

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

地球温暖化に伴う気候変動と日本・東アジア域の降水現象の変化に関する研究
(2-1503)

平成27年度～平成29年度

Studies on Possible Changes of Climate and Precipitation Systems in East Asia
and Around Japan Associated with the Global Warming

〈研究代表機関〉

東京大学

〈研究分担機関〉

国土交通省気象庁 気象研究所

北海道大学

岡山大学

国立研究開発法人 海洋研究開発機構

〈研究協力機関〉

国立研究開発法人 国立環境研究所

国土交通省気象庁 地球環境・海洋部

三重大学

弘前大学

平成30年5月

目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響 （東京大学、国立研究開発法人国立環境研究所、三重大学、弘前大学）	31
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-2 CMIPデータを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化	67
（国土交通省気象庁気象研究所、国土交通省気象庁地球環境・海洋部）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
II-3 水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明 （北海道大学）	86
要旨	
1. はじめに	

2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-4 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明・・・・・・・・・・ 105 (岡山大学)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-5 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明・・・・・・・・・・ 121 (国立研究開発法人海洋研究開発機構、国土交通省気象庁気象研究所)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況
8. 引用文献

II-6 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響・・・・・・・・・・ 137 (国立研究開発法人海洋研究開発機構)

要旨

1. はじめに
2. 研究開発目的
3. 研究開発方法
4. 結果及び考察
5. 本研究により得られた成果
6. 国際共同研究等の状況
7. 研究成果の発表状況

8. 引用文献

III. 英文Abstract	• • • • • 154
-----------------	---------------

I. 成果の概要

課題名 2-1503 地球温暖化に伴う気候変動と日本・東アジア域の降水現象の変化に関する研究
 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27～29年度
 累計予算額 110,090千円（うち平成29年度：36,064千円）

予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 地球温暖化、気候変動、日本・東アジア域、降水、衛星搭載降水レーダ、気候モデル、黒潮、アジアモンスーン、ジェット気流、対流圏－成層圏相互作用

研究体制

- (1) 温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響（東京大学）
- (2) CMIPデータを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化（国土交通省気象庁気象研究所）
- (3) 水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明（北海道大学）
- (4) 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明（岡山大学）
- (5) 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明（国立研究開発法人海洋研究開発機構）
- (6) 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響（国立研究開発法人海洋研究開発機構）

研究協力機関

国立研究開発法人国立環境研究所、国土交通省気象庁地球環境・海洋部、三重大学、弘前大学

1. はじめに（研究背景等）

近年、日本での記録的豪雨豪雪による被害の頻発、東アジア域の降水・干ばつの異常の報告など、地球温暖化の影響による降水の異変が懸念されている。2013年に発行されたIPCC第5次評価報告書の中では、温暖化に伴い気温はほぼ全球で上昇するが降水は地域差のある複雑な変化をすると指摘されているが、地域別の降水の将来変化についてはまだ科学的知見が不十分である。特に、日本・東アジア域は、ユーラシア大陸と太平洋の境に位置し、気象は、大陸と海洋、中緯度と熱帯の多方面からの影響を受け、気候変化に対する応答が大変複雑で敏感な可能性がある。国民の安全と持続可能な社会の実現のため、温暖化に伴う気象と降水の変化の可能性を把握した対策が喫緊に必要である。

そのためには、気候変動に伴う大循環の変化と日本・東アジア地域での降水現象の変化との関係について集中的に調べ、有効な気候変動影響対策に生かすための情報を抽出する必要がある。本研究では特に以下の問題について焦点をあて科学的に調査する。(1)梅雨期や秋雨期の雨は時において東アジア域に豪雨をもたらす。この時期の降雨特性がジェット気流などの大規模場いかに依存するか。さらに、海水温の大規模分布とその変化が、ローカルな影響と遠隔影響を通して東アジア域の降水をいかに変化させるか。(2)東アジア域の降水とその変化が、アジアモンスーンの構造やその再現性および変化とどのように関係しているか。(3)対流圏上層ジェット気流が季節・気候変化に伴っていかに変化するか。その変化が降水に結びつく対流圏下層循環にいかなる効果をもたらすか。(4)北極圏雪氷は温暖化に伴う顕著な減少が報告されている。北極圏雪氷の変動が日本東アジア域の降水にいかなる遠隔影響を及ぼすか。(5)温暖化に伴い成層圏循環にも変動が報告されている。成層圏循環の変動が日本東アジア域気候にいかに遠隔影響するか。(6)熱帯域の降水分布の変化が東アジア域の降水現象にいかなる影響をもたらすか。最終的にチーム間の協力により、従来ではできなかった降水特性の将来変化予測について衛星観測とモデル実験結果を組み合わせる形でより信頼のおける情報を提出できる形にする。

2. 研究開発目的

近年、気候変動に伴う雨の激甚化などの「降水異変」が危惧されており、社会が降水の将来変化に適切に対応できるような政策策定が必要である。そこで、気候変動に伴う大気大循環の変化と、日本・東アジア地域での降水特性変化や極端降水との関係について集中的に調べ、有効な温暖化影響対策に生かすための情報を抽出し、対応策の策定に科学的根拠を与えて貢献することを目的とする。そのために、世界の気候モデル比較実験データ(CMIP)、最新の気象・衛星観測データ、水同位体比データ、全球雲解像モデル出力データ等を利用して、成層圏、北極圏、対流圏上部、海水温、熱帯の効果まで含め、大気大循環などの大規模状態と日本・東アジアの降水特性について解析する。最終的にサブテーマ間の連携により、地球規模の気候変化に伴い、日本・東アジア域の降水が大気海洋の大規模場状態の変化を通していかに将来変化するかという問題について、従来の方法では答えの出せなかった降水特性の変化に注目し、衛星観測とモデル実験解析を組み合わせることで予測することを目指す。サブテーマは各々以下の研究を受け持つ。

(1)温暖化に伴う各季節の水蒸気大循環の将来変化が日本・東アジア域の極端降水に与える影響の評価。日本周辺の海洋変動や熱帯太平洋の長期変動が日本周辺の雲・降水系に与える影響の季節性について、温暖化に伴う将来予測と不確実性の評価。課題全体の総括。(2)CMIPデータ解析によるアジアモンスーンの構造および変動の再現性と将来変化、アジアモンスーンの極端現象の再現性と将来変化。(3)長期客観解析データ(JRA-55)を用い、対流圏上層のジェットと渦位の変動の季節進行、及び、これらが引き起こす対流圏下層の循環への強制効果の解明。CMIP気候モデル出力によるその再現性の調査。(4)近年の地球温暖化に伴う北極圏雪氷の変化が東アジア域の対流圏循環の変動に与える影響の寄与の議論と、日本・東アジア域降水の将来変化への効果の評価。(5)気候変動予測の成層圏変動との関連の理解と、温暖化に伴う東アジア域の対流圏循環の変動に対する成層圏の寄与の解明。(6)台風やMJOに代表される熱帯亜熱帯の数km規模の大気現象が、東アジア域の前線活動や温帯低気圧等に与える影響の調査と、気候変動に伴う中緯度への影響の調査。

3. 研究開発の方法

(1)温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響

- (a) 2014年8月に発生した広島豪雨の事例について対流圏上部の大規模な大気現象(Atmospheric River(AR)と切離低気圧(COL))の効果調べるため、気象庁メソスケール解析データを用いたポテンシャル渦度インバージョン解析と、領域雲解像モデルを用いた感度実験を行った。
- (b) ARとCOLの相乗効果の一般性を調べるため、長期の全球再解析データ(JRA55)と衛星全球降水マップ(GSMaP)のデータを用いて、北西太平洋域におけるARとCOLの降水への影響を統計的に調査した。
- (c) 極端に強い雨を降らせる降水システムは極端に高い対流の降水システムとは異なるという本チームの発見(Hamada et al. 2016 Nature Commu)に基づき、日本の陸上および南海上において、両者の降水システムの特徴とそれらの大規模環境場の違いを調べた。熱帯降雨観測計画(TRMM)衛星搭載降水レーダによる長期間の降水3次元観測データ、および、全球再解析データを利用して特に自由対流圏における水蒸気の流れに着目して調査した。
- (d) TRMMおよび全球降雨観測衛星(GPM)搭載降雨レーダデータを利用し、サブテーマ3と協力して梅雨期の降雨特性と大規模場との関係を解析した。特に、亜熱帯ジェットと対流圏下層の対流不安定度に注目した。
- (e) (d)の結果に基づき大規模場を指標とした降雨特性の参照テーブルを作成し、サブテーマ2と協力して整理した第5次結合モデル相互比較計画(CMIP5)気候モデルデータセットによる大規模環境場の変化予測から、初夏の日本付近での21世紀末の降雨特性変化を推定した。
- (f) 水蒸気同位体比観測を行い、同位体比を組み込んだ大気大循環モデルIsoGSM(Yoshimura et al. 2008)の検証を行った。そのモデルを用いたシミュレーションにより、関東の豪雨時の水蒸気起源、および、タイの降水の水蒸気起源についてのトラジェクトリー解析を行った。
- (g) 日本東方沖の黒潮続流と水温前線の変動や熱帯太平洋の経年・長期変動が東アジア・北西太平洋域の天候・雲・降水系に与える影響を、最新の大気再解析データや衛星データから調査し、その予測可能性を大気大循環モデルアンサンブル実験や大気海洋結合モデルによる「ペースメーカー実験」等から評価した。

(2) CMIPデータを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化

日本を含む夏季のアジアモンスーン域に注目して、CMIP5モデルによる将来予測実験を解析した。基本実験は、気候モデルによる過去から現在までの歴史再現実験と現在から21世紀末までの将来予測実験(RCP4.5とRCP8.5シナリオ)であるが、このほかに、海面水温を与えた大気モデル実験であるAMIP実験や実験設定を制御した各種の感度実験結果を比較することにより、将来予測の分析を実施した。さらに、気象研究所60km版全球大気モデル予測実験など高分解能大気モデル実験も比較対象として解析した。

(3) 水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明

現実大気における現象理解のためには大気の長期客観解析(再解析)データならびに衛星観測等に基づく降雨データを用い、将来予測の研究のためにはCMIP5大気海洋結合モデルデータベースを用いて、コンポジット解析、準地衡理論に基づく諸計算、相関・回帰分析、経験的直交関数(EOF)展開等による診断を行った。また、理想化した渦位分布を与え潜熱の効果も含めて逆解析によって解く診断モデルを構築し理論的な解釈を行い、大気大循環モデルによる数値実験によって支配プロセスの検討を行った。

(4) 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明

既存データに存在する問題点を改善した新しい衛星観測データ(JASMES)から積雪面積/被覆率を推計し、先行研究との差異に留意しながら、ユーラシア大陸における積雪面積/被覆率の季節変化や(主に春季の)長期変動特性を把握した。さらに、シベリア域における春季積雪被覆率の多寡を基準とした大気・陸面変数(客観解析データ)の合成図解析や、全球大気大循環モデルを用いた感度実験から、シベリアの春季積雪減少が日本・東アジア域の大気循環場に及ぼす影響やそのメカニズムについて検討した。

(5) 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明

CMIP5気候モデルデータ、気候モデル実験、再解析データ及び各種観測データを組み合わせた解析を行い、成層圏循環の変動が日本・東アジア域の降水現象の変化に与える影響を評価した。同一の物理過程を組み込んだ成層圏を含むハイトップ、含まないロートップ版気候モデル実験を行い、成層圏の有無による対流圏循環の違いを明らかにした。成層圏-対流圏結合の考察に必要な、3次元空間での波動と平均場の相互作用について、理論面だけでなく実際のデータ解析に適用可能な解析手法を導いた。

(6) 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響

爆弾低気圧データベースやJRA25再解析データを用いて、現在気候における南岸低気圧の活動と、熱帯擾乱としてのMJOの位相や亜熱帯循環としての黒潮の蛇行との関係について、水蒸気フラックスなどの視点で解析を実施した。CMIP5に参加している中からMJOの再現性が高い気候モデルを抽出し、将来気候におけるMJOの振幅の増大と東アジア域の降水事例との関連を調べた。また、56年分の台風ベストトラックデータを用い、観測された台風活動の長期変動から、気候モデルにおける温暖化時の台風の変動予測を評価した。

4. 結果及び考察

(1) 温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響

- (a) 広島に甚大な被害をもたらした2014年8月豪雨に対する大気大規模場の影響を明らかにした。この時、大気上層10km高度を中心とした亜熱帯ジェットに伴いインドシナ半島から日本域にかかるAtmospheric River(AR)により広島上空が深く湿った状態であったところに、中部太平洋の亜熱帯ジェットの蛇行から切り離された上空の寒冷渦(COL)が南方から接近してきた。メソ解析データを用いたインバージョン解析および雲解像モデルを用いた感度実験を行い、この二つの現象の相乗効果によって、広島市上空近辺は対流が立ちやすい湿った状態であったところに、力学的上昇流と熱力学的不安定が加わり、激甚な豪雨をもたらしたことが解明された(Hirota et al. 2016, MWR)。
- (b) 広島豪雨への上空の大規模場(ARと寒冷渦COL)の影響について一般化するため、14年間の長期データから北西太平洋域で合計164個のCOLを抽出し統計的に調べた結果、ARとの相乗効果があった場合に

COLの北西側で顕著に降水強度が増加することが示された。さらに統計的に得られた降水強化の位置と構造は、2014年8月20日の広島豪雨の状況に驚くほど一致し、広島豪雨に対してARとCOLが影響したという上の結果(a)を統計的に裏付けた。結果を一流国際誌に投稿した(Tsuji et al. 2018)。

- (c) TRMM衛星搭載降雨レーダによる降水の3次元データを解析し、8月の日本周辺域において極端に強い雨をもたらす降水システムと環境場の特徴を統計的に明らかにした。13年間に抽出された73000個余の降水システムから上位0.1%の極端に強い雨と上位0.1%の極端に背の高い対流とは、異なる降水システムからもたらされることを統計的に示した。集中豪雨をもたらすような極端な雨は、降雨面積が大きくメソスケールに組織化された降水システムから降り、発雷は少なく対流としてはさほど高くなかった。環境場は、中国大陸南部から続くARのような湿度構造をもち、それに伴う境界層より上の自由対流圏における水蒸気フラックス偏差の特徴が重要であることが指摘された。結果を一流国際誌に発表した(Hamada et al. 2018, J.Clim.)。
- (d) 梅雨末期の集中豪雨など、梅雨期の雨の変化を大気の大規模環境によって捉えるための解析を行った。TRMM降雨レーダによる降雨の立体データを用いて、梅雨前線周辺の降水システムの特徴を中緯度温帯低気圧タイプ、熱帯組織化タイプ、熱帯面積小タイプの3カテゴリーに分類することができた。それらの特徴を下層の大気不安定度と上層の亜熱帯ジェット強度に関連付けることができた。下層大気不安定度は対流の開始を促進し、亜熱帯ジェットは力学的な上昇流の誘導を通して対流圏中層を加湿することで対流の組織化を促進することが示された。本成果はサブテーマ3との共同研究成果であり、一流国際誌に発表した(Yokoyama et al. 2017, J. Clim.)。
- (e) (d)の知見に基づき、日本を中心とした極東アジアと周辺海上における夏季の降水システムを3タイプに分類し、海面水温(SST)と大規模鉛直流(500hPa 鉛直流)を環境場を代表する変数として3タイプの雨の貢献度を求めるテーブルを作成した。これを用いて気象庁再解析データJRA55から現在気候の3タイプの雨の貢献度求め、観測値と比較してテーブルの妥当性を確認した。さらにCMIP5の24モデルの実験結果を用い、現在気候実験で再現された3タイプの雨の貢献度とRCP8.5シナリオによる21世紀末での予測結果を求めた。その結果、21世紀末には、集中豪雨をもたらす危険性の高い「組織化タイプ」の降雨が、関東から東北太平洋側および日本海側で顕著に増加することが指摘された(図1)。また、ゲリラ豪雨につながるような「面積小タイプ」の雨も全般に増加することが指摘された。本成果はサブテーマ2との共同研究成果であり、国際誌に投稿準備中である(Yokoyama et al., in prep.)

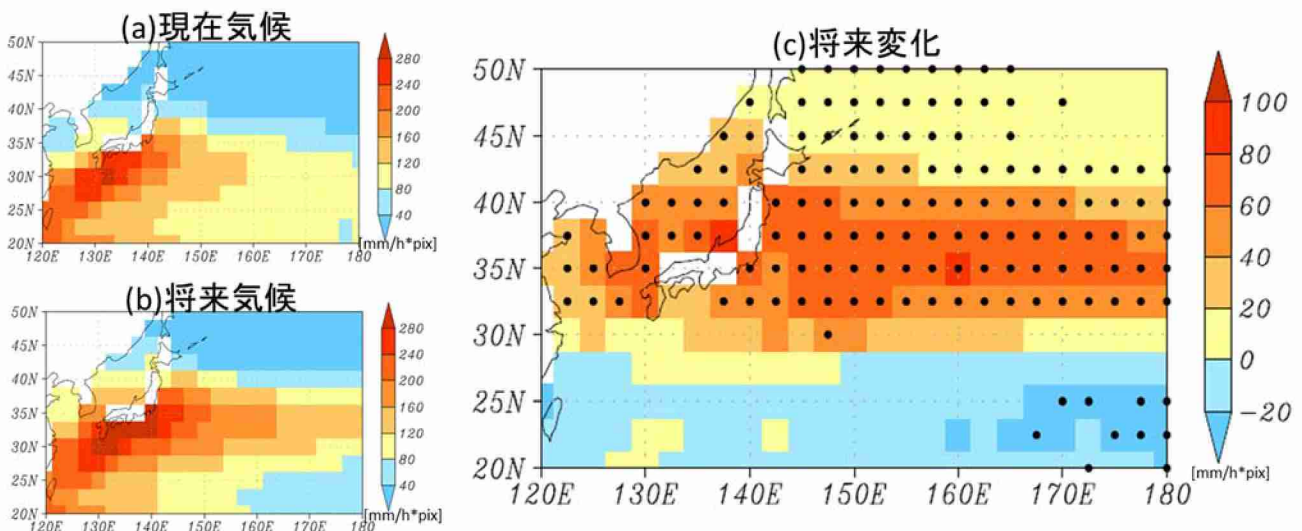


図1 CMIP5モデルの大規模場から再構築された初夏(5-7月)の組織化タイプREの総雨量(色; $\text{mm h}^{-1} \text{ pixel}$)。24モデルのアンサンブル平均。(a)現在気候(Historical実験; 1980-2005年)、(b)将来気候(RCP8.5実験; 2075-2100年)、(c)将来変化。(c)の黒点は90%以上のモデルで変化の符号が一致する場所。

- (f) 平成27年関東東北豪雨の発生した地域において水蒸気同位体比の連続観測を行い、同位体比を組み込んだ大気大循環モデルの検証をおこなった。さらにそのモデルを用いて豪雨時のシミュレーションを行い、水蒸気同位体比変動のメカニズムを解明して論文化した(野本・芳村,2017)。同様な手法をタイ6地点での観測結果にあてはめ、モンスーン域での同位体比変動のプロセスについての理解を深めた。
- (g) 黒潮続流の蛇行強度の十年規模変動に伴う大気への熱放出の変化への応答として、冬季海上風収束と雲・降水分布が明瞭に変動する傾向を見出し、この傾向を大気再解析データで表現するには作成時に高分解能の水温場を与える必要性を明示した。続流変動の予測可能性が海洋内部力学により制限される事も見出した。また、熱帯からの遠隔影響と従来考えられてきた冬季北太平洋上の停滞性循環偏差の形成に、東方海上の水温前線変動からの寄与が無視できないことを示した。さらに、南半球の中緯度水温前線の存在が南極オゾンホール形成への対流圏西風の応答に不可欠なことも示した。
- (h) 冬季季節風を変動させる循環変動「西太平洋(WP)パターン」について、気圧偏差の傾圧構造により海陸気温差に伴う有効位置エネルギーを効率的に獲得して自身を維持し得ることを明らかにし、その励起源の1つとしてオーストラリア夏季モンスーン変動からの遠隔影響である示唆が得られた。さらに、過去120年に起きた階段状の全球平均気温上昇をペースメーカー実験により高精度で再現し、放射強制力に対する気温応答と自然起源の熱帯太平洋変動の影響との間の地域的特徴の違い(例えば、熱帯変動が全球気温上昇を加速する時期に日本付近では年平均気温上昇が抑制傾向)を明確にした。こうして評価した熱帯太平洋変動からの影響を観測データから差引いて人為起源の全球平均気温変化を定量化する新手法、並びに自然変動まで適用できる全球エネルギー収支の関係式を開発した。

(2)CMIPデータを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化

ユーラシア大陸東部に位置する日本の気候はアジアモンスーンの影響を強く受けており、梅雨はアジアモンスーンに伴う現象として捉えることができる。ただし、梅雨前線は中緯度に存在するため、その形成には上空の強い西風(ジェット気流)も関わっており、5月から7月にかけてジェット気流の北上とともに梅雨前線も北上する。気象研究所高分解能(60 km)全球大気気候モデルによる夏季(6-8月)東アジアの平均降水量の将来変化の分布は、中国東北部や日本～北太平洋域での中緯度ジェット気流の南下に相当する循環変化分布とこれに伴う鉛直流の将来変化によって定性的に説明できることがわかった。一方、日降水量で見た日本国内(九州)の地域的な大雨については、850hPa水蒸気フラックスを用いれば統計的に最適に推測できることがわかった。

CMIP5の気候モデルによる予測実験においても、日本上空のジェット気流は現在よりやや南に位置し、梅雨前線の北上は現在よりもやや遅れる傾向が予想されている。アジアモンスーン域の降水量の将来変化では、南アジアや東アジアのモンスーン地域ほぼ全域で降水量が増加すると予測されている。気候モデルによる理想化実験を解析したところ、日本や東南アジアのほか海洋上で顕著に降水量が増加し、日本上空を通るジェット気流は強くなり南下をもたらす「海面水温上昇の効果」と、降水量はインドや中国など大陸上で顕著に増加し、日本上空のジェット気流は弱くなり北上する「陸上温度上昇の効果」の足し合わせで将来変化はあらわされ、2つの効果の一部は相殺されていることがわかった。

このように、日本の降水量の将来変化を正しく予測するためには、大気中の水蒸気量の増加とジェット気流など東アジアの大気循環の変化、さらには背景にあるアジアモンスーン循環の将来変化を正確に予測する必要があることがわかった。ただ、10年平均で降水量将来変化のティッピング年(気候変化が大きくなって現在の気候に後戻りすることがないと推定される年代)を調査したところ、日降水強度に比べると年平均降水量のティッピング年は21世紀末まで明瞭でなく、年平均降水量に関しては10年変動を含む内部変動が大きいことが示唆された。

(3)水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明

日々の客観解析と衛星降雨データを用いた解析より、ジェットの南側に沿っておこる降水強化を、上層の波動擾乱との位置関係も含めて定量化した。さらに、準地衡の診断モデルを活用して、得られた関係性がいかにして生ずるかを明らかにした。特に、従来の知見から降水が起きにくいと考えられる箇所においてもジェットに沿った

降水強化が生じる原因として、南寄り成分を持つ下層ジェットが、上層ジェットの作用により降水に有利な位置関係に來やすいことが大きな要因であることを明らかにした。本研究で明らかになったメカニズムは、より長い時間スケールでの関係性を解釈する上でも有用である。

過去数十年における夏季の降水分布、ジェット、海面水温における年々変動の間の関係を、客観解析と降水観測の月平均データを用いて調べた。その結果、黒潮-親潮続流域の海面水温の変動が、ジェットと降水分布に影響を与えていることが明らかになった。さらに、数十年規模の変動要因を調べたところ、主に夏季の太平洋十年規模振動の影響を受けていることが明らかになった。

IPCC第5次評価報告書の基礎となったCMIP5データベースに集められた大気海洋結合モデルデータ群を用いて、夏季のジェットと降水の関係を調べた。いずれのモデルでも日々のデータから月平均値の年々変動まで、観測された両者の結びつきが再現されていた。さらに、現在気候から将来気候への変化においても、ジェット軸の緯度と降水帯ピークの緯度の変化には良い相関があることが明らかになった。力学的には前者が後者に影響を与えるのが主なので、降水帯の予測においてジェットに着目することが有効であることが明らかになった。また、各モデルにおける夏季のジェットの位置を支配する要素として、黒潮-親潮続流域の海面勾配と熱帯の海面水温が重要であるという知見が得られた。これらは今後さらに高度化するが不確実性も残る降水の将来変化の予測を評価する上で重要な指針となる。CMIP5マルチモデルアンサンブル平均より、梅雨前線帯のピーク緯度は将来気候でやや南下することが示唆された。

(4) 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明

新しい衛星観測データ(JASMES)による、ユーラシア大陸(北緯45~70度、東経20~140度)で平均した積雪被覆率は、既存データと比較して、夏から秋にかけてはほぼ同じ季節変化を示しているが、冬から春にかけてはやや少ない傾向が見られた。JASMESには1970年代のデータが含まれていないこと、既存データは空間解像度の粗い初期の頃に積雪分布を過大評価している可能性が高いこと、が原因と考えられる。日本・東アジア域の夏季降水に影響を及ぼす可能性のある、春季平均した積雪被覆率の年々変動の地理分布は、解析期間が異なるものの、既存データとほぼ同様の特徴を示していた。一方で、その振幅はJASMESがやや小さめであり、既存データの積雪分布には過大評価傾向があることと整合的である。また、領域平均した春季積雪被覆率は有意に減少しているが、1980年代後半~1990年代前半にかけて、既存データとは異なる変動を示していた。さらに、積雪被覆率のトレンド解析から、1979年以降、ユーラシア大陸で積雪被覆率が有意に減少している領域は、3月から6月にかけて、中央アジアから西シベリア南部、西シベリア~中央シベリア、北極海沿岸の北シベリアへと北東方向に推移していくことが分かった。有意な減少トレンドが見られた西シベリアで領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準として、大気循環場および陸面状態の合成図解析を行った結果、西シベリアで積雪被覆率が大きい多雪年に比べ、少雪年には2カ月後の6月に日本付近で対流圏上層のジェット気流が南へ有意に蛇行していることが確認された。地表面温度と土壌水分量についても同様に解析した結果、5~6月には中央アジア~西シベリア南部で少雪年の土壌水分量が有意に減少し、地表面温度が有意に増加していることが確認された。さらに、少雪年の5~6月には地表面から大気への潜熱輸送量が有意に減少する一方で顕熱輸送量が有意に増加し、当該領域上空の大気温度も有意に上昇していることが分かった。大気大循環モデルを用いた感度実験からは、詳細なメカニズムを同定することはできなかったものの、陸域積雪が持つ気候影響の一つである融雪水効果が関与している可能性が高いことが示唆された。

(5) 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明

CMIP5モデル群データを集めて、成層圏を完全に含むハイトップモデルとそうでないロートップモデルとに分別して、循環場の再現性を再解析データと比較したところ、年々変動成分に関してハイトップモデルの方が再現性が高いことが分かった。しかしながら各モデルが組み込んでいる力学・物理過程が異なる為、成層圏の有無がどこまで寄与しているかという理解は難しいことが分かった。

気候モデルの検証に使われる再解析データについて、赤道成層圏東西風の再現性を検証した。再解析間の違いは下部成層圏で一番大きく、東西非一様な構造をしていた。地点観測の特に少ない東太平洋上で顕著な違いが見られ、東西非一様な分布をしていた。これは再解析時に成層圏解析場は十分に修正されず、予報モデ

ル単体による東西風の再現が難しいことを示唆する。再解析と地点観測データとの誤差は時間と共に小さくなり、2000年代以降は観測とよく一致し、再解析間の相違も小さくなる。本研究から、再解析の熱帯域東西風データにおいて地点観測が決定的な役割を果たしていること、また再解析データを用いたトレンド解析には注意が必要であることが示された(Kawatani et al. 2016)。

再解析データ及び各種観測データを用いて、QBOが地表面に与える影響を詳細に調べた。QBO西風時に熱帯大西洋で降水が増えること、特に北半球が夏の季節にその傾向が顕著であることが分かった。また熱帯太平洋収束帯と呼ばれる太平洋で東西に伸びる降水帯はQBO西風時に南編することも判明した(Gray et al. 2017)。

次に同一の物理過程を組み込んだ自前のハイトップ、ロートップ版気候モデル実験を行い、成層圏の有無が対流圏の循環場を変え得るか調査する実験に取り組んだ。成層圏が無いモデルでは、成層圏ブリュワー・ドブソン循環(BDC)が十分に表現されず、高緯度下降流が弱くなり、高緯度下部成層圏で低温偏差になる。温度風の関係から成層圏ジェットが強化され、対流圏ジェットも強化され、北ヘシフトする。地表面で西風も強くなる結果、地表風、地表面気圧、降水分布も変化することが分かった。更に成層圏鉛直解像度を上げる、及びモデル上端を中間圏界面まで上げる実験も行った。鉛直解像度を上げて成層圏をフルカバーするモデルでは、高度と共に赤道に傾く極夜ジェット、及び極夜ジェットの中心緯度が現実的になる。この影響は対流圏循環場や気圧配置にまで有意な差を引き起こし、成層圏の高解像度化と上部成層圏～中間圏の有無も、対流圏に影響を与えていることが判明した。本研究から成層圏の有無・成層圏の解像度が対流圏下層の循環場、気圧配置、降水分布にまで影響を及ぼすことが明らかになった。地球温暖化が進むと、Brewer-Dobson循環が強化されることが知られている為、成層圏の有無は地表面付近の温暖化レスポンスにも影響を与え得ることが強く示唆される。

標準的な解析方法として広く用いられている変換オイラー法(TEM)を拡張し、成層圏擾乱と日本・東アジア 域の降水現象の変化に影響を解明するツールとして、減衰・発達する一般的な擾乱の効果を取り入れた改良版GTEM を導びき、プログラミングも行った。改良版GTEMを実際の気候モデルデータで成立するか検証した。冬季子午面循環場では、温位、絶対角運動量、水蒸気は相互に明確に異なる時間スケールの渦輸送が卓越していることが解析され、水循環と熱・角運動量循環の差が特に顕著である様子などが示された。新しい解析手法で得られた循環には特有の特徴が見られたが、科学的な意味の更なる解明は今後の課題である。

(6) 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響

温暖化に伴う東アジア域の降水の変化に関して、MJOや台風などの熱帯・亜熱帯域現象が南岸低気圧などの中緯度現象に及ぼす影響に着目し、観測データの解析に基づいて気候モデルの将来変化予測を評価した。

現在気候における南岸低気圧活動は、MJOの位相が3、4、すなわちMJOに伴う対流活動域がインド洋に位置している時に活発になり、関東南部などに大雪をもたらす事例が多いことが示された。また、MJOの再現性が良い気候モデルの多くは、温暖化時にMJOの振幅が大きくなっており、関東南部における強い降水の発生頻度が増加していることがわかった。温暖化によって気温が上昇すれば、大気中の水蒸気が増えることで強い降水の頻度が増加する可能性があるため、今後は大雪又は大雨による災害にいつそう留意する必要がある。

関東南部で3月下旬に見られる「菜種梅雨」も南岸低気圧の影響を受けている。黒潮が「接岸型」の年と「離岸型」の年で南岸低気圧の活動を調べたところ、「離岸型」の場合のほうが、低気圧活動が関東南岸で強くなっているという結果が得られた。黒潮の将来予測は不確実性が大きい、仮に将来気候で黒潮が接岸型の経路をとる頻度が多くなった場合、冬季全体では南岸低気圧が活発化する一方で、菜種梅雨が現れにくくなることも考えられる。

台風の経年変化を解析したところ、近年は東日本から日本の東海上で通過頻度が増加し、フィリピンから南シナ海、西日本の南海上などで減少していることが示された。この変動を要因別に分析すると、主に台風平均移動経路が変動した影響であることがわかった。また、日本の南海上を通過する台風が、より東向きの進路を取りやすくなっていることも示された。これらの観測された長期変動と、マルチ気候モデルの結果から導かれた「平均移動経路変化が東日本への台風接近数を増加させる」という将来変化予測が整合的な傾向にあるということは、これまでに提示してきた将来予測情報の妥当性・現実性を確認できたことになる。

5. 本研究により得られた主な成果

(1) 科学的意義

- (1) 日本・東アジア域の集中豪雨の発生メカニズムにおいて、通常注目される大気最下層の水蒸気場や地形の効果以外に、大気上層の大規模場の影響の重要性を指摘した。広島豪雨の事例について定量的に示した結果を、統計的な調査によって一般化した点にも科学的意義がある。
- (2) 集中豪雨のように極端に強い雨をもたらす現象が、「ゲリラ豪雨」と称されるような霰・雹を伴う激しい雷雨の延長ではなく、雷雨より安定な大気で発生すること、さらに自由対流圏の大規模な水蒸気の流れの環境場で多いことが明らかになったことは科学的意義が大きい。
- (3) 衛星による雨の立体観測データの統計により、梅雨前後の日本域の雨が数個の特徴的なタイプのシステムに分類されることを示した。さらに各タイプからの総雨量への寄与を下層安定度と上層の循環に関する大規模環境場指標に定量的に関係づけたことは科学的意義が大きい。さらに衛星解析による降水システムの詳細構造との関係を用いて気候モデルによる大規模場の将来予測を組み合わせ、例えば集中豪雨を伴う組織化した雨が将来どの地域で増えるかなど降水の特性についての具体的な変化予測が可能になったのは世界初であり、科学的意義が大きい。
- (4) 降水に比べ力学的な解釈や変化の因果関係が捉え易いジェット気流に着目することが、降水分布の将来変化の予測の解釈に役立つことが示された。このことは気候の将来変化の傾向とその不確実性の評価に役立つ。
- (5) 今世紀に入ってから温暖化の停滞は継続的気候上昇傾向に自然変動が重畳した階段状の気温上昇の反映に過ぎず、産業革命前からの人為起源の気温上昇推算値が観測値を上回る1.2°Cに達したという結果は、継続的な温暖化緩和策と適応政策の早急な加速の重要性に科学的根拠を付与する成果である。
- (6) モンスーンに関するこれまでの温暖化予測研究の多くは、熱帯対流圏上層の顕著な昇温の役割に着目してきた。今回の研究で、別のメカニズムとしてユーラシア大陸の顕著な昇温将来変化に伴う気圧低下は、南アジアを中心に下層収束を強化し大陸上で顕著な降水量増加をもたらすことがわかった。
- (7) 東アジア夏季の降水に対する上層ジェットの影響が、日々の気象の時間スケールから数10年の平均まで、基本的に同じ原理で成り立つことを示した。これは、降水の将来変化を予測し解釈する上で大きな意味を持つ。
- (8) 既存データの問題点を改良した衛星観測データから、北半球高緯度積雪域の年々変動や長期変化に関する信頼度の高い情報を抽出し、西シベリア域における春季積雪減少が日本・東アジア域の大気循環場に影響を及ぼしている可能性を示した意義は大きい。
- (9) 同一の力学・物理過程を組み込み、モデル上端を変化させた系統的な高解像度気候モデル実験の先行研究は殆ど無く、成層圏が対流圏の循環場や降水形成を変えうることを示し、気候モデルに成層圏を含めることの重要性を示した点は科学的意義がある。
- (10) 熱帯・亜熱帯域での大規模現象が及ぼす影響の解析を温暖化予測実験の結果に適用し、関東地方での局地的な大雪や大雨の発生が増加するとの予測を提示した。また、観測された台風の長期変動と温暖化予測実験の結果が整合的な傾向にあるという統計特性を提示した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

- (1) 東京大学と気象研究所が共同試作した全球大気再解析データJRA-55CHSの作成において高解像度海面水温データを与える重要性が認められた成果を踏まえ、気候系監視に活用される気象庁次期大気再解析JRA-3Qの作成にも衛星観測に基づく高解像度海面水温データを本格的に用いる方針が決定した。

<行政が活用することが見込まれる成果>

- (1) 梅雨期前後の日本各地域の雨の温暖化に伴う将来変化について、気候モデルのみでは表現できない降雨特性の変化について衛星レーダ観測を併用して予測した。特に、豪雨をもたらす組織化した雨が、現在比較的少ない日本海側、関東・東北地方で将来は増加することが予測され、これらの地域における豪雨対策の必要性を示したことは意義が大きい。IPCC AR6への貢献も見込まれる。
- (2) 災害をもたらす豪雨の可能性を判断する上で、従来から着目されている大気最下層の状況だけでなく、大気上層の大規模場状況にも着目すべきであることを示すことができ、豪雨災害に備えるための重要な情報

となる。本成果もIPCC AR6への貢献が見込まれる。

- (3) 気候監視に広く活用される全球大気再解析データ作成における高解像度海面水温データの重要性は、WMOの第5回再解析国際会議やCLIVARの境界流に関する国際会議における招待講演で訴えた。
- (4) 温暖化対策にあたって気象研高分解能(60km)全球大気モデル実験による夏季東アジアの平均降水量の将来変化分布は、中緯度ジェット気流の南下に相当する低気圧性の循環変化分布とこれによる鉛直流の将来変化によっておおまかに説明できるが、地域詳細分布についてはモデルや海面水温変化による不確実性が大きいという知見を与えた。
- (5) 梅雨降水帯は、不確実性はあるものの南下する可能性の高さとその要因を明らかにしたことは、行政が活用しうる成果である。次期IPCCのためのCMIP6データ解析への即刻の適用とAR6への貢献が期待できる。
- (6) 既存データに存在する問題点を改良した日本発の新たな衛星観測データからの近年の地球温暖化にともなう広域積雪の長期変動・変化に関する信頼度の高い情報は、次期IPCCに貢献できる重要な成果である。
- (7) 成層圏を気候モデルに含めることで、対流圏循環場、地表面気圧、降水分布が変わることを示した成果は、将来の気候変動予測モデルに成層圏を含む必要があることを強く示唆し、IPCCの取り組みへ貢献する。
- (8) 熱帯・亜熱帯域の現象把握と解明は、日本周辺域への影響のみならず、アジア・太平洋地域の気候リスクの評価や適応計画の策定に直接的に資することとなり、「アジア太平洋適応情報プラットフォーム(AP-PLAT)」等の構築にむけた基盤的知見となり得る。
- (9) 課題全体の成果から、一般向け冊子「暑いだけじゃない温暖化3—日本の雨の降り方は変わるのか—」を作成し環境省および気象庁など関係機関に配布し、行政官への成果情報の提供とした。また、東京大学大気海洋研究所のエントランスロビーに配布資料として配置すると共に、研究室のホームページでも公開し、一般への普及の材料として貢献している。

