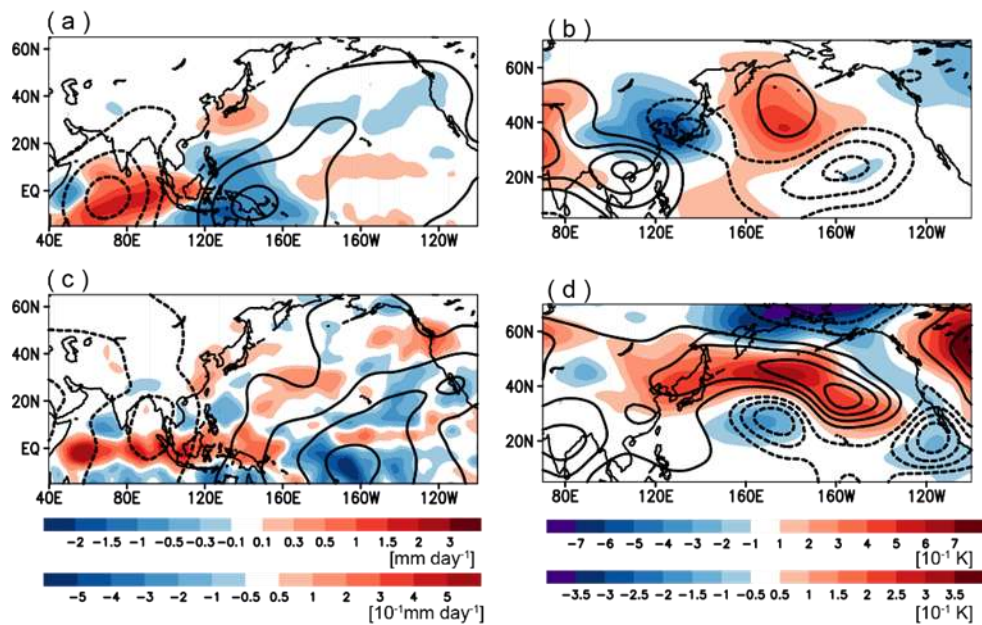
MJ0 がインド洋で活発な時は、北太平洋域のストームトラック活動度 (擾乱の運動エネルギー、南北熱フラックス) は強化する (図 (4)-7a)。これは、主に高温偏差形成による傾圧エネルギー変換効率の増大及び、潜熱加熱による擾乱エネルギー生成に起因する (図 (4)-7b)。MJ0 振幅の将来増加に伴い、特に北西太平洋域では傾圧エネルギー変換の増加により、ストームトラック活動が増加すると予測される (図 (4)-7c, d)。一方、MJ0 が西太平洋域で活発な時は、ストームトラック活動は将来、より抑制される。

擾乱の南北水蒸気フラックス増減は、擾乱に伴う降水の増減を伴う (図 (4)-8a, b)。MJ0 がインド洋域 (西太平洋域) で活発な時、擾乱の北向き水蒸気フラックスと降水振幅は、将来、より増加 (より減少) する (図 (4)-8c, d)。これは、東アジア～北西太平洋域の季節内振動周期の水蒸気フラックス収束偏差の振幅がより北で増加する事に起因する。さらに温暖化した将来、爆弾低気圧型の急発達する低気圧の発達率は、MJ0 がインド洋 (西太平洋域) で活発な時、より増加 (減少) すると予測される (図 (4)-9)。これは、擾乱の南北熱フラックス変動の変化と良く一致している。

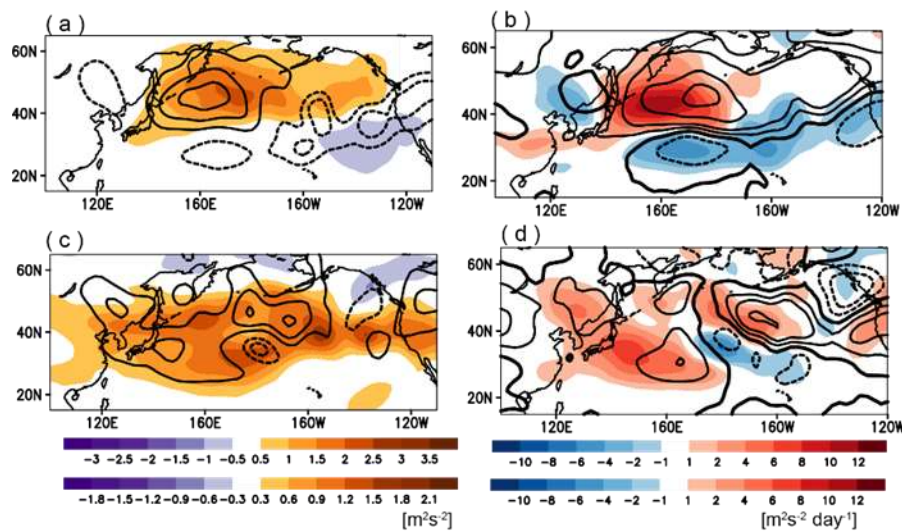
MJ0 降水がある程度再現されている 17 個の CMIP5 モデルにおいて、MJ0 に伴うストームトラック活動の将来変化は、MJ0 に伴う亜熱帯北太平洋域の循環偏差の将来変化と正の相関を示した (図 (4)-10)。モデルによりばらつきは見られるが、BEST モデル平均だけではなく、17 個のモデル平均でも MJ0 とストームトラック活動の将来増加を示している。まとめると、温暖化した将来、冬季 MJ0 に伴う熱帯域降水振幅が増加し、北太平洋中緯度域の総観規模擾乱活動、降水活動、急発達する低気圧の振幅増加が起これと予想される



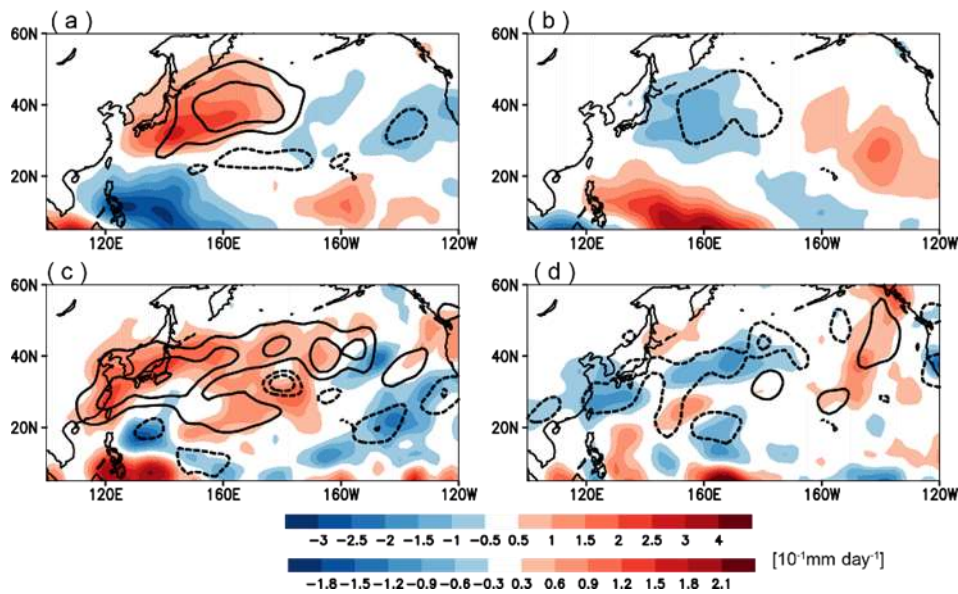
図(4)-5 冬季 MJ0 の降水振幅と将来変化。(a) 観測 (GPCP) , (b) 現在気候 (実線、1.2 mm day⁻¹ から 0.6 mm day⁻¹ 間隔) 、将来変化 (色)。(b) は 5 つの BEST モデル平均値を示す。



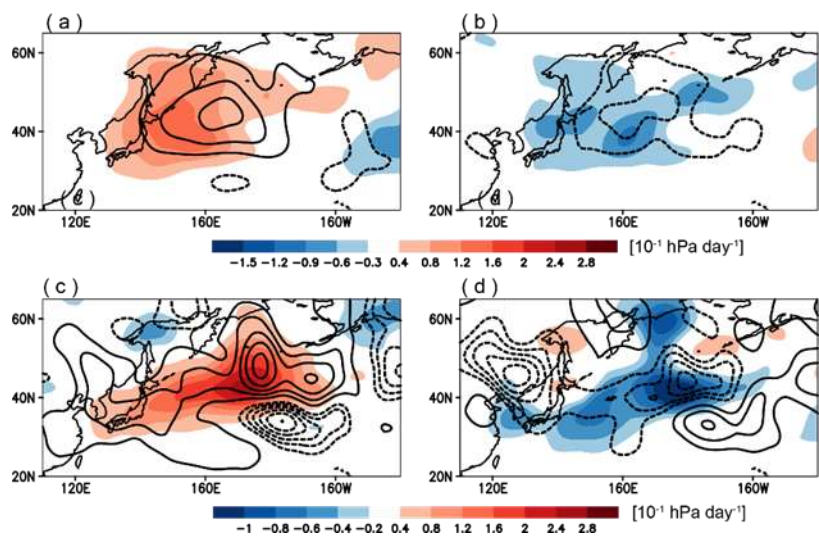
図(4)-6 MJ0-I0 index に対する季節内振動周期の (a), (c) 降水偏差 (色) 、250-150hPa 平均の速度ポテンシャル偏差 (線、(a) $3 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (c) $10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 間隔) 、(b), (d) 850-500hPa 平均の気温偏差 (色) 、250hPa 流線関数偏差 (線、(b) $6 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, (d) $4 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 間隔) の回帰場。実線が正值。5 つの BEST モデル平均値で、(a), (b) は現在気候、(c), (d) は将来変化を示す。



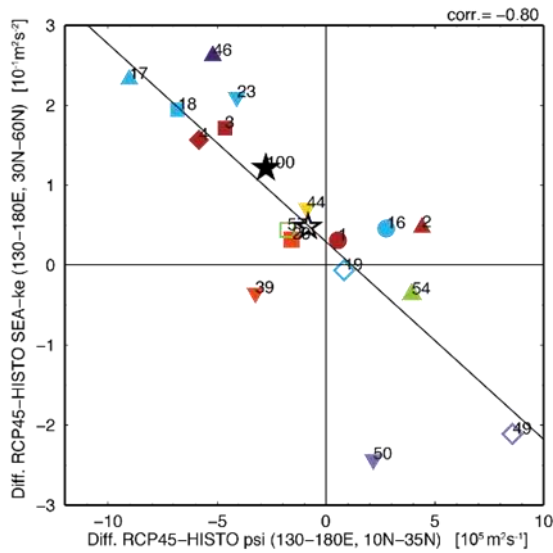
図(4)-7 MJ0-I0 index に対する季節内振動周期の(a), (c) 850-250hPa 平均 EKE 偏差 (色)、850-500hPa 平均の擾乱の南北熱フラックス偏差 (線, (a) $0.2 \times K \ m \ s^{-1}$, (c) $0.15 \times K \ m \ s^{-1}$)、(b), (d) 850-250hPa 平均の傾圧エネルギー変換効率偏差 (色)、850-250hPa 平均の潜熱加熱に伴う擾乱のポテンシャルエネルギー生成率偏差 (線, 1, 2, 4, 6, ... $\times m^2 \ s^{-2} \ day^{-1}$ 間隔) の回帰場。実線が正值。5 つの BEST モデル平均値で、(a), (b) は現在気候、(c), (d) は将来変化を示す。



図(4)-8 MJ0 index に対する総観規模擾乱に伴う降水の標準偏差 (色)、1000-500hPa 平均の擾乱の南北水蒸気フラックス偏差 (線、(a), (b) $5 \times 10^{-5} m \ s^{-1}$, (c), (d) $4 \times 10^{-5} m \ s^{-1}$ 間隔) の回帰場。(a), (c) は、MJ0-I0 index、(b), (d) は MJ0-WP index に対する回帰場。実線が正值。5 つの BEST モデル平均値で、(a), (b) は現在気候、(c), (d) は将来変化を示す。

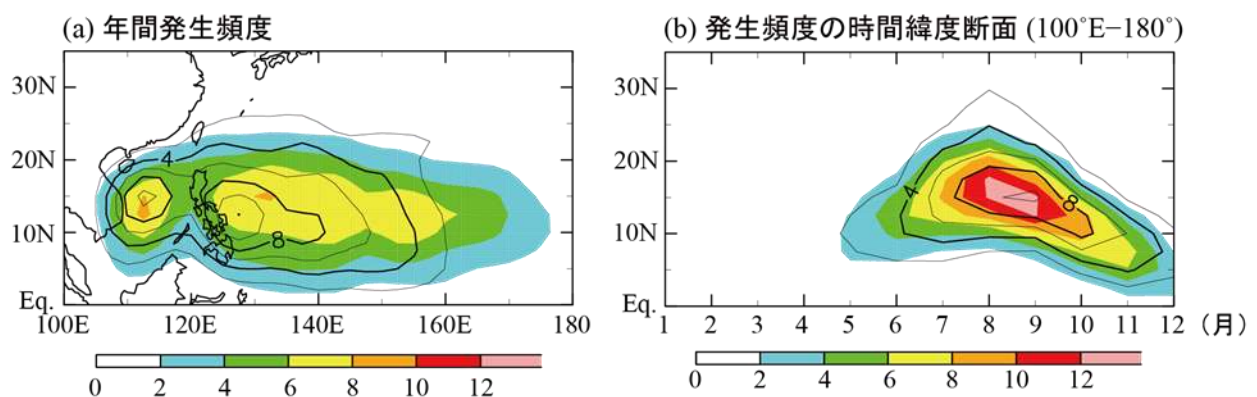


図(4)-9 MJ0 index に対する温帯低気圧発達率（色）、850-500hPa 平均の擾乱の南北熱フラックス偏差（線、(a), (b) $2 \times 10^{-1} \text{ K m}^{-1}$, (c), (d) 10^{-1} K m^{-1} 間隔）の回帰場。海面気圧が 1 hPa/hr 以上の急発達率を示す低気圧のみを抽出。(a), (c) は、MJ0-I0 index、(b), (d) は MJ0-WP index に対する回帰場。実線が正值。5 つの BEST モデル平均値で、(a), (b) は現在気候、(c), (d) は将来変化を示す。

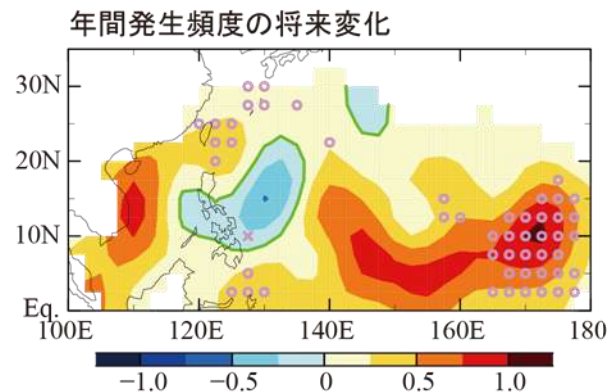


図(4)-10 17 個の CMIP5 モデルにおける MJ0-I0 index に対する亜熱帯西太平洋域上層循環場 (250hPa 流線関数偏差、130-180E, 10-35N 平均) とストームトラック活動度 (850-250hPa 平均 EKE 偏差、130-180E, 30-60N 平均)。5 つの BEST モデル番号は、3, 16, 17, 18, 54 である。17 つのモデル平均は星印で示す。実線は回帰線。

台風発生頻度空間分布の現在気候再現性を評価し、再現性の良い5モデルを用いた解析を行った。図(4)-11に、5モデルで平均した発生頻度の時空間分布と観測値との比較を示す。東シナ海とフィリピン東海上の最多発生域や中部太平洋ほど発生頻度が低い点、5～8月に発生域が北上し、その後12月にかけて軟化する季節変化といった特性が現実的に再現されていることがわかる。海盆全体の発生頻度の将来変化は、5モデル平均では8%の増加が予測されていた。しかし、モデル間で予測の傾向が一致していないことから、この変化予測の不確実性は依然高いといえる。図(4)-12に5モデルで平均した年間発生頻度空間分布の将来変化予測(将来気候実験－現在気候実験)を示す。西太平洋域内の多くの地域で増加が予測されている。特に東経160度以東では5モデルすべてが増加を予測しており、他の地域と比べても不確実性が小さいことが示唆される。また、フィリピン東海上では現象が予測されている。これらを総合すると、フィリピン東海上から東に延びる台風最多発生域が将来はやや東方に伸長・移動することが予測される。また、台風の発生しやすさを測る環境場の指標である対流圏下層の相対渦度場や対流圏上層と下層の風速差を解析し、発生頻度将来変化の原因を検討した。その結果、台風発生的好環境場であるモンスーン低圧帯の将来変化が関係していることが分かった。現在気候では低圧帯はフィリピン東海上から東南東方向に延びているが、これが将来はさらに東方に伸長すると予測されており、東経160度以東での発生頻度の増加と整合的である。一方で、フィリピン東海上では、台風の卵となる熱帯低気圧擾乱の活動度が低下する予測されており、これがこの地域での発生数減少の原因であると考えられる。以上の結果は、基本的にはCMIP3モデルを用いたYokoi and Takayabu (2009)¹⁾と整合的である。



図(4)-11 (a) 台風年間発生頻度(単位: 40年間に緯度経度2.5度格子内で発生する個数)と
(b) 東経100度から180度で平均した発生頻度の時間(月)緯度断面(単位: 40年間の各月に緯度2.5度経度80度の矩形内で発生する個数)についての、(カラー)5モデル平均と(等値線)観測値の比較。



図(4)-12 台風年間発生頻度の将来変化（将来気候－現在気候）。単位は図(4)―11aと同じ。藤色の丸印（×印）は、5モデル全てが増加（減少）を予測した場所を示す。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

これまでに再現が難しいとされてきた MJ0 に関して、各モデルの再現性を評価する方法を開発して、信頼性の高い気候モデルを抽出した。また、最新の観測データを活用して MJ0 の構造の再現性を詳細に解析し、系統的誤差を明らかにした。MJ0 が循環場に与える影響に関して信頼性の高い情報を抽出するための知見を得ることができた。特に、モデル間において MJ0 再現性の差が大きく、MJ0 の影響を受ける気候要素の予測においては MJ0 再現性のスコアの高いモデルのみを抽出すべきである点が重要である。

東アジア域を含む中緯度域の気候変動予測精度向上のために、熱帯域季節内変動のモデル再現性向上の重要性を提示した。温暖化時、熱帯季節内振動による中緯度域への影響がより増大する可能性を示した。

台風発生頻度の将来予測は強度に比べて不確実性が高いとされ、さらに全球平均に比べて地域的な発生頻度の将来変化予測はさらに不確実性が高く、一般には困難であると考えられている

(Knutson et al. 2010²⁾; 横井と吉村 2014³⁾)。このような状況の中で、フィリピン東海上の台風最多発生域が東方移動するという、多くの CMIP3/5 参画気候モデルで意見が一致し、不確実性が低いと考えられる将来予測情報を抽出できたことは意義深い。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

特に記載すべき事項はない。

6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) S. YOKOI, C. TAKAHASHI, K. YASUNAGA, and R. SHIROOKA: SOLA, 8, 137-140 (2012)
 “Multi-model projection of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific: CMIP5 results”
- 2) S. YOKOI and Y. N. TAKAYABU: J. Climate, 26, 973-987 (2013)
 “Attribution of decadal variability in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific: A new approach emphasizing the genesis place of cyclones”
- 3) S. YOKOI, Y. N. TAKAYABU, and H. MURAKAMI: J. Climate, 26, 4096-4101 (2013)
 “Attribution of projected future changes in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific”
- 4) K. YASUNAGA, T. NASUNO, H. Miura, Y. N. TAKAYABU, and M. YOSHIZAKI: J. Meteor. Soc. Japan, 91A, 217-229 (2013)
 “Afternoon precipitation peak simulated in an aqua-planet global non-hydrostatic model (aqua-planet-NICAM)”
- 5) T. MIYAKAWA, S. YOKOI, N. HIROTA, S. HIRAHARA, T. INOUE, and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 91, 305-321 (2013)
 “A summer Eastern Asian metric for CMIP3 climate models: an iterative selection method”
- 6) C. TAKAHASHI and R. SHIROOKA: J. Geophys. Res., 119, 10663-10683 (2014)
 “Storm track activity over the North Pacific associated with the Madden-Julian Oscillation under ENSO conditions during boreal winter”
- 7) S. YOKOI: J. Climate, 28, 793-808 (2015)
 “Multireanalysis comparison of variability in column water vapor and its analysis increment associated with Madden-Julian oscillation”

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 横井寛、吉村純: 日本に近づく台風の変化、公益社団法人日本気象学会地球環境問題委員会編、91-92 (2014)
 「地球温暖化－そのメカニズムと不確実性－」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) S. Yokoi, Y. N. Takayabu, and H. Murakami: AOGS-AGU Joint Assembly 2012, Singapore, 2012
 “Attribution of multi-model future projection of tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific basin”
- 2) C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka: AOGS-AGU Joint Assembly 2012, Singapore, 2012
 “Ocean impact on the MJO observed in the south Indian Ocean for the fall and winter of 2011”