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



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) H. KUBOTA, Y. KOSAKA and S.-P. XIE: Int. J. Climatol., 36, 4, 1575–1589, doi: 10.1002/joc.4441 (2015)
A 117-year long index of the Pacific–Japan pattern with application to interdecadal variability
- 2) F. OGAWA, N.-E. OMRANI, K. NISHII, H. NAKAMURA and N. KEENLYSIDE: Geophys. Res. Lett., 42, 22, 10056–10063, doi: 10.1002/2015GL066538 (2015)
Ozone-induced climate change propped up by the Southern Hemisphere oceanic front
- 3) H.-S. PARK, S. LEE, Y. KOSAKA, S.-W. SON and S.-W. KIM: J. Climate, 28, 15, 6281–6296, doi:

- 10.1175/JCLI-D-14-00773.1 (2016)
The impact of Arctic winter infrared radiation on early summer sea ice
- 4) S.-P. XIE, Y. KOSAKA and Y. M. OKUMURA: *Nature Geosci.*, 9, 1, 29–33, doi:10.1038/ngeo2581 (2016)
Distinct energy budgets for anthropogenic and natural changes during global warming hiatus
- 5) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU, M. KATO and S. ARAKANE: *Mon. Wea. Rev.*, 144, 4, 1145–1160., doi: 10.1175/MWR-D-15-0299.1 (2016)
Roles of an Atmospheric River and a Cut-off Low in the Extreme Precipitation Event in Hiroshima on August 19, 2014
- 6) Z. WEI, K. YOSHIMURA, A. OKAZAKI, K. ONO, W. KIM, M. YOKOI and C.-T. LAI: *J. Hydrol.*, 533, 91–102 (2016)
Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan
- 7) M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, B. TAGUCHI and H. NAKAMURA: *Sci. Rep.*, 6 (2016), doi:10.1038/srep20153 (2016)
How potentially predictable are midlatitude ocean currents?
- 8) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 6681–6699, doi:10.5194/acp-16-6681-2016 (2016)
Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalysis
- 9) J. UCHIDA, M. MORI, H. NAKAMURA, M. SATOH, K. SUZUKI and T. NAKAJIMA: *Mon. Wea. Rev.*, 144, 4, 1423–1447, doi: 10.1175/MWR-D-15-0271.1 (2016)
Error and energy budget analysis of a nonhydrostatic stretched-grid global atmospheric model
- 10) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII and B. QIU: *J. Climate*, 29, 9, 3273–3296, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0545.1 (2016)
Interannual modulations of oceanic imprints on the wintertime atmospheric boundary layer under the changing dynamical regimes of the Kuroshio Extension
- 11) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU and A. HAMADA: *J. Climate*, 29, 9, 3317–3337, doi:10.1175/JCLI-D-15-0480.1 (2016)
Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models
- 12) N. C. JOHNSON and Y. KOSAKA: *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3039-1 (2016)
The impact of eastern equatorial Pacific convection on the diversity of boreal winter El Niño teleconnection patterns
- 13) S. MATSUMURA, T. HORINOUCI, S. SUGIMOTO and T. SATO: *J. Climate*, 29, 8, 3075–3093, doi:http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0691.1 (2016)
Response of the Baiu rainband to northwest Pacific SST anomalies and its impact on atmospheric circulation
- 14) 芳村圭、中村晋一郎、鳩野美佐子、向田清峻、石塚悠太、内海信幸、木口雅司、金炯俊、乃田啓吾、牧野達哉、鼎信次郎、沖大幹: 土木学会論文集 B1(水工学), 72(2016)
平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による茨城県常総市における鬼怒川洪水に関する調査及び考察
- 15) M. NEWMAN, M. A. ALEXANDER, T. R. AULT, K. M. COBB, C. DESER, E. DI LORENZO, N. J. MANTUA, A. J. MILLER, S. MINOBE, H. NAKAMURA, N. SCHNEIDER, D. J. VIMONT, A. S. PHILLIPS, J. D. SCOTT and C. A. SMITH: *J. Climate*, 29, 12, 4399–4427, doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1 (2016)
The Pacific Decadal Oscillation, Revisited
- 16) N. SATO, M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, Y. TANIMOTO, and R. SHIROOKA: *J. Oceanography*, 72(5), 697–705 (2016)
Contribution of sea-surface wind curl to the maintenance of the SST gradient along the upstream Kuroshio Extension in early summer

- 17) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: J. Atmos. Oceanic Technol., 33, 4, 653–667, doi:10.1175/JTECHD-15-0097.1 (2016)
Improvements in detection of light precipitation with the Global Precipitation Measurement dual-frequency precipitation radar (GPM DPR)
- 18) H. WANG, S.-P. XIE, H. TOKINAGA, Q. LIU and Y. KOSAKA: Geophys. Res. Lett., 43, doi:10.1002/2016GL068521 (2016)
Detecting cross-equatorial wind change as a fingerprint of climate response to anthropogenic aerosol forcing
- 19) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: Geophys. Res. Lett., 43, 5435–5441, doi:10.1002/2016GL068962 (2016)
Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements
- 20) F. OGAWA, H. NAKAMURA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: J. Climate, 29, doi:10.1175/JCLI-D-15-0885.1 (2016)
Importance of mid-latitude oceanic frontal zones for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature
- 21) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: Nature Geosci. (2016)
The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming
- 22) S.-P. XIE, Y. KOSAKA, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY and G. HUANG: Adv. Atmos. Sci., 33, 411–432, doi: 10.1007/s00376-015-5192-6 (2016)
Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review
- 23) S. TANAKA, K. NISHII and H. NAKAMURA: J. Climate, 29, 6597–6616, doi:10.1175/JCLI-D-15-0549.1 (2016)
Vertical structure and energetics of the Western Pacific teleconnection pattern
- 24) 芳村圭: 水文科学会誌, 46, 87–99 (2016)
水同位体比情報を用いたデータ同化
- 25) M. KOIKE, N. ASANO, H. NAKAMURA, S. SAKAI, T. M. NAGANO and T. Y. NAKAJIMA: J. Geophys. Res., 121, doi:10.1002/2016JD025375 (2016)
Modulations of aerosol impacts on cloud microphysics induced by the warm Kuroshio Current under the East Asian winter monsoon
- 26) S. MATSUMURA and T. HORINOUCI: Scientific Reports, 6: 37765, doi:10.1038/srep377652016 (2016)
Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high
- 27) H. KAWAI, T. KOSHIRO, H. ENDO, O. ARAKAWA and Y. HAGIWARA: Atmospheric Science Letters, 17, 548–555, doi:10.1002/asl.691 (2016)
Changes in marine fog in a warmer climate
- 28) T. HORINOUCI and A. HAYASHI: J. Atmos. Sci., 74(4), 1233–1247 (2017)
Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific
- 29) C.-Y. WANG, S.-P. XIE, Y. KOSAKA, Q. LIU and X.-T. ZHENG: J. Climate, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0496.1, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0496.1 (2017)
Global influence of tropical Pacific variability with implications for global warming slowdown
- 30) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and T. HORINOUCI: J. Climate, 30 (20), 8127–8147, doi:10.1175/JCLI-D-16-0724.1 (2017)
Precipitation characteristics over East Asia in early summer: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability
- 31) Z. WEI, K. YOSHIMURA, L. WANG, D. MIRALLES, S. JASECHKO and X. LEE: Geophys. Res. Lett., doi:10.1002/2016GL072235 (2017)
Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration
- 32) S.-P. Xie, Y. Kosaka: Current Climate Change Reports, 3, 128–140, doi:10.1007/s40641-017-0063-0

(2017)

What caused the global surface warming hiatus of 1998–2013?

- 33) Y. YANG, J. LI, L. WU, Y. KOSAKA, Y. DU, C. SUN, F. XIE, and J. FENG: *Adv. Atmos. Sci.*, **34**, 1282–1289, doi:10.1007/s00376-017-7009-2 (2017)
Decadal Indian Ocean dipolar variability and its relationship with the tropical Pacific
- 34) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI and K. YONEYAMA: *Mon. Wea. Rev.*, **145**(9), 3745–3761, doi: 10.1175/MWR-D-16-0468.1 (2017)
Diurnal Cycle of Precipitation Observed in the Western Coastal Area of Sumatra Island: Offshore Preconditioning by Gravity Waves
- 35) Y. KAWAI, Q. MOTEKI, A. KUWANO–YOSHIDA, T. ENOMOTO, A. MANDA and H. NAKAMURA: *J. Meteor. Soc. Japan*, **95**, 71–90, doi:10.2151/jmsj.2017-004 (2017)
Impact propagation of radiosonde data assimilation over the Kuroshio and Kuroshio Extension: case study on the early summer (Baiu) in 2012
- 36) T. OSE: *Hydrological Research Letters*, **11**(3), 168–174 (2017)
Future precipitation changes during summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments
- 37) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, H. KAMATORI, K. ONOGI and S. OKAJIMA: *SOLA*, **14**, 6–13, doi:10.2151/sola.2018-002 (2018)
JRA-55CHS: An Atmospheric Reanalysis Produced with High-Resolution SST
- 38) S. OKAJIMA, H. NAKMAURA, K. NISHII, T. MIYASAKA, A. KUWANO–YOSHIDA, B. TAGUCHI, M. MORI and Y. KOSAKA: *J. Climate*, **31**, 297–315, doi:10.1175/JCLI-D-17-0200.1 (2018)
Mechanisms for the Maintenance of the Wintertime Basin-Scale Atmospheric Response to Decadal SST Variability in the North Pacific Subarctic Frontal Zone
- 39) A. MIYAMOTO, H. NAKAMURA and T. MIYASAKA: *J. Climate*, **31**, (10), 4017–4039, doi:10.1175/JCLI-D-17-0229.1 (2018)
Influence of the subtropical high and storm track on low-cloud fraction and its seasonality over the South Indian Ocean
- 40) G. SRINIVAS, J. S. CHOWDARY, Y. KOSAKA, C. GNANASEELAN, A. PAREKH and K. V. S. R. PRASAD: *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0408.1 (2018)
Influence of the Pacific–Japan Pattern on Indian summer monsoon rainfall
- 41) S. WATANABE, K. HAMILTON, S. OSPREY, Y. KAWATANI and E. NISHIMOTO: *Geophys. Res. Lett.*, **45**, 1602–1610, doi:10.1002/2017GL076406 (2018)
First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasibiennial Oscillation
- 42) N. BUTCHART, J. ANSTEY, K. HAMILTON, S. OSPREY, C. MCLANDRESS, A. BUSHELL, Y. KAWATANI, Y-H. KIM, F. LOTT, J. SCINOCCA, T. STCKDALE, O.BELLPRAT, P. BRAESICKE, B. CANGAZZO, C-C. CHEN, H-Y. CHUN, M. DOBRYNIN, R. GARCIA, J. GARCIA-SERRANO, L. GRAY, L. HOLT, T. KERZENMACHER, H. NAOE, H. POHLMANN, J. RITCHER, A. SCAIFE, V. SCHENZINGER, F. SERVA, S. VERSICK, S. WATANABE, K. YOSHIDA, and S. YUKIMOTO: *Geosci. Model. Dev.*, **11**, 1009–1032, doi: 10.5194/gmd-11-1009-2018 (2018)
Overview of experiment design and comparison of models participating in phase 1 of the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi)
- 43) L. J. GRAY, J. ANSTEY, Y. KAWATANI, H. LU, S. OSPREY and V. SCHENZINGER: *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2017-1065 (2017)
Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation
- 44) N. HIROTA, M. OHTA, Y. YAMASHITA and M. TAKAHASHI: *J. Climate*, **31**, 2871–2887, doi:10.1175/JCLI-D-16-0390.1 (2018)

Roles of intraseasonal disturbances and diabatic heating in the East Asian Jet Stream variabilities associated with the East Asian winter monsoon

- 45) N. HIROTA, T. OGURA, H. TATEBE, H. SHIOGAMA, M. KIMOTO and M. WATANABE: J. Climate, 31, 3033–3047, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0246.1 (2018)

Roles of shallow convective moistening in the eastward propagation of the MJO in MIROC6

- 46) N. HIROTA, H. SHIOGAMA, H. AKIYOSHI, T. OGURA, M. TAKAHASHI, Y. KAWATANI, M. KIMOTO and M. MORI: npj Climate and Atmospheric Science (2018)

The influences of El Nino and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016 (in press)

- 47) Z. WEI, X. LEE, Z. LIU, U. SEEBOONRUANG, M. KOIKE and K. YOSHIMURA: Earth and Planetary Science Letters, 488, doi:10.1016/j.epsl.2018.02.015 (2018)

Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia

- 48) H. ENDO, A. KITO and H. UEDA: SOLA, 14 (2018)

A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere (accepted)

- 49) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: J. Climate (2018)

Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events around Japan in the TRMM region (accepted)

(2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA, S. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: AGU Chapman Conference on Evolution of the Asian Monsoon and Its Impact on Landscape, Environment and Society: Using the Past as the Key to the Future, Hong Kong, China, 2015
“Multi-decadal modulations observed in the variability of the East Asian summer monsoon”
- 2) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Hiatus and accelerated global warming due to tropical Pacific natural variability”
- 3) K. NISHII, H. NAKAMURA and T. NAKAMURA: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Atmospheric response to anomalous sea ice in the Sea of Okhotsk”
- 4) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Persistent cooling of the polar stratosphere in 2011 winter and spring”
- 5) H. NAKAMURA, L. WANG and K. NISHII: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“The extreme European cold spell in 2011/12 winter: Observed features and possible causes”
- 6) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Potential importance of midlatitude ocean fronts for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature”
- 7) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA and H. KAMAHORI: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Impacts of midlatitude frontal sea-surface temperature gradients on the atmosphere as revealed in new Japanese reanalysis data”
- 8) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Comparison of the Quasi-biennial Oscillation amplitudes among several reanalysis data”
- 9) S. YOKOI and A. H. SOBEL: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Intraseasonal variability of the moist static energy budget over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO field campaign”

- 10) N. HIROTA, Y. TAKAYABU, M. KATO and S. ARAKANE: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
“Role of an atmospheric river and an upper cold low in the extreme precipitation at Hiroshima on August 19th 2014”
- 11) S. YOKOI and A. H. SOBEL: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
“Seasonal march and intraseasonal variability of the moist static energy budget over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO”
- 12) S. YOKOI: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
“Multi-reanalysis comparison of variability in analysis increment of column water vapor associated with Madden-Julian Oscillation”
- 13) S. YOKOI: Tropical Precipitation Systems Workshop 2015, Yokohama, Japan, 2015
“Variability in moist static energy budget associated with Madden-Julian oscillation over the eastern Maritime Continent”
- 14) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: ACM2015, Paris, France, 2015
“Comparison of the zonal wind in the tropical stratosphere among several reanalysis data”
- 15) S. KUSUNOKI: Tropical Meteorology Workshop, Aizuwakamatsu, Japan, 2015
“Precipitation over the tropics simulated by climate model”
- 16) S. YOKOI: Tropical Meteorology Workshop, Aizuwakamatsu, Japan, 2015
“Moist static energy variability associated with Madden-Julian oscillation”
- 17) 佐藤尚毅、野中正見、笹井義一、佐々木英治、城岡竜一、谷本陽一: 2015 年度日本海洋学会秋季大会 (2015)
「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」
- 18) H.ENDO, A. KITOH, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA: Down-scaling workshop, Tsukuba, Japan, 2015
“Future projection of monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 19) 野本大輔、木口雅司、田上雅浩、芳村圭: 日本水文科学会 2015 年度大会 (2015)
「目黒区で観測された高 d-excess 降水イベントの解析」(2015 年度日本水文科学会学術大会優秀発表賞受賞)
- 20) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) Workshop and SPARC Data Assimilation (DA) workshop, Kyoto, Japan, 2015
“Comparison of the zonal wind in the tropical stratosphere among several reanalysis datasets”
- 21) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, B. TAGUCHI and M. NONAKA: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Long-term modulations of the decadal climate variability over the North Pacific and their future projection in CMIP5 models”
- 22) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Hiatus and acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability” (invited)
- 23) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Persistent cooling of the polar stratosphere in 2011 winter and spring”
- 24) H. ENDO, A. KITOH, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Future changes in monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 25) S. KUSUNOKI: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Are CMIP5 Models better than CMIP3 Models in Simulating Precipitation over East Asia?”

- 26) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, B. TAGUCHI, T. MIYAMA, M. NONAKA, S. IIZUKA and M. KOIKE: 2nd Open Science Symposium on Western Pacific Ocean Circulation and Climate, Busan, Korea, 2015
 “Multi-scale impacts of the western boundary currents and associated frontal zones on the atmosphere”
- 27) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「TRMM PR、JRA55、CMIP5 データを用いた梅雨前線降雨の将来変化に関する研究」
- 28) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「GPM/DPR の降水検出感度向上のインパクト」
- 29) 宮坂貴文、中村尚: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「北大西洋湾流域の鉛直流に対する力学・熱力学的寄与」
- 30) 西井和晃、中村尚、中村哲: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「オホーツク海海水減少に対する大気応答」
- 31) 遠藤洋和、吉田康平、水田亮、鬼頭昭雄、荒川理: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「高分解能 AGCM によるマルチ SST・積雲スキームアンサンブル温暖化実験: モンスーン降水の変化」
- 32) 尾瀬智昭: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「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」
- 33) 楠昌司: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「モデルの水平高解像度化で降水の再現精度は向上するか？」
- 34) 若松俊哉、石原幸司: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「CMIP5 データにおける日本の極端降水の現在気候再現性評価に向けて」
- 35) 松村伸治、堀之内武、杉本詩織、佐藤友徳: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「北西太平洋 SST 変動に対する梅雨降水帯の応答」
- 36) 河谷芳雄、Kevin Hamilton、宮崎和幸、藤原正智、James Anstey: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「複数の再解析データを用いた赤道域成層圏東西風の比較と検証」
- 37) 横井覚: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「インドシナ半島における季節内変動の地理的分布」
- 38) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: 8th International Workshop on Tropical Marine Environment Change, Guangzhou, China, 2015
 “Acceleration and slowdown of global warming due to tropical Pacific natural variability” (invited)
- 39) S. KUSUNOKI and M. HOSAKA: The Sixth Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2015
 “Precipitation over the Arctic simulated by global atmospheric models of MRI-AGCM3.2.”
- 40) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: CLIVAR-ICTP Workshop on Past and Future Climate Shifts, Trieste, Italy, 2015
 “Hiatus and acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability” (invited)
- 41) 小坂 優、謝 尚平、Yan Du、Kaiming Hu、Jasti S. Chowdary、Gang Huang: 研究集会「長期予報と大気大循環」(2015)
 「夏季インド洋-北西太平洋結合モードと ENSO 衰退後の異常気象」
- 42) Y. N. TAKAYABU, N. HIROTA, M. KATO and S. ARAKANE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Combined Effect of an Atmospheric River and a Cut-off Low in Hiroshima Flooding Event on August 19, 2014”
- 43) N. HIROTA and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Reproducibility of summertime diurnal precipitation over northern Eurasia simulated by CMIP5 climate models”
- 44) A. HAMADA, Y. N. TAKAYABU, C. LIU and E. ZIPSER: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Weak Linkage between the Heaviest Rainfall and Tallest Storms”

- 45) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Potential importance of midlatitude SST fronts for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature” (invited)
- 46) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA, Y. KOSAKA, S. OGAWA, K. NISHII and T. MIYASAKA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Multi-decadal modulations in the variability of the East Asian summer monsoon” (invited)
- 47) S. KUSUNOKI: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation? ”
- 48) S. YOKOI: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Variability in moist static energy budget associated with the Madden-Julian Oscillation over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO extended observing period”
- 49) H. ENDO, A. KITO, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
 “Future changes in monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 50) S. WAKAMATSU and K. ISHIHARA: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
 “Reproducibility of atmospheric conditions around Japan by CMIP5 for the assessment of future change in extreme precipitation with statistical downscaling approach”
- 51) S. MAEDA, M. HARADA and S. WAKAMATSU: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
 “Future Changes in Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific Induced by Robust Changes in the Tropical Circulation”
- 52) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, H. KAMAHORI and C. KOBAYASHI: CLIVAR/JAMSTEC Workshop on the Kuroshio Current and Extension System, Yokohama, Japan, 2016
 “Impacts of frontal SST gradients in the Kuroshio-Oyashio Extension on the atmosphere as revealed in a new Japanese reanalysis”
- 53) N. SATO, M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, Y. TANIMOTO and R. SHIROOKA: CLIVAR/JAMSTEC Workshop on the Kuroshio Current and Extension System: Theory, Observations and Ocean Climate Modelling, Yokohama, 2016
 “Contribution of sea-surface wind curl to the maintenance of the SST gradient along the upstream Kuroshio Extension in early summer”
- 54) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, N.-E. OMRANI and N. KEENLYSIDE: 2016 Ocean Sciences Meeting, New Orleans, LA, USA, 2016
 “Role of mid-latitude oceanic frontal zones in the ozone-induced climate change over the Southern Hemisphere as revealed in aqua planet experiments”
- 55) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Rainfall characteristics of the Baiu front observed with TRMM PR: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability”
- 56) M. SATOH, Y. YAMADA, M. SUGI, C. KODAMA, A. T. NODA, M. NAKANO and T. NASUNO: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Responses of tropical cyclone structure and frequency to a global warming simulated by NICAM”
- 57) T. MIYAKAWA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016

- “Characteristics of atmospheric rivers produced by NICAM”
- 58) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA and Y. KOSAKA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “The two dominant meridional teleconnection patterns over the summertime western North Pacific and their interdecadal modulations”
- 59) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, H. KUBOTA, Y. DU, K. HU, J. CHOWDARY and G. HUANG: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “The Indo-western Pacific Ocean capacitor mode and its inter-decadal modulations”
- 60) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Dynamical and thermodynamical contributions to the vertical motions over the wintertime oceanic frontal zones”
- 61) K. NISHII, F. OGAWA, H. NAKAMURA, N.-E. OMRANI and N. KEENLYSIDE: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Ozone-induced climate change propped up by the Southern Hemisphere oceanic front”
- 62) S. WAKAMATSU and K. ISHIHARA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Reproducibility of atmospheric conditions around Japan by CMIP5 for the assessment of future change in extreme precipitation with statistical downscaling approach”
- 63) S. KUSUNOKI: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Are CMIP5 models better than CMIP3 models in simulating precipitation over East Asia?”
- 64) S. KUSUNOKI: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation? ”
- 65) T. HORINOUCI: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Summer subtropical jet and precipitation: from day-to-day variability to climatological understanding”
- 66) S. MATSUMURA, T. HORINOUCI, S. SUGIMOTO and T. SATO: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Response of the Baiu rainband to northwest Pacific SST anomalies and its impact on atmospheric circulation”
- 67) T. NOZAWA and S. FUJIWARA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Revisiting impacts of spring Eurasian snow cover change on the East Asian summer precipitation”
- 68) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Representation of the Tropical Stratospheric Zonal Wind in Global Atmospheric Reanalyses”
- 69) N. SATO and R. SHIROOKA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Influence of the MJO on the extratropical cyclones passing along the southern coast of Japan”
- 70) Y. N. TAKAYABU: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, Japan, 2016
 “Combined Effect of an Atmospheric River and a Cut-off Low in Hiroshima Flooding Event on August 19, 2014”
- 71) S. KUSUNOKI: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, Japan, 2016
 “Changes in precipitation over East Asia projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km

grid sizes”

- 72) 中村尚、釜堀弘隆、小林ちあき、升永竜介、岡島悟:2016 年度日本海洋学会春季大会(2016)
「高解像度海面水温データを与えた全球大気再解析 JRA55 追加プロダクト」(招待講演)
- 73) 小坂優、謝尚平、奥村夕子:2016 年度日本海洋学会春季大会(2016)
「地球温暖化停滞期の全球エネルギー収支」
- 74) 西井和晃、田口文明、吉田聡、中村尚、小坂優、宮坂貴文:2016 年度日本海洋学会春季大会(2016)
「中緯度海洋が大気の潜在的予測可能性へ与える影響」
- 75) 横山千恵、高薮縁:GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会(2016)
「梅雨期の降雨特性:亜熱帯ジェットと下層対流不安定度の影響」
- 76) 濱田篤、高薮縁: GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会(2016)
「次期 GSMaP のための降水レジーム・プロファイルデータベース」
- 77) S. KUSUNOKI: The 13th ‘General Circulation Model Simulations of the East Asian Climate (EAC) workshop, Beijing, China, 2016
“Changes in precipitation over East Asia projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid sizes”
- 78) Y. N. TAKAYABU: Workshop on Intraseasonal Processes and Prediction in the Maritime Continent, Singapore, 2016
“Environmental factors at the selection of MJO and large-scale moist Kelvin waves” (invited)
- 79) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA and K. YONEYAMA: Workshop on Intraseasonal Processes and Prediction in the Maritime Continent, Singapore, 2016
“Modulation of diurnal cycle by Madden-Julian Oscillation observed during Pre-YMC2015 field campaign”
- 80) R. SHIROOKA, B. GENG, J. SUZUKI, H. KUBOTA, M. KATSUMATA, T. NASUNO, T. SHINODA and H. UYEDA: 32nd Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Juan, 2016
“Intra-seasonal oscillation and typhoon activity during PALAU intensive observation around the tropical western Pacific”
- 81) M. MORI: 7th Japan-EU Workshop on Climate Change Research, Tokyo, Japan, 2016
“Attribution of recent extreme events: a probabilistic approach”
- 82) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, H. KAMAHORI and C. KOBAYASHI: GODAE Workshop on High-Resolution Ocean Modelling for Coupled Seamless Predictions, Exeter, UK, 2016
“Multi-scale impacts of midlatitude ocean currents and fronts on the atmosphere” (invited)
- 83) 廣田渚郎、高薮縁、濱田篤:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「CMIP5 気候モデルにおける陸上の降水日変動」
- 84) 横山千恵、高薮縁:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「梅雨期の降雨特性に対する亜熱帯ジェットと下層対流不安定度の影響」
- 85) 濱田篤、高薮縁:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「夏季日本域の極端降水・極端対流イベントに関わる環境場の違い」
- 86) 遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、石井正好:日本気象学会2016年度春季大会 (2016)
「アンサンブル気候予測データベース(d4PDF)における東アジアの極端降水の将来変化」
- 87) 堀之内 武:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「夏季の大陸東岸から洋上にかけての降水帯とその日々の分布の概念モデル」
- 88) 野田彰、河谷芳雄:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「一般化された変換 Euler 平均(GTEM)から見た平均子午面循環(II)―絶対角運動量保存と Eliassen-Palm フラックス」
- 89) 佐藤尚毅、城岡竜一:日本気象学会 2016 年度春季大会 (2016)
「MJO の位相が南岸低気圧に与える影響」
- 90) 横井寛、森修一、勝俣昌己、米山邦夫:日本気象学会2016年度春季大会(2016)

- 「海陸同期ラジオゾンデ観測でとらえたスマトラ島西岸域の日変化 ～自由対流圏下部の気温変化～」
- 91) 芳村圭: 2015 年関東・東北豪雨災害土木学会・地盤工学会合同調査団関東グループ最終報告会 (2016)
「災害発生時の現地調査及び降水頻度に関する検討」
 - 92) 芳村圭: 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016)
「平成 27 年関東・東北豪雨による鬼怒川洪水に関する調査活動を経て」
 - 93) 森 正人、渡部雅浩、木本昌秀: 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016)
「北極温暖化増幅下での天候レジームの変化」
 - 94) 野沢徹、藤原昂: 日本地球惑星科学連合大会 2016 年大会 (2016)
「ユーラシア大陸の春季積雪面積変化が東アジアの夏季降水量に及ぼす影響の再考」
 - 95) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA and M. ONO: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
“Precipitation characteristics observed with GPM DPR, in comparison with TRMM PR” (invited)
 - 96) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
“Improvements in Detection of Light Precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-Frequency Precipitation Radar (GPM/DPR)”
 - 97) T. MACHIMURA, Y. KOSAKA and H. NAKAMURA: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
“Two dominant modes over the summertime western North Pacific and interdecadal modulations” (invited)
 - 98) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, H. KUBOTA, Y. DU, K. HU, J. CHOWDARY and G. HUANG: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
“The Indo-western Pacific Ocean capacitor mode and coherent climate anomalies in post-ENSO summer”
 - 99) S. FUJIIWARA and T. NOZAWA: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
“Revisiting impacts of spring Eurasian snow cover change on the East Asian summer precipitation”
 - 100) Y. N. TAKAYABU: International Workshop on “convection interacting with large-scale flow over the Maritime Continent – South China Sea”, Taiwan, 2016
“Characteristics of extreme rainfalls observed with 17 years of the Tropical Precipitation Measurement Mission” (invited)
 - 101) Y. N. TAKAYABU: ICTP-IITM-COLA Targeted Training Activity(TTA): Towards improved monsoon simulations, Trieste, Italy, 2016
“Satellite observations to validate climate models” (invited)
 - 102) H. NAKAMURA: Japan-Norway Arctic Science and Innovation Week (plenary keynote talk), Tokyo, Japan, 2016
“Teleconnections between the Arctic and the Asian/Pacific regions and related air-sea-ice interactions”
 - 103) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: AOGS 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016
“Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric instability on precipitation characteristics in East Asia in early summer”
 - 104) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: AOGS 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016
“Improvements in Detection of Light Precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-frequency Precipitation Radar”
 - 105) T. HORINOUCI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016
“Jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific: from day-to-day variability to climatological understanding” “Jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific: from day-to-day variability to climatological understanding”
 - 106) 小坂 優、謝 尚平: 「続・地球温暖化ハイエイトと潜在的ブーストに対する海洋熱循環の役割」研究集会

(2016)

「階段状の地球温暖化のペースメーカーとしての熱帯太平洋変動」

- 107) H. NAKAMURA and F. OGAWA: American Meteorological Society 21st Conference on Satellite Meteorology/20th Conference on Air-Sea Interaction (plenary keynote talk), Madison, WI, USA, 2016
“Potential importance of a midlatitude SST front for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the Southern Annular-Mode signatures”
- 108) Y. KOSAKA, T. MACHIMURA and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Climate Variability and Predictability over the Indo-Pacific Ocean: Two meridional teleconnection patterns over the summer Northwestern Pacific and interdecadal modulations”
- 109) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Tropical Pacific variability as the key pacemaker of the global warming staircase”
- 110) S. KUSUNOKI: CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Changes in precipitation over East Asia projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid sizes”
- 111) S. MAEDA, M. HARADA and S. WAKAMATSU: The CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Future Changes in Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific Induced by Robust Changes in the Tropical Circulation”
- 112) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: The QBO and its Global impacts – Past, Present & Future, Oxford, United Kingdom, 2016
“Representation of the Tropical Stratospheric Zonal Wind in Global Atmospheric Reanalyses”
- 113) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
“Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability on precipitation characteristics in the Baiu season”
- 114) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
“Convective cloud top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”
- 115) M. ONO and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
“Characteristics of precipitation systems observed with the GPM DPR and their relationship with environmental moisture field”
- 116) M. FUJISHIMA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
“A Statistical analysis of precipitation feature over oceanic areas adjacent to continents in the tropics from TRMM data”
- 117) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, K. YASUNAGA and K. YONEYAMA: Tropical Meteorology Meeting 2016, Uji, 2016
“Diurnal cycle and its modulation by MJO observed during Pre-PMC field campaign”
- 118) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: AOPP Annual Retreat 2016, Oxford, United Kingdom, 2016
“Representation of the Tropical Stratospheric Zonal Wind in Global Atmospheric Reanalyses”
- 119) Y. N. TAKAYABU: PMM 2016 Science Team Meeting, Houston, USA, 2016
“JAXA GPM Science Status” (invited)
- 120) K. YOSHIMURA: EGU Leonardo conference 2016, Ourense, Spain, 2016
“Data assimilation with stable water isotope information” (invited)
- 121) 松村伸治、堀之内武: 日本気象学会 2016 年秋季大会 (2016)

- 「PDO による太平洋高気圧とオホーツク海高気圧の変動」
- 122) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い」
- 123) 横山千恵、高薮縁: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「GPM KuPR 観測による中緯度降水の特徴—熱帯降水との対比から—」
- 124) 小野茉莉花、高薮縁: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「GPM-DPR データを用いた降水システム特性と環境場の関係」
- 125) 西井和晃、田口文明、吉田 聡、中村 尚、小坂 優、宮坂貴文: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「季節平均降水量の潜在的予測可能性に対する中緯度海洋の役割」
- 126) 小坂優、謝尚平: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「階段状の地球温暖化のペースメーカーとしての熱帯太平洋変動」
- 127) 宮坂貴文、中村尚: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「海洋前線帯上の移動性擾乱に伴う上昇流に対する力学・熱力学的寄与」
- 128) 尾瀬智昭: 2016年度日本気象学会秋季大会 (2016)
「東アジアの温暖化時降水量予測とモデル依存性」
- 129) 遠藤洋和、鬼頭昭雄: 2016年度日本気象学会秋季大会 (2016)
「温暖化に伴うアジアモンスーンの変化: SST効果とCO₂効果」
- 130) 大塩健志、若松俊哉、石原幸司: 日本気象学会秋季大会 (2016)
「CMIP5データにおける日本の極端降水の現在気候再現性評価に向けて」
- 131) 野田彰、河谷芳雄: 日本気象学会秋季大会 (2016)
「一般化された変換 Euler 平均(GTEM)のデータ解析上の問題点とその解決策」
- 132) 佐藤尚毅、城岡竜一: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「MJO の位相が南岸低気圧の発生と構造に与える影響」
- 133) 横井覚、森修一、勝俣昌己、米山邦夫: 日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
「Pre-YMC 観測データを用いた降水日変化メカニズムの検証」
- 134) H. NAKAMURA: Dasan Conference 2016 (invited talk), Jeju, Korea (2016)
“Active roles of midlatitude ocean in weather and climate”
- 135) 森正人: 平成 28 年度「異常気象と長期変動」研究集会 (2016)
「北極海の海水変動に対する大気応答と自然変動について」
- 136) 宮坂貴文、中村 尚: 平成 28 年度「異常気象と長期変動」研究集会 (2016)
「海洋前線帯上の鉛直流形成に対する力学・熱力学的寄与」
- 137) K. NISHII, S. TANAKA and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference, Qingdao, China, 2016
“Vertical structure and energetics of the Western Pacific Teleconnection Pattern”
- 138) B. TAGUCHI, M. NONAKA, N. SCHNEIDER and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference, Qingdao, China, 2016
“Extratropical Frontal- and Meso-scale Air-Sea Interaction: Response of atmosphere-ocean system to latitudinal shifts of the North Pacific Subarctic frontal zone”
- 139) H. NAKAMURA: Klima Campus Colloquium (invited lecture), Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 2016
“Midlatitude warm ocean currents as climatic hotspots”
- 140) S. YOKOI: Workshop on global precipitation systems, Yokohama, 2016
“Diurnal cycle of precipitation in western coastal area of Sumatra Island observed during Pre-YMC field campaign”
- 141) 藤原昂、野沢徹: 第 7 回極域科学シンポジウム (2016)
「ユーラシア大陸における初夏の積雪減少が局所的な大気循環場に及ぼす影響」
- 142) 森 正人、渡部雅浩、中村 尚、木本昌秀: 日本気象学会研究会「長期予報と大気大循環」(2016)

「北極海の海水減少が冬季中緯度大気循環へ与える影響」

- 143) K. YOSHIMURA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Future stable water isotope projection with an isotope-AGCM driven by CMIP5 SSTs”
- 144) H. NAKAMURA and K. NISHII: 2016 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2016
“Dynamics of monthly anomalies of the Western Pacific teleconnection pattern” (invited)
- 145) S. FUJIWARA and T. NOZAWA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Impacts of Early-Summer Eurasian Snow Cover Change on Atmospheric Circulation in Northern Mid-Latitudes”
- 146) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY and G. HUANG: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Coherent climate anomalies over the Indo-western Pacific in post-El Niño summer” (invited talk)
- 147) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Tropical Pacific variability as a key pacemaker of the global warming staircase”
- 148) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Dynamical and thermodynamical contributions to the vertical motions over the wintertime oceanic frontal zones”
- 149) T. OSE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Systematic Biases of Present-day’s Land Surface Air Temperature and Precipitation and Associated Tendency of Future Projection in the Asia Monsoon of the CMIP5 models”
- 150) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, K. YASUNAGA and K. YONEYAMA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Diurnal cycle and its modulation by Madden-Julian oscillation observed around western coast of Sumatra Island: preconditioning for offshore convection by gravity waves”
- 151) S. KUSUNOKI: 97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, USA, 2017
“Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2”
- 152) K. OSHIO, K. ISHIHARA and S. WAKAMATSU: 97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, USA, 2017
“Reproducibility of Atmospheric Conditions around Japan by CMIP5 for the Assessment of Future Change in Extreme Precipitation with Statistical Downscaling Approach”
- 153) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, H. NAKAMURA, T. OSE, T. HORINOUCI, T. NOZAWA, Y. KAWATANI and R. SHIROOKA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Project Introduction: Toward an understanding of precipitation changes in the East Asia”
- 154) H. NAKAMURA, K. NISHII, Y. KOSAKA, M. MORI, B. TAGUCHI, T. MIYASAKA, H. HOTTA and S. SUGANO: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Potential predictability in the extratropics: A reassessment through AGCM experiments with high-resolution SST”
- 155) H. ENDO and A. KITOH: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Future changes in the Asian summer monsoon: the role of direct CO₂ radiative forcing and indirect SST warming”
- 156) T. HORINOUCI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific”

- 157) T. NOZAWA and S. FUJIWARA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Influence of Springtime Eurasian Snow Cover Retreat on Atmospheric Circulation over East Asia”
- 158) Y. KAWATANI, S. WATANABE, L. GRAY and S. OSPREY: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“The effects of well-resolved stratosphere on representations of the tropospheric circulations in climate model simulations”
- 159) N. SATO, S. YOKOI and R. SHIROOKA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Influence of the MJO and Kuroshio on the cyclone activity around Japan”
- 160) K. OSHIO, K. ISHIHARA and S. WAKAMATSU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Assessment of future change in Extreme Precipitation Frequency around Japan by applying Statistical Downscaling approach to CMIP5 data”
- 161) S. MATSUMURA and T. HORINOUCHI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high”
- 162) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII, Y. TANIMOTO and B. QIU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Wintertime imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on cloudiness and precipitation”
- 163) N. SUETO, A. YATAGAI and Y. N. TAKAYABU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“The Effect of Atmospheric Rivers on Japanese Heavy Precipitation”
- 164) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Tropical Pacific variability as a key pacemaker of the global warming “staircase””
- 165) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA and M. ISHIGAKI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013”
- 166) M. SATOH, T. OHNO, A. WING, S. BONY, B. STEVENS and K. REED: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“RCEMIP: Radiative Convective Equilibrium Model Inter-comparison Project”
- 167) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Large-scale environmental conditions related to mid-summer extreme rainfall events over the Japan region”
- 168) K. KIKUCHI, Y. N. TAKAYABU and H. NAKAMURA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Relationship between the MJO and precipitation in East Asia: Event-to-event variations”
- 169) S. KUSUNOKI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation?”
- 170) K. YOSHIMURA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Relationship between stratiform fraction and precipitation isotope: Was the isotopic parameterization wrong?”

- 171) S. YOKOI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Future change of extreme precipitation projected by NICAM AMIP-type experiment”
- 172) Y. N. TAKAYABU: JAXA/NASA Clouds and Precipitation Mission Concept Study Group Meeting, Pasadena, USA, 2017
“TRMM/GPM Science: What have been Learned and what the gaps are”
- 173) Y. N. TAKAYABU and K. SUZUKI: JAXA/NASA Clouds and Precipitation Mission Concept Study Group Meeting, Pasadena, USA, 2017
“Post-GPM/EarthCare Science and Applications focus in Japan”
- 174) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI and K. YONEYAMA: EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria, 2017
“Diurnal cycle of precipitation observed in the western coastal area of Sumatra Island, Indonesia: Offshore preconditioning by gravity waves”
- 175) R. SHIROOKA: EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria, 2017
“Observational research study around tropical Western Pacific: PALAU (Pacific Area Long-term Atmospheric observation for Understanding climate change) project”
- 176) 高薮縁、横山千恵、濱田篤、重尚一、山本宗尚、山地萌果、久保田拓志、幾田泰醇: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“GPM SLH latent heating retrievals with a study on extratropical precipitation systems” (invited)
- 177) 濱田篤、高薮縁: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”
- 178) 野沢徹、藤原昂: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japa, 2017
「シベリアの春季積雪減少が東アジア域の大気循環場に与える影響」
- 179) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA and M. ISHIGAKI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013” (Invited)
- 180) M. MORI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Evaluation of Atmospheric Response to Arctic Sea Ice Anomalies”
- 181) K. NISHII, B. TAGUCHI, A. KUWANO-YOSHIDA, H. NAKAMURA and T. MIYASAKA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“The role of midlatitude oceanic fronts in the formation of the climatological mean atmospheric circulation”
- 182) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI and K. YONEYAMA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japa, 2017
“Observational study of diurnal offshore migration of precipitation area over the Indonesian Maritime Continent”
- 183) R. SHIROOKA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Intra-seasonal oscillation and typhoon activity obtained by long-term observational project around warm pool region”
- 184) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
「静止衛星高頻度観測を用いた積雲鉛直流の推定」
- 185) 横山千恵、高薮縁、濱田篤、重尚一、山本宗尚、山地萌果、幾田泰醇: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
「GPM DPR 潜熱加熱スペクトル推定のための中緯度参照テーブルの作成: 気象庁 LFM データの解析」
- 186) 小野茉莉花、高薮縁: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)

- 「GPM DPR データを用いた中・低緯度の降水システム特性の海陸による違いに関する統計解析」
- 187) 藤島美保、高薮縁、濱田篤: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
「TRMM 衛星データを用いた熱帯の海陸遷移領域における降雨特性の統計的解析」
- 188) 尾瀬智昭: 日本気象学会2017年度春季大会 (2017)
「アジア大陸気温のモデル再現性バイアスおよび関連する将来変化の要因」
- 189) 西井和晃、田口文明、吉田聡、中村尚、小坂優、宮坂貴文: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
「ユーラシア大陸寒冷化と北極海での海水減少」
- 190) 堀之内武・館野愛実: 日本気象学会2017年春季大会 (2017)
「ジェット・渦位分布と降水分布」
- 191) 松村伸治・堀之内武: 日本気象学会2017年秋季大会 (2017)
「夏季北太平洋における亜熱帯ジェットの将来変化」
- 192) 野沢徹、藤原昂: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
「温暖化に伴うユーラシア大陸の春季積雪減少と日本・東アジア域における夏季大気循環場の変化との関連性について」
- 193) 野田彰: 日本気象学会春季大会(2017)
「データ解析における残差循環の任意性と多様性」
- 194) 佐藤尚毅、城岡竜一: 日本気象学会2017年度春季大会 (2017)
「早春における関東地方南岸での低気圧活動と降水の極大」
- 195) H. NAKAMURA: 2017 CLIVAR International Workshop on Boundary Currents: 5-6 June 2017, Qingdao, China, 2017
“Impacts of warm western boundary currents and associated oceanic fronts on the mean state and variability of the extratropical atmosphere” (invited)
- 196) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, C.-Y. WANG, M. WATANABE, Y. IMADA, C. DESER and T. FAN: JSPS Japan-Norway Symposium 2017 “Past, Present, and Future of the Arctic and Antarctic”, Bergen, Norway, 2017
“Slowdown & acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability”
- 197) Y. N. TAKAYABU: The Future of Cumulus Parametrization Workshop: 10-14 July 2017, Delft University of Technology, The Netherlands, 2017
“Land/Ocean Contrasts in Precipitation Characteristics Observed with the GPM DPR and Their Relationship to Column Relative Humidity”
- 198) Y. N. TAKAYABU: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
“GPM SLH Latent Heating Algorithm for Extratropical Precipitation Systems”
- 199) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI and K. YONEYAMA: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
“Diurnal offshore migration of precipitation area over western coastal waters of Sumatra Island observed during Pre-YMC field campaign: Offshore preconditioning due to gravity waves”
- 200) Y. KOSAKA, S.-P. XIE and C.-Y. WANG: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
“Tropical Pacific variability as a pacemaker of the staircase-like global warming”
- 201) R. SHIROOKA: Workshop on Aerosol Observation and its Impact in East and Southeast Asia, Toyama, Japan, 2017
“Current Status of the Continuous Observation at Palau Site”
- 202) Y. N. TAKAYABU: 2017 Workshop for Typhoon, cloud and climate study, National Taiwan University, Taipei Taiwan, 2017
“GPM Spectral Latent Heating (SLH) retrieval algorithm for extratropical precipitation systems”
- 203) H. NAKAMURA, K. NISHII, R. MASUNAGA and B. TAGUCHI: 2017 IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Cape Town, South Africa, 2017

- “Impacts of midlatitude oceanic fronts on the mean state and variability of the extratropical atmosphere”
- 204) H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO and T. MIYASAKA: 2017 IAPSO-IAMAS-IAGA Joint Assembly, Cape Town, South Africa, 2017
- “Satellite-measured daily-to-seasonal variations of low-cloud fraction over the South Indian Ocean”
- 205) Y. N. TAKAYABU: 2017 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation & Climate Sensitivity, the University of Tokyo, Japan, 2017
- “Convective latent heating observed from space: From TRMM to GPM”
- 206) Y. N. TAKAYABU: STS forum 2017 – 14th Annual Meeting, Kyoto, Japan, 2017
- “The science of climate change (with an emphasis on the use of satellites) International collaboration in climate monitoring”
- 207) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. SATO, S. WATANABE and T. J. DUNKERTON: Joint SPARC Dynamics & Observations Workshop – QBOi, FISAPS & SATIO-TCS, Kyoto, Japan, 2017
- “ENSO modulation of the QBO: Results from MIROC models with and without nonstationary gravity wave parameterization”
- 208) Y. N. TAKAYABU: 2017 PMM Science Team Meeting, San Diego, CA, 2017
- “JAXA GPM Science Status” (invited)
- 209) 横井寛: 第48回メソ気象研究会・気象災害委員会研究会(2017)
- 「台風通過頻度の統計解析からみた2016年台風」
- 210) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY, G. HUANG and H. KUBOTA: Asian Conference on Meteorology 2017, Busan, Korea, 2017
- “Coherent climate anomalies over the Indo-western Pacific in post-El Niño summer”
- 211) K. YOSHIMURA: International Workshop on Isotopes for Tropical Ecosystem Studies, San Jose, Costa Rica, 2017
- “Data assimilation of Isotopic information for multi centennial atmospheric reanalysis” (Invited)
- 212) 小坂優、謝尚平、C.-Y. Wang、今田由紀子、渡部雅浩、T. Fan、C. Deser: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「熱帯太平洋十年規模変動に伴う全球気温変動とその不確実性」
- 213) 高薮縁、横山千恵、濱田篤、幾田泰醇、重尚一、山本宗尚、山地萌果、久保田拓志: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「GPM SLH(スペクトル潜熱加熱推定法) V05プロダクトの紹介: PartI アルゴリズム概要と初期解析結果」
- 214) 濱田篤、横山千恵、高薮縁、幾田泰醇、重尚一、山地萌果: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「GPM SLH(スペクトル潜熱加熱推定法) V05プロダクトの紹介: Part II: リトリバブル 手法」
- 215) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い(2)」
- 216) 辻宏樹、高薮縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「Atmospheric Riverと切離低気圧に伴う降水の統計的調査」
- 217) 末藤菜保、谷田貝亜紀代、高薮縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「Atmospheric Riverが日本の豪雨に与える影響」
- 218) 宮坂貴文、中村尚、碓氷典久、佐々木秀孝、川瀬宏明、野坂真也: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「2013年8月島根豪雨における海面水温の影響」
- 219) 尾瀬智昭: 日本気象学会2017年度秋季大会(2017)
- 「温暖化による夏季東アジアの降水量変化予測のモデル比較」
- 220) 遠藤洋和、鬼頭昭雄、植田宏昭: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
- 「温暖化に伴うアジアモンスーン循環の変化」
- 221) 野田彰、河谷芳雄: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)

- 「一般化された変換Euler 平均(GTEM)から見た平均子午面循環(III)---対称渦拡散テンソル(非定常擾乱)の効果」
- 222) 河谷芳雄, 渡辺 真吾, Lesley Gray, Scott Osprey: 日本気象学会 2017 年度秋季大会(2017)
「成層圏が対流圏循環に及ぼす影響:MIROC-AGCM を用いた考察」
- 223) 佐藤尚毅、城岡竜一: 日本気象学会2017年度秋季大会(2017)
「基本場の東西勾配を考慮した浅水方程式系におけるMJO的な東進モード」
- 224) 河谷芳雄、Kevin Hamilton、Lesley Gray、Scott Osprey、渡辺真吾、山下陽介:「様々な結合過程がもたらす異常気象の実態とそのメカニズム」に関する研究集会(2017)
「成層圏が対流圏循環に及ぼす影響:MIROC-AGCMを用いた考察」
- 225) 田口文明、西井和晃、中村尚、小坂優、森正人、宮坂貴文、小守信正、吉田聡、野中正見: 日本海洋学会 2017年度秋季大会 (2017)
「熱帯域の大気海洋変動が中高緯度・北極域へ及ぼす遠隔影響:AFES過去再現実験とCFESペースメーカー実験」
- 226) 西井和晃, 田口文明, 吉田聡, 中村尚, 小坂優, 宮坂貴文: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
「中緯度海洋前線帯と西風ジェット」
- 227) M. MORI: Fifth Session of the East Asia winter Climate Outlook Forum (EASCOF-5), Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 2017
“The role of Arctic sea-ice decline on cold winters in recent Eurasia” (invited lecture)
- 228) K. YOSHIMURA: 5th International Conference on Reanalysis (ICR5), Rome, 2017
“Atmospheric reanalysis for multi-centuries using historical weather archives and isotopic proxies”
- 229) Y. N. TAKAYABU: Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-6), Singapore, 2017
“Precipitation observed from space and its extremes” (Invited review)
- 230) T. OSE: The Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-VI), Singapore, 2017
“Systematic Biases of Present-days Land Surface Air Temperature and Precipitation and Associated Tendency of Future Projection in the Asia Monsoon of the CMIP5 models”
- 231) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, H. KAMAHORI, K. ONOGI and S. OKAJIMA: 5th International Conference on Reanalysis, Rome, Italy, 2017
“On the Significance of Using High-Resolution Sea Surface Temperature in Atmospheric Reanalysis Production” (invited)
- 232) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, Y. IKUTA, S. SHIGE, M. YAMAJI and T. KUBOTA: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“GPM SLH: Convective Latent Heating Estimated with GPM Dual-frequency Precipitation Radar Data”
- 233) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”
- 234) H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“A statistical study on synergetic effects of atmospheric rivers and cut-off lows upon precipitation”
- 235) T. OSE: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“Future precipitation change during the summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments”
- 236) S. KUSUNOKI: 98th American Meteorological Society Annual Meeting, Austin, USA, 2018
“When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation?”
- 237) M. MORI, Y. KOSAKA, M. WATANABE, H. NAKAMURA and M. KIMOTO: Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
“Quantification of influence of Arctic sea-ice reduction and natural variability to recent Eurasian cooling”
- 238) B. TAGUCHI, K. NISHII, M. MORI, H. NAKAMURA, Y. KOSAKA and T. MIYASAKA: Fifth International

- Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
 “Remote tropical influence on a regional Arctic warming over the Barents Sea since the late 1990s”
- 239) K. NISHII, B. TAGUCHI, A. KUWANO-YOSHIDA, H. NAKAMURA Y. KOSAKA, and T. MIYASAKA: Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
 “Cooling trend over Eurasian continent and Arctic sea ice decline”
- 240) B. TAGUCHI, K. NISHII, H. NAKAMURA, Y. KOSAKA, M. MORI, T. MIYASAKA, N. KOMLORI, A. KUWANO-YOSHIDA and M. NONAKA: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, 2018
 “Quantifying the relative contribution of remote influence from tropics and extra-tropical oceanic variability on the interannual-to-decadal variability of the midlatitude atmosphere”
- 241) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, 2018
 “Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013”
- 242) K. Nishii, H. Nakamura and Y.J. Orsolini: 北方圏国際シンポジウム, 北海道紋別市 (2018)
 “Cooling trend over Eurasian continent and Arctic sea ice decline”
- 243) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, H. TSUJI, H. NAKAMURA, T. OSE, T. HORINOCHI, T. NOZAWA, Y. KAWATANI and R. SHIROOKA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Project Introduction FY2017: Toward an understanding of precipitation changes in the East Asia”
- 244) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU, O. ARAKAWA and T. OSE: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments”
- 245) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events over the southern Japan region”
- 246) H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “A statistical study of rainfall enhancement through an interplay of atmospheric rivers and cut off lows”
- 247) M. SATOH: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Project DYAMON “DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains” for high resolution (< 5 km) global model intercomparison”
- 248) N. HIROTA, T. OGURA, H. TATEBE, H. SHIOGAMA, M. KIMOTO and M. WATANABE: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Roles of shallow convective moistening in the eastward propagation of the MJO in MIROC6”
- 249) H. Nakamura: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Impact of high-resolution SST data on atmospheric reanalysis as revealed in a new JRA-55 product”
- 250) Y. KOSAKA, T. MACHIMURA and H. NAKAMURA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “Two dominant teleconnection patterns over the summer Northwestern Pacific and their interdecadal modulations”
- 251) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, S. IIZUKA and A. MANDA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” Tokyo, Japan, 2018
 “Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Kyushu in early July 2017”
- 252) K. NISHII: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo,

Japan, 2018

“Midlatitude oceanic fronts and atmospheric westerlies”

- 253) M. MORI: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan 2018

“Quantification of influence of Arctic sea-ice reduction and internal variability to recent Eurasian cooling”

- 254) H. ENDO, A. KITOH and H. UEDA: The 3rd International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018

“A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere”

- 255) T. HORINOCHI, Y. TAKAYABU, C. YOKOYAMA, T. OSE and S. MATSUMURA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018

“East Asian summertime jet and precipitation in CMIP5 models”

- 256) S. MATSUMURA and T. HORINOCHI: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018

“Weakening of the midlatitude jet over the North Pacific in a warming climate”

- 257) T. NOZAWA and S. FUJIWARA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan (2018)

“On the linkage between springtime Eurasian snow cover retreat due to the global warming and changes in summertime atmospheric circulation over Japan and East Asia”

- 258) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, L. GRAY, S. OSPREY, S. WATANABE and Y. YAMASHITA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018

“The effects of well-resolved stratosphere on representations of the Northern winter tropospheric circulations in the MIROC-AGCM simulations”

- 259) N. SATO, S. YOKOI and R. SHIROOKA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018

“Influence of the MJO on the wintertime cyclone activity around Japan”

- 260) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. SATO, S. WATANABE, T. J. DUNKERTON and K. KUKUCHI: 熱帯気象研究会(2018)

“The QBO modulations associated with ENSO in the MIROC models with and without nonstationary gravity wave parameterization”

7. 研究者略歴

研究代表者

高藪 縁

東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科地球物理学専攻修士課程修了、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、東京大学大学院理学系研究科教授、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、九州大学大学院理学研究科修士課程修了、博士(理学)、現在、気象研究所気候研究部長（平成30年4月より気象研究所 気候研究部第一研究室 研究官）

3) 堀之内 武

京都大学理学部卒業、京都大学大学院理学研究科博士課程(地球惑星科学専攻)修了、博士(理学)、
京都大学助手・助教、現在、北海道大学地球環境科学研究所准教授

4) 野沢 徹

京都大学理学部卒業、京都大学大学院理学研究科博士課程研究指導認定退学、博士(理学)、国立環境研究所室長、現在、岡山大学自然科学研究科教授

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、国立研究開発法人海洋研究開発機構主任研究員

6) 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

II. 成果の詳細

II-1 温暖化に伴う水蒸気大循環・大気海洋結合変動が日本と東アジア域の降水現象に及ぼす影響

東京大学

大気海洋研究所

高薮 縁・佐藤 正樹

生産技術研究所（兼 大気海洋研究所）

芳村 圭

先端科学技術研究センター

中村 尚・小坂 優・森 正人

<研究協力者>

東京大学

大気海洋研究所

濱田 篤・横山 千恵・宮川 知己

先端科学技術研究センター

宮坂 貴文

三重大学大学院

西井 和晃

国立研究開発法人国立環境研究所

廣田 渚郎

弘前大学

谷田貝 亜紀代・末藤 菜保

平成27～29年度累計予算額：59,859千円（うち平成29年度：20,673千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

近年、日本では記録的豪雨の頻発化など、地球温暖化に伴う「降水異変」が懸念されている。二酸化炭素などの人為起源の温室効果ガスが大気中に急速に排出され、地球温暖化はすでにまぎれもない現実として起こっている（IPCC第5次評価報告書（IPCC AR5））。そして、地球温暖化は、地球の平均気温上昇の数値からは想像がつかないスピードで、私たちの生活に影響をもたらしている可能性がある。その一つが降水現象の変化である。

将来の気候を予測するためには、気候モデルを使って数値シミュレーションを行う。気候モデルでは、大規模な大気循環の再現性や将来変化については比較的議論しやすいと考えられているが、雨がどのくらいの強さで降るかなどを精確に表現することは、現在の気候モデルはまだ苦手である。それは、大気の流れ、気温、湿度、陸面や海表面の状態などの環境条件によって、雨の降り方いかによりコントロールされるか、ということを経験的に表現するための降水や対流の物理過程に未解明な部分が多く残っているからである。

本課題では、観測データと気候モデル実験を組み合わせることで研究することにより、日本と東アジア域の降水現象の将来変化をより詳しく知るための取り組みをした。最新の高性能衛星観測データをもとに現実に起きている豪雨や降水のメカニズムを研究し、さらに海面水温やジェット気流などの大規模な気候の状態との関係を明らかにすることに重点をおいた。たとえば、人工衛星から観測した立体的な雨のデータを利用して、雨の特徴が大規模な気候状態によってどのように決められるかを調査し、その結果を気候モデルが予測する将来の大規模場の情報と組み合わせ、雨の降り方が将来どのように変わるかを推定する研究を行った。大量の衛星観測データの解析に基づく知見をもとに、21世紀末に関東・東北・北陸地方において集中豪雨をもたらす組織化した降水が増加する可能性を示す具体的な成果を出したことは特筆に値する。また詳細な海面水温データをモデルに適用する必要性を示し、気象庁の再解析データに新しいプロダクトを付加することに貢献した。

[キーワード]

地球温暖化、気候変動、将来予測、日本・東アジア域、極端降水

1. はじめに

近年、日本では記録的豪雨の頻発化など、地球温暖化に伴う「降水異変」が懸念されている。二酸化炭素などの人為起源の温室効果ガスが大気中に急速に排出され、地球温暖化はすでにまぎれもない現実として起こっている（IPCC AR5）。そして、地球温暖化は、じわじわと上がる地球の平均気温の一見緩慢な変化からは想像がつかないスピードで、私達の生活に影響をもたらしているかもしれない。その一つの可能性が降水現象の変化である。

将来の気候を予測するためには、気候モデルを使って数値シミュレーションを行う。気候モデルでは、大規模な大気循環の再現性や将来変化については比較的議論しやすいと考えられているが、雨がどのくらいの強さで降るかなどを精確に表現することは、現在の気候モデルはまだ苦手である。それは、大気の流れ、気温、湿度、陸面や海表面の状態などの環境条件によって、雨の降り方いかにコントロールされるか、ということを数式で表現するための降水や対流の物理過程に未解明な問題が多く残っているからである。

そこで本課題では、観測データと気候モデル実験を組み合わせることで研究することにより、日本と東アジア域の降水現象の将来変化をより詳しく知るための取り組みをした。今回の研究プロジェクトでは、観測データをもとに現実に起きている豪雨や降水のメカニズムを研究し、さらに海面水温やジェット気流などの大規模な気候の状態との関係を明らかにすることに重点をおいた。

2. 研究開発目的

地球規模の気候変化が東アジアの降水を将来いかに変化させるかについての見通しを立てるため、気候変動に伴う大気大循環の変化と、日本・東アジア地域での降水特性変化や極端降水との関係について集中的に調べ、有効な温暖化影響対策に生かすための情報を抽出することを目的とする。本サブテーマでは、以下のテーマに焦点を当てた研究を推進するとともに、課題全体の総括を行う。(1)最新の高機能衛星観測データの利点を生かした降水特性の解析に基づき、極端降水をもたらす降水システムの特徴とその環境条件を解明する。(2)温暖化に伴う大気大循環および海面水温の将来変化が日本・東アジア域の極端降水に与える影響を評価する。(3)水の相変化に感度を持つため局所的な降水過程の詳細を探ることに利点がある水同位体情報を用いて東アジア・東南アジアの降水の水蒸気起源を解析する。(4)日本周辺の海洋変動や熱帯太平洋の長期変動が日本周辺の雲・降水系に与える影響の季節性について、温暖化に伴う将来予測やその不確実性の評価にも資する調査を行う。

3. 研究開発方法

(a) 2014年8月広島豪雨におけるAtmospheric Riverと切離低気圧の相乗効果の解析

2014年8月に発生した広島豪雨の事例について対流圏上部の大規模な大気現象（Atmospheric River(AR)と切離低気圧（COL））の効果を調べるため、気象庁メソスケール解析データを用いた大気構造の解析および、ポテンシャル渦度インバージョン解析を行った。また領域雲解像モデルCRESSを用いた感度実験を行った。

(b) Atmospheric Riverと切離低気圧の相乗効果に伴う降水の統計的調査

雨の強化に対するARとCOLの相乗効果の一般性を調べるため、長期の全球再解析データ(JRA55)および衛星全球降水マップ(GSMaP)のデータを用いて統計的解析を行った。詳細な衛星降水観測が得られる14年間についてJRA55の350Kポテンシャル渦度データと可降水量データより北西太平洋域のCOLとARを抽出した。COL近傍にARが共存する場合としない場合の降水活動の差を統計的に求めた。ARとCOLの相乗効果に関する統計解析結果を広島豪雨の事例と比較して議論した。

(c) 日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い

極端に強い雨を降らせる降水システムは極端に高い対流の降水システムとは異なるという本チームの発見（Hamada et al. 2016 Nature Commu）に基づき、日本の陸上および南海上において、両

者の降水システムの特徴とそれらの大規模環境場の違いを調べた。熱帯降雨観測計画（TRMM）衛星搭載降水レーダによる長期間の降水3次元観測データ、および、全球再解析データを利用して特に自由対流圏における水蒸気の流れに着目して調査した。

(d) 初夏の日本付近の降雨特性と大規模場の関係の調査

TRMMおよび全球降雨観測衛星（GPM）搭載降雨レーダデータを利用し、雨の連続域を3次元で現す降雨イベントデータベースを作成した。そのデータベースを用いて梅雨期の雨をもたらす降雨イベントの特性を大規模場との関係を解析した。降雨イベントの特性に基づき日本の梅雨期の雨をタイプ分けした。特に、亜熱帯ジェットと対流圏下層の対流安定度に注目し、大規模場条件とそれぞれの降雨タイプの貢献度合いについての関係を統計的に定量化した。

(e) 温暖化に伴う降雨特性変化の推定

上記(d)の結果に基づき、初夏の日本付近の雨を代表する3タイプの降水システム（温帯低気圧タイプ、組織化タイプ、小面積タイプ）について、の大規模場（大規模鉛直流と海面水温）を指標とした参照テーブルを作成した。第5次結合モデル相互比較計画（CMIP5）気候モデルの大規模環境場の変化予測から、初夏の日本付近での21世紀末の降雨特性変化を推定した。

(f) 水同位体情報を用いた東アジア・東南アジアの降水の水蒸気起源解析研究

豪雨の発生メカニズムの解明に資するため、日本とタイにおいて、水蒸気と降水の同位体比の観測と水蒸気起源解析を実施した。平成27年関東東北豪雨の発生した地域において水蒸気同位体比の連続観測を行い、同位体比を組み込んだ大気大循環モデルの検証をおこなった。さらにそのモデルを用いて豪雨時のシミュレーションを行い、水蒸気同位体比変動のメカニズムを解明して論文化した（野本・芳村, 2017）。同様な手法をタイ6地点での観測結果にあてはめ、モンスーン域での同位体比変動のプロセスについての理解を深めた。

(g) 黒潮など日本周辺の海洋変動が局所的に雲や降水系の形成に与える影響

i) 東方海上の黒潮続流の変動が下層大気や雲・降水系の形成に与える影響を大気再解析データ・衛星データから調査した。ii) 冬季に黒潮続流域で発達する温帯低気圧に伴う雲・降水系と密接に関連する上昇流の要因を、暖流からの影響に着目しつつ、大気再解析データ力学的診断手法を適用して定量的に評価した。iii) 冬季黒潮・黒潮続流が大気境界層の成層度や海上風収束を通じ下層雲の分布や雲粒数濃度に及ぼす影響を航空機観測と衛星観測から同定した。iv) 東シナ海から日本海の海面水温が九州と山陰地方の集中豪雨に与える影響を領域大気モデル実験から調査した。

(h) 熱帯太平洋の結合変動が東アジアの降水に及ぼす遠隔影響

熱帯北西太平洋の積雲対流活動の変調を伴い、東アジアの夏季天候に大きく影響する大気循環偏差「太平洋-日本（PJ）パターン」がENSO衰退直後の夏に現れやすいという遅延励起メカニズムとその長期変調の調査のため、i) 気候モデル内でENSOを人為的に操作する数値実験、ii) 気象官署の観測データに基づく19世紀末まで遡るPJ指標の作成、及びiii) 長期大気再解析データに基づくPJパターンの卓越性の変調の解析を実施した。

(i) 熱帯太平洋数十年規模結合変動による地球温暖化の加減速

1990年代末以降の温暖化停滞に寄与した熱帯太平洋数十年規模変動が、それ以前の温暖化の加減速に与えた影響について、気候モデル内で熱帯太平洋海面水温変動を観測値に追従させる「ペースメーカー実験」から評価した。また、CMIP5データを用いて、この熱帯太平洋変動による全球影響の不確実性の評価と地球温暖化の加減速期の全球エネルギー収支の解析を行った。

(j) 熱帯と中緯度の海面水温がもたらす大気変動の潜在的予測可能性

i) 北西太平洋海洋前線帯の10年規模の南北シフトに対する冬季アリューシャン低気圧の応答とそのメカニズムを大気大循環モデル (AGCM) によるアンサンブル実験から調査した。さらに、アリューシャン低気圧の変動に伴う海上風変化を大気海洋結合モデルに与えるアンサンブル感度実験を行うことで、海洋の主水温躍層深の変動に伴う大規模波動を励起させ、その西進に伴う大気海洋結合系変動の時間発展とその不確実性を調べた。ii) 過去30余年に衛星観測による高解像度の海面水温・海水分布を全球に与えたAGCMアンサンブル実験の結果を、熱帯と亜熱帯・中高緯度の海面水温のいずれか一方について年々変動を消して平年の海面水温 (海水) 分布の季節変化を繰り返し与えた2種類のAGCMアンサンブル実験と比較することにより、それぞれの海域の水温変動がもたらす大気の年々変動の潜在的予測可能性を評価した。

(k) 冬季東アジア気候変動のメカニズム

冬季モンスーン変動に関わる大気循環偏差「西太平洋パターン」の維持過程の解明に向け、その顕著事例の合成図に運動・有効位置エネルギー収支解析を適用した。また、これを励起し得る熱帯変動を観測データの統計解析から調査した。さらに、中緯度海洋前線帯の影響をAGCMアンサンブル実験により調査した。

(l) 北極海の海水変動がユーラシア・東アジア域にもたらす大気循環変動

北極海の海水変動が大気循環へ及ぼす影響を、AGCM巨大アンサンブル実験結果に基づき、大気循環における卓越変動の確率分布の変化から調査した。

(m) 中緯度の海面水温分布が対流圏・成層圏結合変動に果たす役割

中緯度南大洋の水温前線が南極成層圏オゾン減少と南半球対流圏西風トレンドの関わりに果たす効果を評価するため、AGCMを用いて現実的な水温前線を与えた実験と水温前線を除去した実験とを行い、それぞれの実験における南極成層圏のオゾン減少による南半球対流圏西風トレンドを観測と比較した。

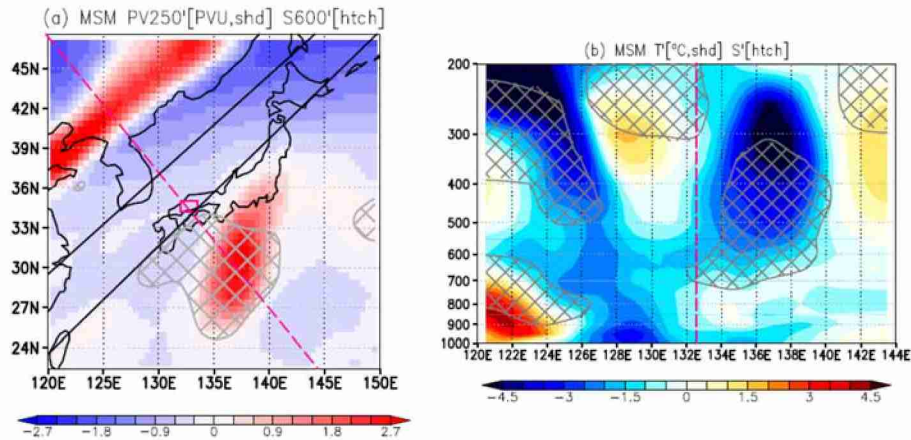
4. 結果及び考察

(a) 2014年8月広島豪雨におけるAtmospheric Riverと切離低気圧の相乗効果の解析

平成26年8月20日未明に広島では、3時間に200mmを超える豪雨が発生し、土砂崩れなどで75名の犠牲者を出す過去30年で最悪の土砂災害になった。この時、大規模大気場に見られたAtmospheric River (AR) (Ralph et al. 2006)¹⁾と上層寒冷渦(Cut-off Low, COL)の豪雨発生に対する役割を、データ解析・数値実験から定量的に示した。

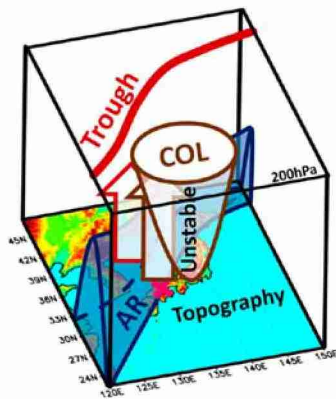
まず、気象庁のメソ解析データを用いて、当日のポテンシャル渦度分布に対するインバージョン解析で上昇流と気温を診断した (図(1)-1)。その結果、広島域は、北方の上層トラフに伴う上昇流と南東から接近した上層寒冷渦に伴う上昇流が重なり、さらにその上昇流が寒冷渦に伴い不安定化された領域に診断されていた。この結果は、中層の不安定域での上昇流が激しい対流に寄与していた可能性を示唆している。

次に、雲解像モデルCReSS (水平分解能2.5km)を用いて、気象庁解析データを初期値・境界値とし、この広島豪雨事例の再現実験を行った。実験結果は、中国地方への南西からの深い水蒸気流入、南東からの上層渦の接近などの大規模場の様子を再現しており、大規模場との関係を議論するためには十分な再現性であると考えられる。



図(1)-1 (a) 250hPaでのポテンシャル渦度偏差分布。ハッチは600hPa で安定度偏差 $<-0.3 \times 10^{-6} \text{m}^2 \text{Pa}^{-2} \text{s}^{-2}$ で定義した不安定領域。(b) 左図の赤破線鉛直断面での気温偏差分布。ハッチは不安定領域。

続いて、この再現実験をコントロール実験とした感度実験を行い、ARに伴い自由対流圏が深く湿っていたこと、上層渦が接近したことの影響を調べた。まず、初期値・境界値の水蒸気量を、800hPa以下で気候平均値に置き換えた実験、及び800hPa以上で置き換えた実験を行い比較した。800hPa以下を置き換えた実験では、再現実験の様な中国地方の降水が見られるが、800hPa以上を置き換えた実験では見られない。これは、この事例における水蒸気量の気候平均値からの偏差は大気中上層で顕著であるが、常に湿っている下層では比較的大きくならないことを反映すると同時に、中上層の大きな水蒸気偏差が豪雨の発生に重要な役割を果たしていたことを示す。次に、上層渦を初期値・境界値から取り除いた実験を行うと、中国地方の降水は見られなくなった。つまり、概念図(1)-2に示すように、ARの存在で大気が中上層まで湿っていたこと、上層渦が接近したことという大規模場の状況が、この広島豪雨の発生にとって重要な要素であったことが示唆された (Hirota et al. 2016, MWR)。



図(1)-2 広島豪雨に影響した大循環場の概念図。上層トラフに伴う深い水蒸気フラックス (Atmospheric River) と南東から近づいた上層寒冷渦の双方が豪雨をもたらし強い対流の発生に影響したことが示された。

(b) Atmospheric Riverと切離低気圧の相乗効果に伴う降水の統計的調査

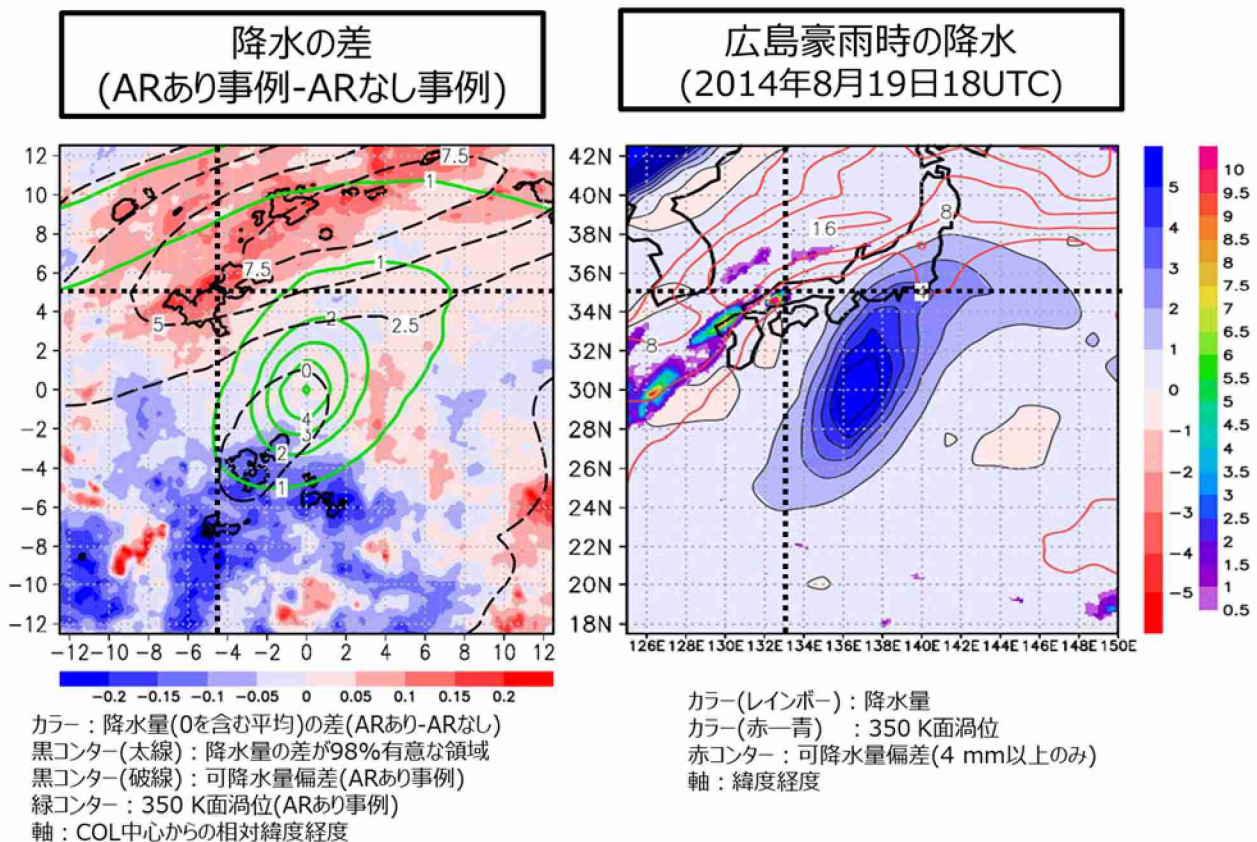
日本を含む湿潤気候域では、ARに伴う中上層の湿潤化やCOLが誘起する中層の上昇流のような中上層の要因よりも、下層の水蒸気収束や下層ジェットといった下層の要因が大雨の原因として強調される(例えばChen et al. 2005²⁾; Kato 2006³⁾)。そのため、広島事例のような豪雨について中上層の要因を考慮すべきだということについて疑問視する意見があった。そこで、中上層大気状態の強雨への効果を統計的に実証するため、2001-2014年の14年間の全球再解析データ (JRA55) と衛星全球降水マップ (GSMaP) のデータを用い、北西太平洋域におけるARとCOLの相乗効果について統計的調査を行った。

まず初めに、JRA55の350K等温位面ポテンシャル渦度を用いて抽出したCOLを、JRA55の鉛直積算可降水量を用いて抽出したARから5° 以内に存在するCOL (ARあり事例) と存在しないCOL (ARなし事例) に分類した。続いて、ARあり事例とARなし事例それぞれについてコンポジット解析を行った。その結果、ARあり