- 3) K. Yasunaga: AOGS-AGU Joint Assembly 2012, Singapore, 2012
 “Cross-equatorial Disturbances Observed Over the Tropical Indian Ocean During CINDY”
- 4) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本海洋学会 2012 年度秋季大会（2012）
 「梅雨期における黒潮フロント域の水温勾配の強化」
- 5) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会 2012 年秋季大会（2012）
 「梅雨期における黒潮フロント域の水温勾配の強化」
- 6) 高橋千陽、米山邦夫、城岡竜一：日本気象学会 2012 年度秋季大会（2012）
 「冬季インド洋における波動性擾乱の特徴と季節内振動との関係」
- 7) 安永数明、日本気象学会 2012 年度秋季大会（2012）
 「MJO 内部で卓越する総観規模スケールの渦擾乱」
- 8) C. Takahashi and R. Shirooka: 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2012
 “ENSO dependency of the North Pacific synoptic eddy activity associated with MJO during the boreal winter”
- 9) K. Yasunaga: 2012 AGU Fall Meeting, San Francisco, 2012
 “Formation and Development of Transient Eddies within an MJO”
- 10) C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka, MJO Field Data and Science Workshop, Hawaii, USA, 2013
 “Characteristics of meso-synoptic scale convective systems associated with the MJO observed in CINDY /DYNAMO 2011”
- 11) K. Yasunaga, MJO Field Data and Science Workshop, Hawaii, USA, 2013
 “Formation and Development of Transient Eddies within an MJO”
- 12) N. Sato, C. Takahashi, and R. Shirooka, International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
 “An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian oscillation in the CMIP5 multi-models.”
- 13) S. Yokoi, Y. N. Takayabu, and H. Murakami, International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
 “Attribution of projected future changes in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific”
- 14) C. Takahashi and R. Shirooka, International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
 “Intraseasonal variability of the North Pacific storm track associated with the MJO during the boreal winter in CMIP5 models”
- 15) 佐藤尚毅：日本気象学会 2013 年度春季大会（2013）
 「台風を中心付近での海面水温の低下が台風に与える影響」
- 16) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会 2013 年度春季大会（2013）
 「CMIP5 マルチ気候モデルデータにおける MJO の再現性」

- 17) 高橋千陽、城岡竜一：日本気象学会 2013 年度春季大会（2013）
「冬季 MJO に伴う北太平洋域ストームトラック変動の CMIP5 マルチ気候モデル再現性と将来変化予測」
- 18) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本海洋学会 2013 年度秋季大会（2013）
「台風を中心付近での海面水温の低下が台風に与える影響」
- 19) 横井覚：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「JRA-55 再解析を用いた熱帯季節内変動の水蒸気収支解析」
- 20) 高橋千陽、城岡竜一：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「冬季東アジア域における降水量変動に対する MJO の影響」
- 21) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「梅雨期の黒潮域における海上風の強化」
- 22) 安永数明：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「CINDY 期間中の HSRL と CALIPSO 搭載ライダーによる観測プロファイルの比較」
- 23) 安永数明：日本気象学会 2013 年度秋季大会（2013）
「MJO 内部の総観規模スケールの渦擾乱による水蒸気輸送」
- 24) S. Yokoi: 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013
“Precipitable water vapor budget associated with MJO represented in newly-released JRA-55 reanalysis data”
- 25) C. Takahashi and R. Shirooka: 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013
“Changes in storm track and precipitation variability in East Asia and western North Pacific related to the MJO during boreal winter under global warming”
- 26) K. Yasunaga: 2013 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2013
“Moisture Transport by Transient Eddies within an MJO”
- 27) S. Yokoi, Y. N. Takayabu, and H. Murakami: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
“Attribution of projected future changes in tropical cyclone passage frequency over the western North Pacific”
- 28) C. Takahashi and R. Shirooka: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
“Changes in storm activity in North Pacific related to the MJO during boreal winter under global warming.”
- 29) N. Sato and R. Shirooka: The 2nd International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tokyo, Japan, 2014
“An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian oscillation in the CMIP5 multi-models.”
- 30) S. Yokoi: AMS 31st Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Diego, USA, 2014

- “Water vapor tendency associated with MJO represented in global reanalysis products”
- 31) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会 2014 年度春季大会（2014）
「大気海洋結合のある浅水方程式系において導出された遅い東進モードと MJO」
- 32) 安永数明：日本気象学会 2014 年度春季大会（2014）
「MJO における風の回転成分による水蒸気輸送の効果」
- 33) C. Takahashi and R. Shirooka: AOGS2014, Sapporo, Japan, 2014
“Synoptic-scale disturbances over the North Pacific with the MJO in boreal winter”
- 34) N. Sato, M. Nonaka, Y. Sasai, H. Sasaki, and R. Shirooka: AOGS2014, Sapporo, 2014
“The SST front maintained by early-summer westerly wind in the Kuroshio/Kuroshio Extension region”
- 35) K. Yasunaga: AOGS2014, Sapporo, Japan, 2014
“Dry Air Advection by Transient Eddies within an MJO”
- 36) 佐藤尚毅、野中正見、笹井義一、佐々木英治、城岡竜一：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
「梅雨期の強い西風によって維持される黒潮続流域の水温勾配」
- 37) 安永数明：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
「MJO の発達期・衰退期における水平風による水蒸気輸送の効果」
- 38) 高橋千陽、城岡竜一：日本気象学会 2014 年度秋季大会（2014）
「北半球冬季の熱帯季節内降水の将来変化と遠隔影響」
- 39) S. Yokoi: 2014 AGU Fall Meeting, San Francisco, USA, 2014
“Multi-reanalysis comparison of variability in Analysis Increment of Column-integrated Water Vapor associated with Madden-Julian Oscillation”

（３）出願特許

特に記載すべき事項はない。

（４）「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) 教員向け公開講座「夏季教員セミナー」（主催：多摩六都科学館、2012 年 7 月 26 日、多摩六都科学館、観客約 20 名）で講演
- 2) 教員免許状更新講習（2012 年 8 月 23 日、参加者 29 名）にて成果紹介
- 3) 一般公開講座「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（主催：東京学芸大学、2012 年 10 月 11 日、東京学芸大学、観客約 20 名）にて成果紹介
- 4) 一般公開講座「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（主催：東京学芸大学、2013 年 10 月 10 日、東京学芸大学、観客約 20 名）にて成果紹介
- 5) 東京都高等学校文化祭自然科学部門中央大会（主催：東京都、2013 年 11 月 24 日、東京都立多摩科学技術高等学校、観客約 200 名）で講演
- 6) 小金井市立緑中学校における特別授業「熱帯の海と温帯低気圧」（2014 年 2 月 13 日、聴講者約 240 名）

- 7) 第2回気象サイエンスカフェ北陸 in 富山「台風の故郷、熱帯気象へようこそ」（2014年3月1日）
- 8) 一般公開講座「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（主催：東京学芸大学、2014年6月23日、東京学芸大学、観客約20名）にて成果紹介
- 9) 一般公開講座「数値シミュレーションに挑戦」（主催：東京学芸大学、2014年6月30日、東京学芸大学、観客約20名）にて講演
- 10) 教員免許状更新講習（2014年8月21日、参加者32名）にて成果紹介
- 11) 日本技術士会富山県支部第22回講演会「頻発する大雨災害 自然変動か？温暖化に伴う気候変動か？」（主催：日本技術士会富山県支部、2014年11月15日）にて講演
- 12) 東京都高等学校文化祭自然科学部門中央大会（主催：東京都、2014年11月23日、東京都立多摩科学技術高等学校、観客約200名）で講演

（5）マスコミ等への公表・報道等

特に記載すべき事項はない。

（6）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) S. Yokoi, and Y. N. Takayabu: J. Meteor. Soc. Japan, 87, 525-538 (2009)
“Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the Western North Pacific”
- 2) T. R. Knutson, and co-authors: Nature Geoscience, 3, 157-163 (2010)
“Tropical cyclones and climate change”
- 3) 横井覚、吉村純: 日本に近づく台風の変化、公益社団法人日本気象学会地球環境問題委員会編、91-92 (2014)
「地球温暖化ーそのメカニズムと不確実性ー」

(5) 対流圏－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

基幹研究領域 統合的気候変動予測研究分野 河谷芳雄

<研究協力者>

国土交通省 気象庁 気象研究所 気候研究部 第一研究室 野田彰

平成24～26年度累計予算額：7,396千円（うち、平成26年度予算額：3,000千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

60年分の東西風観測データを用いて成層圏赤道準2年振動（QB0）振幅の経年変化を調べたところ、高度70hPaのQB0振幅がこの60年間で30%以上減少していることを発見した。更にQB0を再現しているCMIP5モデル全てが地球温暖化に伴ってQB0が弱まり、赤道上昇流が強まっていた。温暖化を伴わない実験ではこれらの変化は見られず、QB0と赤道上昇流の変化は地球温暖化が原因であることを裏付けた。本研究により地球温暖化の新たなシグナルが、成層圏のQB0という現象に既に現れていることを発見するとともに、大気微量成分を全球に運ぶ極めて重要なBDCの強化を観測データから世界で初めて立証し、気候モデル予測の正当性を示した。

最新のMLS観測データを用いて、赤道域上部成層圏で時間と共に下方伝播する水蒸気偏差の存在を発見し、上部対流圏から下部成層圏にかけては上方伝播する成分が卓越することを示した。次に気候モデル実験及びCMIP5モデルを用いてそのメカニズムの解明を試みた。上部成層圏に関しては、QB0が引き起こす2次的な鉛直循環と、メタンの酸化によって上部成層圏で水蒸気を作られる効果の掛け合わせによって説明できた。一方下部成層圏に関しては、対流圏界面まで下りてきたQB0が、その場所で温度偏差を作ることによって引き起こされており、下部成層圏における水蒸気の年々変動と、対流圏界面付近でのQB0振幅との間に高い相関があることを明らかにした。

CMIP5モデルについて成層圏をフルカバーするハイトップモデルとフルカバーしないロートップモデルに分類し、対流圏－成層圏の東西風の再現性を調べた。年々変動成分についてはハイトップモデルの再現性の方が良く、その中でもQB0を再現しているモデルが更に良好なことが判明した。更に波動と平均場の相互作用において、波動の増幅と減衰の効果を陽に取り扱うことを可能にする新たな解析手法の導出に成功した。その結果、負の渦拡散が東西風ジェットの形成や対流圏中・上層の傾圧帯形成に及ぼす効果を初めて定量的に見積もる事が出来た。

[キーワード]

地球温暖化、赤道準2年振動、成層圏大規模循環、成層圏水蒸気、新解析手法

1. はじめに

本サブテーマでは、観測データ、気候モデル実験、及びCMIP5モデルの20世紀再現実験と将来予測実験のデータ解析を組み合わせ、対流圏－成層圏循環場に関する研究を行った。対流圏と比べて成層圏では経度方向の変化が比較的小さく、大規模循環で構成されている成層圏全体の構造や温暖化時のレスポンスを調べる必要がある。本サブテーマでは（1）地球温暖化時のQB0とBD循環の変化、（2）気候変動に重要な役割を果たす成層圏水蒸気の年々変動の解明、（3）成層圏を含む・含まないモデルでの東西風の年々変動の再現性、（4）力学場・放射場の変化と対応した対流圏－成層圏大規模循環場の特徴を記述可能な方程式系の導出とデータ解析への適用、について研究を遂行した。

（1）地球温暖化時のQB0と成層圏大規模循環の変化

赤道準2年振動（QB0）は対流圏－成層圏結合を引き起こし、広範囲の力学・化学過程に影響を及ぼす為、気候変動を考える上で重要な気象現象の1つである。QB0は成層圏を含まない低解像度気候モデルではQB0を再現されず、CMIP3ではQB0を再現しているモデルは無かったため、AR4では温暖化に伴うQB0変化に対する記述は無かった。成層圏では、赤道域で上昇し、そこから南北両半球に広がり、高緯度では下降する、ブリューワー・ドブソン循環（BD循環）と呼ばれる大規模な循環が存在する。BD循環は人体に有害な紫外線を防ぐオゾンや、気候変動と関係する水蒸気などの大気微量成分を全球的に運ぶ働きがあり、極めて重要な地球規模の循環である。現在、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循環が強まることを予測している。地球温暖化は既に始まっており、実際にBD循環が近年強まっているかどうかを各種観測データ解析から検証する試みが行われてきた。しかしながら、BD循環に伴う赤道域上昇流は 0.3 mm s^{-1} 程度と非常に弱く、現在の観測技術ではその直接観測は不可能である。従ってBD循環が強まっている事を明示する観測データは無く、気候モデルの予測が正しいかどうかは十分に検証されていない状況が続いてきた。