事例では、COLの北側にARに伴って可降水量が多い領域が存在した。ARあり事例とARなし事例の降水の差を取ると、ARあり事例のほうがARなし事例よりも降水が有意に強化されている領域がCOLの北側のARに沿って存在する。特にCOLの北西側でARの南側の領域に集中して存在する。ARとCOL、COLの北西における降水が有意に強化されている領域の三者の位置関係について、広島での豪雨事例と比較すると、両者は非常によく似た位置関係になる(図(1)-3)。すなわち、広島での豪雨事例におけるCOLの中心から見たARの位置や強雨域(広島)の位置は、統計解析におけるARの位置や降水が有意に強化されている領域の位置と一致する。統計解析の結果と広島での大雨事例の類似性は、COLの中心を通る北西-南東断面(図1の対角線)に沿った鉛直断面における気温や湿度の分布についても確認できた。これらの結果は、広島での豪雨事例における環境場が統計的にも有意であることを示している。

ARは前線に沿って出現することがしばしばあるため、ARのみによる雨とARとCOLの相乗効果による雨を区別する必要がある。そこで、ARあり事例となし事例の分類基準となっているARとCOLの距離の閾値を変えて解析を行った。その結果、COLの北西側でARの南側における降水が強化される領域の位置は、ARとCOLの距離を変えても変化しなかった。一方、この領域を除いたAR近辺では、ARとCOLの距離を遠くするにつれて降水が強化される領域が北側に広がることが明らかになった。これは、COLの北西側の降水強化域はARとCOLの両方が関係している一方、ARに沿って存在する降水強化域はARのみによる雨と関係していることを示唆している。

本研究における解析結果は、下層が十分湿っている状態では、上層の大規模力学状態が大雨の起こる環境を整える効果を持つことを示唆している。実際に、本研究で用いたCOLの大部分は地形効果のない海上に存在している。従来大雨の解析は地形の効果や下層での水蒸気収束など、下層の現象に着目して行われてきた。本研究の結果は、大雨に対して下層だけでなく上層の現象にも着目することの必要性を指摘している。本成果を取りまとめて国際誌に投稿した(Tsuiji et al., submitted)



図(1)-3 左:ARあり事例とARなし事例の降水の差(カラー)と、ARあり事例における可降水量偏差(破線、mm)と350 K等温位面渦位(緑線、 $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$)のコンポジット。太線で囲まれる領域は降水量の差が98%有意な領域を示す。軸はCOLの中心からの相対緯度経度を示す。右:2014年8月の広島における大

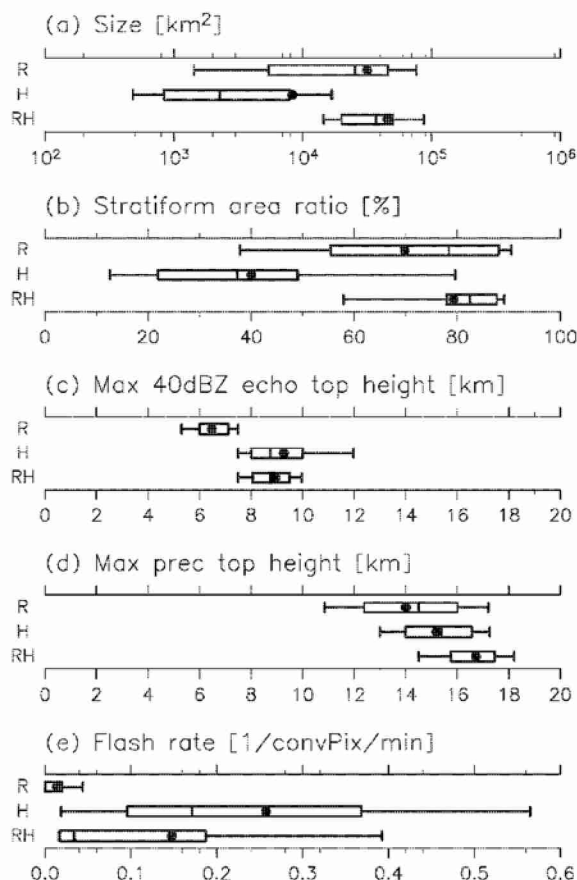
雨時の降水(レインボーカラー、 mm h^{-1})、可降水量偏差(赤線、 mm)、350 K面等温位面渦位(赤-青のカラー、 $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$)。図の水平スケールは左の図と同じになるように調整されている。図中の点線は広島的位置を見つけるための目印として示している。

(c) 日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い

熱帯降雨観測衛星 (TRMM) 搭載降水レーダによる13年間の降雨立体観測を用いて、我々のチームでは極端降水と極端対流が性質の大きく異なる降水システムからもたらされることを示した (Hamada et al., 2015, Nature Commun)⁴⁾。この手法で抽出された夏季日本域の極端降水と極端対流について、気象庁全球客観解析データ (JRA55) を利用し、それぞれの大規模環境場の特徴を調べた。極端降水イベントは、地表降水強度が 0.2 mm/h 以上のひと繋がりである降水イベント内の最大地表降水強度が全観測の上位0.1%であるものと定義した。極端対流イベントは、降水イベント内の最大40 dBZエコー頂高度が全観測の上位0.1%にあるものと定義した。いずれも、研究対象領域 (東経127.5度～東経142.5度、北緯30度～北緯37.5度) を2.5度四方に区切った各格子領域で定義した。事例数は極端降水イベントが74、極端対流イベントが193である。

まず、極端降水・極端対流イベントの降水特性にみられる違いを調べた。極端降水イベントの降水レーダ反射強度の鉛直プロファイルは、極端対流イベントのそれに比べて低いエコー頂高度を示しており、融解層高度下でもレーダ反射強度が下方に増大しているのが特徴的であった。これらの特徴は、極端に強い雨の形成には、いわゆる「暖かい雨の降水プロセス」が非常に効果的に働くことが重要であることを示唆している。

降水システムの面積・層状性降水面積比・発雷頻度などの降水特性についての統計 (図(1)-4) から、極端降水イベントと極端対流イベントの間には明確な違いが見出され、極端降水イベントはより組織化した降水システムから構成されていることが分かった。極端降水イベントの最大40 dBZエコー頂高度は極端対流イベントのそれよりも有意に低いが、降水頂高度の違いはそれほど明確ではなかった。発雷頻度は極端対流イベントで圧倒的に高く、極端降水イベントは殆ど発雷が観測されなかった。



図(1)-4 極端降水イベントおよび極端対流イベントの降水特性の統計分布。それぞれ(a)面積、(b)層状性降雨面積比、(c)最大40dBZエコー頂高度、(d)最大降水頂高度、(e)発雷頻度を示し、箱の両端が第1, 3四分位、中央付近の縦棒が中央値、ひげの両端が10, 90パーセンタイル値、黒丸が平均値を示している。

極端降水・極端対流イベントのイベント内最大降水強度の頻度分布には明確な違いがあり、極端対流イベントの最大降水強度は、30-50 mm/h付近を中心として15-100 mm/hの範囲に分布している一方で、極端降水イベントの最大降水強度は殆どが100 mm/h以上であった。日本域の短時間降水に対して豪雨・極端降水事例を定義する閾値として、しばしば降水強度（量）50 mm/h、または累積頻度分布の95, 99パーセンタイル値などが用いられる。しかしながら、これらの通例的な閾値を用いた場合はいずれも、極端降水・対流イベントの両方が含まれてしまい、強い雨をもたらした降水プロセスの違いが見えなくなってしまう。

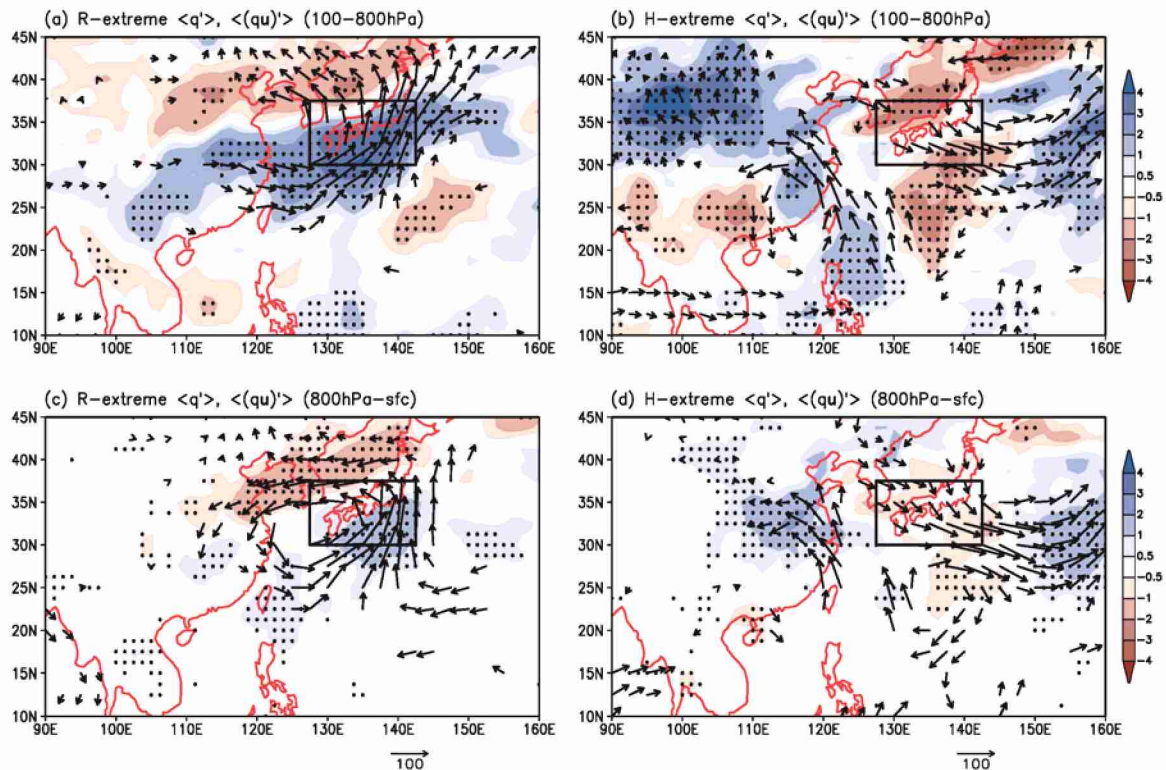
極端降水・極端対流イベントに関わる大規模環境場を調べた。極端降水・極端対流イベントが発生したときの環境場の鉛直プロファイルに対照的な違いが見出された。極端降水イベント発生時には、相当温位および気温はいずれも大気下層で負偏差、上層で正偏差であり、気候値に対して相対的に安定であることを示している。いっぽうで極端対流イベント発生時にはこれと逆の状態になっており、大気は非常に不安定である。水蒸気プロファイルに着目すると、極端降水イベント発生時には対流圏が深く湿潤化しており、特に800 hPaより上層の自由対流圏で顕著である。極端対流イベント発生時には対流圏はほぼ全層にわたって乾燥化している。

極端降水イベントの発生環境場に見られた自由対流圏の湿潤化は、イベント発生地点付近に局所的なものではなく、広域に広がったものである。図(1)-5は、極端降水イベント発生時における、800~100 hPaで積算した水蒸気量および水平水蒸気フラックスの偏差合成図である。極端降水イベントでは、中国南部から日本域上空にかかる帯状の正偏差が明瞭である。いっぽう、極端対流イベントの環境場にはこのような水蒸気量の強い正偏差は見られない。下層（地表~800 hPa）にも、水蒸気量の正偏差が見られるが、極端降水イベント発生地点付近に限られている。中上層の水蒸気量偏差は、極端降水発生域では全可降水量偏差の5~7割、その西側では7割以上を占めており、大規模な流れによる自由対流圏の水蒸気輸送が極端降水イベントの発生に重要な役割を果たしていることを示唆している。

台風との関わりを調べた。極端降水イベントのおよそ25%が台風の直接的影響を受けているいっぽうで、台風の直接的影響を受けた極端対流イベントはわずか5%であった。ただし、極端降水・極端対流イベントのいずれも、半数程度以上が台風と間接的な関わりを持っていることが示唆された。

上部対流圏の力学的擾乱場にも明確な違いが存在する。200 hPaのジオポテンシャル高度偏差を見ると、極端降水イベントは発生域の北（南）に負（正）の高度偏差を示していた。これに対応する水平風は、熱帯からの暖湿な気塊を輸送してくるのに都合の良い場となっている。対照的に、極端対流イベントの発生域は負の高度偏差の中心付近にあった。

以上の成果をまとめて発表した（Hamada and Takayabu, 2018, J. Climate）。



図(1)-5 極端降水・極端対流イベントが発生したときの、鉛直積算した水蒸気量およびその水平フラックスの分布。(a), (c)が極端降水イベントの結果で、(b), (d)が極端対流イベントの結果。上段(a), (b)は100 hPaから800 hPaまでの自由対流圏の積算値で、下段(b), (d)は地表から800 hPaまでの下層の積算値。全て気候値からの偏差として示しており、色は水蒸気量偏差（単位mm）、ベクトルは水平水蒸気フラックス（単位kg/m/s）。黒点は偏差値が95%の信頼水準で統計的に有意である地点を示している。黒枠は本研究で極端降水・極端対流イベントを定義した領域。

(d) 初夏の日本付近の降雨特性と大規模場の関係の調査

従来、梅雨前線の活発な対流や強い降雨に対する対流不安定の重要性は多くの研究により示されてきた (Kato et al. 2003)⁵⁾。一方、Kodama (1993)⁶⁾は、梅雨前線形成には亜熱帯ジェットが存在も重要だと指摘している。特に、対流圏中上層の循環については、東アジアの降水に重要な役割を持つことが最近の研究で明らかになってきた (Horinouchi 2014)⁷⁾。そこで、本研究では、亜熱帯ジェットおよび下層対流不安定度（1000 hPaと700 hPaの相当温位の差で定義）に着目し、2002-2014年梅雨期（6-7月）における日本付近の降雨特性が大規模環境場によっていかに決まるのかを調査した。

まず、平均的には、亜熱帯ジェットの南側に存在する深い水蒸気場に対応して、梅雨前線降雨帯はジェットの南約500kmを中心に現れた。また、下層対流不安定度は降雨帯の南ほど大きかった。

次に、降雨帯を構成する降水イベント（RE；ひとつながりの雨域）の特性を解析した結果、メソスケールREの層状雨量比、最大降雨強度、面積の関係が、層状雨量比80%を境に大きく変化することが見いだされた。層状雨量比80%未満のREは、層状雨量比の増加と共に面積が増大し、降雨強度が強まる特性を持っており、雲クラスターなどの組織化したタイプだと考えられた。一方、層状雨量比が80%を超えるREは、面積は大きい層状雨量比の増加と共に降雨強度が弱まる特性を持ち、温帯低気圧に伴うタイプだと考えられた。

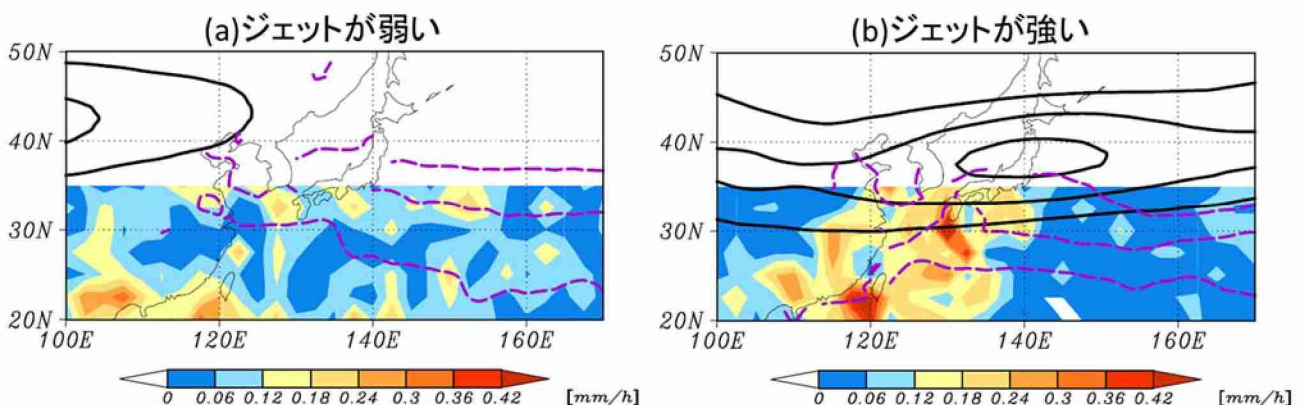
これらのメソスケールREと亜熱帯ジェットとの関係を解析した結果、日本付近の亜熱帯ジェットの強まりと共に、ジェットの南で2次循環に伴う上昇流が強まり、中層がより湿潤化されることが示された。組織化タイプ雨は、この中層の湿潤化と対応して、ジェットの南で増加した（図(1)-6）。一方、面積小タイプの雨はこのような関係が見られず、梅雨期の積雲対流の組織化にはジェットの強化に伴う中層の湿潤化が重要であることが示された。なお、温帯低気圧タイプの雨もジェットの強化と共に増加したが、

そのメカニズムについては、傾圧不安定の強化などの観点も含めてさらに検討する必要がある。

さらに、上述の2タイプのメソスケールREの他に面積の小さなタイプのREも含めて、亜熱帯ジェットおよび下層対流不安定度の降雨特性に果たす役割を包括的に調べた。その結果、面積小タイプの雨は、下層対流不安定度への高い依存性を示し、不安定度が非常に高い場では深い対流として生じていた。一方、組織化タイプの雨は、ジェットへの依存性が強く、ジェットが強い場合は対流不安定度が比較的低い場でも生じていた。温帯低気圧タイプの雨は、ジェットが強く対流不安定度が低い場で生じていた。

以上の結果から、梅雨期の降雨特性に対する亜熱帯ジェットおよび下層対流不安定度の役割が明らかになった。つまり、亜熱帯ジェットはその南で上昇流を強制して中層を湿潤化し、積雲対流の組織化に好都合な場を提供する。また、温帯低気圧に伴う雨もジェットの強さと関係する。下層対流不安定度は面積の小さな対流と関連づけられ、対流の開始に効くと共に、非常に強い下層対流不安定度の場では組織化せずに深い対流を生じさせる。

以上は、梅雨期の降雨特性と大規模環境場との物理的関係に関して新しい知見を与える成果である (Yokoyama et al. 2017, J. Climate)。

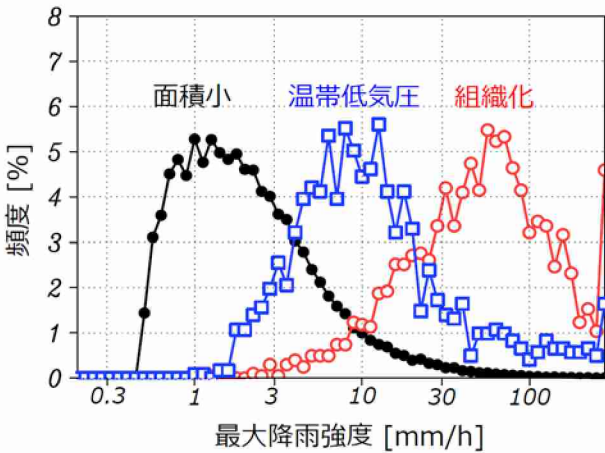


図(1)-6 日本付近の亜熱帯ジェットが(a)弱い ($20\text{--}30\text{ m s}^{-1}$) とき、および (b) 強い ($50\text{--}60\text{ m s}^{-1}$) ときの組織化タイプのREの雨量分布 (色; mm h^{-1})。黒等値線は200 hPaの東西風 (m s^{-1})、紫等値線は下層対流不安定度 (K hPa^{-1})。2002-2014年6-7月のTRMM衛星降雨レーダおよびJRA55を使用。

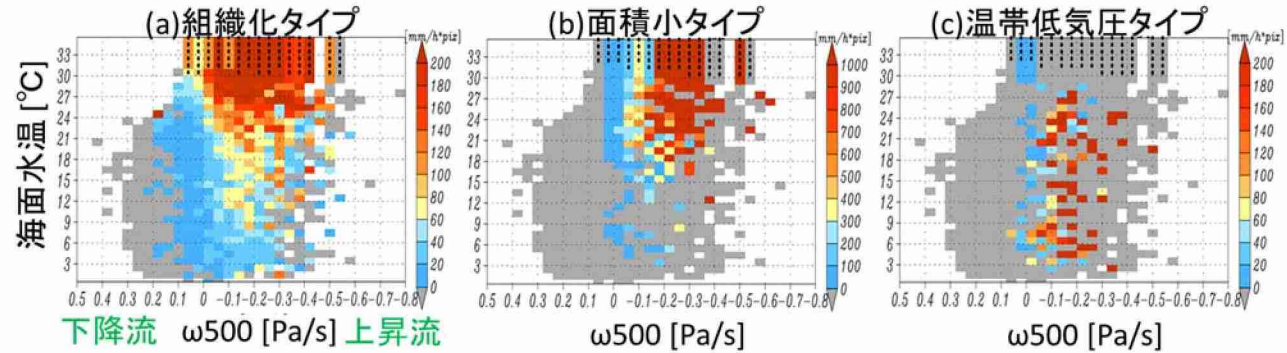
(e) 温暖化に伴う降雨特性変化の推定

上述の3タイプのREは、降雨強度や対流の強さの指標などの観点からそれぞれ大きく異なる特性を持つ。特に、組織化したタイプは、他の2タイプに比べて非常に強い雨を伴う (図(1)-7)。

そこで、これらの3タイプのREに対して、Yokoyama et al. (2017)で得られた知見を踏まえ、大気循環に伴う力学的上昇流 (500 hPaの大規模鉛直流; $\omega 500$) と海面水温とを指標とする雨量の参照テーブルを作成し、CMIP5気候モデルによる大規模場の変化予測から日本の初夏 (5-7月) の降雨特性の将来変化を推定した。なお、海面水温は下層対流不安定度と密接に関係する。図(1)-8に作成された参照テーブルを示す。いずれのタイプも上昇域において雨が多い点は共通しているが、面積小タイプの雨は比較的弱い下降域でも見られた。面積小タイプは高い海面水温域で多い傾向があるのに対し、組織化タイプは比較的低い海面水温域でも存在し上昇流の影響をより強く受けていた。温帯低気圧タイプはさらに低い海面水温域で見られた。これらの特徴はYokoyama et al. (2017)と整合的であり、この2つの大規模場の指標で合理的に降雨特性が分けられた。さらに、この参照テーブルを用いて、テーブル作成に使用されたJRA55およびOISSTv2による大規模場から各タイプの雨を再構築した。その結果、再構築された雨は観測と矛盾のない分布を示し、参照テーブルを用いた本手法の有効性が示された。



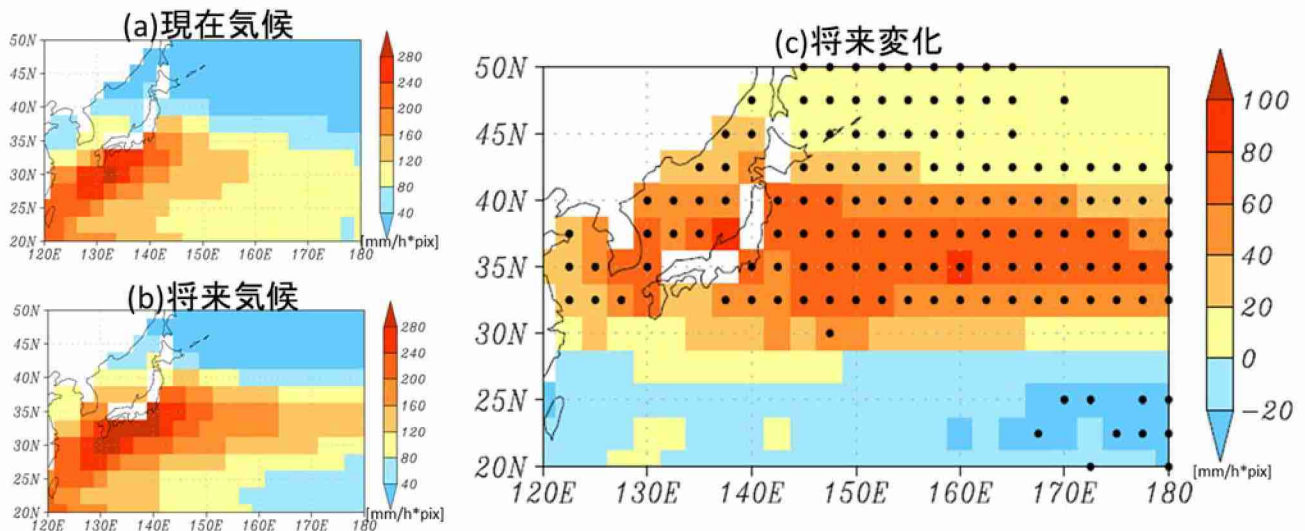
図(1)-7 120° E-180°、20° -50° Nで観測された各タイプのREの最大降雨強度の頻度分布。黒線：面積小タイプ、青線：温帯低気圧タイプ、赤線：組織化タイプ。2014-2017年5-7月のGPM衛星降雨レーダデータを使用。



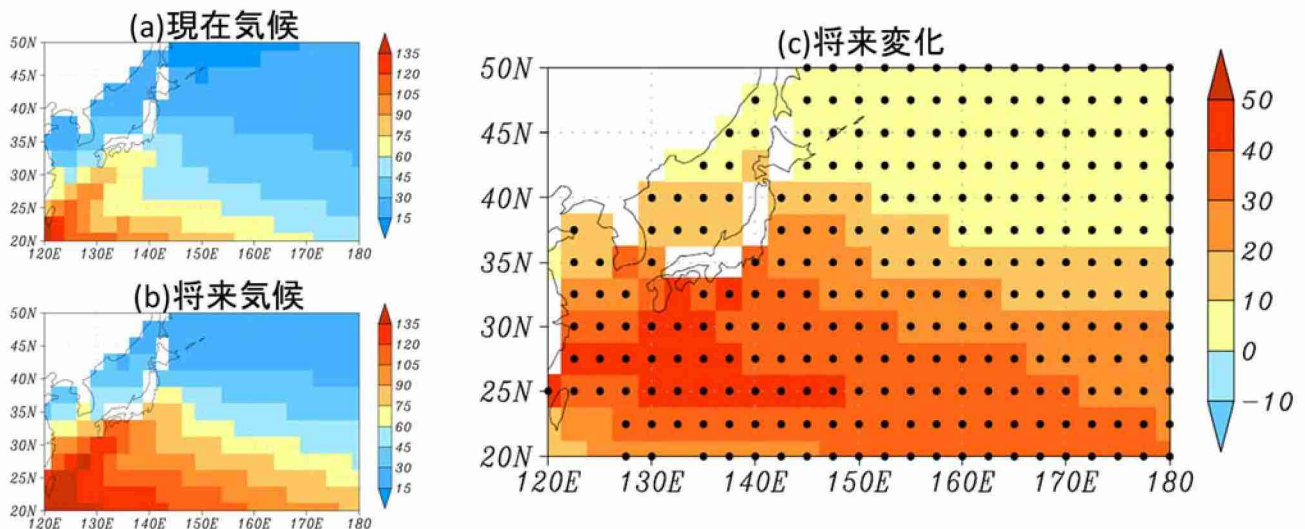
図(1)-8 各タイプのREの総雨量 ($\text{mm h}^{-1} \text{ pixel}$) に対する参照テーブル。海面水温 ($^{\circ}\text{C}$) と $\omega 500$ (Pa s^{-1} ; 負が上昇流) を指標としている。黒点は値が外挿されていることを示す。2014-2017年5-7月のGPM衛星降雨レーダデータおよびJRA55再解析データ、OISSTv2海面水温データを使用。

そこで、この手法を24個のCMIP5気候モデルに適用し、CMIP5モデルの大規模場から再構築された3タイプのREの雨の将来変化を調べた。図(1)-9に、アンサンブル平均した雨量の現在および将来の気候値と将来変化を示す。なお、組織化タイプの雨は、日本付近で全般に増加傾向であり、その影響域は現在より北まで広がると予測された。特に、現在は組織化タイプの雨が比較的少ない東北地方や関東地方、日本海側において、将来このタイプの顕著な増加が示された。この増加は90%以上のモデルで予測されていた。一方、面積小タイプの雨は、現在と同様の分布で全体的に増加することが予測され、日本南西部の太平洋側で大きな増加を示した (図(1)-10)。温帯低気圧タイプの雨は日本付近での全般的な減少が示された (図(1)-11)。

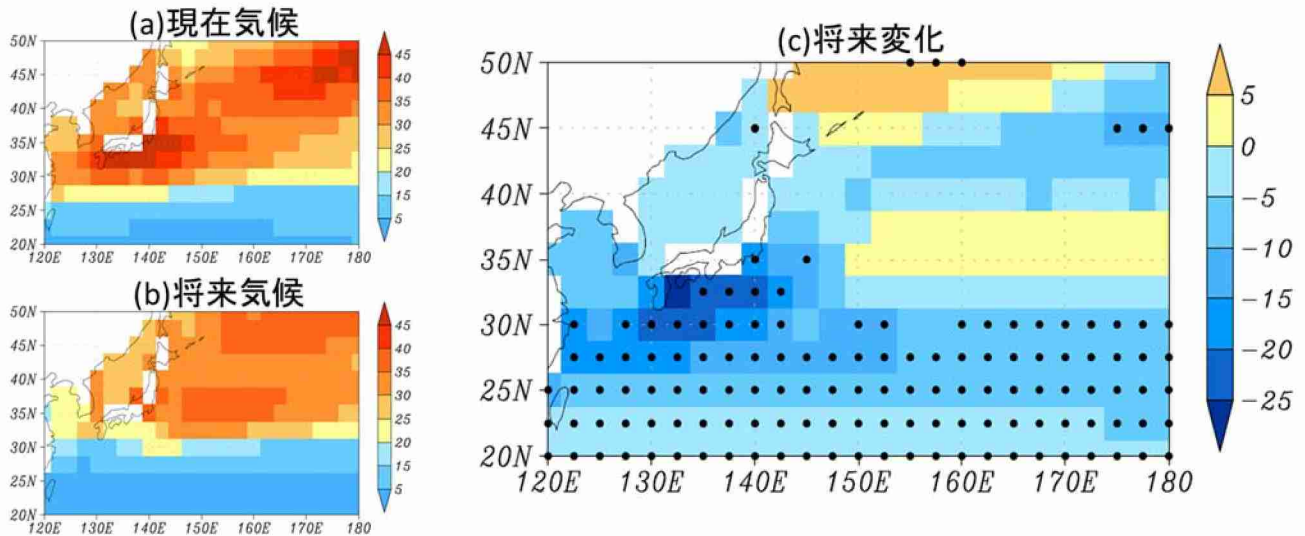
上述の通り、各タイプのREは、それぞれ大きく異なる特性を持っている。それゆえ、各地域における各タイプの雨量の変化は、将来その地域での雨の降り方が大きく変わることを意味している。特に、組織化タイプは他の2タイプに比べて非常に強い雨を含んでおり、将来、組織化タイプが増加する地域では強雨が増加する可能性があるため注意が必要である。以上の降雨特性の将来変化に関する研究成果は、国際学会誌への投稿論文として準備中である。



図(1)-9 CMIP5モデルの大規模場から再構築された初夏(5-7月)の組織化タイプREの総雨量(色; mm h^{-1} pixel)。24モデルのアンサンブル平均。(a)現在気候(Historical実験; 1980-2005年)、(b)将来気候(RCP8.5実験; 2075-2100年)、(c)将来変化。(c)の黒点は90%以上のモデルで変化の符号が一致する場所。



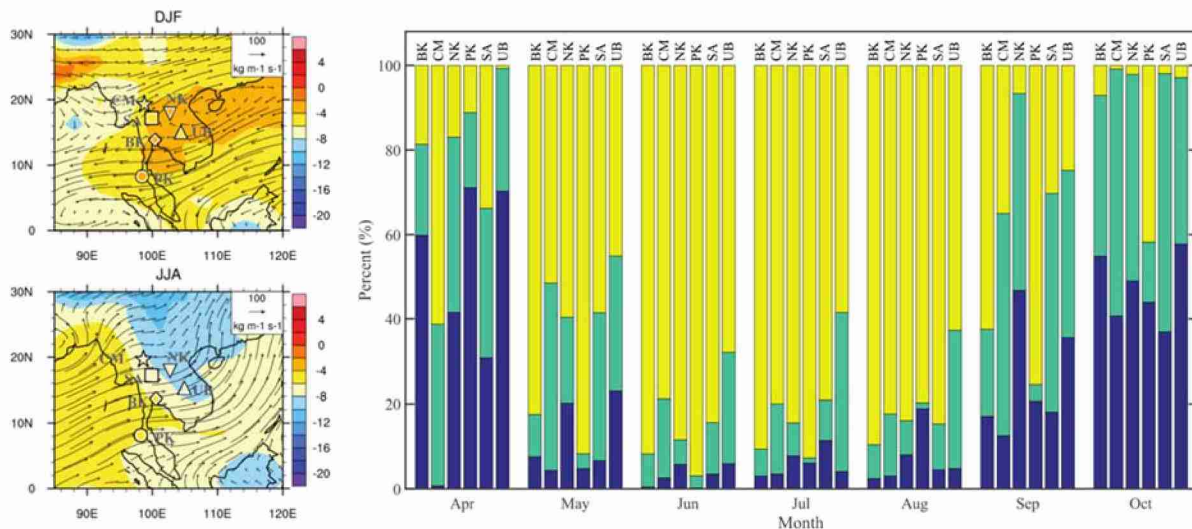
図(1)-10 CMIP5モデルの大規模場から再構築された初夏(5-7月)の面積小タイプREの総雨量(色; mm h^{-1} pixel)。24モデルのアンサンブル平均。(a)現在気候(Historical実験; 1980-2005年)、(b)将来気候(RCP8.5実験; 2075-2100年)、(c)将来変化。(c)の黒点は90%以上のモデルで変化の符号が一致する場所。



図(1)-11 CMIP5モデルの大規模場から再構築された初夏(5-7月)の温帯低気圧タイプREの総雨量(色; $\text{mm h}^{-1} \text{ pixel}$)。24モデルのアンサンブル平均。(a)現在気候(Historical実験; 1980-2005年)、(b)将来気候(RCP8.5実験; 2075-2100年)、(c)将来変化。(c)の黒点は90%以上のモデルで変化の符号が一致する場所。

(f) 水同位体情報を用いた東アジア・東南アジアの降水の水蒸気起源解析研究

初年度には、平成27年関東東北豪雨によって大洪水が起こった常総市近傍に位置するつくば市真瀬において、地表付近の水蒸気同位体比の連続観測を行った。さらに同位体大気大循環モデルIsoGSM (Yoshimura et al., 2008)⁸⁾を用いたシミュレーションにより、水蒸気同位体比の変動の大きさとタイミングが精度よく再現されていることを示した。次年度には、この豪雨時の水蒸気同位体比の変化がどのような要因で起こったのかを突き止めるため、シミュレーション結果の大気環境場を用いたトラジェクトリー解析およびトラジェクトリー上での水収支解析を行い、この時の水蒸気同位体比の短期変動は、降水をもたらした水蒸気塊が観測地に到達するまでにどれくらいの降水をもたらしてきたかというイベントスケールでの降水量効果による寄与が大きいということを示した。最終年度には、これまでの研究成果を論文にまとめた(野本・芳村, 2017)ほか、長期間に渡って収集したタイ6地点での日単位降水試料の同位体比についても、日本での分析と同様、IsoGSMによるシミュレーションとトラジェクトリー解析を行った。その結果、降雨中の同位体比はその場での降雨量と地域の長波放射と相関があり、この地域の降雨同位体比はその場の降雨量(降水量効果)だけでなく大規模な対流活動によっても制御されていることが示唆された。この結果も論文に発表した(Wei et al., 2018)。また、インドモンスーンと西部北太平洋モンスーンとの間の移行帯では、観測された降水同位体比の空間的な差は水蒸気起源の違いによって形成されていることがわかった。これらの結果は、熱帯域の降水量同位体比を決定する上での地域プロセスの重要性を強調し、地域的な気候動態の状況における古地質同位体記録の解釈に制約を与えるものと考えている。



図(1)-12 左図:タイ 6 地点での観測サイトの位置及び IsoGSM シミュレーションによる鉛直積算水平水蒸気フラックス (矢印) と降水同位体比 (シェード)。上図は冬季、下図は夏季を示す。右図: 4 月から 10 月での、各観測地点での降水への起源地域ごとの寄与率。青は太平洋起源、黄色はインド洋起源、緑は陸上起源を示す。

(g) 黒潮など日本周辺の海洋変動が局所的に雲や降水系の形成に与える影響

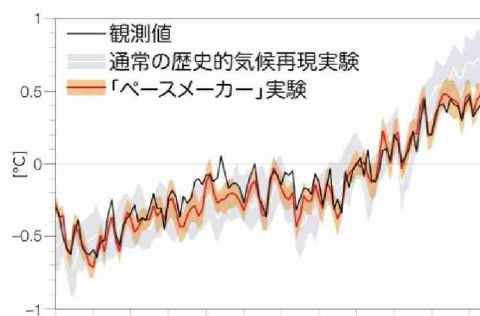
i) 黒潮続流の十年規模変動に伴って暖かい続流が強く東流する時期には、それに沿って増大する海洋からの熱供給が大気境界層を暖め、海上風収束を強化し雲量・降水量を増加させる一方、続流が弱まって蛇行が激しい時期には、多数の暖水渦により温暖化した北側の混合水域上で海上風収束の強化と雲量・降水量増加が起こる傾向を見出した。また、こうした海流から大気への影響を大気再解析データで表現するにはデータ同化時に高分解能の水温場を与える必要性を明示した。さらに、高分解能の水温分布を与えた AGCM アンサンブル実験と人為的に平滑化した水温分布を与えたアンサンブル実験との比較から、低気圧が集団として黒潮続流域にもたらす上昇流が海上風分布に有意な寄与を与えることも示された。ii) 黒潮続流域での上昇流は降水による非断熱加熱が励起する成分が局所的には卓越するものの、大気擾乱による熱や運動量輸送などにより力学的に励起される上昇流がやや弱いながらもより広範囲に分布し、雲・降水形成に有利な環境を生み出すことが定量的に明らかにされた。iii) 人為起源のエアロゾルを多量に含む冬季アジア大陸からの季節風が黒潮を吹き渡る際、境界層内の成層不安定性増大による乱流上昇運動の強化で過飽和度が高まり、通常よりも微小な粒子までもが雲凝結核となることで下層雲の雲粒数密度やアルベドが顕著に増加することが明らかになった。iv) 九州と山陰地方において過去に生じた集中豪雨の 2 事例について、異なる海面水温分布を与えた領域大気モデル実験間で降水量を比較した結果、海面水温が高い場合ほど降水が増えることが確認された。これにより、水平解像度が低い海面水温データ、時間的に人為的な平滑化がなされている海面水温データを用いた予測は、降水量を過小評価する可能性が示唆された (Masunaga et al. 2016, J. Climate)。

(h) 熱帯太平洋の結合変動が東アジアの降水に及ぼす遠隔影響

PJ パターンが夏季平均降水量・気温、台風活動、日本のコメ収穫量、中国長江の流量など東アジア域にもたらす多様な影響、及び PJ パターンを内包する大気海洋結合変動モード「インド洋-西太平洋キャパシター (IPOC) モード」を同定した。このモードを介した ENSO の遠隔遅延影響が、今世紀に入ってから弱体化を含め、20~30 年規模で強弱を繰り返してきた事実も見出し、この主因が自然変動であることを示唆した。さらに、PJ パターンとは独立な大気循環変動を同定し、これが発達期の ENSO の下で励起されやすく、今世紀に入り PJ パターンに代わって夏季北西太平洋域で最も卓越していることを発見した。成果を論文化し国際誌に発表した (Xie et al. 2016, Adv. Atmos. Sci.)

(i) 熱帯太平洋数十年規模結合変動による地球温暖化の加減速

過去120年に起きた階段状の全球平均気温上昇をペースメーカー実験により高精度で再現し(図(1)-13)、放射強制力に対する気温応答と自然起源の熱帯太平洋変動の影響との間の地域的特徴の違いを明確にした。例えば、熱帯太平洋変動が全球平均気温上昇を加速するとき、日本付近は年平均気温上昇が抑制傾向にある。ただしこの熱帯太平洋変動の全球気候影響には、特に十年規模で大きな不確実性があることを明らかにした。また、熱帯太平洋変動が全球平均気温に与えてきた影響を評価し、これを観測データから差引くことで人為起源の全球平均気温変化を定量化する新手法を提示した。さらに、自然変動まで適用できる全球エネルギー収支の関係式を初めて導き、観測された全球海洋蓄熱量変化を明解に説明した。加えて、今世紀初めに起こった地球温暖化の停滞についてのレビュー論文、及び熱帯を含む太平洋十年規模変動に関する包括的なレビュー論文の執筆に貢献した。成果は論文化され、Nature Geoscienceにおいて出版した (Kosaka and Xie, 2016, Nature Geoscience)。



図(1)-13 歴史的気候再現実験及びペースメーカー実験による全球平均気温偏差の観測値との比較。

(j) 熱帯と中緯度の海面水温がもたらす大気変動の潜在的予測可能性

熱帯の水温変動からの遠隔影響と従来考えられてきた冬季北東太平洋上の停滞性循環偏差の形成に、中緯度水温前線域の水温変動からの寄与が無視できないことが見出された。こうした地表のアリュージョン低気圧の変動に伴う中部北太平洋での風応力偏差が強制する海洋ロスビー波が日本近海へと西進する際に、北西太平洋水温前線を南北シフトさせることで降水分布や移動性高・低気圧活動を局所的に変化させることが見いだされた。さらに、こうした大気応答から海洋へのフィードバックの可能性も示唆された。また、同一の風強制の下でも海洋内部力学によって黒潮続流の時間発展がその僅かな初期値の差異に依って異なることを発見した。ii) 中緯度大気は内在する変動が大きいいため、大気循環偏差は正負いずれの場合も生じ得るものの、大気応答-海洋循環フィードバックを通じて偏差の持続性に系統的な影響が現れる可能性が示唆された。また、日本付近の降水変動に対する潜在的予測可能性については、南海上では熱帯水温変動からの遠隔影響の寄与が大きいのに対し、黒潮続流及び日本海・オホーツク海では局所的な中緯度海面水温による寄与が大きいことが明らかになった。対流圏下層の気温変動についても同様な傾向が確認された。

(k) 冬季東アジア気候変動のメカニズム

冬季西太平洋(WP)パターンの気圧偏差はその位相が高さとともに南西に傾く傾圧構造を持ち、気候平均場からの有効位置エネルギーを効率的に獲得し、自身を維持し得ることを明らかにした。また、その励起源の1つとしてオーストラリア夏季モンスーン変動からの遠隔影響の可能性の示唆が得られた。さらに、北西太平洋中緯度海洋前線帯の存在が西太平洋パターンの出現頻度を増加させ得る可能性の示唆も得られた。

(l) 北極海の海水変動がユーラシア・東アジア域にもたらす大気循環変動

北極海の海水変動に伴って中高緯度ユーラシア大陸上に励起される大気循環偏差が、この領域の地上気温変動場に「北極振動」に次いで卓越する変動パターンであることを見出した。また、巨大アンサンブル実験から、この変動は大気に内在する自然変動であり、海水変動によってその極性の出現確率が変動を受け、ユーラシア・東アジア域の下部対流圏気温等に影響していることが見出された。成果は論文として発表した (Ogawa et al. 2016, J. Climate)。

(m) 中緯度の海面水温分布が対流圏・成層圏結合変動に果たす役割

中緯度南大洋の水溫前線が南極成層圏オゾン減少と南半球対流圏西風トレンドの関係に果たす効果を評価するため、AGCMを用いて現実的な水溫前線を与えた実験と水溫前線を除去した実験とを行い、それぞれの実験における南極成層圏のオゾン減少による南半球対流圏西風トレンドを観測と比較した。現実的な水溫前線を与えたAGCM実験では、南極成層圏のオゾン減少による南半球対流圏西風トレンドが観測と整合的に形成されたが、水溫前線を除去した実験では現実的な西風応答は再現されなかった。また、中緯度南半球の海洋前線帯の強度を現実的に表すCMIP3/5モデルでは、海洋前線の気候平均緯度の極側に西風強化トレンドの極大が存在する傾向を見出した。一方、海洋前線帯が弱いモデルでは両者の関係性が弱いことが判明した。成果論文を一流国際誌に発表した (Ogawa et al. 2015, *Geophys. Res. Lett.*)。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

1) 日本・東アジア域の集中豪雨の発生メカニズムにおいて、通常注目される大気最下層の水蒸気場や地形の効果以外に、大気上層の大規模場の影響の重要性を指摘した点は科学的意義が大きい。広島豪雨の事例についてこのメカニズムの重要性を定量的な解析とモデル感度実験で示した (Hirota et al. 2016, MWR)。さらにこのメカニズムの重要性を統計的な調査によって一般化した点にも科学的意義がある

(Tsuji and Takayabu, 論文投稿中)。

2) 集中豪雨のように極端に強い雨をもたらす現象が、「ゲリラ豪雨」と称されるような霰・雹を伴う激しい雷雨の延長ではなく、雷雨より安定な大気で発生すること、さらに自由対流圏の大規模な水蒸気の流れの環境場で多いことが明らかになったことは科学的意義が大きい (Hamada and Takayabu 2018, *J. Climate*)。

3) 衛星による雨の立体観測データの統計により、梅雨前後の日本域の雨が数個の特徴的なタイプのシステムに分類されることを示した。さらに各タイプからの総雨量への寄与を下層安定度と上層の循環に関する大規模環境場指標に定量的に関係づけたことは科学的意義が大きい (Yokoyama et al. 2017, *J. Climate*)。さらに衛星解析による降水システムの詳細構造との関係を用いて気候モデルによる大規模場の将来予測を組み合わせ、例えば集中豪雨を伴う組織化した雨が将来どの地域で増えるかなど降水の特性についての具体的な変化予測が可能になったのは世界初であり、科学的意義が大きい (Yokoyama et al. 投稿準備中)。

4) 黒潮続流の大気への影響の発見は、同化を通じて大気観測データを取り込んだ再解析データにおいても、中緯度海流の大気影響の表現には高解像度の海面水溫場を用いる必要性を明確に示す重要な成果である。これを踏まえ現在気象研究所と共同して25km解像度の海面水溫場を与えた全球大気再解析データを作成中 (JRA-55再解析への追加プロダクト) で、次期の気象庁大気再解析データ作成にも活かされることとなった。また、海洋内部力学により黒潮続流変動の予測可能性が制限される事実の発見から大気同様アンサンブル予測が必要なことを指摘し、その成果を記者発表した。中緯度の気候海洋結合変動に関する研究は多く存在するが、大気変動が強制した海洋循環変動をもたらす大気変動とそれからの海洋への再影響の過程を明示的に調べた研究は先駆的で、北太平洋の10年規模変動に関わり得る結合系のフィードバック過程に新たな示唆を与え得るものである。低気圧通過時に黒潮続流域に組織化される降水系に伴う上昇流と冷水側の下降流に特徴付けられる対流圏下層の直接循環が存在することが初めて示されたことは、移動性高低気圧に伴う非湿潤過程を主に反映して水溫前線に沿って形成されるストームトラックに伴って深い間接循環が形成されるという古典的描像のみでは水溫前線・ストームトラック域の大気循環の平均場が解釈できないことを強く示唆する斬新な結果であり、平滑化した水溫分布を与えた実験では直接循環が再現されず、その影響で現実的な海上風応力場が再現されなかったことも含め、斬

新で重要な成果が得られた。さらに、人為起源エアロゾルを多量に含む冬季季節風が暖かい黒潮の影響で下層雲の雲粒数密度やアルベドが顕著に増加する傾向を確認したことは、中緯度暖流が大気を与える影響の新らたな側面を見出した重要な成果であり、北米東岸沖のメキシコ湾流域でも同様の傾向が見られる可能性が高い。なお、九州西方から日本海における海面水温については蒸発量の変化等を通じて九州・山陰地方の集中豪雨に対して影響を及ぼしていることが示され、より正確な豪雨予測のためにはより正確な海面水温データが必要であることが示唆される。

5) IPOCモードはENS0による夏季北西太平洋・東アジアへの遅延影響に対し提示されていた2つのメカニズムを統合し、東アジアにおける夏季の異常気象に対する季節予測可能性の仕組みを明らかにした。当該論文は高被引用文献(上位1%、Web of Scienceによる)に選出された他、Advances in Atmospheric Sciences誌の2018年Esteemed Review Paper Prizeを獲得した。

6) 温室効果気体増加による持続的な全球平均気温上昇に重畳する十年規模の気温加減速に熱帯太平洋起源の自然変動が強く大きく寄与することを明らかにし、観測された地表気温とその地域・季節性や全球エネルギー収支まで矛盾無く説明する概念モデルを提示した。20世紀初めに比べて2010年代前半の気温は観測では約0.9℃高いが、これは熱帯太平洋自然変動が近年負位相に推移し人為起源温暖化の一部を相殺した結果である。人為起源の気温上昇は約1.2℃との推定を示し、熱帯太平洋変動が正位相に推移すれば温度上昇が急激に進む可能性を示した。この成果の一部はNature Geoscience誌で論文として出版し、また4度の招待講演を含む発表を国内外で行った。

7) 中緯度極東・北太平洋域の大規模大気循環変動には熱帯の海面水温変動からの遠隔影響や内部変動が卓越すると従来から指摘されてきた。しかし、従来よりも高分解能の水温データを与えたAGCM実験の結果は、日本周辺域を含め、中高緯度域の降水や気温、循環変動の潜在的予測可能性が従来の研究では過少評価されていたことを強く示唆する有意義なものである。

8) 冬季西太平洋パターンの維持にとって冷たい大陸と比較的暖かい海洋の気温差が重要であり、将来、海洋よりも大きな気温上昇が大陸上で予測されていることから、西太平洋パターンに伴う冬季モンスーン変動が弱化的ことが示唆される。さらに、オーストラリア夏季モンスーン変動や海洋前線帯からの影響過程の解明は、冬季モンスーン変動の潜在的予測可能性の評価にとって重要である。

9) 季節平均場に現れる大気の経年変動には、外的な強制が無くとも生じる内部変動の寄与が存在することは指摘されてきたが、これこそが北極海の海水変動がユーラシア・東アジア域の大気循環・気温変動に及ぼす影響の本質であること、そしてAGCM実験による検出には従来より遙かに多数のアンサンブルが必要なことが示され、巨大アンサンブル予報実験に基づく確率分布的アプローチが気候研究の新たな基準手法となり得ることを明示した有意義な成果である。

10) 気候モデルにおいて現実的な中緯度の水温前線帯の再現が、大気の気候平均場とその長期変動の再現性および将来変化予測にとって重要な事を示唆した成果について記者発表を実施した。

(2) 環境政策への貢献

<行政が既に活用した成果>

気象庁長期再解析推進委員会では、本研究の成果の一部として東京大学先端科学技術研究センターと気象庁気象研究所が協同作成したJRA-55CHSにおいて海上風や雲・降水分布に明確な改善が認められたことを踏まえ、気候監視に活用する気象庁次期大気再解析JRA-3Qにおいては、その主プロダクトにおいてもJRA-55CHSと同じく衛星観測に基づく高解像度海面水温データMGDSSTをその境界条件に用

いる方針を決定した。

＜行政が活用することが見込まれる成果＞

- ・ 温暖化時における初夏の日本各地域の降雨特性変化を推定した。特に、集中豪雨を伴う線状降水帯のような組織化した雨は、現在は梅雨末期の九州地方で多いが、日本海側、関東・東北地方で比較的少ない。将来は初夏の組織化した雨が日本海側や関東・東北地方で増加する可能性があり、これらの地域における集中豪雨対策が必要である。この結果は将来の豪雨対策の際に考慮すべきであると共に、IPCC の AR6 へ貢献することができる。
- ・ 大気上層の環境場と降水の統計的な関係を示した。この結果は、災害をもたらす豪雨の可能性を判断するうえで、従来から着目されている大気最下層の状況だけでなく、大気上層の状況にも着目すべきであることを示している。この知見は、今後、気象庁などにおいて豪雨災害の対策強化のために活用されることが期待できる。
- ・ 大規模な大気の状態から、集中豪雨とゲリラ豪雨のどちらのタイプが発生しやすい状況かをある程度読み取ることが可能となり、災害にピンポイントで備えるための重要な情報となる。極端降雨の発生条件に関する科学的成果として、IPCC AR6 に貢献することが見込まれる。
- ・ 気候監視に広く活用される全球大気再解析データ作成における高解像度海面水温データの重要性は、WMOの第5回再解析国際会議やCLIVARの境界流に関する国際会議における招待講演で訴えた。この知見は、今後の世界の再解析データ作成において活用されることが見込まれる。
- ・ 課題全体の成果から、一般向け冊子「暑いだけじゃない温暖化3ー日本の雨の降り方は変わるのかー」を作成し環境省および気象庁など関係機関に配布し、行政官への成果情報の提供とした。また、東京大学大気海洋研究所のエントランスロビーに配布資料として配置すると共に、研究室のホームページでも公開し、一般への普及の材料として貢献している。

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



6. 国際共同研究等の状況

(1) Global Precipitation Measurement Mission

Global Precipitation Measurement (GPM) 計画はNASAとJAXAによる衛星による全球降水観測計画 (GPM主衛星の運用主ミッションは2014. 4-2018. 5、衛星観測は継続している) である。衛星観測の運用、プロダクト生成アルゴリズムの決定、プロダクト確認、生成配布等については、日米の科学者16名 (各8名) で構成するJoint PMM Science Team (JPST): PMMはPrecipitation Measurement Missionでの議論・承認の上決定される。JPSTの日本側科学者の代表(プロジェクトサイエンティスト)を高荻縁 (東京大学大気海洋研究所) が務めている。米国側カウンターパートのプロジェクトサイエンティ

ストは Dr. Gail Skofronik-Jackson (NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)) であり、共同で衛星観測プロダクトを作り出す国際協力の中核に立っている。

本推進費研究課題においては、ここで生成された最新の衛星観測プロダクトを多く用いているが、このように衛星観測プロダクトを作り出す国際協力の中心にいたるため、衛星観測の特性を理解した上での解析を行うことが可能となっている。

(2) Satellite Based Latent Heating Project

本計画はDr. Wei-Kuo Tao (米国NASA/GSFC) をカウンターパートとして、高薮縁 (Prof. Yukari Takayabu, 東京大学大気海洋研究所) が日本側の代表を務める。熱帯降雨観測計画 (TRMM) 衛星および全球降雨観測計画 (GPM) 衛星による衛星観測降雨プロダクトを利用した降水に伴う大気潜熱加熱を3次元で推定しNASAとJAXAの標準プロダクトとして世界に提供するプロジェクトである。日米それぞれが独立にアルゴリズムを開発し、日本はSpectral Latent Heating (SLH) プロダクト、米国はConvective and Stratiform Heating (CSH) プロダクトを生成して提供している。大気潜熱加熱は降水特性を表現すると共に、気候における降水によるエネルギー収支の一端を担う重要な物理量であり、気候研究において重要な役割を果たす。

(3) Belmont Forum and JPI-Climate CRA (Collaborative Research Action) Climate Predictability and Inter-Regional Linkage: The potential of seasonal-to-decadal -scale inter-regional linkages to advance climate predictions ("InterDec")

本課題はベルモントフォーラム国際連携活動「気候予測可能性と地域間連携」(H 28～H31年度) の採択課題の1つであり、欧州・中国・日本の代表的研究者が緊密に連携し、長期の観測データ解析と複数の良く練られた数値実験により、世界の異なる地域における十年規模気候変動の起源と地域間連携のメカニズムと予測可能性を探ることを目的とする。主要メンバーは、PI: Dr. Daniela MATEI (ドイツ Max-Planck気象研究所); Deputy PI: Prof. Hisashi NAKAMURA (東京大学先端科学技術研究センター); Dr. Elisa MANZINI (独 Max-Planck気象研究所); Prof. Mojib LATIF (独 Kiel Helmholtz 海洋研究センター); Prof. Noel KEENLYSIDE (ノルウェーBergen大学); Dr. Torben KOENIGK (スウェーデン気象・水文研究所); Dr. Frederic VITART (英 欧州中期予報センター); Dr. Tao WANG (中国科学院大気物理研究所); Prof. Jinro UKITA (新潟大学自然科学系) である。

(4) Partnership between Norway and Japan for Excellent Education and Research in the realm of past, present and future weather and climate dynamics ("NORPAN")

本課題は、過去・現在・将来の気象・気候力学分野における優れた教育と研究の発展のために、ノルウェーと日本両国の連携を強化することを目的とするノルウェー政府の国際連携・人材育成プログラムである(H 27～H29年度; H30年度以降の延長申請)。ノルウェー側PI: Prof. Thomas SPENGLER (Bergen 大学); 日本側PI: Prof. Ayako ABE-OUCHI (東京大学大気海洋研究所); Prof. Noel KEENLYSIDE (Bergen 大学); Dr. Yvan ORSOLINI (ノルウェー大気研究所); Prof. Hiroshi NIINO (東京大学大気海洋研究所); Prof. Hisashi NAKAMURA (東京大学先端科学技術研究センター); Prof. Yu KOSAKA (東京大学先端科学技術研究センター)

(5) Unifying Perspectives on Atmosphere-Ocean Interactions during Cyclone Development ("UNPACC")

温帯低気圧の発達において生起する多様な大気海洋相互作用の解明を目的とするノルウェー政府による国際共同研究(H29～H31年度)。PI: Prof. Thomas SPENGLER (Bergen 大学); Prof. Hisashi NAKAMURA (東京大学先端科学技術研究センター); Prof. Michael REEDER (豪Monash大学); Prof. Ping CHANG (米Texas A&M大学); Prof. Ian RENFREW (英 East Anglia 大学); Dr. Tim HEWSON (英 欧州中期予報センター)

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) H. KUBOTA, Y. KOSAKA and S.-P. XIE: *Int. J. Climatol.*, 36, 4, 1575-1589, doi: 10.1002/joc.4441 (2015), A 117-year long index of the Pacific-Japan pattern with application to interdecadal variability.
- 2) F. OGAWA, N.-E. OMRANI, K. NISHII, H. NAKAMURA and N. KEENLYSIDE: *Geophys. Res. Lett.*, 42, 22, 10056-10063, doi: 10.1002/2015GL066538 (2015), Ozone-induced climate change propped up by the Southern Hemisphere oceanic front.
- 3) H.-S. PARK, S. LEE, Y. KOSAKA, S.-W. SON and S.-W. KIM: *J. Climate*, 28, 15, 6281-6296, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00773.1 (2016), The impact of Arctic winter infrared radiation on early summer sea ice.
- 4) S.-P. XIE, Y. KOSAKA and Y. M. OKUMURA: *Nature Geosci.*, 9, 1, 29-33, doi:10.1038/ngeo2581 (2016), Distinct energy budgets for anthropogenic and natural changes during global warming hiatus.
- 5) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU, M. KATO and S. ARAKANE: *Mon. Wea. Rev.*, 144, 4, 1145-1160., doi: 10.1175/MWR-D-15-0299.1 (2016), Roles of an Atmospheric River and a Cut-off Low in the Extreme Precipitation Event in Hiroshima on August 19, 2014.
- 6) Z. WEI, K. YOSHIMURA, A. OKAZAKI, K. ONO, W. KIM, M. YOKOI and C.-T. LAI: *J. Hydrol.*, 533, 91-102 (2016), Understanding the variability of water isotopologues in near-surface atmospheric moisture over a humid subtropical rice paddy in Tsukuba, Japan.
- 7) M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, B. TAGUCHI and H. NAKAMURA: *Sci. Rep.*, 6 (2016), doi:10.1038/srep20153 (2016), How potentially predictable are midlatitude ocean currents?
- 8) J. UCHIDA, M. MORI, H. NAKAMURA, M. SATOH, K. SUZUKI and T. NAKAJIMA: *Mon. Wea. Rev.*, 144, 4, 1423-1447, doi: 10.1175/MWR-D-15-0271.1 (2016), Error and energy budget analysis of a nonhydrostatic stretched-grid global atmospheric model.
- 9) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII and B. QIU: *J. Climate*, 29, 9, 3273-3296, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0545.1 (2016), Interannual modulations of oceanic imprints on the wintertime atmospheric boundary layer under the changing dynamical regimes of the Kuroshio Extension.
- 10) N. HIROTA, Y. N. TAKAYABU and A. HAMADA: *J. Climate*, 29, 9, 3317-3337, doi:10.1175/JCLI-D-15-0480.1 (2016), Reproducibility of summer precipitation over northern Eurasia in CMIP5 multi-climate models.
- 11) N. C. JOHNSON and Y. KOSAKA: *Climate Dyn.*, doi:10.1007/s00382-016-3039-1 (2016), The impact of eastern equatorial Pacific convection on the diversity of boreal winter El Niño teleconnection patterns.
- 12) 芳村 圭、中村晋一郎、鳩野美佐子、向田清峻、石塚悠太、内海信幸、木口雅司、金炯俊、乃田啓吾、牧野達哉、鼎信次郎、沖大幹: 土木学会論文集 B1(水工学), 72 (2016, 平成 27 年 9 月関東・東北豪雨による茨城県常総市における鬼怒川洪水に関する調査及び考察
- 13) M. NEWMAN, M. A. ALEXANDER, T. R. AULT, K. M. COBB, C. DESER, E. DI LORENZO, N. J. MANTUA, A. J. MILLER, S. MINOBE, H. NAKAMURA, N. SCHNEIDER, D. J. VIMONT, A. S. PHILLIPS, J. D. SCOTT and C. A. SMITH: *J. Climate*, 29, 12, 4399-4427, doi:10.1175/JCLI-D-15-0508.1 (2016), The Pacific Decadal Oscillation, Revisited.
- 14) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 33, 4, 653-667, doi:10.1175/JTECHD-15-0097.1 (2016), Improvements in detection of light precipitation with the Global Precipitation Measurement dual-frequency precipitation radar (GPM DPR).
- 15) H. WANG, S.-P. XIE, H. TOKINAGA, Q. LIU and Y. KOSAKA: *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL068521 (2016), Detecting cross-equatorial wind change as a fingerprint of climate response to anthropogenic aerosol forcing.

- 16) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: *Geophys. Res. Lett.*, 43, 5435-5441, doi:10.1002/2016GL068962 (2016), Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements.
- 17) F. OGAWA, H. NAKAMURA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: *J. Climate*, 29, doi:10.1175/JCLI-D-15-0885.1 (2016), Importance of mid-latitude oceanic frontal zones for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature.
- 18) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: *Nature Geosci.* (2016), The tropical Pacific as a key pacemaker of the variable rates of global warming.
- 19) S.-P. XIE, Y. KOSAKA, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY and G HUANG: *Adv. Atmos. Sci.*, 33, 411-432, doi: 10.1007/s00376-015-5192-6 (2016), Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review.
- 20) S. TANAKA, K. NISHII and H. NAKAMURA: *J. Climate*, 29, 6597-6616, doi:10.1175/JCLI-D-15-0549.1 (2016), Vertical structure and energetics of the Western Pacific teleconnection pattern.
- 21) 芳村圭: *水文科学会誌*, 46, 87-99 (2016), 水同位体比情報を用いたデータ同化
- 22) M. KOIKE, N. ASANO, H. NAKAMURA, S. SAKAI, T. M. NAGANO and T. Y. NAKAJIMA: *J. Geophys. Res.*, 121, doi:10.1002/2016JD025375 (2016), Modulations of aerosol impacts on cloud microphysics induced by the warm Kuroshio Current under the East Asian winter monsoon.
- 23) C.-Y. WANG, S.-P. XIE, Y. KOSAKA, Q. LIU and X.-T. ZHENG: *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-15-0496.1, doi : 10.1175/JCLI-D-15-0496.1 (2017), Global influence of tropical Pacific variability with implications for global warming slowdown.
- 24) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and T. HORINOUCI: *J. Climate*, 30 (20), 8127-8147, doi:10.1175/JCLI-D-16-0724.1 (2017), Precipitation characteristics over East Asia in early summer: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability.
- 25) Z. WEI, K. YOSHIMURA, L. WANG, D. MIRALLES, S. JASECHKO and X. LEE: *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2016GL072235 (2017), Revisiting the contribution of transpiration to global terrestrial evapotranspiration.
- 26) S.-P. Xie, Y. Kosaka: *Current Climate Change Reports*, 3, 128-140, doi:10.1007/s40641-017-0063-0 (2017), What caused the global surface warming hiatus of 1998-2013?
- 27) Y. YANG, J. LI, L. WU, Y. KOSAKA, Y. DU, C. SUN, F. XIE, and J. FENG: *Adv. Atmos. Sci.*, 34, 1282-1289, doi:10.1007/s00376-017-7009-2 (2017), Decadal Indian Ocean dipolar variability and its relationship with the tropical Pacific.
- 28) Y. KAWAI, Q. MOTEKI, A. KUWANO-YOSHIDA, T. ENOMOTO, A. MANDA and H. NAKAMURA: *J. Meteor. Soc. Japan*, 95, 71-90, doi:10.2151/jmsj.2017-004 (2017), Impact propagation of radiosonde data assimilation over the Kuroshio and Kuroshio Extension: case study on the early summer (Baiu) in 2012.
- 29) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, H. KAMATORI, K. ONOGI and S. OKAJIMA: *SOLA*, 14, 6-13, doi:10.2151/sola.2018-002 (2018), JRA-55CHS: An Atmospheric Reanalysis Produced with High-Resolution SST.
- 30) S. OKAJIMA, H. NAKMAURA, K. NISHII, T. MIYASAKA, A. KUWANO-YOSHIDA, B. TAGUCHI, M. MORI and Y. KOSAKA: *J. Climate*, 31, 297-315, doi:10.1175/JCLI-D-17-0200.1 (2018), Mechanisms for the Maintenance of the Wintertime Basin-Scale Atmospheric Response to Decadal SST Variability in the North Pacific Subarctic Frontal Zone.
- 31) A. MIYAMOTO, H. NAKAMURA and T. MIYASAKA: *J. Climate*, 31, (10), 4017-4039, doi:10.1175/JCLI-D-17-0229.1 (2018), Influence of the subtropical high and storm track on

low-cloud fraction and its seasonality over the South Indian Ocean.

- 32) G. SRINIVAS, J. S. CHOWDARY, Y. KOSAKA, C. GNANASEELAN, A. PAREKH and K. V. S. R. PRASAD: J. Climate, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0408.1 (2018), Influence of the Pacific-Japan Pattern on Indian summer monsoon rainfall.
- 33) N. HIROTA, M. OHTA, Y. YAMASHITA and M. TAKAHASHI: J. Climate, 31, 2871-2887, doi:10.1175/JCLI-D-16-0390.1 (2018), Roles of intraseasonal disturbances and diabatic heating in the East Asian Jet Stream variabilities associated with the East Asian winter monsoon.
- 34) N. HIROTA, T. OGURA, H. TATEBE, H. SHIOGAMA, M. KIMOTO and M. WATANABE: J. Climate, 31, 3033-3047, doi: 10.1175/JCLI-D-17-0246.1 (2018), Roles of shallow convective moistening in the eastward propagation of the MJO in MIROC6.
- 35) N. HIROTA, H. SHIOGAMA, H. AKIYOSHI, T. OGURA, M. TAKAHASHI, Y. KAWATANI, M. KIMOTO and M. MORI: npj Climate and Atmospheric Science (2018), The influences of El Nino and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016. (in press)
- 36) Z. WEI, X. LEE, Z. LIU, U. SEEBOONRUANG, M. KOIKE and K. YOSHIMURA: Earth and Planetary Science Letters, 488, doi:10.1016/j.epsl.2018.02.015 (2018), Influences of large-scale convection and moisture source on monthly precipitation isotope ratios observed in Thailand, Southeast Asia.
- 37) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: J. Climate (2018), Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events around Japan in the TRMM region. (accepted)

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII, Y. TANIMOTO and B. QIU: CLIVAR Exchanges, 69, 27-30 (2016), Meso-scale imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio front on the wintertime atmospheric boundary layer.
- 2) 西井和晃, 田口文明, 吉田聡, 中村尚, 小坂優, 宮坂貴文: 月間海洋, 568, 100-106 (2018), 中緯度海洋前線帯の西風ジェットへの影響

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA, S. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and Y. KOSAKA: AGU Chapman Conference on Evolution of the Asian Monsoon and Its Impact on Landscape, Environment and Society: Using the Past as the Key to the Future, Hong Kong, China, 2015
“Multi-decadal modulations observed in the variability of the East Asian summer monsoon”
- 2) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Hiatus and accelerated global warming due to tropical Pacific natural variability”
- 3) K. NISHII, H. NAKAMURA and T. NAKAMURA: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Atmospheric response to anomalous sea ice in the Sea of Okhotsk”
- 4) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Persistent cooling of the polar stratosphere in 2011 winter and spring”
- 5) H. NAKAMURA, L. WANG and K. NISHII: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“The extreme European cold spell in 2011/12 winter: Observed features and possible causes”
- 6) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Potential importance of midlatitude ocean fronts for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature”

- 7) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA and H. KAMAHORI: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
 “Impacts of midlatitude frontal sea-surface temperature gradients on the atmosphere as revealed in new Japanese reanalysis data”
- 8) N. HIROTA, Y. TAKAYABU, M. KATO and S. ARAKANE: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
 “Role of an atmospheric river and an upper cold low in the extreme precipitation at Hiroshima on August 19th 2014”
- 9) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: ACM2015, Paris, France, 2015
 “Comparison of the zonal wind in the tropical stratosphere among several reanalysis data”
- 10) 野本大輔、木口雅司、田上雅浩、芳村圭: 日本水文科学会 2015 年度大会 (2015)
 「目黒区で観測された高 d-excess 降水イベントの解析」(2015 年度日本水文科学会学術大会優秀発表賞受賞)
- 11) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, B. TAGUCHI and M. NONAKA: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
 “Long-term modulations of the decadal climate variability over the North Pacific and their future projection in CMIP5 models”
- 12) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
 “Hiatus and acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability” (invited)
- 13) K. NISHII, H. NAKAMURA and Y. J. ORSOLINI: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
 “Persistent cooling of the polar stratosphere in 2011 winter and spring”
- 14) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, B. TAGUCHI, T. MIYAMA, M. NONAKA, S. IIZUKA and M. KOIKE: 2nd Open Science Symposium on Western Pacific Ocean Circulation and Climate, Busan, Korea, 2015
 “Multi-scale impacts of the western boundary currents and associated frontal zones on the atmosphere”
- 15) 横山千恵、高薮縁、金田幸恵: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「TRMM PR、JRA55、CMIP5 データを用いた梅雨前線降雨の将来変化に関する研究」
- 16) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「GPM/DPR の降水検出感度向上のインパクト」
- 17) 宮坂貴文、中村尚: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「北大西洋湾流域の鉛直流に対する力学・熱力学的寄与」
- 18) 西井和晃、中村尚、中村哲: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「オホーツク海海氷減少に対する大気応答」
- 19) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: 8th International Workshop on Tropical Marine Environment Change, Guangzhou, China, 2015
 “Acceleration and slowdown of global warming due to tropical Pacific natural variability” (invited)
- 20) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: CLIVAR-ICTP Workshop on Past and Future Climate Shifts, Trieste, Italy, 2015
 “Hiatus and acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability” (invited)
- 21) 小坂 優、謝 尚平、Yan Du、Kaiming Hu、Jasti S. Chowdary、Gang Huang: 研究集会「長期予報と大気大循環」(2015)

「夏季インド洋-北西太平洋結合モードと ENSO 衰退後の異常気象」

- 22) Y. N. TAKAYABU, N. HIROTA, M. KATO and S. ARAKANE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Combined Effect of an Atmospheric River and a Cut-off Low in Hiroshima Flooding Event on August 19, 2014”
- 23) N. HIROTA and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Reproducibility of summertime diurnal precipitation over northern Eurasia simulated by CMIP5 climate models”
- 24) A. HAMADA, Y. N. TAKAYABU, C. LIU and E. ZIPSER: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Weak Linkage between the Heaviest Rainfall and Tallest Storms”
- 25) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, T. MIYASAKA and A. KUWANO-YOSHIDA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Potential importance of midlatitude SST fronts for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the southern annular-mode signature” (invited)
- 26) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA, Y. KOSAKA, S. OGAWA, K. NISHII and T. MIYASAKA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
 “Multi-decadal modulations in the variability of the East Asian summer monsoon” (invited)
- 27) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, H. KAMAHORI and C. KOBAYASHI: CLIVAR/JAMSTEC Workshop on the Kuroshio Current and Extension System, Yokohama, Japan, 2016
 “Impacts of frontal SST gradients in the Kuroshio-Oyashio Extension on the atmosphere as revealed in a new Japanese reanalysis”
- 28) H. NAKAMURA, F. OGAWA, K. NISHII, N.-E. OMRANI and N. KEENLYSIDE: 2016 Ocean Sciences Meeting, New Orleans, LA, USA, 2016
 “Role of mid-latitude oceanic frontal zones in the ozone-induced climate change over the Southern Hemisphere as revealed in aqua planet experiments”
- 29) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Rainfall characteristics of the Baiu front observed with TRMM PR: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability”
- 30) M. SATOH, Y. YAMADA, M. SUGI, C. KODAMA, A. T. NODA, M. NAKANO and T. NASUNO: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Responses of tropical cyclone structure and frequency to a global warming simulated by NICAM”
- 31) T. MIYAKAWA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Characteristics of atmospheric rivers produced by NICAM”
- 32) H. NAKAMURA, T. MACHIMURA and Y. KOSAKA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “The two dominant meridional teleconnection patterns over the summertime western North Pacific and their interdecadal modulations”
- 33) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, H. KUBOTA, Y. DU, K. HU, J. CHOWDARY and G. HUANG: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “The Indo-western Pacific Ocean capacitor mode and its inter-decadal modulations”
- 34) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016

- “Dynamical and thermodynamical contributions to the vertical motions over the wintertime oceanic frontal zones”
- 35) K. NISHII, F. OGAWA, H. NAKAMURA, N. -E. OMRANI and N. KEENLYSIDE: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Ozone-induced climate change propped up by the Southern Hemisphere oceanic front”
- 36) Y. N. TAKAYABU: The International Science Conference on MAHASRI, Tokyo, Japan, 2016
 “Combined Effect of an Atmospheric River and a Cut-off Low in Hiroshima Flooding Event on August 19, 2014”
- 37) 中村尚、釜堀弘隆、小林ちあき、升永竜介、岡島悟：2016 年度日本海洋学会春季大会（2016）
 「高解像度海面水温データを与えた全球大気再解析 JRA55 追加プロダクト」（招待講演）
- 38) 小坂優、謝尚平、奥村夕子：2016 年度日本海洋学会春季大会（2016）
 「地球温暖化停滞期の全球エネルギー収支」
- 39) 西井和晃、田口文明、吉田聡、中村尚、小坂優、宮坂貴文：2016 年度日本海洋学会春季大会（2016）
 「中緯度海洋が大気の潜在的予測可能性へ与える影響」
- 40) 横山千恵、高薮縁：GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会（2016）
 「梅雨期の降雨特性：亜熱帯ジェットと下層対流不安定度の影響」
- 41) 濱田篤、高薮縁：GSMaP および衛星シミュレータ合同研究集会（2016）
 「次期 GSmAP のための降水レジーム・プロファイルデータベース」
- 42) Y. N. TAKAYABU: Workshop on Intraseasonal Processes and Prediction in the Maritime Continent, Singapore, 2016
 “Environmental factors at the selection of MJO and large-scale moist Kelvin waves” (invited)
- 43) M. MORI: 7th Japan-EU Workshop on Climate Change Research, Tokyo, Japan, 2016
 “Attribution of recent extreme events: a probabilistic approach”
- 44) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, S. OKAJIMA, H. KAMAHORI and C. KOBAYASHI: GODAE Workshop on High-Resolution Ocean Modelling for Coupled Seamless Predictions, Exeter, UK, 2016
 “Multi-scale impacts of midlatitude ocean currents and fronts on the atmosphere” (invited)
- 45) 廣田渚郎、高薮縁、濱田篤：日本気象学会 2016 年度春季大会（2016）
 「CMIP5 気候モデルにおける陸上の降水日変動」
- 46) 横山千恵、高薮縁：日本気象学会 2016 年度春季大会（2016）
 「梅雨期の降雨特性に対する亜熱帯ジェットと下層対流不安程度の影響」
- 47) 濱田篤、高薮縁：日本気象学会 2016 年度春季大会（2016）
 「夏季日本域の極端降水・極端対流イベントに関わる環境場の違い」
- 48) 芳村圭：2015 年関東・東北豪雨災害土木学会・地盤工学会合同調査団関東グループ最終報告会（2016）
 「災害発生時の現地調査及び降水頻度に関する検討」
- 49) 芳村圭：日本地球惑星科学連合 2016 年大会（2016）
 「平成 27 年関東・東北豪雨による鬼怒川洪水に関する調査活動を経て」
- 50) 森 正人、渡部雅浩、木本昌秀：日本地球惑星科学連合 2016 年大会（2016）
 「北極温暖化増幅下での天候レジームの変化」
- 51) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA and M. ONO: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
 “Precipitation characteristics observed with GPM DPR, in comparison with TRMM PR” (invited)
- 52) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
 “Improvements in Detection of Light Precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-Frequency Precipitation Radar (GPM/DPR)”