QB0とBD循環に伴う赤道域上昇流は密接に関連し合っている。BD循環に伴う赤道域上昇流は、QB0が上から下に下りるのを妨げる働きをする。現在気候では、QB0は赤道上昇流に対抗しながら、高度約18kmに位置する対流圏界面付近まで下りている。しかしながら地球温暖化に伴って赤道域上昇流が強まると、QB0が対流圏界面付近まで十分に下りる事が出来なくなり、結果として高度19km付近のQB0は弱くなる。この地球温暖化に伴うQB0の変化は、最新の気候モデル研究で得られた知見である（Kawatani et al. 2011¹⁾, 2012²⁾）。これによって、東西風の観測データを用いて高度19kmにおけるQB0強度の変化を解析する事で、赤道域上昇流の長期変化を考察する事が可能になった。

（2）成層圏水蒸気の年々変動特性の解明

成層圏水蒸気は全球の放射強制力に寄与し、気候変動に重要な役割を果たしている。成層圏水蒸気量の変化が地表面温度の変化と対応していることを指摘する研究（Solomon et al. 2010, Science³⁾）もある。水蒸気はBD循環に沿って成層圏の幅広い範囲に運ばれる。対流圏から成層圏に運ばれる水蒸気の入口は、BD循環の出発点に相当する熱帯域対流圏界面にある。成層圏へ運ばれる水蒸気量は、対流圏界面の温度を関数とした飽和水蒸気圧に従って決まるため、熱帯圏界面

の温度変動は、成層圏水蒸気の変動に深く関わっている。10年程度前までは、成層圏水蒸気を高精度且つ長期間計測できる観測機器は無く、成層圏の水蒸気変動に関しては未知な部分が多く残されている。

(3) 成層圏を含む・含まないモデルでの東西風の年々変動の再現性

CMIP3では成層圏をフルカバーするハイトップモデル(モデル上端高度が50–60km以上)が無く、全てのモデルがロートップモデルに属していたのに対して、CMIP5では、少なくとも11研究機関14モデルがハイトップモデルとして参加している。成層圏を含む・含まないが顕著に現れる物理量として東西風が考えられる。

(4) 対流圏－成層圏大規模循環場の特徴を記述可能な方程式系の導出

対流圏－成層圏大規模循環において平均場と波動(渦)の相互作用を記述する方式として、変換オイラー平均(TEM)が広く用いられてきた。しかし、この方式は、減衰も成長もしない(中立性)波動が暗黙裡に仮定されていることが明らかになり、実際の大規模循環場への適用には更なる拡張が必要とされる。

2. 研究開発目的

(1) 地球温暖化時のQB0と成層圏大規模循環の変化

Kawatani et al. (2011)¹⁾の気候モデル実験で示された、地球温暖化に伴う下部成層圏QB0振幅の弱화가、現実大気に実際に現れているのかどうか、長年蓄積された観測データを用いて検証する。CMIP5では成層圏まで解像する気候モデルが登場したので、最初にCMIP5でQB0を再現しているモデルを抽出し、そのモデルを用いて同様な解析を行う。

(2) 成層圏水蒸気の年々変動特性の解明

2004年6月に打ち上げられたAura MLS衛星によって、これまでにない精度で成層圏水蒸気を測ることができるようになった。そこでMLSと気候モデルを組み合わせ、成層圏水蒸気の年々変動の実態とそのメカニズムを明らかにすることに取り組む。

(3) 成層圏を含む・含まないモデルでの東西風の年々変動の再現性

対流圏－成層圏の東西風の平均構造及び年々変動成分の再現性に対して、成層圏が果たす役割を調べる。さらにQB0の影響も調査する。

(4) 対流圏－成層圏大規模循環場の特徴を記述可能な方程式系の導出

従来の法では考慮されていなかった摩擦抵抗力・非断熱加熱と不安定・減衰波の効果を取り入れて一般化された方式(GTEM)を導く。

3. 研究開発方法

(1) 地球温暖化時のQB0と成層圏大規模循環の変化

ベルリン自由大学(FUB)が提供している1953年から2012年までの月平均東西風データを用いる。

データはKanton (3°S, 172°W)、Gan (1°S, 73°E)、Singapore (1°S, 104°E) の赤道近傍3点の月平均東西風から作成され、1953年1月から現在までのデータが揃っており、QB0研究で最も利用されている観測データである。本研究では更にIntegrated Global Radiosonde Archive (IGRA) で提供されているゾンデで観測された東西風データを利用した。IGRAには数多くの観測点データが含まれているが、多くの地点でデータサンプルが散在しており、連続的なデータは取られていない。10° S-10° Nの範囲に存在する220点全ての地点観測データを調べたところ、70hPaにおけるQB0振幅の長期トレンドを解析可能な観測地点はSingapore以外に、Chuuk (7° N, 152° E)、Koror (7° N, 135° E)、Majuro (7° N, 171° E)、Ponape (7° N, 158° E)、Penang (5° N, 100° E) の5点存在した。CMIP5についてはMPI-ESM-MR, HadGEM2-CC, MIROC-ESM-CHEM, MIROC-ESMの4種類のモデルがQB0の再現に成功していた。これらのhistorical及びrcp45実験の出力データを解析し、温暖化に伴うQB0の変化を調べた。得られたQB0変化が温暖化に伴うものかどうか更に検証する為、温暖化の影響が無い（例：CO₂濃度が一定）preindustrial control run (piControl run) のデータも合わせて解析する。

(2) 成層圏水蒸気の年々変動特性の解明

2004年8月から2014年1月までの約10年分のMLS水蒸気データを解析する。データは月平均及び帯状平均したものを用いる。最初にスペクトル解析を行い、各高度で水蒸気変動の卓越する周期を調べる。次にMIROC-AGCM気候モデルによる実験を行う。解像度はT106L72で、積分期間は30年間とする。成層圏水蒸気の年々変動に対する、メタン酸化の効果を調べるため、メタン酸化パラメタリゼーションを取り入れた実験と外した実験を行う。次にCMIP5モデルを用いて、成層圏水蒸気の年々変動の再現性を調査し、メカニズムの解明に迫る。

(3) 成層圏を含む・含まないモデルでの東西風の年々変動の再現性

CMIP5モデルを、成層圏をフルカバーするハイトップモデルと、フルカバーしないロートップモデルに分類する。対流圏－成層圏の東西風の平均構造及び年々変動成分を調べ、ハイトップ、ロートップモデルで差がみられるかどうかを調査する。さらにハイトップの中から、QB0を再現しているモデルを抽出し、QB0の再現性の影響を調べる。

(4) 対流圏－成層圏大規模循環場の特徴を記述可能な方程式系の導出

中立波に基づいて定式化された3次元TEM法 (Noda, 2010) ⁴⁾ に対して、摩擦抵抗力・非断熱加熱と不安定・減衰波の効果を取り入れて拡張したGTEM法を開発する。このGTEM法の有効性と新奇性を確認するために高解像度大気モデルによる気候シミュレーションを行い、出力データを用いてGTEM法による解析を行う。

4. 結果及び考察

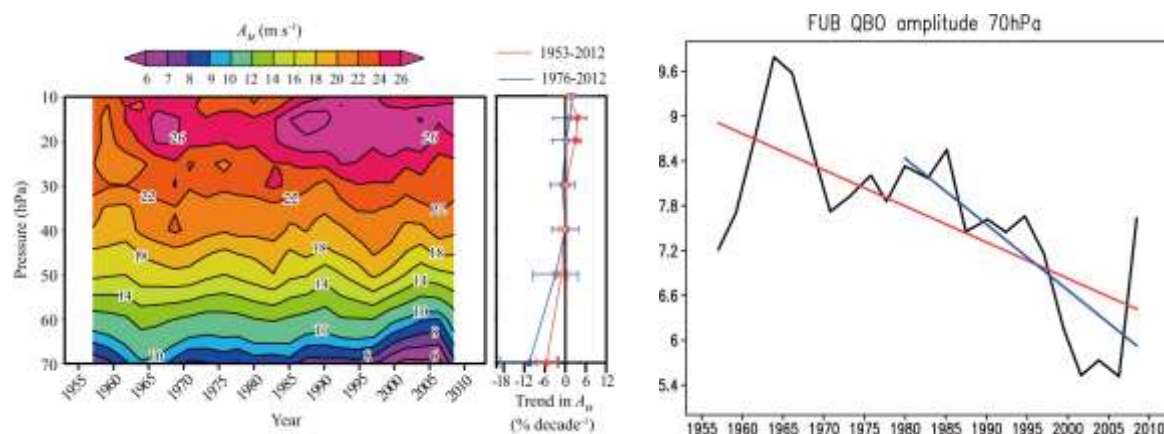
(1) 地球温暖化時のQB0と成層圏大規模循環の変化

図(5)-1に、観測データから計算されたQB0振幅の時間－高度断面図と、70hPa (高度約19km) におけるQB0の強さの時間変化を示す。QB0の強さは70hPaで統計的に有意な負のトレンドが見られる。この60年間に3割以上減少している事が新たに発見された。図(5)-2はChuuk、Koror、Majuro、Ponape、

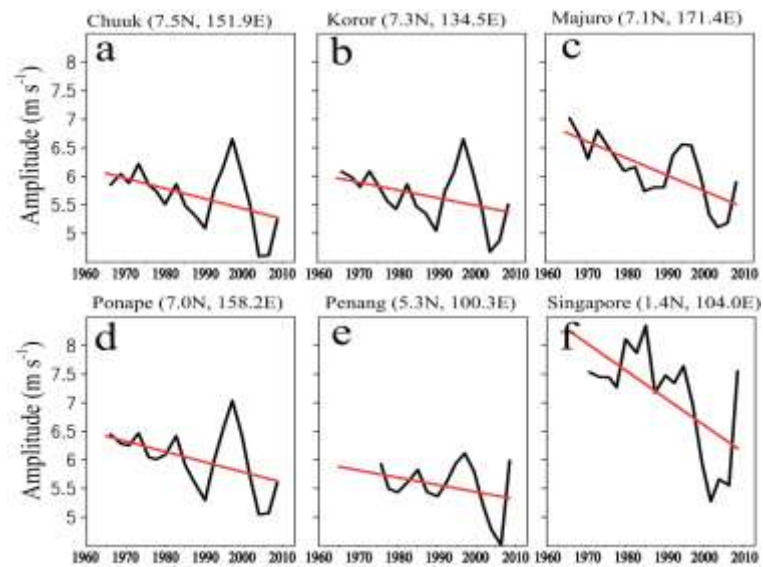
Penang、SingaporeにおけるQB0振幅の時間変化を示す。全ての地点でQB0振幅の弱化傾向がみられる。

次に同じ解析手法を用いてQB0の再現に成功しているCMIP5気候モデルデータを用いて、QB0と赤道域上昇流の長期変化を解析した。ここでは1900年から2100年までのデータを用いた結果を示す。1900年から2005年までは、観測データに基づいた温室効果ガスなどのデータを気候モデルに入れて計算し、2006年以降は温室効果ガス濃度の排出シナリオを与えて計算している。QB0を再現する事に成功しているドイツ、イギリス、日本の気候モデル（日本のモデルは2種類）による、高度19kmにおけるQB0強度と赤道域上昇流の変化を図(5)-3に示す。これら全てのモデルで20世紀から21世紀にかけてQB0が弱まり、赤道上昇流が強まっている。また、図(5)-4に温暖化を伴わない気候モデル実験データ結果を示す。QB0と赤道上昇流に有意な変化は見られず、QB0と赤道上昇流の変化は地球温暖化が原因である事が裏付けられた。

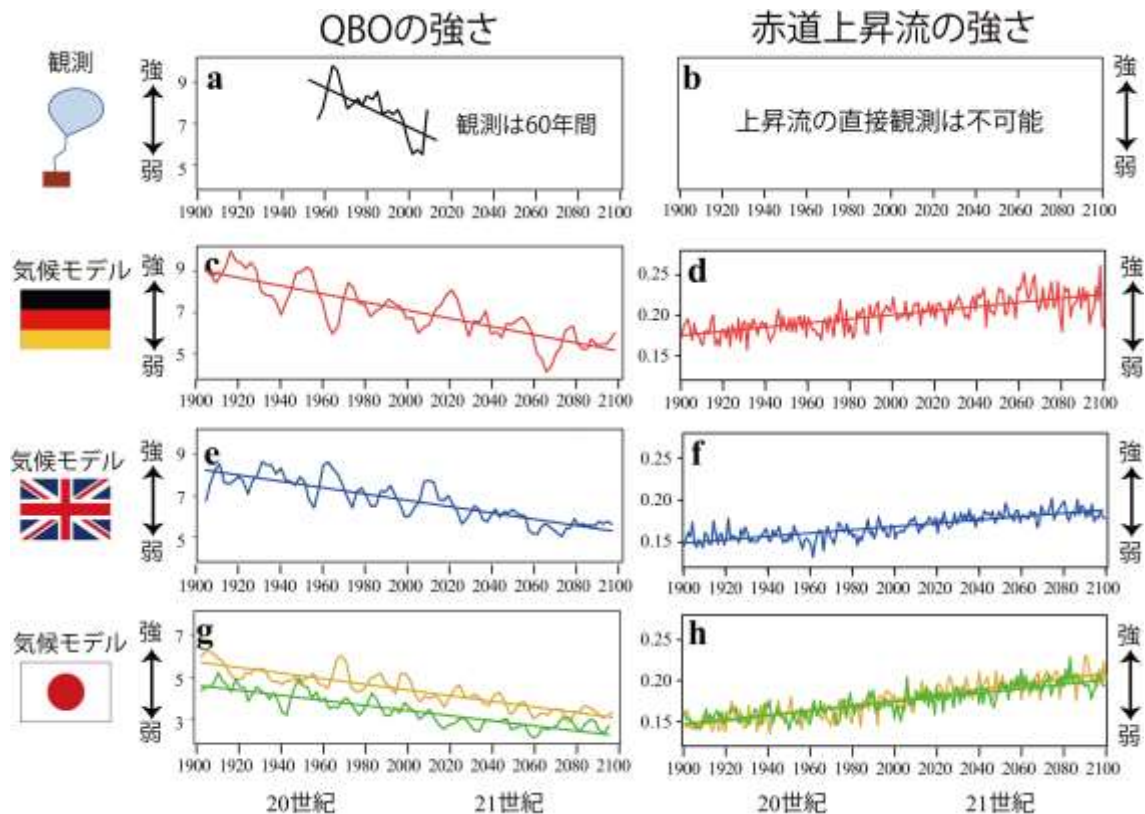
本結果は観測データを用いて、地球温暖化のシグナルが成層圏QB0という現象の変化として現れている事を示すとともに、今まで気候モデルで予測されていたBD循環の強化を、観測データから初めて立証した成果である。温暖化ガス増加による地球温暖化のシグナルは、成層圏では気温の低下として現れる事は周知である（IPCC評価報告書でも既に報告されている）が、QB0の弱化・BD循環の強化といった形でも既に現れていることが明らかになった。



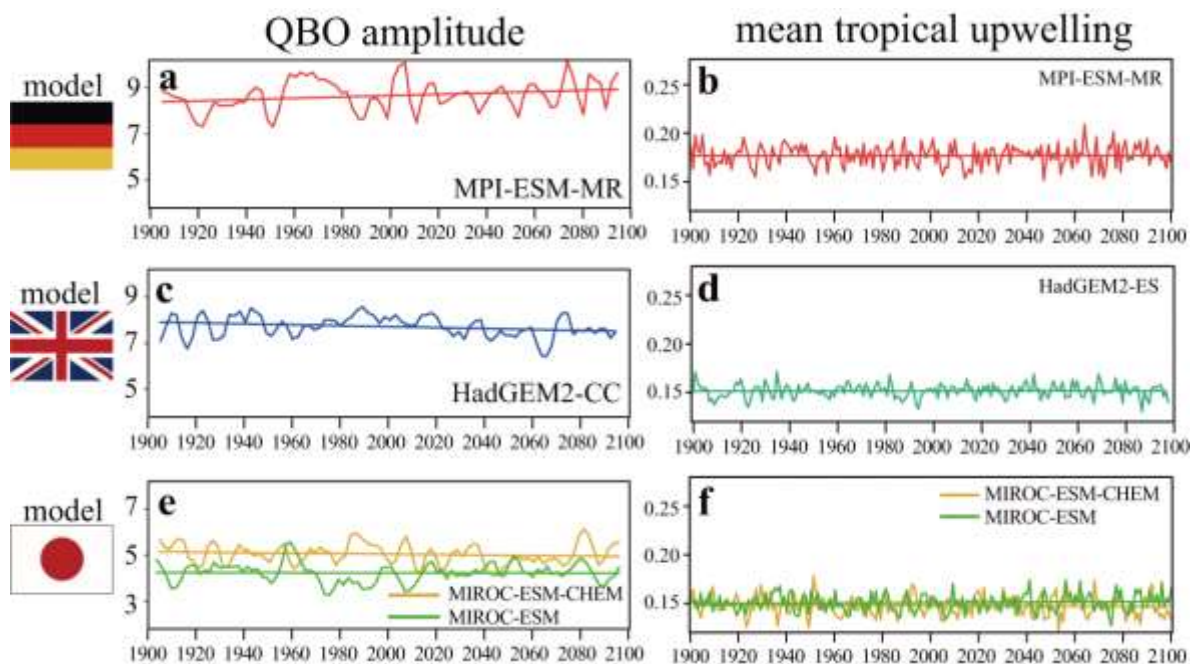
図(5)-1 (左) 成層圏QB0振幅の時間－高度断面図。右のプロファイルは振幅のトレンドを示す。赤線が1953年－2012年、青線が1976年－2012年。有意なトレンドは黒丸で示している。70hPaで有意な負のトレンドが見られる。(右) 70hPaにおけるQB0振幅の時間変化。



図(5)-2 Chuuk, Koror, Majuro, Ponape, Penang, Singaporeの高度70hPaにおけるQBO振幅の時間変化。全ての地点でQBO振幅が弱まっている事が分かる。



図(5)-3 高度約19kmにおける（左）QBOと（右）赤道域上昇流の変化。(a, b)が観測データ、(c, d)がドイツ、(e, f)がイギリス、(g, h)が日本の気候モデルによる計算結果。縦軸の値が大きいほど、（左）QBOに伴う西風・東風の風速、（右）上昇流が大きい事を意味する。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る様子が見られる。



図(5)-4 図(5)-3と同様。ただし温暖化を伴わないコントロール実験。

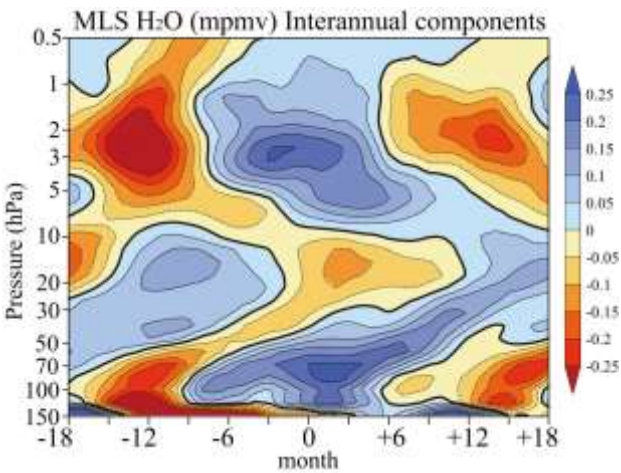
(2) 成層圏水蒸気の年々変動特性の解明

スペクトル解析から成層圏水蒸気の年々変動成分は、下部成層圏から上部成層圏に掛けてQBO成分が卓越することが分かった。従ってQBOの位相を基準としたコンボジット解析を行った。図(5)-5に成層圏水蒸気の年々変動成分の時間-高度断面図を示す。赤道域上部成層圏では時間と共に下方伝播する水蒸気偏差の存在が発見された。一方で赤道域上部対流圏から下部成層圏にかけては、上方伝播する成分が卓越している。次に得られた現象について、MIROC-AGCM(東京大学、国立環境研究所、独立行政法人海洋研究開発機構が開発されてきた大気気候モデル)実験及びCMIP5に参加した世界の気候モデルを用いてそのメカニズムの解明を試みた。上部成層圏では成層圏水蒸気過程をきちんと取り込んだモデルのみ、観測と同様な水蒸気年々変動成分が得られることが判明した。上部成層圏の年々変動成分に関しては、上部成層圏の赤道準2年振動(QBO)が引き起こす2次の鉛直循環と、メタンの酸化によって上部成層圏で水蒸気が作られる効果の掛け合わせによって説明できることが分かった。図(5)-6は4種類のCMIP5モデルで再現された成層圏水蒸気の年々変動成分の時間-高度断面図。各図の右のグラフは、衛星観測(黒)とモデルの長期平均された水蒸気の鉛直プロファイルを示す。上部成層圏で下方伝播する年々変動の再現性は、水蒸気の平均鉛直プロファイルに依存しており、時間平均水蒸気量の鉛直プロファイルが現実的であるモデルは年々変動成分が大きく、鉛直勾配を過小評価しているモデルは、年々変動成分も過小評価していることが分かる。