- 53) T. MACHIMURA, Y. KOSAKA and H. NAKAMURA: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
 “Two dominant modes over the summertime western North Pacific and interdecadal modulations”
 (invited)
- 54) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, H. KUBOTA, Y. DU, K. HU, J. CHOWDARY and G. HUANG: Japan Geoscience Union Meeting 2016, Chiba, Japan, 2016
 “The Indo-western Pacific Ocean capacitor mode and coherent climate anomalies in post-ENSO summer”
- 55) Y. N. TAKAYABU: International Workshop on “convection interacting with large-scale flow over the Maritime Continent – South China Sea”, Taiwan, 2016
 “Characteristics of extreme rainfalls observed with 17 years of the Tropical Precipitation Measurement Mission” (invited)
- 56) Y. N. TAKAYABU: ICTP-IITM-COLA Targeted Training Activity(TTA): Towards improved monsoon simulations, Trieste, Italy, 2016
 “Satellite observations to validate climate models” (invited)
- 57) H. NAKAMURA: Japan-Norway Arctic Science and Innovation Week (plenary keynote talk), Tokyo, Japan, 2016
 “Teleconnections between the Arctic and the Asian/Pacific regions and related air-sea-ice interactions”
- 58) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: AOGS 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016
 “Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric instability on precipitation characteristics in East Asia in early summer”
- 59) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: AOGS 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016
 “Improvements in Detection of Light Precipitation with the Global Precipitation Measurement Dual-frequency Precipitation Radar”
- 60) 小坂 優、謝 尚平:「続・地球温暖化ハイエイタスと潜在的ブーストに対する海洋熱循環の役割」研究集会 (2016)
 「階段状の地球温暖化のペースメーカーとしての熱帯太平洋変動」
- 61) H. NAKAMURA and F. OGAWA: American Meteorological Society 21st Conference on Satellite Meteorology/20th Conference on Air-Sea Interaction (plenary keynote talk), Madison, WI, USA, 2016
 “Potential importance of a midlatitude SST front for the annular-mode variability: Inter-basin differences in the Southern Annular-Mode signatures”
- 62) Y. KOSAKA, T. MACHIMURA and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
 “Climate Variability and Predictability over the Indo-Pacific Ocean: Two meridional teleconnection patterns over the summer Northwestern Pacific and interdecadal modulations”
- 63) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
 “Tropical Pacific variability as the key pacemaker of the global warming staircase”
- 64) C. YOKOYAMA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
 “Effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability on precipitation characteristics in the Baiu season”
- 65) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
 “Convective cloud top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”

- 66) M. ONO and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
 “Characteristics of precipitation systems observed with the GPM DPR and their relationship with environmental moisture field”
- 67) M. FUJISHIMA and Y. N. TAKAYABU: Tropical Meteorology Meeting 2016, Kyoto, Japan, 2016
 “A Statistical analysis of precipitation feature over oceanic areas adjacent to continents in the tropics from TRMM data”
- 68) Y. N. TAKAYABU: PMM 2016 Science Team Meeting, Houston, USA, 2016
 “JAXA GPM Science Status” (invited)
- 69) K. YOSHIMURA: EGU Leonardo conference 2016, Ourense, Spain, 2016
 “Data assimilation with stable water isotope information” (invited)
- 70) 濱田篤、高薮縁：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い」
- 71) 横山千恵、高薮縁：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「GPM KuPR 観測による中緯度降水の特徴—熱帯降水との対比から—」
- 72) 小野茉莉花、高薮縁：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「GPM-DPR データを用いた降水システム特性と環境場の関係」
- 73) 西井和晃、田口文明、吉田 聡、中村 尚、小坂 優、宮坂貴文：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「季節平均降水量の潜在的予測可能性に対する中緯度海洋の役割」
- 74) 小坂優、謝尚平：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「階段状の地球温暖化のペースメーカーとしての熱帯太平洋変動」
- 75) 宮坂貴文、中村尚：日本気象学会 2016 年度秋季大会 (2016)
 「海洋前線帯上の移動性擾乱に伴う上昇流に対する力学・熱力学的寄与」
- 76) H. NAKAMURA: Dasan Conference 2016 (invited talk), Jeju, Korea, 2016
 “Active roles of midlatitude ocean in weather and climate”
- 77) 森正人：平成 28 年度「異常気象と長期変動」研究集会 (2016)
 「北極海の海水変動に対する大気応答と自然変動について」
- 78) 宮坂貴文、中村 尚：平成 28 年度「異常気象と長期変動」研究集会 (2016)
 「海洋前線帯上の鉛直流形成に対する力学・熱力学的寄与」
- 79) K. NISHII, S. TANAKA and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference, Qingdao, China, 2016
 “Vertical structure and energetics of the Western Pacific Teleconnection Pattern”
- 80) B. TAGUCHI, M. NONAKA, N. SCHNEIDER and H. NAKAMURA: CLIVAR Open Science Conference, Qingdao, China, 2016
 “Extratropical Frontal- and Meso-scale Air-Sea Interaction: Response of atmosphere-ocean system to latitudinal shifts of the North Pacific Subarctic frontal zone”
- 81) H. NAKAMURA: Klima Campus Colloquium (invited lecture), Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, Germany, 2016
 “Midlatitude warm ocean currents as climatic hotspots”
- 82) 森 正人、渡部雅浩、中村 尚、木本昌秀：日本気象学会研究会「長期予報と大気大循環」(2016)
 「北極海の海水減少が冬季中緯度大気循環へ与える影響」
- 83) K. YOSHIMURA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
 “Future stable water isotope projection with an isotope-AGCM driven by CMIP5 SSTs”
- 84) H. NAKAMURA and K. NISHII: 2016 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA, 2016
 “Dynamics of monthly anomalies of the Western Pacific teleconnection pattern” (invited)
- 85) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY and G. HUANG: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016

- “Coherent climate anomalies over the Indo-western Pacific in post-El Niño summer” (invited talk)
- 86) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
 “Tropical Pacific variability as a key pacemaker of the global warming staircase”
- 87) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
 “Dynamical and thermodynamical contributions to the vertical motions over the wintertime oceanic frontal zones”
- 88) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, H. NAKAMURA, T. OSE, T. HORINOCHI, T. NOZAWA, Y. KAWATANI and R. SHIROOKA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Project Introduction: Toward an understanding of precipitation changes in the East Asia”
- 89) H. NAKAMURA, K. NISHII, Y. KOSAKA, M. MORI, B. TAGUCHI, T. MIYASAKA, H. HOTTA and S. SUGANO: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Potential predictability in the extratropics: A reassessment through AGCM experiments with high-resolution SST”
- 90) R. MASUNAGA, H. NAKAMURA, T. MIYASAKA, K. NISHII, Y. TANIMOTO and B. QIU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Wintertime imprints of the Kuroshio Extension and Oyashio fronts on cloudiness and precipitation”
- 91) N. SUETO, A. YATAGAI and Y. N. TAKAYABU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “The Effect of Atmospheric Rivers on Japanese Heavy Precipitation”
- 92) Y. KOSAKA and S.-P. XIE: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Tropical Pacific variability as a key pacemaker of the global warming “staircase””
- 93) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA and M. ISHIGAKI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013”
- 94) M. SATOH, T. OHNO, A. WING, S. BONY, B. STEVENS and K. REED: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “RCEMIP: Radiative Convective Equilibrium Model Inter-comparison Project”
- 95) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Large-scale environmental conditions related to mid-summer extreme rainfall events over the Japan region”
- 96) K. KIKUCHI, Y. N. TAKAYABU and H. NAKAMURA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Relationship between the MJO and precipitation in East Asia: Event-to-event variations”
- 97) K. YOSHIMURA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Relationship between stratiform fraction and precipitation isotope: Was the isotopic parameterization wrong?”
- 98) Y. N. TAKAYABU: JAXA/NASA Clouds and Precipitation Mission Concept Study Group Meeting, Pasadena, USA, 2017

- “TRMM/GPM Science: What have been Learned and what the gaps are”
- 99) Y. N. TAKAYABU and K. SUZUKI: JAXA/NASA Clouds and Precipitation Mission Concept Study Group Meeting, Pasadena, USA, 2017
- “Post-GPM/EarthCare Science and Applications focus in Japan”
- 100) 高薮縁、横山千恵、濱田篤、重尚一、山本宗尚、山地萌果、久保田拓志、幾田泰醇: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
- “GPM SLH latent heating retrievals with a study on extratropical precipitation systems” (invited)
- 101) 濱田篤、高薮縁: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
- “Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”
- 102) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA and M. ISHIGAKI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
- “Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013” (Invited)
- 103) M. MORI: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
- “Evaluation of Atmospheric Response to Arctic Sea Ice Anomalies”
- 104) K. NISHII, B. TAGUCHI, A. KUWANO-YOSHIDA, H. NAKAMURA and T. MIYASAKA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
- “The role of midlatitude oceanic fronts in the formation of the climatological mean atmospheric circulation”
- 105) 濱田篤、高薮縁: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
- 「静止衛星高頻度観測を用いた積雲鉛直流の推定」
- 106) 横山千恵、高薮縁、濱田篤、重尚一、山本宗尚、山地萌果、幾田泰醇: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
- 「GPM DPR 潜熱加熱スペクトル推定のための中緯度参照テーブルの作成: 気象庁 LFM データの解析」
- 107) 小野茉莉花、高薮縁: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
- 「GPM DPR データを用いた中・低緯度の降水システム特性の海陸による違いに関する統計解析」
- 108) 藤島美保、高薮縁、濱田篤: 日本気象学会 2017 年度春季大会 (2017)
- 「TRMM 衛星データを用いた熱帯の海陸遷移領域における降雨特性の統計的解析」
- 109) H. NAKAMURA: 2017 CLIVAR International Workshop on Boundary Currents: Qingdao, China, 2017
- “Impacts of warm western boundary currents and associated oceanic fronts on the mean state and variability of the extratropical atmosphere” (invited)
- 110) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, C.-Y. WANG, M. WATANABE, Y. IMADA, C. DESER and T. FAN: JSPS Japan-Norway Symposium 2017 “Past, Present, and Future of the Arctic and Antarctic”, Bergen, Norway, 2017
- “Slowdown & acceleration of surface global warming due to tropical Pacific decadal variability”
- 111) Y. N. TAKAYABU: The Future of Cumulus Parametrization Workshop: 10-14 July 2017, Delft University of Technology, The Netherlands, 2017
- “Land/Ocean Contrasts in Precipitation Characteristics Observed with the GPM DPR and Their Relationship to Column Relative Humidity”
- 112) Y. N. TAKAYABU: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
- “GPM SLH Latent Heating Algorithm for Extratropical Precipitation Systems”
- 113) Y. KOSAKA, S.-P. XIE and C.-Y. WANG: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
- “Tropical Pacific variability as a pacemaker of the staircase-like global warming”
- 114) Y. N. TAKAYABU: 2017 Workshop for Typhoon, cloud and climate study, National Taiwan University,

Taipei Taiwan, 2017

“GPM Spectral Latent Heating (SLH) retrieval algorithm for extratropical precipitation systems”

- 115) H. NAKAMURA, K. NISHII, R. MASUNAGA and B. TAGUCHI: 2017 IAPSO-IAMAS-IGA Joint Assembly, Cape Town, South Africa, 2017
 “Impacts of midlatitude oceanic fronts on the mean state and variability of the extratropical atmosphere”
- 116) H. NAKAMURA, A. MIYAMOTO and T. MIYASAKA: 2017 IAPSO-IAMAS-IGA Joint Assembly, Cape Town, South Africa, 2017
 “Satellite-measured daily-to-seasonal variations of low-cloud fraction over the South Indian Ocean”
- 117) Y. N. TAKAYABU: 2017 CFMIP Meeting on Clouds, Precipitation, Circulation & Climate Sensitivity, the University of Tokyo, Japan, 2017
 “Convective latent heating observed from space: From TRMM to GPM”
- 118) Y. N. TAKAYABU: STS forum 2017 - 14th Annual Meeting, Kyoto, 2017
 “The science of climate change (with an emphasis on the use of satellites) International collaboration in climate monitoring”
- 119) Y. N. TAKAYABU: 2017 PMM Science Team Meeting, San Diego, CA, 2017
 “JAXA GPM Science Status” (invited)
- 120) Y. KOSAKA, S.-P. XIE, Y. DU, K. HU, J. S. CHOWDARY, G. HUANG and H. KUBOTA: Asian Conference on Meteorology 2017, Busan, Korea, 2017
 “Coherent climate anomalies over the Indo-western Pacific in post-El Niño summer”
- 121) K. YOSHIMURA: International Workshop on Isotopes for Tropical Ecosystem Studies, San Jose, Costa Rica, 2017
 “Data assimilation of Isotopic information for multi centennial atmospheric reanalysis” (Invited)
- 122) 小坂優、謝尚平、C.-Y. Wang、今田由紀子、渡部雅浩、T. Fan、C. Deser: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「熱帯太平洋十年規模変動に伴う全球気温変動とその不確実性」
- 123) 高菰縁、横山千恵、濱田篤、幾田泰醇、重尚一、山本宗尚、山地萌果、久保田拓志: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「GPM SLH (スペクトル潜熱加熱推定法) V05プロダクトの紹介: PartI アルゴリズム概要と初期解析結果」
- 124) 濱田篤、横山千恵、高菰縁、幾田泰醇、重尚一、山地萌果: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「GPM SLH (スペクトル潜熱加熱推定法) V05プロダクトの紹介: Part II:リトリバーバル 手法」
- 125) 濱田篤、高菰縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「日本域の極端降水・極端対流イベントの降水特性・環境場の違い(2)」
- 126) 辻宏樹、高菰縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「Atmospheric Riverと切離低気圧に伴う降水の統計的調査」
- 127) 末藤菜保、谷田貝亜紀代、高菰縁: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「Atmospheric Riverが日本の豪雨に与える影響」
- 128) 宮坂貴文、中村尚、碓氷典久、佐々木秀孝、川瀬宏明、野坂真也: 日本気象学会2017年度秋季大会 (2017)
 「2013年8月島根豪雨における海面水温の影響」
- 129) 田口文明、西井和晃、中村尚、小坂優、森正人、宮坂貴文、小守信正、吉田聡、野中正見: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)

「熱帯域の大気海洋変動が中高緯度・北極域へ及ぼす遠隔影響:AFES過去再現実験とCFESペースメーカー実験」

- 130) 西井和晃, 田口文明, 吉田聡, 中村尚, 小坂優, 宮坂貴文: 日本海洋学会2017年度秋季大会 (2017)
「中緯度海洋前線帯と西風ジェット」
- 131) M. MORI: Fifth Session of the East Asia winter Climate Outlook Forum (EASCOF-5), Japan Meteorological Agency, Tokyo, Japan, 2017
“The role of Arctic sea-ice decline on cold winters in recent Eurasia” (invited lecture)
- 132) K. Yoshimura: 5th International Conference on Reanalysis (ICR5), Rome, 2017
“Atmospheric reanalysis for multi-centuries using historical weather archives and isotopic proxies “
- 133) Y. N. Takayabu: Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-6), Singapore, 2017
“Precipitation observed from space and its extremes” (Invited review)
- 134) H. NAKAMURA, R. MASUNAGA, H. KAMAHORI, K. ONOGI and S. OKAJIMA: 5th International Conference on Reanalysis, Rome, Italy, 2017
“On the Significance of Using High-Resolution Sea Surface Temperature in Atmospheric Reanalysis Production” (invited)
- 135) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, Y. IKUTA, S. SHIGE, M. YAMAJI and T. KUBOTA: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“GPM SLH: Convective Latent Heating Estimated with GPM Dual-frequency Precipitation Radar Data”
- 136) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“Convective cloud-top vertical velocity estimated from geostationary satellite rapid-scan measurements”
- 137) H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: AGU Fall Meeting, New Orleans, USA, 2017
“A statistical study on synergetic effects of atmospheric rivers and cut-off lows upon precipitation”
- 138) M. MORI, Y. KOSAKA, M. WATANABE, H. NAKAMURA and M. KIMOTO: Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
“Quantification of influence of Arctic sea-ice reduction and natural variability to recent Eurasian cooling”
- 139) B. TAGUCHI, K. NISHII, M. MORI, H. NAKAMURA, Y. KOSAKA and T. MIYASAKA: Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
“Remote tropical influence on a regional Arctic warming over the Barents Sea since the late 1990s”
- 140) K. NISHII, B. TAGUCHI, A. KUWANO-YOSHIDA, H. NAKAMURA Y. KOSAKA, and T. MIYASAKA: Fifth International Symposium on Arctic Research (ISAR-5), Tokyo, Japan, 2018
“Cooling trend over Eurasian continent and Arctic sea ice decline”
- 141) B. TAGUCHI, K. NISHII, H. NAKAMURA, Y. KOSAKA, M. MORI, T. MIYASAKA, N. KOMLORI, A. KUWANO-YOSHIDA and M. NONAKA: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, 2018
“Quantifying the relative contribution of remote influence from tropics and extra-tropical oceanic variability on the interannual-to-decadal variability of the midlatitude atmosphere”
- 142) T. MIYASAKA and H. NAKAMURA: 2018 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, 2018
“Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Shimane in late August 2013”
- 143) K. Nishii, H. Nakamura and Y.J. Orsolini: 北方圏国際シンポジウム, 北海道紋別市 (2018)

“Cooling trend over Eurasian continent and Arctic sea ice decline”

- 144) Y. N. TAKAYABU, A. HAMADA, C. YOKOYAMA, H. TSUJI, H. NAKAMURA, T. OSE, T. HORINOCHI, T. NOZAWA, Y. KAWATANI and R. SHIROOKA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Project Introduction FY2017: Toward an understanding of precipitation changes in the East Asia”
- 145) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU, O. ARAKAWA and T. OSE: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments”
- 146) A. HAMADA and Y. N. TAKAYABU: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Large-scale environmental conditions related to midsummer extreme rainfall events over the southern Japan region”
- 147) H. TSUJI and Y. N. TAKAYABU: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“A statistical study of rainfall enhancement through an interplay of atmospheric rivers and cut off lows”
- 148) M. SATOH: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Project DYAMON “DYnamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains” for high resolution (< 5 km) global model intercomparison”
- 149) N. HIROTA, T. OGURA, H. TATEBE, H. SHIOGAMA, M. KIMOTO and M. WATANABE: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Roles of shallow convective moistening in the eastward propagation of the MJO in MIROC6”
- 150) H. Nakamura: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Impact of high-resolution SST data on atmospheric reanalysis as revealed in a new JRA-55 product”
- 151) Y. KOSAKA, T. MACHIMURA and H. NAKAMURA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Two dominant teleconnection patterns over the summer Northwestern Pacific and their interdecadal modulations”
- 152) T. MIYASAKA, H. NAKAMURA, S. IIZUKA and A. MANDA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” Tokyo, Japan, 2018
“Influences of sea surface temperature on a heavy rainfall event over Kyushu in early July 2017”
- 153) K. NISHII: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Midlatitude oceanic fronts and atmospheric westerlies”
- 154) M. MORI: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan, 2018
“Quantification of influence of Arctic sea-ice reduction and internal variability to recent Eurasian cooling”

(3) 知的財産権

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) 第 37 回夏季大学「熱帯積雲対流のマルチスケール構造をとき解す～雄大積雲から MJ0 まで～」(実施者：高薮縁、主催：気象学会関西支部、聴講者約 100 名、平成 27 年 8 月 22 日 場所：京都テルサ)
- 2) 群馬県立高崎高校生徒に対する特別講義「地球温暖化の仕組みとそれに伴う異常気象について」(実施者：中村尚、平成 27 年 9 月 10 日、聴講者約 50 名、場所：東京大学先端科学技術研究センター)
- 3) 平成 27 年度環境研究総合推進費 研究成果発表会「暑いだけじゃない～地球温暖化世界のモデルが予測する東アジアと日本の雨～」(実施者：高薮縁、主催：環境省、平成 27 年 10 月 23 日、聴講者約 120 名、場所：都道府県会館)
- 4) こども大学・宇宙地球学部における特別授業「地球と私たち」「水のことを学ぼう!!」(実施者：芳村圭、主催：UDX オープンカレッジ事務局、平成 27 年 12 月 13 日、場所：秋葉原 UDX、聴講者約 20 名)
- 5) 土曜講座「気候変動と異常気象：どこまで予測できるのか?」(実施者：中村尚、主催：私立市川学園中学校・高等学校、平成 28 年 5 月 14 日)
- 6) 東京大学駒場リサーチキャンパス公開 2016 イベント「地球がたいへん! 温暖化を学ぼう」(実施者：小坂優・中村尚、主催：東京大学先端科学技術研究センター、平成 28 年 6 月 3・4 日、場所：東京大学先端科学技術研究センター)
- 7) OB ゼミ「地球温暖化と異常気象：現状と将来予測(仮題)」(実施者：中村尚、主催：私立栄光学園中学校・高等学校、平成 28 年 6 月 8 日)
- 8) 駿台予備学校 東大教授講演会「宇宙から雨を観て見えてきたもの」(実施者：高薮縁、主催：駿台予備学校、平成 28 年 7 月 2 日、聴講者約 118 名)
- 9) 東京大学駒場リサーチキャンパス公開 2016 イベント「地球がたいへん! 温暖化を学ぼう」(平成 28 年 6 月 3～4 日、東京大学先端科学技術研究センター、観客約 50 名)
- 10) ソウル大学ウィーク国際交流行事ミニワークショップ(2016 年 7 月 22 日、東京大学先端科学技術研究センター、観客約 30 名)
- 11) 第 50 回夏季大学「エルニーニョと異常気象」(実施者：小坂優、主催：日本気象学会、平成 28 年 7 月 30 日・31 日、場所：気象庁)
- 12) 川崎市退職女性校長会(梅の実会)「衛星から見た世界の雨と気候」(実施者：高薮縁、主催：川崎市退職女性校長会、平成 28 年 10 月 4 日、聴講者約 40 名)
- 13) 島田県立浜田高等学校向け講義「気候のゆらぎとうつろいの科学」(2016 年 12 月 8 日、東京大学先端科学技術研究センター、観客約 40 名)
- 14) 第 1 回イオン未来の地球フォーラム(1st FORUM on FUTURE EARTH)招待講演「地球温暖化と雨を考える」(実施者：高薮縁、主催：公益財団法人イオン環境財団・東京大学国際高等研究所サステイナビリティ学連携研究機構、平成 29 年 2 月 25 日、聴講者約 200 名、場所：東京大学武田ホール)
- 15) 公開シンポジウム「我が国の衛星地球観測計画」(実施者：高薮縁、主催：日本学術会議地球惑星科学委員会 地球・惑星圏分科会、平成 29 年 7 月 18 日、参加者 204 名)
- 16) 墨田区医師会主催区民フォーラム 2017「地球温暖化と雨」(実施者：高薮縁、主催：墨田区医師会、一般市民向け講演会、平成 29 年 9 月 2 日、聴講者約 30 名)
- 17) 山梨県甲府南高等学校教養講演「衛星から地球の雨を科学する一降水異変は起こっているのかー」(実施者：高薮縁、主催：山梨県甲府南高等学校、平成 29 年 10 月 10 日、聴講者：全校生徒(840 名 および保護者))
- 18) 山梨県甲府南高等学校 第 8 回東京同窓会における講演会「宇宙から地球の雨を観る」(実施者：高薮縁、主催：山梨県甲府南高等学校同窓会、平成 29 年 11 月 23 日、場所：ホテルグランドパレス九段下)

- 19) 平成 29 年度 全球降水観測計画 (GPM) 国内シンポジウム「宇宙から見る雨～これまでの 20 年、これからの 20 年～」(実施者：高薮縁、主催：宇宙航空研究開発機構、平成 29 年 11 月 29 日、聴講者約 160 名、場所：富士ソフトアキバプラザ ホール)
- 20) 気象サイエンスカフェ in 名古屋「春一番はなぜ吹くのか？」(実施者：西井和晃、主催：日本気象学会中部支部・日本気象予報士会東海支部、平成 30 年 2 月 10 日、聴講者約 40 名、場所：諏訪栄町珈琲)

(5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 成果の記者発表(2015 年 7 月 30 日、於文部科学省、「日本近海の夏の大気圧分布に数十年規模で変化する関係を見 ～コメの収穫量や台風数との相関を指摘～」)
- 2) 毎日新聞(2015 年 7 月 30 日、朝刊 28 面、「海洋研究開発機構など指摘 エルニーニョ 影響に周期性?」)
- 3) 毎日新聞(2015 年 7 月 30 日、大阪版、朝刊 26 面)「東大などチーム エルニーニョ 影響に周期性? 「翌年冷夏」予測できぬ時期も」)
- 4) 日本農業新聞(2015 年 7 月 30 日、朝刊 1 面)「海洋研究開発機構、東京大学 夏の気圧配置 日本近海 低 フィリピン 高 米は不作」)
- 5) 日本経済新聞(2015 年 8 月 4 日、朝刊 3 面)「エルニーニョで冷夏のはずが… 海水温に異変・台風も」)
- 6) 日刊工業新聞(2015 年 8 月 10 日、朝刊 14 面)「海洋研究開発機構 夏の日本近海 数十年規模で気圧分布変化」
- 7) Japan Times(2015 年 9 月 11 日)“How Japan’s devastating rainstorm came about”
- 8) Japan Times(2015 年 9 月 12 日)“Authorities knew of flood risk; detailed simulation done 10 years ago”
- 9) 日本経済新聞朝刊(2015 年 9 月 21 日)「鬼怒川堤防なぜ決壊? 軟らかい土質も影響」
- 10) NHK ニュース 7(2015 年 10 月 1 日)「鬼怒川南北 30 キロ余で「パイピング」現象」
- 11) 日経アーキテクチュア(2015 年 10 月 10 日)「関東・東北豪雨の教訓」
- 12) 公明新聞(2015 年 10 月 14 日)「水害が多発 どう高める水防力」
- 13) 日経ホームビルダー(2015 年 10 月 21 日)「洗掘で家が流れ、基礎が浮く」
- 14) 成果の記者発表(2015 年 12 月 11 日、於東京大学先端科学技術研究センター、「成層圏オゾンホールの影響を地表に伝える南大洋の水温分布—20 世紀後期に観測された南半球の気候変化、および気候の将来予測に対する示唆—」)
- 15) Japan Times(2015 年 12 月 21 日)“Joso disaster prompts ministry rethink of flood control, prediction policies”
- 16) 成果の記者発表(2016 年 2 月 1 日、於海洋研究開発機構、「海洋循環に潜む『パラレルワールド』の存在を指摘 —アンサンブル実験により黒潮続流の年々変動要因を解析—」)
- 17) テレビ朝日「報道ステーション」(2016 年 6 月 22 日、九州での記録的豪雨への水温上昇の影響について解説)
- 18) 中国中央電視台(2016 年 6 月 19 日、エルニーニョ翌夏の東アジアの異常天候について解説)
- 19) NHK 総合「テレビニュース 7」(2016 年 6 月 21 日、九州での記録的豪雨への水温上昇の影響について解説)
- 20) 成果の記者発表(2016 年 7 月 19 日、於東京大学先端科学技術研究センター「地球温暖化が階段状に進む要因を究明 ～熱帯太平洋は地球温暖化の「ペースメーカー」～」)
- 21) 読売新聞(2016 年 8 月 18 日夕刊、全国版、6 頁「温暖化「一休み」…海面温の低下で 0.3 度抑制」)
- 22) 毎日新聞(2016 年 8 月 23 日、全国版、2 頁「海水温低下で温暖化 0.3 度抑制 熱帯太平洋「冷や水効果」」)
- 23) Newton(2016 年 9 月号、ニュートンプレス社「異常気象と地球温暖化の脅威」)

- 24) テレビ朝日「報道ステーション」 (2016 年 9 月 8 日、豪雨の環境場について解説)
- 25) NHK 総合テレビ「首都圏ニュース 845」 (2016 年 12 月 2 日、北極海の海氷減少と日本の寒冬について 3 分ほど紹介)
- 26) Newton(2016 年 12 月号、ニュートンプレス社「エルニーニョが異常気象を引き起こすしくみとは?」)
- 27) テレビ朝日「報道ステーション」 (2017 年 1 月 11 日、温暖化が進行した将来の日本への寒波について解説)
- 28) 日本経済新聞 (2017 年 1 月 22 日、全国版、25 頁「減る北極氷 日本に寒風」)
- 29) Newton 別冊 (2017 年 2 月、ニュートンプレス社「海のすべて」)
- 30) 『蒸散寄与率解明』日刊工業新聞 2017 年 5 月 16 日付朝刊
- 31) 『「蒸散」研究で地球の未来がわかる』朝日小学生新聞 2017 年 6 月 6 日付
- 32) 三重テレビ「みえの風紀行」 (2017 年 6 月 11 日、梅雨のメカニズムについて解説)
- 33) 三重テレビ「みえの風紀行」 (2017 年 7 月 9 日、豪雨と海面水温の関係についての解説)
- 34) 三重テレビ「みえの風紀行」 (2018 年 2 月 11 日、春一番とその将来についての解説)

(6) その他

- 1) 平成 28 年 科学技術分野の文部科学大臣表彰 (2016) 若手科学者賞 (小坂 優: 業績名「異常気象や地球温暖化に関わる熱帯気候変動と遠隔影響の研究」)
- 2) 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 (2016) ハイライト論文 (対象講演: Y. Kosaka, S.-P. Xie, H. Kubota, Y. Du, K. Hu, J. S. Chowdary and G. Huang: “The Indo-western Pacific Ocean capacitor mode and coherent climate anomalies in post-ENSO summer”)
- 3) 2017 年度 日本気象学会正野賞 (小坂 優: 業績名「熱帯大気海洋結合変動がもたらす気候影響のメカニズムと予測可能性の研究」)
- 4) Esteemed Review Paper Prize 2018, Advances in Atmospheric Sciences (対象論文: S.-P. Xie, Y. Kosaka, Y. Du, K. Hu, J. Chowdary and G. Huang, 2016: Indo-western Pacific ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. Adv. Atmos. Sci., 33, 411-432)

8. 引用文献

- 1) F. M. RALPH, P. J. NEIMANN, G. A. WICK, S. I. GUTMAN, M. D. DETTINGER, D. R. CAYAN and A. B. WHITE: Geophys. Res. Lett., 33, L13801, doi:10.1029/2006GL026689 (2006)
Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers
- 2) C.-S. CHEN, W.-C. CHEN, Y.-L. CHEN, P.-L. LIN and H.-C. LAI: Atmospheric Research, 73(1-2), 101-130. doi:10.1016/j.atmosres.2004.07.005 (2005)
Investigation of orographic effects on two heavy rainfall events over southwestern Taiwan during the Mei-yu season
- 3) T. KATO: Journal of the Meteorological Society of Japan, 84(1), 129-153.
doi:10.2151/jmsj.84.129 (2006)
Structure of the band-shaped precipitation system inducing the heavy rainfall observed over the northern Kyushu, Japan on 29 June 1999
- 4) A. HAMADA, Y. N. TAKAYABU, C. LIU and E. J. ZIPSER: Nat. Commun., Vol. 6(6213), doi: http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7213 (2015)
Weak linkage between the heaviest rainfall and tallest storms
- 5) T. KATO, M. YOSHIZAKI, K. BESSHO, T. INOUE, Y. SATO and X-BAIU-01 OBSERVATION GROUP: J. Meteor. Soc. Japan, 81, 993-1013 (2003) Reason for the failure of the simulation of heavy rainfall during X-BAIU-01—Importance of a vertical profile of water vapor for numerical simulations—

- 6) Y.-M. KODAMA: J. Meteor. Soc. Japan, 71, 581-610 (1993)
Large-scale common features of sub-tropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part II: Conditions of the circulations for generating the STCZs
- 7) T. HORINOCHI: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 519-541 (2014)
Influence of upper tropospheric disturbances on the synoptic variability of precipitation and moisture transport over summertime East Asia and the Northwestern Pacific
- 8) K. YOSHIMURA, M. KANAMITSU, D. NOONE and T. OKI: J. Geophys. Res, 113, D19108, doi:10.1029/2008JD010074 (2008)
Historical isotope simulation using Reanalysis atmospheric data

II-2 CMIPデータをを用いたアジアモンスーンの現在気候再現性評価と将来変化

国土交通省 気象庁気象研究所

気候研究部	尾瀬 智昭
気候研究部 第一研究室	楠 昌司
気候研究部 第四研究室	遠藤 洋和

<研究協力者>

国土交通省 気象庁気象研究所

気候研究部 第二研究室	前田 修平	(平成27～28年度)
-------------	-------	-------------

国土交通省 気象庁地球環境・海洋部

気象情報課	石原 幸司	(平成27～28年度)
気象情報課	若松 俊哉	(平成27年度～平成28年5月)
気象情報課	大塩 健志	(平成28年6月～平成28年度)
気象情報課	田中 昌太郎	(平成29年度)
気象情報課	山田 賢	(平成29年度)

平成27～29年度累計予算額：8,898千円（うち平成29年度：2,647千円）

[要旨]

ユーラシア大陸東部に位置する日本の気候はアジアモンスーンの影響を強く受けており、梅雨はアジアモンスーンに伴う現象として捉えることができる。ただし、梅雨前線は中緯度に存在するため、その形成には上空の強い西風（ジェット気流）も関わっており、5月から7月にかけてジェット気流の北上とともに梅雨前線も北上する。

CMIP5の気候モデルが予測する降水量の将来変化では、南アジアや東アジアのモンスーン地域ほぼ全域で降水量が増加すると予測されている。一方、日本上空のジェット気流は現在よりやや南下するため、梅雨前線の北上は現在よりもやや遅れる傾向が予想される。気候モデルによる理想化実験を行ったところ、日本や東南アジアのほか海洋上で顕著に降水量が増加し、日本上空を通るジェット気流は強くなり南下をもたらす「海面水温上昇の効果」と、降水量はインドや中国など大陸上で顕著に増加し、日本上空のジェット気流は弱くなり北上する「陸上温度上昇の効果」の足し合わせで将来変化はあらわされ、2つの効果の一部は相殺されていることがわかった。

CMIP5平均の海面水温変化を与えた気象研究所高分解能(60km)全球大気気候モデルによる将来予測実験の水収支と熱収支の解析では、夏季(6-8月)東アジアの平均降水量の将来変化分布は、中国東北部や日本～北太平洋域での中緯度ジェット気流の南下に相当する低気圧性の循環変化分布とこれに伴う鉛直流の将来変化によって説明できることがわかった。また、これには熱帯アジア域での、アジアモンスーン降水域の鉛直流の弱化およびこれに伴う高気圧性の循環変化が関係していることが示唆された。CMIP5気候モデル実験の将来予測では、さらに個々のモデルの海面水温変化の影響を考慮する必要があるかもしれない。

CMIP5気候モデル実験では解像度が荒く、モデルの降水量の出力値のみによって日本国内の地域的な大雨について議論することは困難である。そこで、全球モデルによる大気場から地域的な降水量を推定する統計的ダウンスケーリングの考え方で手法を調査したところ、850hPa水蒸気フラックスを用いれば、最も適切に過去の九州付近の日降水量を統計的に推測できることが分かった。そこで、CMIP5による850hPa水蒸気フラックスの将来変化予測から、九州付近の6月の地上気象観測点の日降水量変化を統計的ダウンスケーリングすると、極端に降る日数と極端に降らない日数が増加するモデルが多いことがわ

かった。

以上のように、日本の降水量の将来変化を正しく予測するためには、大気中の水蒸気量の増加とジェット気流など東アジアの大気循環の変化、さらには背景にあるアジアモンスーン循環の将来変化を正確に予測する必要があることがわかった。

CMIP5 気候モデルの全球降水量分布について現在気候再現性を評価したところ、概ね水平分解能の高い CMIP5 気候モデルの降水量再現性が高い傾向があることがわかった。また、10 年平均で降水量将来変化のティッピング年（気候変化が大きくなって現在の気候に戻ることがないと推定される年代）を調査したところ、日降水強度に比べると年平均降水量のティッピング年は 21 世紀末まで明瞭でなく、年平均降水量に関しては 10 年変動を含む内部変動が大きいことが示唆された。

[キーワード]

地球温暖化、降水、CMIP、アジアモンスーン、日本

1. はじめに

(a) 温暖化に伴うアジアモンスーン変化と東アジアの降水量変化の関係：海陸温度コントラスト

モンスーンは太陽加熱の季節変化とそれに伴う海陸間の温度差で駆動されている。とりわけアジアモンスーンは、広大なユーラシア大陸やチベット高原などの影響を受けて、風と降水の季節変化が顕著であり、典型的なモンスーン気候を示す。モンスーン地域では水資源への依存が強いことから、温暖化に伴う降水変化予測に対する需要が大きい。最新の気候モデルを用いた温暖化予測では、世界平均のモンスーン降水量は増加すると予測されている (Kitoh et al. 2013)¹⁾。大気中の水蒸気量増加がその要因である。一方で、温暖化に伴い熱帯大気は安定化するために世界規模のモンスーン循環は弱化すると予測されている。このため、モンスーン降水量は水蒸気量ほど多くの割合では増加しない。地域規模では、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 (Kitoh et al. 2013)¹⁾。特にアジアモンスーン地域では増加が顕著であり、この原因として他地域と比べてモンスーン循環の弱化が不明瞭であることが指摘されている (Endo and Kitoh 2014)²⁾。温暖化に伴い海陸間の地表温度コントラストは一般に増加することから、これがモンスーン循環を強化する方向に働いている可能性が指摘されている (Ma and Yu 2014)³⁾。

(b) 温暖化に伴う東アジア降水量変化の理解：大気大循環場の変化との関係

CMIP5モデルによる温暖化予測実験では、水蒸気量の増加による「湿潤域で増加、乾燥域で減少」効果 (Held and Soden 2006)⁴⁾により、地球全体で見るとある程度モデル間で共通した降水量将来変化分布を示す。しかし、東アジアなど地域で見ると、さらに海面水温将来変化の分布や鉛直流の変化に伴う降水量変化が加わるので、CMIP5モデル間の違いは小さくはない。

気象研究所では、温暖化影響評価を目的に、海面水温の21世紀末将来変化を与えた気象研高分解能 (60 km) 全球大気モデルによる温暖化予測実験を実施してきた (Kitoh et al. 2016)⁵⁾。これらの予測実験では、同一の将来海面水温変化のもとではあるが、YS、AS、KFで略称する3つの異なる積雲対流スキームを用いた全球大気モデルで予測実験を行ってきた。この場合でも東アジアの平均降水量変化の詳細については異なるところがあることがわかっている。

(c) 温暖化に伴う日本域の降水量変化のダウンケーリング：大気大循環場の変化の利用

IPCC第5次評価報告書 (2013) では「地球温暖化に伴って、今世紀末までに中緯度の陸域のほとんどにおいて、極端な降水がより強く、より頻繁となる可能性が非常に高い」と報告されている。また、日本では、短時間強雨の頻度が増えていることがアメダスデータから示されており (気象庁, 2015)、将来の豪雨のリスクについての定量的な評価を行うことが不可欠である。しかし、複数の地球温暖化予測結果が集まるCMIP5 (Taylor et al., 2012)⁶⁾モデル群によるデータでは解像度が荒く (2.5度格子が一般的)、モデルの降水量の出力値のみによって地域的な大雨について議論することは困難である。