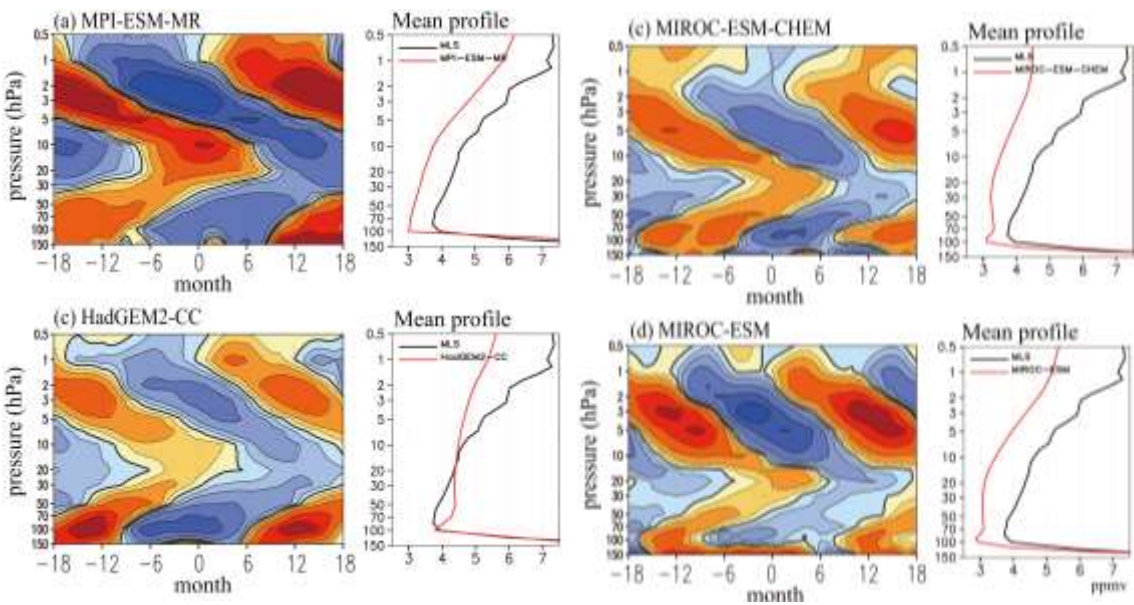
一方、下部成層圏の年々変動成分に関しては、対流圏界面まで下りてきたQBOが、その場所で温度偏差を作ることによって引き起こされていた。すなわちQBO振幅に伴う対流圏界面の温度偏差が暖かく(冷たく)なる時に、より多くの(少ない)水蒸気量が成層圏へと運ばれ、下部成層圏における水蒸気の年々変動と、対流圏界面付近でのQBO振幅との間に高い相関があることが明らかになった。図(5)-7に各気候モデルの高度100hPaにおける温度と水蒸気、及び高度70hPaにおける水

蒸気の年々変動成分の時間変化を示す。QB0に伴う高度100hPaの温度変動が大きいモデルほど、100hPaの水蒸気変動が大きく、それが下部成層圏70hPaの水蒸気変動を決定していることが分かる。

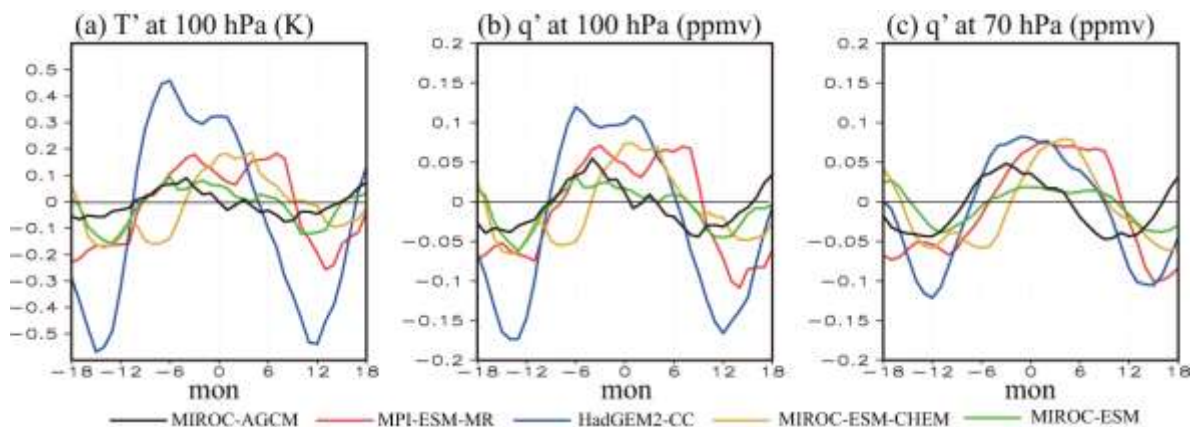
Kawatani and Hamilton (2013)⁵⁾では、下部成層圏最下層のQB0振幅が、過去数十年にわたって弱まっている事を世界で初めて発見したが、本研究により、温暖化に伴うQB0変化が、具体的に他の現象に与える影響を示すことができた。すなわち、温暖化に伴って成層圏最下層のQB0振幅が弱まることで、QB0を介した対流圏－成層圏結合も弱まり、対流圏から成層圏へ上方伝播する水蒸気変動を弱めることになる。成果はKawatani et al. (2014)⁶⁾として発表した。



図(5)-5 成層圏水蒸気の年々変動成分の時間－高度断面図。東西風で見たQB0の位相が高度30hPaで西風から東風に変わる月を基準にコンポジットを施した。青（赤）色は水蒸気が多い箇所を示す。



図(5)-6 4種類のCMIP5モデルで再現された成層圏水蒸気の年々変動成分の時間－高度断面図。各図の右のグラフは、衛星観測（黒）とモデルの長期平均された水蒸気の鉛直プロファイルを示す。

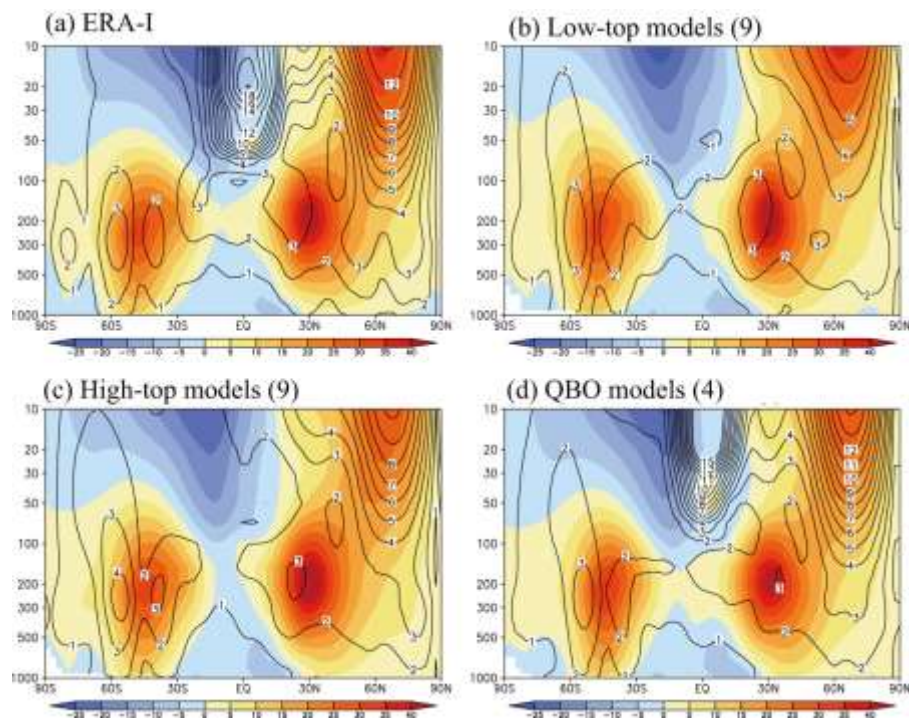


図(5)-7 各気候モデルの100hPaにおける(a)温度、(b)水蒸気、(c)70hPaにおける水蒸気の年々変動成分の時間変化。

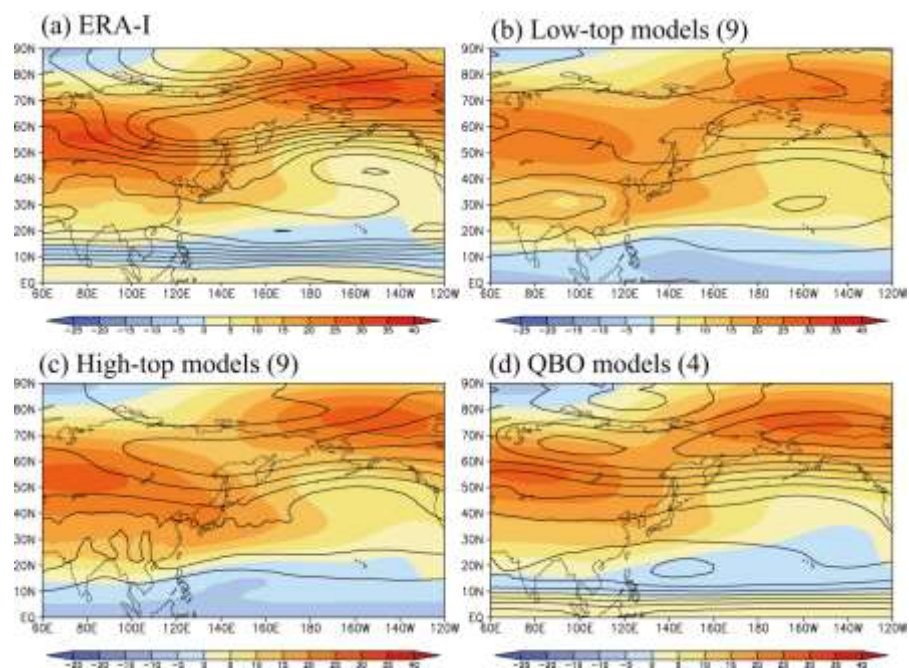
(3) 成層圏を含む・含まないモデルでの東西風の年々変動の再現性

図(5)-8に1月における帯状平均東西風と年々変動成分の緯度－高度断面図を示す。比較の為の観測データとしてERA-Iの再解析データを用いた。ロートップモデルでは、北半球の極夜ジェットの変動をかなり過小評価している。またERA-Iでみられる北緯60-70度の大きな年々変動成分が、対流圏まで十分に下りてきていない様子が分かる。一方ハイトップモデルでは極ジェットの変動の再現性が改善されている。更にQB0を再現しているハイトップモデルでは、赤道域成層圏に加えて北半球高緯度10hPa付近の年々変動成分の再現性がかなり良くなっている。一方で長期平均した東西風の構造には有意な差は見られなかった。モデル上端より物理過程の影響が大きいと考えられる (cf. Manzini et al. 2014⁷⁾)。

図(5)-9に高度50hPaの1月における東西風と年々変動成分のアジア域水平マップを示す。赤道域の変動の再現性の優劣は、QB0を含むハイトップモデル、QB0を含まないハイトップモデル、ロートップモデル、と位置づけられる。また高緯度域の変動も同様に位置づけられる。帯状平均場のみならず、日本域北側での年々変動成分も、成層圏が入る事で現実的になることが分かった。これらの結果から、成層圏の有無は、東西風の基本場には影響を与えない、もしくは異なる物理過程を用いている影響の方が強く出て見られない、ということが考えられる。一方で年々変動成分については、成層圏の有無が決定的であり、年々変動の大きさを考察するには成層圏を入れる事が必要不可欠であると言える。



図(5)-8 1月における帯状平均東西風（色）と年々変動成分（コンター）の緯度－高度断面図。
 (a)ERA-I、(b)ロートップモデル、(c)QBOを再現していないハイトップモデル、(d)QBOを再現しているハイトップモデル。



図(5)-9 高度50hPaの1月における東西風（色）と年々変動成分（コンター）のアジア域水平マップ。
 (a)ERA-I、(b)ロートップモデル、(c)QBOを再現していないハイトップモデル、(d)QBOを再現しているハイトップモデル。