(d) 気候モデルの現在降水分布再現性と水平分解能の関係および将来変化のティッピング年調査

モデルの水平分解能を上げるとモデルの精度が向上するかどうか、様々な要因が関連しており、決して単純ではない。例えば、水平分解能を単純に上げると、全球平均降水量が増えてしまうという危険性がある。ティッピング・ポイントとは、急激で不可逆的な変化のしきい値である (IPCC AR5 WG2, 2013)。気温や降水量で見た気候が後戻りしない時をティッピング年と呼ぶ。少ないアンサンブル実験では不確実性を評価するのは難しい。

2. 研究開発目的

(a) 温暖化に伴うアジアモンスーン変化と東アジアの降水量変化の関係：海陸温度コントラスト

本研究では、アジアモンスーンの温暖化応答メカニズムを理解することを目的として、CMIP5のマルチモデル感度実験を解析した (Endo et al. 2018)⁷⁾。具体的には、大気モデル実験に基づいて変化要因を①CO₂放射変化、②海面水温 (SST) 一様上昇、③SSTパターン変化、に分けて各要因の役割を評価した。なお、実験①ではSSTを固定してCO₂を増加させるため、陸面のみが昇温して海陸間の地表温度コントラストが強化される。

(b) 温暖化に伴う東アジア降水量変化の理解：大気大循環場の変化との関係

東アジアの平均降水量変化の詳細がモデル実験によって異なる原因を調べる目的で、YSで略称する積雲対流スキームを用いた気象研高分解能 (60km) 全球大気モデルによる温暖化予測実験の将来降水量変化について、上昇流変化と関係する東アジアの夏の降水量将来変化を水収支および熱収支の解析 (Sampe and Xie 2010)⁸⁾をもとに調べた (Ose 2017)⁹⁾。得られた結果をもとに、CMIP5モデルアンサンブルによる将来の降水予測結果について検討した (尾瀬 2017)。

(c) 温暖化に伴う日本域の降水量変化のダウンスケーリング：大気大循環場の変化の利用

本研究では、全球モデルによる大気場から地域的な降水量を推定する統計的ダウンスケーリングの考え方 (Wilby et al. 2004)¹⁰⁾に基づき、CMIP5モデルの降水量出力値そのものからではなく、循環場出力値から日本での降水特性の変動を捉えることを目指した。若松ほか (2015) および大塩ほか (2016) では、6月の九州地方に着目し、850hPa水蒸気フラックスを用いることによりRCP4.5シナリオにおける将来の極端現象の傾向を調査した (RCP8.5シナリオの場合は、山田ほか2017)。

(d) 気候モデルの現在降水分布再現性と水平分解能の関係および将来変化のティッピング年調査

気候モデルの現在降水分布再現性と水平分解能の関係 (楠 2015) および将来変化のティッピング年について調査し、さらに予測されたティッピング年の信頼度情報を付加する方法を提唱した (楠 2016)。

3. 研究開発方法

(a) 温暖化に伴うアジアモンスーン変化と東アジアの降水量変化の関係：海陸温度コントラスト

CMIP5 で行われたモデル感度実験を解析した。実験リストを表 (2)-1 に示す。すべての実験データが揃う 9 個の気候モデルを解析対象とした。amipFuture 実験で用いる Δ SST は、CMIP3 マルチモデル予測平均値 (全球平均 Δ SST=4K でスケーリング) である。RCP8.5 実験では Historical 実験との差、1pctCO2 実験では積分 121~140 年目と 1~20 年目の差、AGCM 実験では amip からの差を計算した。1pctCO2 実験と大気モデル (AGCM) 実験の比較に際し、両者が同じ強制力 (Δ CO₂:3.3 倍、熱帯平均 Δ SST:2.93K (1pctCO2 応答のマルチモデル平均)) になるように AGCM 変化をスケーリングした。さらに amipFuture と amip4K の差を amipPattern として定義した。これら定義に基づき、1pctCO2 を、①amip4xC02 (CO₂ 増加)、②amip4K (SST 一様昇温)、③amipPattern (SST パターン変化) に分解した。

表(2)-1 モデル感度実験リスト

a) AOGCM実験			
実験名	CO ₂	その他の強制力	解析期間
Historical	観測	観測	1986-2005年
RCP8.5	RCP8.5シナリオ	RCP8.5シナリオ	2080-2099年
1pctCO2	年率1%漸増	産業革命前の値に固定	1-20年目 121-140年目

b) AGCM実験			
実験名	CO ₂	海面水温	解析期間
amip	観測	観測	1979-2008年
amip4xCO2	観測 x 4	観測	1979-2008年
amip4K	観測	観測 + 4°C	1979-2008年
amipFuture	観測	観測 + 4°C(空間パターン)	1979-2008年

(b) 温暖化に伴う東アジア降水量変化の理解：大気大循環場の変化との関係

文科省革新プログラムで実施した気象研究所60km版全球大気モデル予測実験で、現在（1980～2003年）平均とRCP8.5シナリオによる将来（2075～2099年）平均について解析した。さらに、CMIP5マルチモデルの20年夏季平均の東アジアの降水量変化を調査した。後者の解析の将来変化値は、全球平均4度上昇で規格化している。ここでは、38個のCMIP5モデルのうち、500hPa循環場の変化が、気象研60km格子気候モデルと相関係数0.6以上の、7個のCMIP5モデルを選んで解析した。

(c) 温暖化に伴う日本域の降水量変化のダウンスケーリング：大気大循環場の変化の利用

使用したデータは、日降水量観測値として九州付近の地上気象観測点のデータを用いた。現在気候における循環場の日別値にはJRA-55、将来気候においてはCMIP5(RCP4.5およびRCP8.5シナリオ)を用いた。解析手法は、Chu and Yu (2010)¹¹⁾での方法を参考に、特異値分解解析により統計的ダウンスケーリングを行った。訓練期間の1981～2000年におけるJRA-55の850hPa水蒸気フラックス（予測要素）と日降水量観測値（被予測要素）との統計的関係を求め、この関係をCMIP5の予測に適用し、2080～2099年における日降水量を推定した。

(d) 気候モデルの現在降水分布再現性と水平分解能の関係および将来変化のティッピング年調査

表(2)-2に、現在降水分布再現性調査で使用したモデルを示す。第3期結合モデル国際比較計画(CMIP3)およびCMIP5の46個の大気海洋結合モデルによる過去実験を用いた。大気モデルについては、気象研のMRI-AGCM3.2S, H, LおよびCMIP5の中でも高解像度の大気モデル(a-f)に観測された海面水温を与えたAMIP型実験を用いた。将来変化のティッピング年の調査では、モデルは大気海洋結合モデルMRI-CGCM3を用いた。第5期結合モデル国際比較計画(CMIP5)に提出した歴史実験(historical, 1856-2005年)、将来実験(RCP8.5, 2006-2095年)、産業革命以前実験(piControl, 100年)による年降水量を解析し、Mora (2013, Nature)¹²⁾が提唱した手法を適用した。

表(2)-2 使用したモデルと実験設定

記号	モデル	実験	期間	年数	格子間隔 km (35N)
×	CMIP3、15個	20C3M	1981-2000	20	103-445 平均254
○	CMIP5、31個	historical	1981-2000	20	68-342 平均193
S	MRI-AGCM3.2S	AMIP	1981-2000	20	17
H	MRI-AGCM3.2H	AMIP	1981-2000	20	51
L	MRI-AGCM3.2L	AMIP	1981-2000	20	171
a	BCC-CSM1.1(m)	AMIP	1981-2000	20	102
b	CMCC-CM	AMIP	1981-2000	20	68
c	EC-EARTH	AMIP	1981-2000	20	102
d	GFDL-HIRAM-C180	AMIP	1981-2000	20	57
e	GFDL-HIRAM-C360	AMIP	1981-2000	20	28
f	MRI-CGCM3	AMIP	1981-2000	20	102

4. 結果及び考察

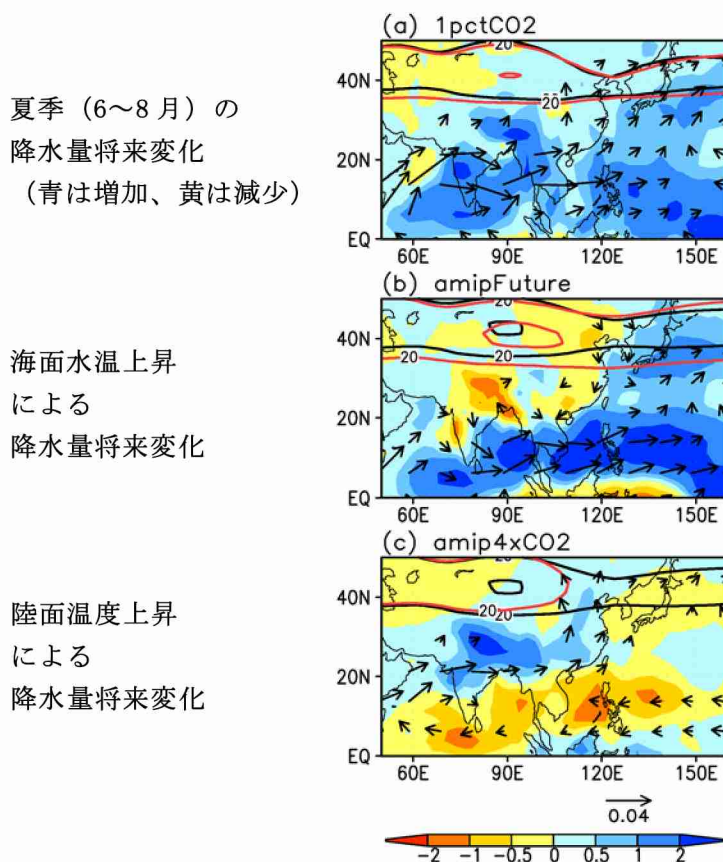
(a) 温暖化に伴うアジアモンスーン変化と東アジアの降水量変化の関係：海陸温度コントラスト

(ア) アジアモンスーンの変化と日本の夏季降水量変化の関係

気候モデルが予測する降水量の将来変化（CMIP5 二酸化炭素濃度年1%漸増実験：1pctCO2）を、図(2)-1aに示す。南アジアや東アジアのモンスーン地域ほぼ全域で降水量が増加すると予測されている。また、日本上空のジェット気流は現在よりやや南下するため、梅雨前線の北上は現在よりもやや遅れる。

温暖化に伴う降水量変化のメカニズムを知るために、温暖化による海面水温上昇の効果（将来の海面水温を設定：amipFuture）と温暖化による陸上温度上昇の効果（海面水温は現在と同じで、将来の二酸化炭素量を設定：amip4xC02）に分けて、気候モデルによる理想化実験を行った。海面水温上昇の効果（図(2)-1b）を見ると、水蒸気の増加によって水蒸気の流れが海上で強まり、降水量は日本や東南アジアのほか海洋上で顕著に増加している。また、日本上空を通る上空のジェット気流は強くなり南下している。一方、陸上温度上昇の効果（図(2)-1c）を見ると、海洋から大陸に吹き込むモンスーンの強化によって水蒸気の流れが強まり、降水量はインドや中国など大陸上で顕著に増加する。また、日本上空のジェット気流は弱くなり北上している。将来変化予測の結果（図(2)-1a）は、この2つの効果の足し合わせであり、一部は相殺されていることがわかる。

このように、日本を含むアジアモンスーン地域の降水量の将来変化を正しく予測するためには、大気中の水蒸気量の増加と海陸間温度差の変化に伴うモンスーン強度の変化を、正確に予測する必要がある。



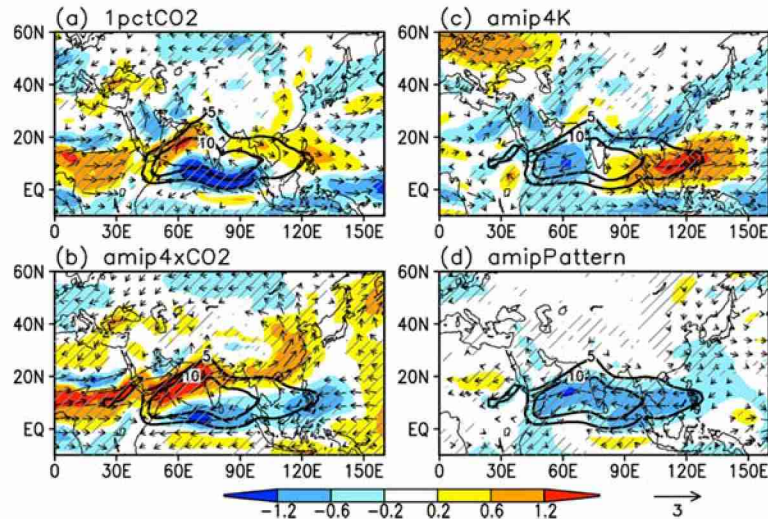
図(2)-1 夏季（6～8月）の降水量（陰影：単位は mm/日）と地表近く（850hPa）の水蒸気輸送（矢印：単位は g/kg・m/s）の変化、および上空（200hPa）の風速（黒太線は現在、赤太線は将来：単位は m/s）。

(a) 将来変化予測(1pctCO2)の結果、(b)海面水温上昇(amipFuture)の効果、(c)陸上温度上昇(amip4xC02)の効果。

(イ) アジアモンスーン循環の変化

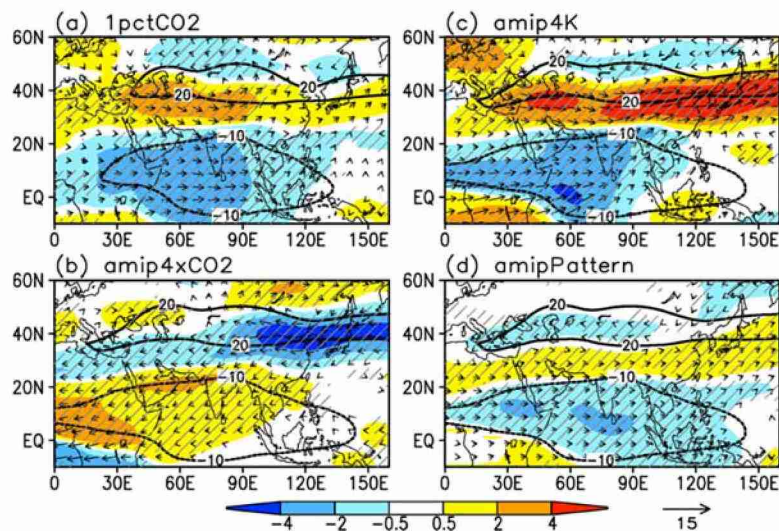
図(2)-2 は北半球夏季の 850hPa 風変化である。1pctCO2 のモンスーン西風は、南アジアの赤道～10° N

で弱化する一方で $10 \sim 25^\circ \text{N}$ ではやや強化しており、基準実験よりも北上する傾向が見られる。そのほか、東アジアの陸域やサヘル地域で西風が強化している。このような特徴は、 CO_2 のみを増加させた amip4xC02 と類似する。amip4xC02 では陸上における西風強化が明瞭である。一方、SST を一様上昇させた amip4K では、モンスーン西風は南アジア～東アジアで弱化している。一方で熱帯北西太平洋では西風は強化している。SST パターンを変化させた amipPattern では、南アジア～東アジアの海域を中心に弱化している。



図(2)-2 6～8月平均の850hPa風変化 (m s^{-1}) : (a) 1pctCO2、(b) amip4xC02、(c) amip4K、(d) amipPattern。9モデル平均。矢印は風変化、陰影は風速変化、太線は基準実験の東西風、ハッチは風速の変化符号が約80% (7個) 以上のモデルで一致する領域。

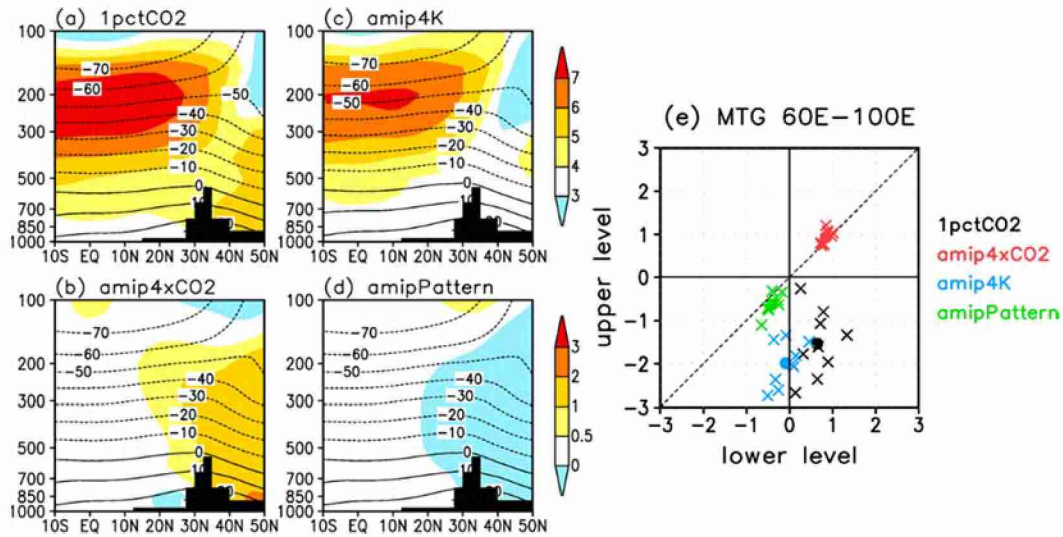
図(2)-3 は北半球夏季の 200hPa 風変化である。1pctCO2 では、熱帯対流圏上層で卓越する東風ジェットは広域で弱化し、中緯度の西風ジェットは南下している。このような特徴は amip4K と類似する。amipPattern では、偏差は小さいが amip4K と同様の傾向を示す。一方、amip4xC02 は 1pctCO2 と反対符号の偏差を示す。このように、1pctCO2 のモンスーン循環は対流圏の上層と下層で異なる変化を示し、上層では SST 一様昇温、下層では CO_2 増加による影響が卓越している。結果は省略するが、1pctCO2 と RCP8.5 (21 世紀末) の循環場応答は非常に類似している。



図(2)-3 6～8月平均の200hPa風変化 (m s^{-1}) である以外は図(2)-1と同じ。

図(2)-4a-d は気温変化の緯度・高度断面 (60°E – 100°E 平均) である。1pctCO2 では熱帯対流圏上層の昇温が顕著で、中緯度対流圏でも昇温量が多い。前者は amip4K、後者は amip4xC02 (amipPattern が

一部をキャンセル)を主に反映している。対流圏上層の昇温は、SST 昇温により大気中の水蒸気が増加することで湿潤断熱減率が減少するためと考えられる (Bony et al. 2013)¹³⁾。中緯度対流圏の昇温は、CO₂ 増加により熱容量の小さい陸面で昇温が大きくなるためと考えられる。アジアモンスーン循環を駆動する南北温度勾配 (MTG: Meridional Temperature Gradient) について、対流圏の上層と下層に分けて評価すると、1pctCO₂ では上層では MTG が顕著に減少する一方、下層では増加している (図(2)-4e)。上層では amip4K が卓越して MTG が弱化するが、下層では amip4xCO₂ が他の要因を上回り MTG が強化している。上層における東風ジェット弱化 (図(2)-3a) と下層における陸域のモンスーン西風強化 (図(2)-2a) は、このような大規模な海陸温度コントラスト変化に関連している。



図(2)-4 (a-d) 夏季南アジア気温変化の南北断面 (60°E-100°E平均)。(a) 1pctCO₂、(b) amip4xCO₂、(c) amip4K、(d) amipPattern。9モデル平均。線は基準実験の気温、陰影は感度実験の気温変化。(e) 南北温度傾度 (25°N-45°N平均と10°S-10°N平均の差) の変化。横軸は下層平均 (地上~500hPa平均)、縦軸は上層平均 (500hPa~200hPa平均)。×は各モデル、●は全モデル平均。単位はいずれも℃。

(ウ) 他のモンスーン地域との比較

図(2)-5aは世界各地のモンスーン地域の降水量変化である。1pctCO₂では、多くのモンスーン地域で増加しており、特に南アジア (SAS) における増加が顕著である。amip4xCO₂は、多くの地域で増加傾向を示し、興味深いことに1pctCO₂の地域的な違いを良く説明する。例外的に熱帯北西太平洋(WNP)はamip4Kの影響を強く受ける。amipPatternは、SASやWNPを含む多くの地域で減少するが偏差は小さい。

以下の水蒸気収支式を用いて、降水量変化に対する水蒸気変化 (熱力学的変化) と風変化 (力学的変化) の影響を定量化する。

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

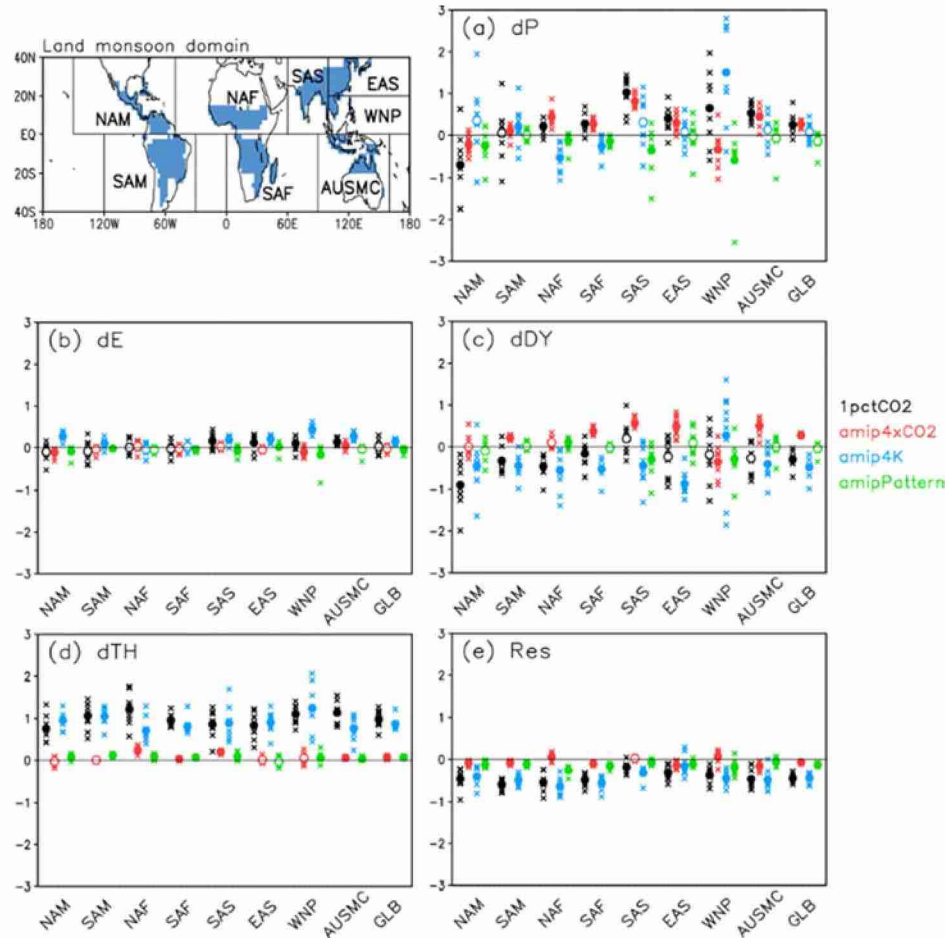
$$\delta TH = -\frac{1}{g\rho_w} \nabla \cdot \int_0^{\bar{p}_{sc}} (\bar{\mathbf{u}}_c [\delta \bar{q}]) dp, \quad (2)$$

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

ここで、 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 (熱力学効果)、 δDY は平均風変化による項 (力学効果)、 Res は残差項である。 p_s は地表面気圧、バーは気候値、添え字cは基準実験を意味する。

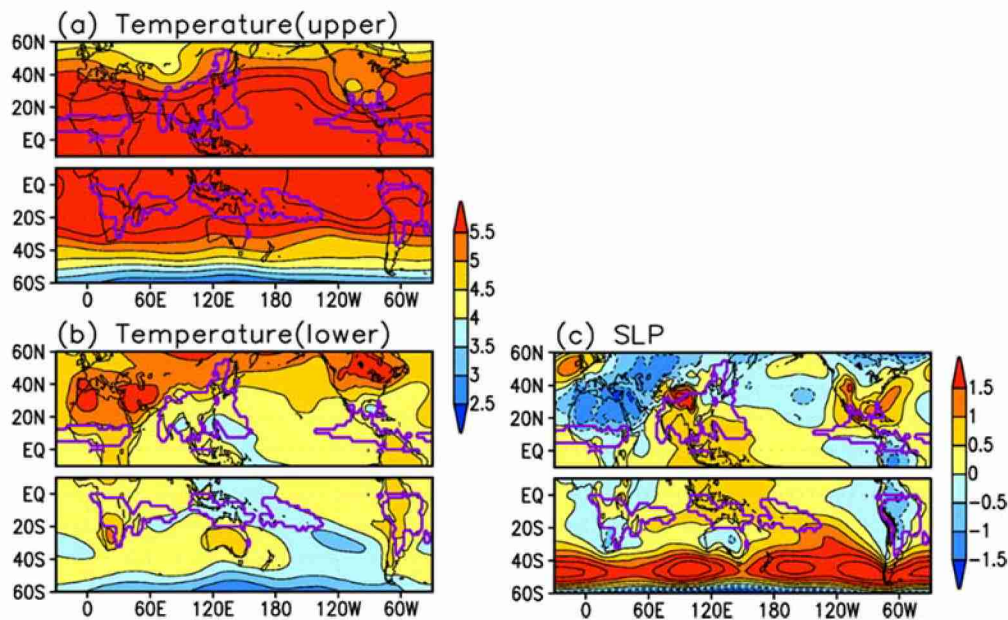
結果を図(2)-5b-eに示す。1pctCO₂では、 δTH は比較的一様に増加しその多くはSST昇温で説明される。

一方、 δDY は減少傾向を示すが、SASは例外でamip4xC02の影響で増加傾向である。これは南アジアにおけるモンスーン西風強化（図(2)-5a）と整合的である。1pctC02降水量変化の地域間差異は、amip4xC02の δDY のそれに類似している。amip4Kでは δTH と δDY が大部分を相殺している。いずれの地域でも蒸発量変化項は小さい。残差項（Res）は無視できない大きさであるため、収支解析の各項の大きさに関する詳細な議論は難しい。



図(2)-5 世界の地域モンスーン領域（陸上）で平均した夏季の水蒸気収支式の各項の変化：（a）降水量、（b）蒸発量、（c）力学変化項、（d）熱力学変化項、（e）残差項。×：各モデルの値、○（●）：全モデル平均（変化符号が約80%（7個）以上のモデルで一致）。夏季：北（南）半球は5月～9月（11～3月）。観測データ（GPCP）の降水量の季節差が 2.5 mm day^{-1} 以上の領域をモンスーン領域と定義（Wang et al. 2011）¹⁴⁾。GLBは全球陸上モンスーン領域。

モンスーン循環変化に関連する大規模場の特徴を図(2)-6に示す。対流圏上層では、熱帯域の昇温が顕著で、大気は安定化してMTGは減少するという傾向はモンスーン地域間で共通する。対流圏下層では、陸域の昇温が大きく特に北半球陸域の昇温が顕著である。下層の温度分布に対応して、海面気圧（SLP）はおおむね陸域で下降し海域で上昇している、特に、北アフリカ～ユーラシア大陸西部の負偏差と太平洋の正偏差は明瞭である。このような特徴はamip4xC02を反映している（図は省略）。Wang et al. (2014)¹⁵⁾が示唆するように、このような気圧偏差が、周辺海域からユーラシア大陸へ吹き込むモンスーン気流を強化し、南アジアで下層収束を強化して顕著な降水量増加をもたらすと考えられる。



図(2)-6 1pctCO₂における夏季の (a) 上層気温偏差 (500hPa~200hPa平均、℃)、(b) 下層気温偏差 (地上~500hPa平均、℃)、(c) 海面気圧偏差 (hPa)。9モデル平均。北(南)半球側は5月~9月(11~3月)。紫太線はモンスーン領域 (Wang et al. 2011)¹⁴⁾。

(エ) アジアモンスーン循環の変化のまとめ

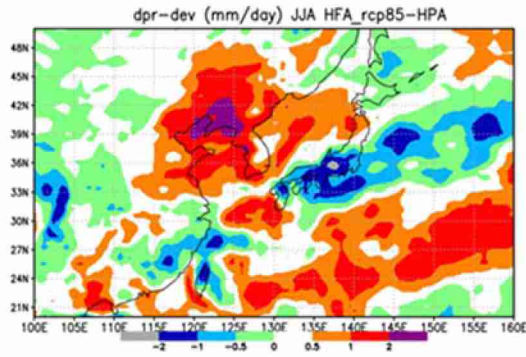
アジアモンスーン地域では温暖化に伴い、対流圏下層ではモンスーン西風が北上して南アジアや東アジアなどの陸域では西風が強化する。一方、対流圏上層では東風ジェットが広域で弱化し、中緯度の西風ジェットは南下する。このようなモンスーン循環の変化は、広域の海陸温度コントラスト変化 (MTG) と関連する。すなわち、MTGは下層で増加し上層で減少する。大気モデルを用いたSST上昇効果とCO₂増加効果 (陸面の昇温) を分離する理想実験によれば、CO₂効果が下層MTGを強化する。さらに世界のモンスーン地域間の比較によれば、CO₂効果は南アジアの降水量に最もインパクトがある。これら結果は、アジアモンスーンの温暖化応答における陸面昇温の重要な役割を示唆する。

モンスーンに関するこれまでの温暖化予測研究の多くは、熱帯対流圏上層の顕著な昇温の役割に着目してきた。熱帯対流圏上層の顕著な昇温は、熱帯大気を安定化させるほか、上層の海陸温度コントラストを弱めるように働く。その結果としてモンスーン循環は弱化すると考えられてきた。一方で本研究は、陸面昇温に伴う下層の海陸温度コントラスト強化の役割を強調した。特に、ユーラシア大陸の顕著な昇温に伴う気圧低下は、南アジアにおいて下層収束を強化し顕著な降水量増加をもたらすと考えられる。また、これら2つの昇温影響が重なることによりアジアモンスーン地域の風は複雑な変化を示す。

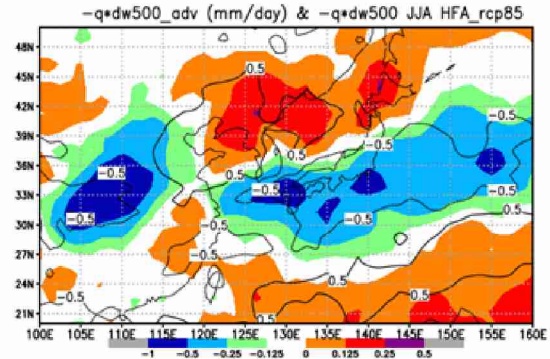
(b) 温暖化に伴う東アジア降水量変化の理解：大気大循環場の変化の役割

図(2)-7は、積雲対流 (YS) モデルによる夏季 (6-8月) 平均降水量の将来変化、正確には降水量変化から蒸発量変化を引いた量を示す。将来予測には、中国東北部で増加、日本から北側で減少の傾向、日本の南方で増加傾向といった特徴が見られる。

将来予測実験で、各年の500hPa月平均大気の熱収支から水平温度移流に伴う上昇流の変化を見積もり、さらに地表面の現在気候の水蒸気量を利用して近似的に求めた降水量変化を図(2)-8にカラーで、全上昇流から同様に求めた降水量変化を等値線で示す。図(2)-7で示した夏季 (6-8月) 平均降水量の将来変化の特徴が、大気中層500hPaにおける水平温度移流に伴う上昇流の変化に対応する将来降水量変化によって、大まかに説明できることがわかる。ただし、あくまでも定性的な特徴であって、降水の熱源自体による上昇流の変化が含まれていないため、将来降水量変化としては量的に不十分である。



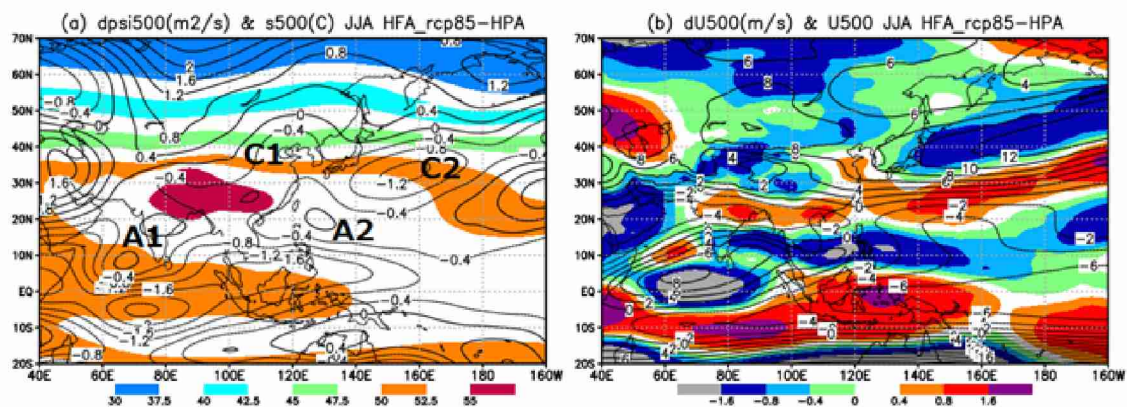
図(2)-7 積雲対流 (YS) モデルによる夏季 (6-8月) 平均降水量の将来変化。正確には降水量変化から蒸発量変化を引いた量。単位は、mm/day。



図(2)-8 積雲対流 (YS) 実験において、水平温度移流に伴う上昇流の変化から診断できる降水量変化 (カラー) および全上昇流の変化から診断できる降水量変化 (等値線)。単位は、mm/day。

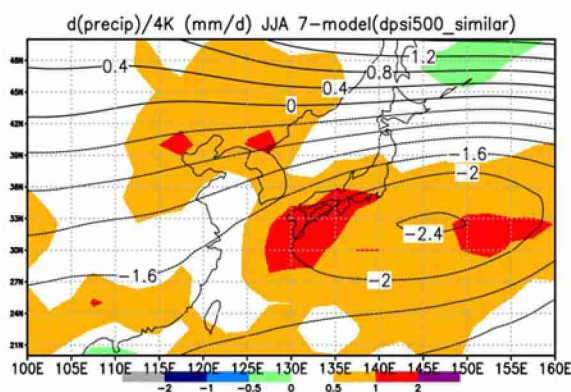
図(2)-9aに、等値線で500hPaの大気循環 (流線関数) の25年平均値の将来変化を示す。カラーで示す現在気候の気温分布 (正確には乾燥静的エネルギーを定圧比熱で割った量) と組み合わせて、図(2)-8で示した水平温度移流に伴う上昇流の変化 (およびこれによる降水量変化) が、どのような大気循環の将来変化から生じたものかをある程度推測できる。図(2)-9bは500hPa東西風の25年平均の将来変化を示しており、図(2)-9aは大気循環の将来変化は熱帯アジアモンスーン循環の弱化 (A1とA2) と中緯度帯ジェット以南 (C1,C2) として解釈できることがわかる。

たとえば、日本域に広がる下降流的な変化と日本の南での上昇流的な変化と関連する降水量の変化は、日本から東に広がるジェット気流の南方へのシフトとこれに関係する低気圧性の循環偏差 (C2) がもたらしめていることがわかる。日本の南方では、熱帯アジアモンスーン循環の弱化 (A2) も関係している。一方、中国東北部の中緯度帯ジェットの南偏 (C1) は、チベット高気圧の中国北東部からの縮小であり、熱帯アジアモンスーン循環の弱化 (A1) との関連も考えられる。

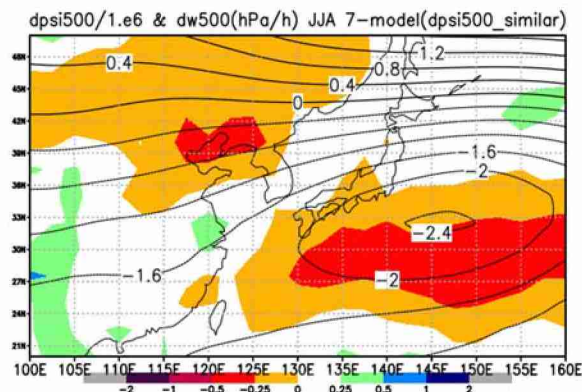


図(2)-9 a)の等値線は、積雲対流 (YS) 実験における500hPa大気循環 (流線関数) 25年平均値の将来変化。単位は $10^9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。現在気候実験の気温分布 (正確には乾燥静的エネルギーを等圧比熱で割った値) をカラーで示す。単位は℃。 b) 積雲対流 (YS) 実験における500hPa東西風の将来変化 (カラー)、等値線はその現在気候値。単位は、 m s^{-1} 。

図(2)-10は、4 K温暖化時の東アジアにおける夏季平均の500hPa循環場の変化パターンが、気象研60 km格子気候モデルの結果(図(2)-9a)と似ている7個のCMIP5モデル平均の東アジア降水量変化を示す。中国東北部や日本の南の海洋上を中心に降水量が増加する点では、気象研60km格子気候モデルの結果(図(2)-9a)と似ているが、日本のほぼ全域で降水量が増加する傾向が見られる点で異なる。図(2)-11の陰影は温暖化に伴う鉛直流の変化であり、降水量変化分布の特徴と概ね一致するが、夏季平均の500hPa循環場の変化(図(2)-11の等値線)との整合性は十分でない。構成する個々のモデルにおいて、鉛直流の将来変化に対する海面水温の変動の寄与などを調べる必要がある。