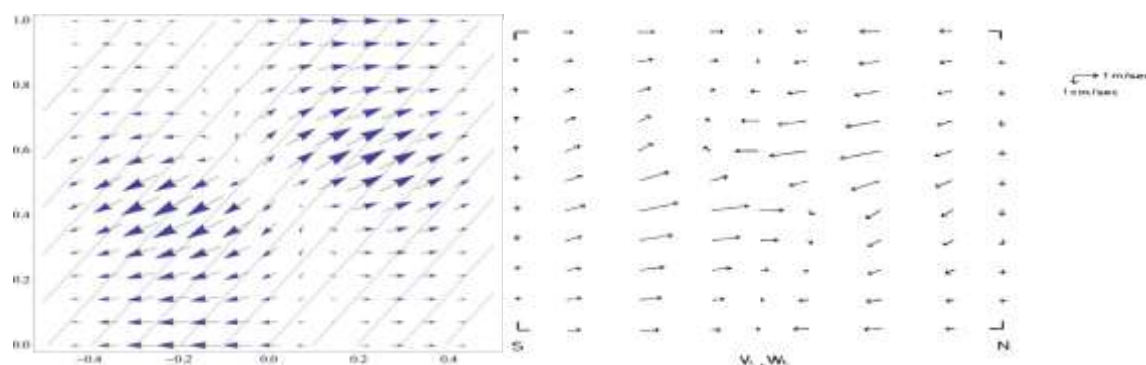
(4) 対流圏－成層圏大規模循環場の特徴を記述可能な方程式系の導出

従来の変換Euler 法では考慮されていなかった摩擦抵抗力・非断熱加熱と不安定・減衰波の効果を取り入れて一般化されたGTEMを導出した(Noda, 2014)⁸⁾。GTEM のエッセンスは、 Boussinesq 流体について、WKB 近似の非中立波（周波数・波数が複素数）を仮定すると、渦運動量輸送を表す Reynolds ストレステンソルと熱（温位）渦輸送フラックスベクトルが

Reynolds ストレスの水平成分＝（反対称渦拡散テンソルによる拡散）＋（対称渦拡散テンソルによる拡散）＋（Eliassen-Palmフラックス）＋（渦摩擦フラックス）
熱渦輸送フラックス＝（反対称渦拡散テンソルによる拡散）＋（対称渦拡散テンソルによる拡散）
＋（渦非断熱加熱フラックス）

の形で得られ、渦拡散テンソル、Eliassen-Palm (EP) フラックス (テンソル)、浮力フラックスが、周波数・波数を陽に含まずに、速度、温位の擾乱の共分散量と摩擦抵抗力・非断熱加熱擾乱の Hilbert 変換渦フラックス、及び、基本場の傾きの関数として代数的に求まることにある。従来の TEM では、渦拡散テンソルの反対称部分のみを考慮し、対称部分を無視又は EP フラックスとして E に繰り込まれていた。

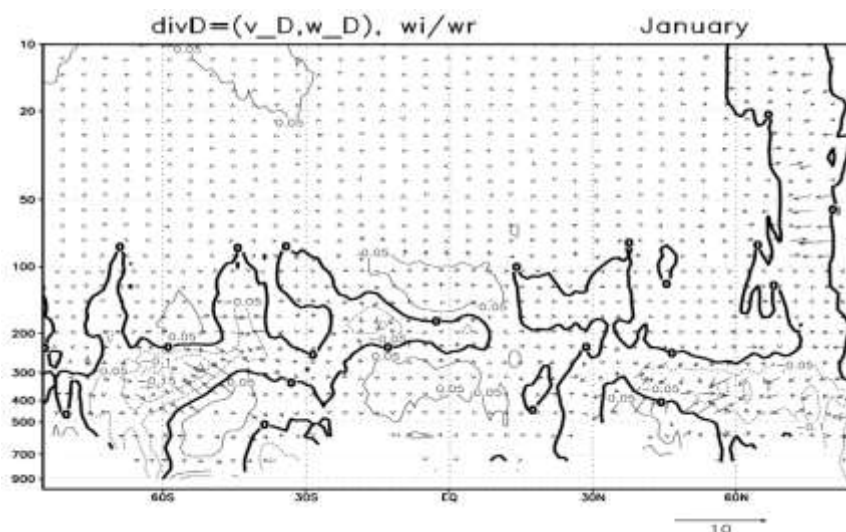
平均基本場の運動方程式、熱力学方程式において、渦拡散テンソルの発散は、渦輸送速度ベクトルとしての効果を持つ。GTEM法の特徴を最も顕著に示す例として、理論的な傾圧不安定波に適用し手得られた渦輸送速度ベクトルと、ラグランジュ的な平均速度ベクトルを図(5)-10に示す。中立波を仮定した従来のTEMでは、渦輸送速度ベクトルとラグランジュ的な平均速度ベクトルはほぼ一致するが、不安定性が強いと、速度ベクトル場が発散的になり、かつ、向きが逆になることがわかる。



図(5)-10 傾圧不安定波により励起される東西平均子午面流。左) GTEM法、右) ラグランジュ的平均 (Uryu, 1979)。子午面流の大きさはほぼ同じだが、向きが逆転しているのが分かる。

次に、実際のデータ解析への応用例を示す。気候モデルMIROC の大気部分 (T106、72 層) を用いた長期気候積分の1 年分について、通常の変数に加え摩擦抵抗力と加熱項を含む毎時間データを出力し、ここでは1 月のデータについて、GTEM法 の静力学近似の解析結果を示す。図(5)-11に図(5)-10に対応する対称渦拡散テンソルの発散ベクトル場と特徴的平均周波数の実数部と虚数部の比を示す。虚数部の符号は対称渦拡散テンソルの固有値の符号と一致する。負の渦拡散の領域は平均基本場の傾度を強めるような渦フラックスが生じている事を意味する。極夜ジェットの

局側や傾圧不安定帯では、負の渦拡散が生じている。そこでは、図(5)-10の不安定波の場合とは逆に、速度場の収束が見られる。



図(5)-11 GTEM法に基づく1月の平均子午面循環：対称渦拡散テンソルの発散による移流速度と特徴的周波数の実数部と虚数部の比(太線は零等値線)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

BD循環の変化はオゾンの全球的な輸送とも深く関わっている。オゾンは大気中の酸素分子が太陽紫外線によって酸素原子に光解離され、生成した酸素原子が周りの酸素分子と化学反応を起こすことによって生成される。従ってオゾンは太陽紫外線の強い低緯度成層圏で主に生成される。生成されたオゾンはBD循環の流れに沿って中高緯度へ運ばれる。つまり赤道域のオゾン量を減らし、中高緯度のオゾン量を増やす方向に働く。地球温暖化に伴いBD循環が強化されると、より多くのオゾンが熱帯から中高緯度へ運ばれる為、オゾンホールが回復する方向に働きかける（ただし、オゾンホールの形成には、BD循環の強度以外に、オゾン破壊物質やオゾンの化学的な消滅量を規定する成層圏の気温の変化、また極渦の強さや成層圏突然昇温等の大気の内変動とも深く関連する為、BD循環だけでは決定されないことに注意）。これまで行われてきたオゾン層将来予測モデルを使った研究により、将来のオゾン破壊物質の減少に加えて、温室効果ガス増加によるBD循環の強化と成層圏寒冷化に応じて、将来のオゾン層回復の時期が変わることが指摘されている。BD循環の変化に関する新しい知見は、このようなオゾン層回復時期・程度に関する知見に定量的な示唆を与えて修正する可能性があると考えられる。

観測データを用いて地球温暖化のシグナルがQB0という現象に現れている事を示すと共に、今まで気候モデルで予測されていたBD循環の強化について、観測データから世界で初めて立証した成果である。本研究結果によって、例えば、世界的に注目されているオゾンホールについて、オゾンは主に赤道域成層圏で多く生成され、BD循環の流れに沿って南北両半球へ運ばれるので、BD循環の強化は、より多くのオゾンが赤道域から中高緯度へ運ばれる事になり、オゾンホールが回復する方向に働きかける可能性を論理的に示している。

大きな放射強制力を持つ故に、気候変動に重要な役割を果たす成層圏水蒸気の年々変動につい

て、その実態を示しメカニズムの解明をしたことや、中高緯度で成層圏から対流圏まで伸びる東西風の年々変動の再現性には成層圏を含む必要を示した科学的意義は大きい。また、新たなGTEM解析法により、現実的な波動と平均場の相互作用について、理論的に予想された負の渦拡散の効果を初めて定量的に取り扱うことが出来るようになったことの科学的意義も大きい。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

<行政が活用することが見込まれる成果>

地球温暖化による成層圏循環の応答を初めて観測から実証した。更に温暖化影響の正確な把握には成層圏現象を正しく表現できる気候モデルの利用が必要不可欠なことを示した。これはオゾンホール回復のための政策にも重要である。

6. 国際共同研究等の状況

Scott Osprey博士(英国オックスフォード大学)、Neal Butchart博士(英国ハドレーセンター)、Kevin Hamilton教授(米国ハワイ大学)が主責任者として進められている、気候モデルQB0国際比較プロジェクト(QB0i)に主要メンバーとして参画し、共同研究を進めている。本研究で行った地球温暖化時のQB0変化に関する成果ではこのプロジェクトをリードしている。成層圏再解析比較国際プロジェクト(S-RIP)のQB0部門(英国オックスフォード大学のLesly Grey教授及びJames Anstey博士がLeads)にcontributorsとして参画。本研究で得られた温暖化に伴うQB0振幅及び成層圏BD循環の変化について、各再解析データを評価している。

7. 研究成果の発表状況 ※【別添】H26年度研究等成果報告書作成要領 参照

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. KAWATANI and K. HAMILTON: Nature, 497, 478-481, (2013)
“Weakened stratospheric Quasibiennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling”
- 2) Y. KAWATANI, J. N. LEE and K. HAMILTON: J. Atmos. Sci., 71, 4072-4985, (2014)
“Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations”
- 3) A. NODA: J. Meteorol. Soc. Jpn, 92, 411-431, (2014)
“Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids”

<査読付論文に準ずる成果発表>

- 1) 河谷芳雄: パリティ、丸善、vol.29、No.04, 44-48 (2014)
“クローズアップ「成層圏に地球温暖化シグナルを発見！」”

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

（２）口頭発表（学会等）

※発表済みのもの又は確実に発表する予定のものにとどめること。発表年順（古→新）に並べること。

- 1) 野田彰：日本気象学会2012年度春季大会（2012）
「非中立波動に基づいて一般化されたTEM（GTEM）-不安定Eady 波への応用-」
- 2) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：第4回熱帯気象研究集会（2012）
「種々のデータに現れた赤道準2年振動の変化」
- 3) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：日本気象学会2012年度秋季大会（2012）
「種々のデータに現れた赤道準2年振動の変化」
- 4) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：研究集会「週間及び1か月予報における顕著現象の予測可能性」（2012）
「種々のデータに現れた赤道準2年振動の変化」
- 5) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：2地球流体における流れのスケール間相互作用の力学（2012）
「赤道準2年振動の変化と赤道域上昇流」
- 6) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：九州大学大気流体セミナー（2012）
「ゾンデ観測とCMIP5モデルに現れた赤道準2年振動の長期トレンド」
- 7) Y. Kawatani and K. Hamilton：International Workshop on CMIP5 Model Intercomparisons for Future Projections of Precipitation and Climate in Asia, Tsukuba, Japan, 2013
“Quasi Biennial Oscillation and tropical mean upwelling changes in observation and CMIP5 models”
- 8) 河谷芳雄：日本気象学会2013年度春季大会（2013）
「複数のゾンデ観測及びCMIP5モデルに現れた赤道準2年振動の長期トレンド」
- 9) 河谷芳雄、Kevin Hamilton：地球惑星科学連合2013年度連合大会（2013）
「赤道準2年振動と赤道域上昇流の長期トレンド」
- 10) 河谷芳雄：九州大学理学部地球惑星科学教室談話会（2013）
「成層圏で新たに発見された地球温暖化シグナル」
- 11) 河谷芳雄、Kevin Hamilton, Jae N. Lee：第14回地球流体力学研究集会（2013）
「熱帯成層圏における水蒸気の年々変動」
- 12) Y. Kawatani and K. Hamilton：SPARC General Assembly, Queenstown, New Zealand (2014)
“Weakening stratospheric quasibiennial oscillation and trends in tropical mean upwelling”
- 13) Y. Kawatani, Jae N. Lee. and K. Hamilton：PANSY meeting, Tokyo, Japan, (2014)
“Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations”
- 14) 河谷芳雄、Kevin Hamilton, Jae N. Lee：地球惑星連合大会2014（2014）

「衛星観測と気候モデルを用いた成層圏水蒸気の年々変動」

- 15) Y. Kawatani, Jae N. Lee. and K. Hamilton: AOGS2014, Sapporo, Japan (2014)
 “Interannual Variations of Stratospheric Water Vapor in Microwave Limb Sounding Observations and Climate Model Simulations”
- 16) 河谷芳雄, Kevin Hamilton, Jae N. Lee : 熱帯気象研究会 (2014)
 「Interannual Variations of Stratospheric Water Vapor in Microwave Limb Sounding Observations and Climate Model Simulations」
- 17) 野田彰 : 日本気象学会2014年度秋季大会 (2014)
 「波に誘起された渦拡散テンソルとStokes ドリフトの関係」
- 18) A. Noda and Y. kawatani: AGU Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., 2014
 “Relationship between wave-induced diffusion tensor and Stokes drift for Unstable Waves”
- 19) Y. Kawatani: QBO modeling and Reanalysis workshop, Victoria, Canada, (2015)
 “The QBO amplitude in radiosonde observations and seven reanalysis data”
- 20) Y. Kawatani: Third International Workshop on “Studies on future climate projection of the Asian region utilizing the CMIP5 multi-model ensemble data”, Tokyo, Japan, (2015)
 “Seasonal and interannual variations of middle atmospheric water vapor in MLS observations and climate model simulations”

(3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

(4) 「国民との科学・技術対話」の実施

- 1) (独) 海洋研究開発機構施設一般公開のサイエンスカフェ (主催: 海洋研究開発機構、2013年10月12日、海洋研究開発機構横浜研究所、聴講者約100名) 「雲より高い場所で地球温暖化のシグナルが見つかった!」を講演

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表 (2013年5月22日掲載、於文部科学省記者クラブ、「地球温暖化に伴う赤道準2年振動の弱化傾向を発見ー地球規模の流れの変化を立証する新たな観測的知見ー」)
- 2) 毎日新聞 (2013年6月7日掲載、朝刊16面、「赤道上空、東西の風弱まる」)
- 3) 産経新聞 (2013年6月3日掲載、朝刊17面「温暖化で赤道上空の成層圏東西風弱まる」)
- 4) 朝日新聞 (2013年5月23日掲載、朝刊37面「温暖化でオゾンホール縮小か 海洋研究開発機構が解析」)
- 5) 日刊工業新聞 (2013年5月23日掲載、朝刊19面、「赤道域の東西風 60年で3分の1 海洋機構」)
- 6) 電気新聞 (2013年5月23日掲載、朝刊1面、「地球温暖化の原因 赤道から南北へ 成層圏 風強まる 海洋研とハワイ大が立証」)
- 7) 日経産業新聞 (2013年5月23日掲載、朝刊11面、「成層圏 空気の流れ変化 海洋機構など温

暖化響く」)

- 8) 東奥日報新聞 (2013年5月23日掲載、朝刊23面、「温暖化で東西風弱まる 赤道上空の成層圏極方向には強化 日本研究チーム 「オゾン層予測に有効」)
- 9) 科学新聞 (2013年5月31日掲載、朝刊4面、「温暖化が成層圏の流れ強化 -海洋機構がシミュレーション解析- オゾンホール縮小に寄与?」)
- 10) 共同通信 (2013年5月23日配信、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 11) 時事通信 (2013年5月23日配信、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構など」)
- 12) 東京新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 13) 北海道新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 14) 東奥新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 15) 中日新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 16) 京都新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 17) 西日本新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 18) 中国新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 19) 愛媛新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 20) 新潟日報web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 21) 下野新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 22) 神戸新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 23) 山陰中央新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 24) 長崎新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 25) 大分合同新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 26) 日本海新聞web版 (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 27) Yahoo!ニュース (2013年5月23日掲載、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構など」)
- 28) infoseekニュース (2013年5月23日掲載、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構など」)
- 29) 世界日報 (2013年5月23日掲載、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構などがネイチャー誌に発表」)
- 30) ウォール・ストリート・ジャーナル (2013年5月23日掲載、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構など」)
- 31) exciteニュース (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 32) サーチナ (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 33) マイナビニュース (2013年5月23日掲載、「成層圏の「赤道準2年振動」は過去数10年弱まり続けている - JAMSTECなど」)
- 34) ジョルダンニュース! (2013年5月23日掲載、「赤道高空の東西風弱まる＝温暖化で上昇流強く－気象に影響か・海洋機構など」)
- 35) WEBジャーナルOPTRONICS (2013年5月23日掲載、「海洋研、地球温暖化に伴う赤道準2年振動の弱化傾向を発見」)

- 36) MY J:COM (2013年5月23日掲載、「成層圏、温暖化で東西の風弱まる 赤道上空」)
- 37) MSN産経ニュース (2013年6月3日掲載、「温暖化で赤道上空の成層圏東西風弱まる」)
- 38) Science Daily (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 39) PHYS ORG (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 40) ScienceNewsline (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 41) TGDAILY (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 42) EurekAlert (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 43) Alternative Fuse (2013年5月22日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 44) TERRA DAILY (2013年5月24日掲載、「Tropical Upper Atmosphere 'Fingerprint' of Global Warming」)
- 45) Summit Country Voice (2013年5月25日掲載、「Study tracks greenhouse gas fingerprint in tropical atmosphere」)
- 46) Futra Sciences (2013年5月27日掲載、「Le changement climatique laisse son empreinte dans la stratosphere」)

(6) その他

7. (1)に記載した、

A. Noda: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 411-431, (2014)

“Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids”

が2014年気象集誌論文賞 (JMSJ award) を受賞した。

8. 引用文献

- 1) Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe, 2011: The Quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate, J. Atmos. Sci., 68, 265-283.
- 2) Kawatani, Y., K. Hamilton and A. Noda, 2012: The effects of changes in sea surface temperature and CO₂ concentration on the quasi-biennial oscillation, J. Atmos. Sci., 69, 1734-1749.
- 3) Solomon S., K. H. Rosenlof, R. W. Portmann, J. S. Daniel, S. M. Davis, T. J. Sanford and G-K Plattner, 2010: Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming, Science, 327, 1219-1223.
- 4) Noda, A., 2010: A general three-dimensional transformed Eulerian mean formulation, SOLA, 6, 85-88.
- 5) Kawatani, Y. and K. Hamilton, 2013: Weakened stratospheric Quasibiennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling, Nature, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140.

- 6) Kawatani, Y., J. N. Lee and K. Hamilton, 2014: Interannual variations of stratospheric water vapor in MLS observations and climate modelsimulations, *J. Atmos. Sci.*, 71, 4072-4085.
- 7) Manzini, E., A. Yu. Karpechko, J. Anstey, M. P. Baldwin, R. X. Black, C. Cagnazzo, N. Calvo, A. Charlton-Perez, B. Christiansen, Paolo Davini, E. Gerber, M. Giorgetta, L. Gray, S. C. Hardiman, Y.-Y. Lee, D. R. Marsh, B. A. McDaniel, A. Purich, A. A. Scaife, D. Shindell, S.-W. Son, S. Watanabe, G. Zappa, 2014: Northern winter climate change: Assessment of uncertainty in CMIP5 projections related to stratosphere-troposphere coupling, *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 7979-7998.
- 8) Noda, A., 2014: Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids, *J. Meteor. Soc. Japan*, 92, 411-431.

Studies on future climate projection of the Asian region utilizing the CMIP5 multi-model ensemble data

Principal Investigator: Yukari TAKAYABU

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: Meteorological Research Institute, Tsukuba University, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[Abstract]

Key Words: CMIP5, Global warming, Extreme Precipitation in Baiu Season, Sea Surface Temperature, Asia Monsoon, Subtropical Jet, Cold Air Outflow, Madden-Julian Oscillation (MJO), Typhoon, Stratospheric Large-Scale Circulation

In order for an adequate adaptation policy, concrete information on impacts of the global warming is necessary. The global warming can be noticed more directly through changing states of weather phenomena, such as typhoons, extratropical cyclones, Baiu, extreme precipitation, droughts, heat waves, etc. Moreover, as we have experienced through the floods in Thailand in 2011, climate change in various regions of Asia can place large impacts on society and economy in Japan.

In 2013, the Fifth Assessment Reports of the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC AR5) was issued. In order for future projections of the global climate, Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) was called, and with collaborations of more than fifty climate models from all over the world, experimental runs on historical climate and on future projections were assembled. Tremendous efforts of thousands of scientists were aggregated in IPCC AR5 to provide the physical basis, impacts, and to find pathways for adaptation and mitigation of the global warming. Still, however, we find that regional information of how the climate change will be actualized in Asia, is not sufficiently provided. Uncertainty is especially large for future changes in terms of precipitation.

In this study, we aimed to clarify how various weather phenomena in Japan and Asia will change associated with the global warming, utilizing CMIP5 data and accumulated observational data, and to convey results to the public in plain words. We especially focused on phenomena related to precipitation in Asia, changes of which should have huge impacts on our society. This study consists of five sub-themes: 1) Research on intense precipitation and large-scale environment in Asia, 2) Research on

seasonal change of precipitation in Asia and its relationship to land and ocean surface conditions, 3) Research on conveying climate model information to downscaling studies, 4) Research on effects of tropical convections to the East-Asian precipitation and their future, and 5) Research on the troposphere-stratosphere circulations and future Asian Climate.

Results are published in 33 peer-reviewed papers in distinguished international scientific journals, including Nature, and presented in 198 papers at international and domestic meetings. During the three-year project, we hosted three international workshops on climate change, inviting outstanding experts from abroad in this field. Finally, selected results are published with plain words for general public in a booklet, named “It’s Not Only Warming: Future Projections of Precipitation in Japan and the East Asia, with Climate Models in the World”.