図(2)-10 7つのCMIP5気候モデルによる20年夏季平均の降水量変化。等値線は、500hPa流線関数の変化 (m^2/s)。



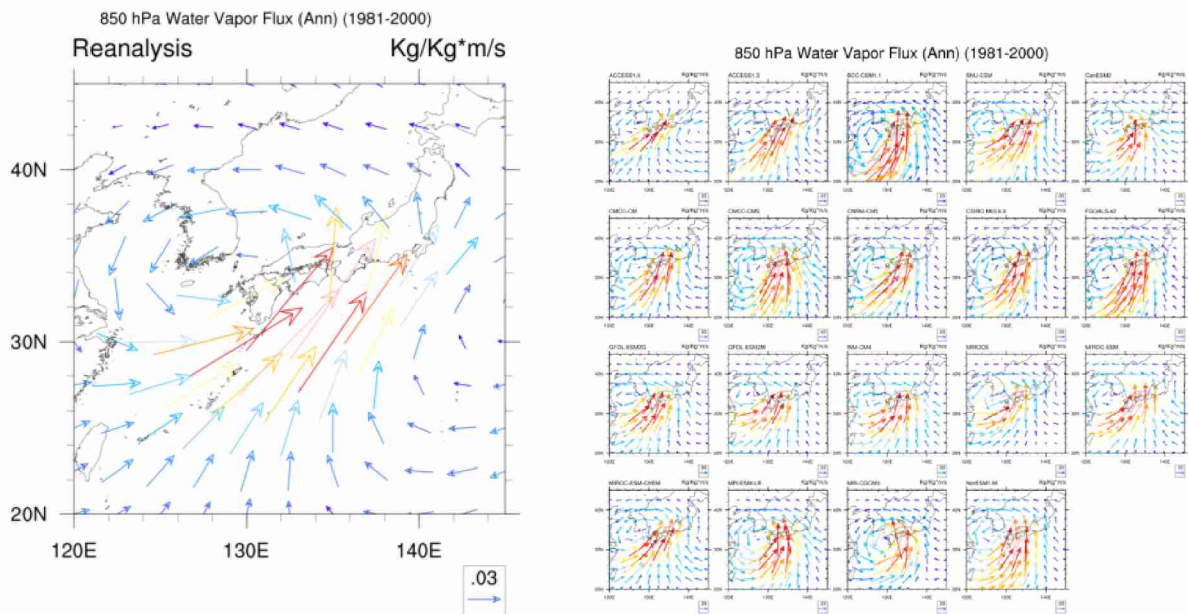
図(2)-11 7つのCMIP5気候モデルによる25年夏季平均の鉛直流変化(影: hPa/h)。等値線は、500hPa流線関数の変化 (m^2/s)。

(c) 温暖化に伴う日本域の降水量変化ダウンケーリング：大気大循環場の変化の利用

日降水量観測値として九州付近の地上気象観測点のデータを用いた。現在気候における循環場の日別値にはJRA-55、将来気候においてはCMIP5 (RCP4.5シナリオ)を用いた。Chu and Yu (2010)¹¹⁾での方法を参考に、特異値分解解析により統計的ダウンスケーリングを行った。訓練期間を1981～2000年とし、当該期間で得られたJRA-55の予測要素と日降水量観測値との統計的関係をCMIP5の予測要素に適用し、2080～2099年における日降水量を推定する。

大気下層に暖湿気塊が多量に存在することの目安となる850hPa水蒸気フラックスについて、九州付近において日降水量のモデル出力値が年の中で上位50日となった日を基準として作成した、1981～2000年の気候モデル循環場の合成図を、図(2)-12左に示す。なお、850hPa高度での水蒸気フラックスを対象としているのは、CMIP5モデルの日別値データセットは鉛直解像度が荒く、地表面の1000hPa高度から一つ上の層として利用できる高度が850hPaとなっているためである。

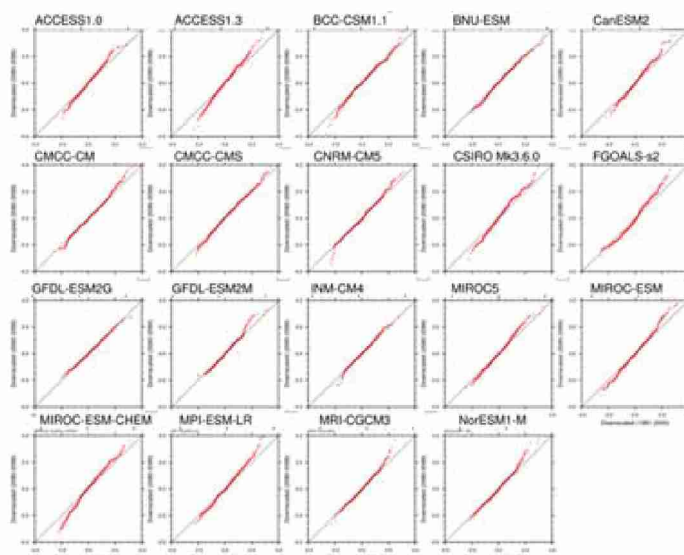
大気下層の暖湿気塊は極端降水の発生条件の一つであるが、図(2)-12右を見ると、CMIP5モデル間において水蒸気フラックスの分布にある程度のばらつきが存在していることがわかる。CMIP5モデルの合成図を再解析データである図(2)-12左のJRA-55の合成図と比較すると、850hPa水蒸気フラックスが九州付近にまで流れこむ向きやその強度において違いがみられる。この違いは、日本に特化したより良い将来予測のためにCMIP5モデルを選抜する際、その選定基準となりうるものと考えられるが、その具体的な選定方法については、今後の課題である。



図(2)-12 850hPa 水蒸気フラックスの合成図 (kg/kg・m/s)

左：JRA-55。右：CMIP5 モデル。九州付近（東経 130 度～132.5 度、北緯 32.5 度～35 度）の 2.5 度格子 4 個において気候モデルにより出力された日降水量が、年間上位 50 日となった日を基準とした。合成図は、1981～2000 年の期間において作成した。

予測要素として850hPaの相当温位など他の要素も検討したが、850hPa水蒸気フラックスを用いれば、最も適切に過去の九州付近の日降水量を統計的に推測できることが分かった。CMIP5による850hPa水蒸気フラックスの将来変化予測から、九州付近の6月の地上気象観測点の日降水量を統計的ダウンスケーリングすると、極端に降る日数と極端に降らない日数が増加するモデルが多かった（図(2)-13）。九州付近の6月の降水量の将来変化について、水蒸気フラックスの将来変化が支配的要因であると単純に説明できる可能性が示唆された。



図(2)-13 CMIP5 モデルごとの地上気象観測点地域平均日降水量統計的ダウンスケーリング値の分位数-分位数(Q-Q)プロット (RCP4.5)

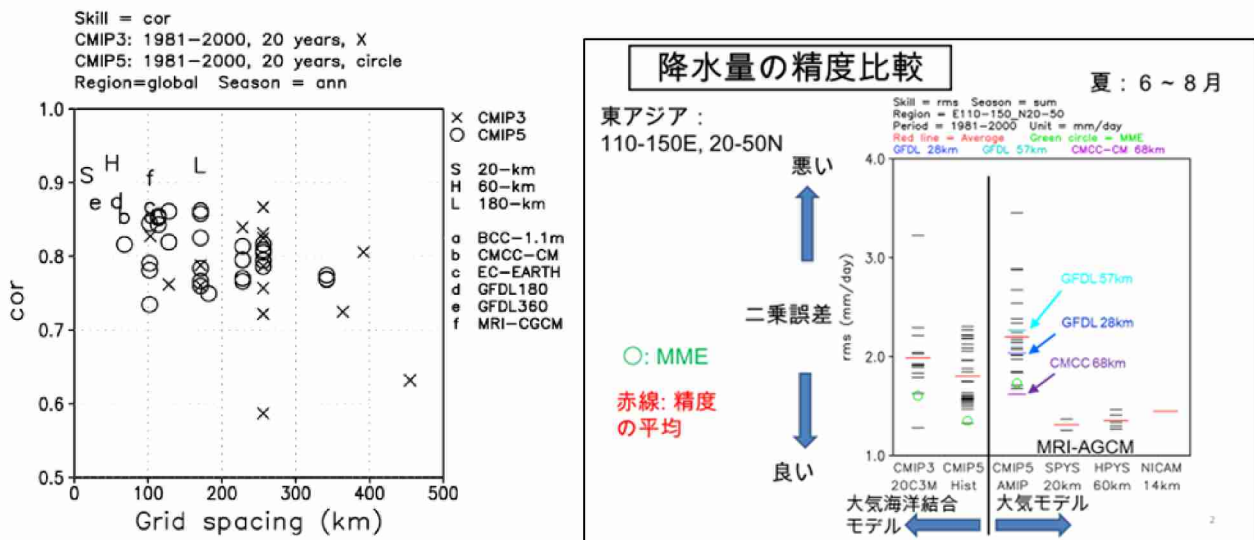
横軸：現在気候（1981～2000年）、縦軸：RCP4.5シナリオの将来気候

（2080～2099年）。CMIP5モデルの850hPa水蒸気フラックス日別値から統計的ダウンスケーリングによって予測した。ここの日降水量は標準化されている。ここでは6月を示している。

(d) 気候モデルの現在降水分布再現性と水平分解能の関係および将来変化のティッピング年調査

年平均全球降水量の地理分布について、観測値とモデルの空間相関係数を計算した(図(2)-14 左)。結合モデル(CMIP3 と CMIP5)については、高解像度のモデルほど高い空間相関係数を示しており、格子間隔と空間相関係数との間には、統計的に有意な相関がある。大気モデル(a-f)の場合は、海面水温の誤差がないので、空間相関係数は結合モデルより大きいものの、高解像度のモデルほど精度が良いという関係は得られない。ただし、モデルの例数が少ないので、中・低解像度モデルも含めた検討が必要である。気象研究所高分解能(20 km、60 km、110 km) 全球大気モデル(MRI-AGCM3.2S, H, L) は高解像度の大気モデル(a-f)より精度が高いが、MRI-AGCM3.2 のモデル間についても、一番高解像度の S が低解像版(H, L)より精度が高いわけではない。

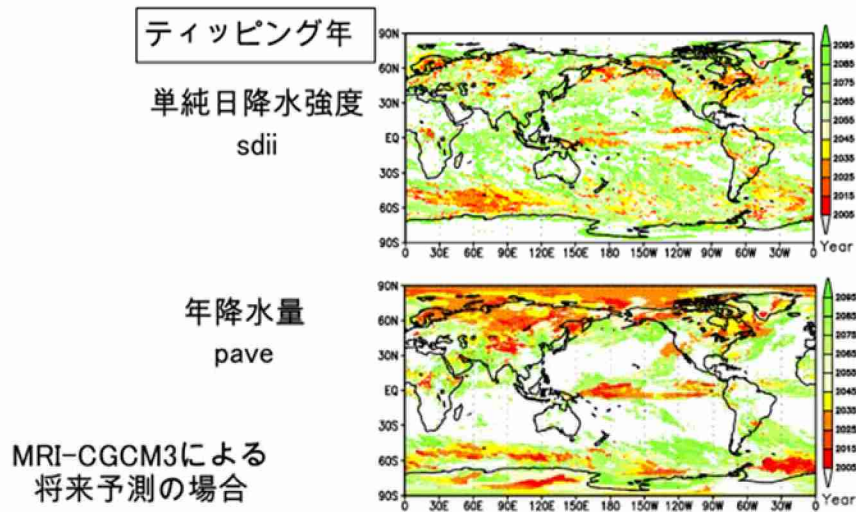
夏季東アジア降水量の地理分布について、観測値とモデルの二乗誤差を計算した(図(2)-14 右)。結合モデル(CMIP5)は、結合モデル(CMIP3)より精度が高い上、大気モデル版(AMIP)の場合に比べても精度が良い傾向がある。MRI-AGCM3.2S, H は高解像度の CMIP5 大気モデル版(AMIP)より精度が高く、MRI-AGCM3.2 のモデル間についても、一番高解像度の S が低解像版(H)より精度が高い。



図(2)-14 (左)年平均全球降水量の空間相関係数の水平分解能依存性、観測値は GPCP 1 DD (1997-2008、12 年)、CMIP3/5(46 個)モデルの水平分解能との相関係数は、-0.422(99%有意)、大気モデルの AMIP 実験間では有意な相関無し。(右)夏季東アジア降水量の地理分布について、観測値とモデルの二乗誤差。

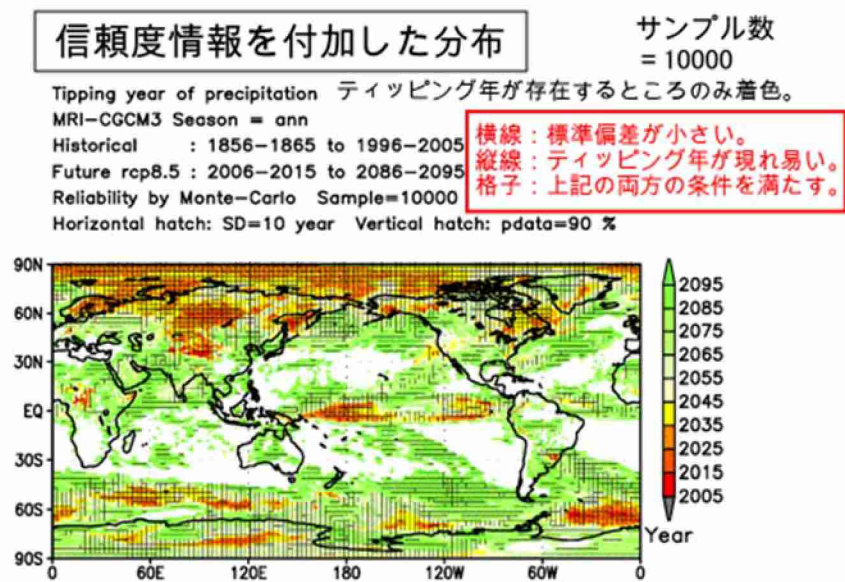
図(2)-15は、気象研究所大気海洋結合CMIP5モデル(MRI-CGCM3)による温暖化予測実験の結果から求めた10年平均の単純日降水強度および年降水量のティッピング年を示す。昇温が大きい太平洋の赤道付近や北半球の高緯度では降水量の増加が大きいので、温暖化による雨の降り方の変化の兆候が早く出現している。日本付近では、単純日降水強度のティッピング年は21世紀後半に現れているが、年降水量の場合は21世紀内に北日本で見られるかどうかである。

多数のアンサンブル実験で予測の不確実性を評価するのが基本であるが、MRI-CGCM3 の将来実験は計算機資源の制約から1 メンバに限られている。そこで、多メンバーの疑似内部変動をモンテ・カルロ法により生成して信頼度情報を付加した。具体的には、産業革命前実験(piControl)により10 個の10 年平均年降水量の標準偏差Sd と10 年間の年降水量の年々変動の標準偏差Sy の比 $R=Sd/Sy$ を求めた。さらに、R は格子点ごとに異なるが1856-2095 年の実験期間中は一定と仮定した。そして、その範囲内に降水量の変動がばらつくと考えてモンテ・カルロ法により1 万個の時系列を生成して、信頼度の情報を付加したのが、図(2)-16のティッピング年分布である。



13

図(2)-15 (上) 単純日降水強度および(下) 年降水量の10年平均時系列から求めたティッピング年。モデルはMRI-CGCM3。たとえば、ティッピング年2030年は2026-2035年平均の降水量をもとに判断する。



9

図(2)-16 年降水量の10年平均時系列から求めたティッピング年に、横線と縦線で信頼度情報を付加した。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまで明瞭でなかった大陸と海洋の地表面温度のコントラスト、特に大陸の温度上昇がアジアモンスーンの大気循環と降水量の将来変化、そして東アジアの中緯度ジェットと日本域の降水量の将来変化に及ぼす影響が明らかになった。すなわち、モンスーンに関するこれまでの温暖化予測研究の多くは、熱帯対流圏上層の顕著な昇温の役割に着目してきた。しかし、ユーラシア大陸の顕著な昇温将来変化に伴う気圧低下は、南アジアにおいて下層収束を強化し顕著な降水量増加をもたらすことがわかった。この結果、「海面水温上昇の効果」と「陸上温度上昇の効果」の2つの昇温影響が重なることによりアジアモンスーン地域の風と降水量の将来変化は複雑な変化を示し、地域によっては一部は相殺されていることがわかった。(Endo et al. 2018)⁷⁾

これまで、東アジアの詳細な降水将来予測については単に統計的に結果を示すことが多かったが、今回、CMIP5 平均の海面水温変化を与えた将来予測実験について水収支と熱収支を使った解析による研究を進めた結果、夏季(6-8月)東アジアの平均降水量の将来変化分布は、中国東北部や日本～北太平洋域での中緯度ジェット気流の南下に相当する低気圧性の循環変化分布とこれに伴う鉛直流の変化によって概ね説明できることがわかった。ただし、CMIP5 気候モデル実験の個々の将来予測では、さらに各モデルの海面水温変化の影響を考慮する必要があるかもしれない。(Ose 2017)⁹⁾

(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>

CMIP5気候モデルの将来予測海面水温変化を与えた気象研究所高分解能(60km)全球大気気候モデル実験は、地域気候モデル実験によるダウンスケーリング手法と組み合わせて緩和策策定のための温暖化予測研究(気象庁温暖化予測情報第9巻、d4pdfデータ、SI-CAT)などで利用されている。本研究で、高分解能(60km)全球大気気候モデル実験による夏季(6-8月)東アジアの平均降水量の将来変化分布は、中国東北部や日本～北太平洋域での中緯度ジェット気流の南下に相当する低気圧性の循環変化分布とこれによる鉛直流の将来変化によって説明できることがわかった。この点を他のモデル実験と照らし合わせると、夏季平均降水量の将来変化の日本域における詳細地域分布についてはモデルや海面水温による不確実性が大きく、この点について注意して利用する必要がある。

CMIP5全球モデルによる大気場から地域的な日降水量を推定する統計的ダウンスケーリングの考え方を調査したところ、6月については850hPa水蒸気フラックスを用いれば、最も適切に過去の九州付近の日降水量を統計的に推測できることが分かった。一方、台風の影響が必ずしも無視できない他の月では他の統計的な手法の開発が必要であり、地域気候モデルの利用など力学的なダウンスケーリングを実施するほうが有利ではないかと考えられる。

本研究で得られた科学的意義に関する内容をまとめた査読論文、Ose(2017)⁹⁾およびEndo et al.(2018)⁷⁾は、IPCC-AR6に貢献する新たな科学的な知見を含んでいる。

6. 国際共同研究等の状況

世界気候研究計画(WCRP)第5期結合モデル国際比較計画(CMIP5)に参画した。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) H. KAWAI, T. KOSHIRO, H. ENDO, O. ARAKAWA and Y. HAGIWARA: Atmospheric Science Letters, 17, 548-555, doi:10.1002/asl.691 (2016), Changes in marine fog in a warmer climate.
- 2) T. OSE: Hydrological Research Letters, 11(3), 168-174 (2017), Future precipitation changes during summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments.
- 3) H. ENDO, A. KITOH and H. UEDA: SOLA, 14 (2018), A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere. (accepted)

<その他誌上発表(査読なし)>

- 1) H. ENDO and A. KITOH: The Monsoons and Climate Change, Springer Climate, 47-66, doi:10.1007/978-3-319-21650-8 (2016), Projecting changes of the Asian summer monsoon through the twenty-first century.
- 2) A. KITOH and H. ENDO: The Global Monsoon System: Research and Forecast 3rd Edition, World Scientific, 303-313 (2016), Monsoon Precipitation in a Future Warmer World.
- 3) A. KITOH and H. ENDO: The Global Monsoon System: Research and Forecast 4th Edition, World Scientific, (2018), Future changes in global monsoon precipitation and their uncertainty: Results from 20-km and 60-km MRI-AGCM ensemble simulations. (submitted)

(2) 口頭発表(学会等)

- 1) S. KUSUNOKI: Tropical Meteorology Workshop, Aizuwakamatsu, Japan, 2015
“Precipitation over the tropics simulated by climate model”
- 2) S. KUSUNOKI: Asian Conference on Meteorology 2015, Kyoto, Japan, 2015
“Are CMIP5 Models better than CMIP3 Models in Simulating Precipitation over East Asia?”
- 3) S. KUSUNOKI and M. HOSAKA: The Sixth Symposium on Polar Science, Tokyo, Japan, 2015
“Precipitation over the Arctic simulated by global atmospheric models of MRI-AGCM3.2.”
- 4) S. KUSUNOKI: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
“When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation?”
- 5) H. ENDO, H., A. KITOH, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA: Asian Conference, Kyoto, Japan, 2015
“Future changes in monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 6) H. ENDO, H., A. KITOH, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA : Down-scaling workshop, Tsukuba, Japan, 2015
“Future projection of monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 7) 遠藤洋和、吉田康平、水田亮、鬼頭昭雄、荒川理： 2015年度日本気象学会秋季大会 (2015)
「高分解能AGCMによるマルチSST・積雲スキームアンサンブル温暖化実験:モンスーン降水の変化」
- 8) 尾瀬智昭：日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
「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」
- 9) 楠昌司：日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
「モデルの水平高解像度化で降水の再現精度は向上するか？」

- 10) 若松俊哉、石原幸司：日本気象学会 2015 年度秋季大会（2015）
「CMIP5 データにおける日本の極端降水の現在気候再現性評価に向けて」
- 11) H. ENDO, A. KITOH, K. YOSHIDA, R. MIZUTA and O. ARAKAWA: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
“Future changes in monsoon precipitation by high-resolution MRI-AGCM ensemble simulations with multi-SSTs and multi-physics”
- 12) S. WAKAMATSU and K. ISHIHARA: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
“Reproducibility of Atmospheric Conditions around Japan by CMIP5 for the Assessment of Future Change in Extreme Precipitation with Statistical Downscaling Approach”
- 13) S. MAEDA, M. HARADA and S. WAKAMATSU: 96th American Meteorological Society annual meeting, New Orleans, USA, 2016
“Future Changes in Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific Induced by Robust Changes in the Tropical Circulation”
- 14) S. KUSUNOKI: The 13th ‘General Circulation Model Simulations of the East Asian Climate (EAC) workshop, Beijing, China, 2016
“Changes in precipitation over East Asia projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid sizes”
- 15) S. KUSUNOKI: The CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Changes in precipitation over East Asia projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid sizes”
- 16) S. MAEDA, M. HARADA and S. WAKAMATSU: The CLIVAR Open Science Conference “Charting the course for climate and ocean research”, Qingdao, China, 2016
“Future Changes in Winter Stationary Waves in East Asia and the North Pacific Induced by Robust Changes in the Tropical Circulation”
- 17) S. WAKAMATSU and K. ISHIHARA: The International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
“Reproducibility of Atmospheric Conditions around Japan by CMIP5 for the Assessment of Future Change in Extreme Precipitation with Statistical Downscaling Approach”
- 18) T. OSE: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2016
“Systematic Biases of Present-day’s Land Surface Air Temperature and Precipitation and Associated Tendency of Future Projection in the Asia Monsoon of the CMIP5 models”
- 19) 遠藤洋和、鬼頭昭雄、水田亮、石井正好:2016年度日本気象学会春季大会（2016）
「アンサンブル気候予測データベース（d4PDF）における東アジアの極端降水の将来変化」
- 20) 尾瀬智昭:2016年度日本気象学会秋季大会（2016）
「東アジアの温暖化時降水量予測とモデル依存性」
- 21) 遠藤洋和、鬼頭昭雄:2016年度日本気象学会秋季大会（2016）
「温暖化に伴うアジアモンスーンの変化：SST効果とCO₂効果」
- 22) 大塩健志、若松俊哉、石原幸司：日本気象学会秋季大会（2016）
「CMIP5データにおける日本の極端降水の現在気候再現性評価に向けて」
- 23) S. KUSUNOKI: 97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, USA, 2017
“Future changes in precipitation over East Asia projected by the global atmospheric model MRI-AGCM3.2”
- 24) K. OSHIO, K. ISHIHARA and S. WAKAMATSU: 97th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, USA, 2017

- “Reproducibility of Atmospheric Conditions around Japan by CMIP5 for the Assessment of Future Change in Extreme Precipitation with Statistical Downscaling Approach”
- 25) S. KUSUNOKI: The second International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation?”
- 26) H. ENDO and A. KITOH: The second International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 Future changes in the Asian summer monsoon: The role of direct CO2 radiative forcing and indirect SST warming”
- 27) K. OSHIO, K. ISHIHARA and S. WAKAMATSU: The second International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “Assessment of Future Change in Extreme Precipitation Frequency around Japan By Applying Statistical Downscaling Approach to CMIP5 Data”
- 28) T. OSE: The Sixth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-VI), Singapore, 2017
 “Systematic Biases of Present-days Land Surface Air Temperature and Precipitation and Associated Tendency of Future Projection in the Asia Monsoon of the CMIP5 models”
- 29) T. OSE: AGU Fall Meeting, New Orleans, LA, USA, 2017
 “Future precipitation change during the summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments”
- 30) 尾瀬智昭:2017年度日本気象学会春季大会 (2017)
 「アジア大陸気温のモデル再現性バイアスおよび関連する将来変化の要因」
- 31) 尾瀬智昭:2017年度日本気象学会秋季大会 (2017)
 「温暖化による夏季東アジアの降水量変化予測のモデル比較」
- 32) 遠藤洋和, 鬼頭昭雄, 植田宏昭:2017年度日本気象学会秋季大会 (2017)
 「温暖化に伴うアジアモンスーン循環の変化」
- 33) S. KUSUNOKI: 98th American Meteorological Society Annual Meeting, Austin, USA, 2018
 “When does climate shift emerge in the future beyond the historical variability of precipitation?”
- 34) H. ENDO, A. KITOH and H. UEDA: The third International Workshop on “Climate change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere”

(3) 知的財産権

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) A. KITOH, H. ENDO, K. KRISHNA KUMAR, I. F. A. CAVALCANTI, P. GOSWAMI and T. ZHOU: J. Geophys. Res., 118, 3053-3065, doi:10.1002/jgrd.50258 (2013)
Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context
- 2) 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
- 3) J. MA and J.-Y. YU: Geophys. Res. Lett., 41, 2934-2940 (2014)
Paradox in South Asian summer monsoon circulation change: Lower tropospheric strengthening and upper tropospheric weakening
- 4) I.M. HELD and B. SODEN: Journal of Climate., 19, 5686-5699 (2006)
Robust responses of the hydrological cycle to global warming
- 5) A. KITOH, T. OSE and I. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan 94A: 1-16. DOI:10.2151/jmsj.2015-022 (2016)
Dynamical Downscaling for climate projection with high-resolution MRI AGCM-RCM.
- 6) K.E. TAYLOR, R.J. STOUFFER and G.A. MEEHL: Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485-498 (2012)
An Overview of CMIP5 and the experiment design
- 7) H. ENDO, A. KITOH and H. UEDA: SOLA, 14 (2018)
A unique feature of the Asian summer monsoon response to global warming: The role of different land-sea thermal contrast change between the lower and upper troposphere (accepted)
- 8) T. SAMPE and S.-P. XIE: Journal of Climate 23: 113-134. DOI: 10.1175/2009JCLI3128.1 (2010)
Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: environmental forcing by the westerly jet
- 9) T. OSE: Hydrological Research Letters, 11(3), 168-174 (2017)
Future precipitation changes during summer in East Asia and model dependence in high-resolution MRI-AGCM experiments
- 10) R.L. WILBY, S.P. CHARLES, E. ZORITA, B. TIMBAL, P. WHETTON and L.O. MEARNES: IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis, 27 pp (2004)
Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods
- 11) J.L. CHU and P.S. YU: J. Geophys. Res., 115, D10105 (2010)
A study of the impact of climate change on local precipitation using statistical downscaling
- 12) C. MORA, A.G. FRAZIER, R.J. LONGMAN, R.S. DACKS, M.M. WALTON, E.J. TONG, J.J. SANCHEZ, L.R. KAISER, Y.O. STENDER, J.M. ANDERSON, C.M. AMBROSINO, I. FERNANDEZ-SILVA, L.M. GIUSEFFI and T.W. GIAMBELLUCA: Nature 502 183-187. doi: 10.1038/nature12540 (2013)
The projected timing of climate departure from recent variability
- 13) S. BONY, G. BELLON, D. KLOCKE, S. SHERWOOD, S. FERMEPIN and S. DENVIL: Nat Geosci, 6, 447-451, doi:10.1038/NGEO1799 (2013)
Robust direct effect of carbon dioxide on tropical circulation and regional precipitation
- 14) B. WANG, H.-J. KIM, K. KIKUCHI and A. KITOH: Climate Dyn., 37, 941-955, doi:10.1007/s00382-010-0877-0 (2011)
Diagnostic metrics for evaluation of annual and diurnal cycles
- 15) B. WANG, S.-Y. YIM, J.-Y. LEE, J. LIU and K.-J. HA: Climate Dyn., 42, 83-100, doi:10.1007/s00382-013-1769-x (2014)
Future change of Asian-Australian monsoon under RCP 4.5 anthropogenic warming scenario

Ⅱ－３ 水輸送に係る対流圏上層ジェットの力学的メカニズムの解明

北海道大学

地球環境科学研究所

堀之内 武

<研究協力者>

北海道大学

地球環境科学研究所

松村 伸治

平成27～29年度累計予算額：23,023千円（うち平成29年度：7,346千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

東アジア・北西太平洋域における上層のジェット気流と地表での降水の変動について、日々の気象から気候学的な時間スケールまで、両者の関係性とそのメカニズムを明らかにし、予測が難しい降水分布の将来変化について、評価と理解のよりどころとなる知見を得るための研究を行った。

日々の客観解析と衛星降雨データを用いた解析より、ジェットの南側に沿っておこる降水強化を、上層の波動擾乱との位置関係も含めて定量化した。さらに、準地衡の診断モデルを活用して、得られた関係性がいかにして生ずるかを明らかにした。特に、従来の知見から降水が起きにくいと考えられる箇所においてもジェットに沿った降水強化が生じる原因として、南寄り成分を持つ下層ジェットが、上層ジェットの作用により降水に有利な位置関係に來やすいことが大きな要因であることを明らかにした。本研究で明らかになったメカニズムは、より長い時間スケールでの関係性を解釈する上でも有用である。

過去数十年における夏季の降水分布、ジェット、海面水温における年々変動の間の関係を、客観解析と降水観測の月平均データを用いて調べた。その結果、黒潮-親潮続流域の海面水温の変動が、ジェットと降水分布に影響を与えていることが明らかになった。さらに、数十年規模の変動要因を調べたところ、主に夏季の太平洋十年規模振動の影響を受けていることが明らかになった。

IPCC第5次評価報告書の基礎となったCMIP5データベースに集められた大気海洋結合モデルデータ群を用いて、夏季のジェットと降水の関係を調べた。いずれのモデルでも日々のデータから月平均値の年々変動まで、観測された両者の結びつきが再現されていた。さらに、現在気候から将来気候への変化においても、ジェット軸の緯度と降水帯ピークの緯度の変化には良い相関があることが明らかになった。力学的には前者が後者に影響を与えるのが主なので、降水帯の予測においてジェットに着目することが有効であることが明らかになった。また、各モデルにおける夏季のジェットの位置を支配する要素として、黒潮-親潮続流域の海面勾配と熱帯の海面水温が重要であるという知見が得られた。これらは今後さらに高度化するが不確実性も残る降水の将来変化の予測を評価する上で重要な指針となる。CMIP5マルチモデルアンサンブル平均より、梅雨前線帯のピーク緯度は将来気候でやや南下することが示唆された。

[キーワード]

降水，ジェット気流，アジアモンスーン，梅雨，将来予測

1. はじめに

(これまでの降水将来変化予測)

かつては予測であった地球温暖化は、観測的な現実として進行している。そして、IPCC評価報告書等に結集される膨大な努力を通じて、近未来に起こるであろう気候変化を、よりよく見積もる努力がなされ続けている。このような研究では、多数の大気海洋結合モデルにより、程度に幅はあれ、温室効果ガス濃度増大による全般的な地球温暖化は一致して予測されている。

降水についても、地球温暖化による飽和比湿増に伴い、全般的に増加することが予測されている。ただし、多くのモデルで、飽和比湿増に比例するよりは、予測される降水増は小さい。それは水循環が相対的に「ゆっくりに」なるという変化もあることを示唆する (Held and Soden, 2006¹⁾)。また、赤道域と中高緯度では比較的降水の増加が大きく、もともと降水の少ない亜熱帯高圧帯での変化は小さいなどの予測が得られている。ただし、最近でもモデル間の不一致の度合いは低くない (IPCC, 2013²⁾)。

このように、これまでの研究によって、地球温暖化に伴う降水変化傾向については、非常に大まかなスケールではある程度一致した予測と、その説明がもたらされた。しかし、より細かな地域規模での予測においては、モデル間の不一致も大きく、また、その解釈も難しいケースが多い。行政の対応においては、可能なら信頼性が高い地域ごとの予測が得られることが望ましいが、現状はそのようにはなっておらず、近未来に劇的に改善する見込みもないのが、科学の現状である。そのような場合に求められるのは、不確実性を含めた説明、そしてその不確実性をもたらしメカニズムを腑分けし、明快で判断のよりどころとなる説明であろう。

(東アジアの降水について)

日本を含む東アジアは、モンスーン地帯である。特に東アジアの夏季のモンスーン (EASM: East Asian summer monsoon) は、大陸から伸びる梅雨前線帯を含み、日本の降水に大きな影響を与える。アジアモンスーンによる降水は、多くのモデルで地球温暖化に伴う増加が予測されている (Kitoh and Uchiyama, 2006³⁾ など多数)。しかし、降水の分布がどのように変化するかについては、コンセンサスが得られていない。また、「降り方」の変化についても、定性的な予想を超えることはなかなか難しいのが現状である。

(ジェットという視点)

梅雨などの亜熱帯降水帯では広く、ジェット気流と降水との間に関係があることが知られている (Kodama 1993⁴⁾ など)。我々は最近、その関係を日々の客観解析データおよび衛星降水データを用いて、地球流体力学的な観点から深める研究を行った (Horinouchi 2014⁵⁾)。この研究では、亜熱帯ジェット気流が、高度10 kmほどの高さにおいて、対流圏と成層圏の空気塊をわける形になっている (同じ高度でジェットの赤道側は対流圏、極側は成層圏に対応する大気安定度を持つことが多い) ことに着目し、力学的により直接的な指標である渦位という物理量に着目して、メカニズムを探究した。日々の大気の客観解析データと衛星降雨データを用いたデータ解析により、ある等温位面 (具体的には約350 K) 上で特定の渦位の値 (約2 PVU) を表す線の南縁に沿って降水が特に強化されること、その線の移動に伴って降水帯も移動することを示した。さらに、力学的な診断を駆使して (診断法自体も新たに開発して)、その関係が気候学的な (つまり平均的な意味での) 亜熱帯ジェットに沿う導波管を伝搬する総観規模のロスビー波により駆動されることを示した。この研究が直接対象とするのは、数日から10日程度の時間スケールの変動であるが、より長期の降水に対する力学的な影響に対しても有用な枠組みが得られたと考えられる。本サブ課題は、この研究の成功とその発展性を基礎に構想された。

上記の研究で直接に残された課題は、ジェット (あるいは等温位等渦位線) に沿った降水強化と、上層の擾乱 (ロスビー波) の位相関係であった。上層のトラフの東側において降水が強化されることについては、(同線とのタイトな関係を除けば) 総観気象学の常識で説明できる現象である。事実、降水の

強化はその場合において著しい。しかし、それ以外の位相においても同線に沿った強化が起こることが例示されたことが研究者の興味を引いていた。これを定量化し、そのメカニズムを明らかにすることは、ジェットと降水の関係をよりよく明らかにすることであり、応用研究にも重要である。そこで、本サブ課題ではまずそれに取り組むことを目指した。

その上で、気候の問題に取り組んだ。上記の研究の成果を活用することで、東アジア・北西太平洋域におけるジェットと降水の関係、さらに、それに影響を与える海洋の効果について、これまでの観測から得られたデータや近未来予測データから、新しく有用な知見が得られることが期待されるが、以下に示すように、それは現実のものとなった。

(CMIP5データベースについて)

CMIP5 (Coupled-model inter-comparison, 5)データベースは、世界中の研究機関が協調・協力して作り上げた、大気海洋結合モデルによるシミュレーション結果を収録するデータベースで、IPCC第5次評価報告書(2013)²⁾による近未来予測の基礎となっている。CMIP5データベースには、様々なカテゴリーの結果が収録されている。例えば、海洋部分を固定し、大気モデルだけで走らせるAMIPラン、大気海洋結合モデルを用い、過去の温室効果ガス濃度や火山性エアロゾル濃度などを与えて過去の気候変動の再現性をみるhistoricalラン、近未来に予測される温室効果ガス濃度の推移を、複数のケースを想定して与えて大気海洋結合モデルを走らせるRCP (representative concentration pathways)ランなどがある。CMIP5データベースはこれまでに多数の研究に使われている。しかし、ジェットと降水の力学的関係という観点では、これまでほとんど活用されていなかった。

2. 研究開発目的

(a) 日々の降水分布とジェットの関係ならびに気候理解への応用の基礎研究

東アジア・北西太平洋域における日々の降水と上層のジェット気流の変動の関係性のメカニズムを、後者に関わる波動擾乱の位相という観点で整理し明らかにする。これによって、Horinouchi (2014)⁵⁾で示された、アジアジェットに対応する、成層圏と対流圏の空気塊を分ける等温位等渦位線と降水の関係をより包括的に明らかにし、そのメカニズムを解明して、気象学的時間スケールから気候学的時間スケールまで適用可能な「理解の形」を提示する。

特に、Horinouchi (2014)⁵⁾で見いだされたが、統計的な定量化がなされておらず、そのメカニズムも明らかでない(従来の総観気象学の観点からは、降水が起きにくいと考えられる)上層のトラフの後面(西側)においても、上記の線に沿っては降水が強化される現象を定量化し、さらにそのメカニズムを明らかにする。降水発生に必要なのは水蒸気の供給と鉛直輸送である。この点に着目した理論的・数値的な解析を行うことで、課題の解決を試みる。また、サブ課題 I を中心に行われている、ジェットと降水の降り方(広がりや強度、層状性降水か対流性降水かなど)の研究に協力し、力学的な診断を行って、解釈を強化する。

(b) 降水分布、ジェット、海面水温の関係の気候学的な解析

過去数十年の降水分布の変化と、ジェット、海面水温の関係を、大気の客観解析や衛星等による降水量、海面水温データを用いて、明らかにする。これによって、大気海洋結合モデルによる近未来予測の解釈に資する。

東アジア・北西太平洋域の夏季の降水の年々変動に大きな影響をあたえるものとして、フィリピン近海と日本付近の対流の遠隔的な共変動であるPJパターンが知られている。PJパターンはENSO(エルニーニョ・南方振動)が衰退する年の夏季にインド洋のメモリを経て発達し、亜熱帯太平洋と梅雨降水帯に南北のダイポール変動を引き起こす。ところが、最近の30年間の長期変化では、梅雨降水帯の活動が北西太平洋上で北にシフトする傾向にあり、亜熱帯降水域を含めるとトリポールパターンのような変化を

している(Matsumura et al. 2015⁶⁾)。したがって、ENSO が励起するPJパターンだけではこの梅雨降水帯の変化を説明できない可能性が高い。一方で、PJ パターンは南北に大きなSST 勾配を持つ黒潮-親潮続流域にSST 偏差を生じ、夏季でSST 変動が最大となる一因でもある。そこで黒潮-親潮続流域の変動に対する梅雨降水帯の年々変動における応答と夏季大気循環への影響を調べる。

北太平洋とその周辺の大気場に数十年スケールの変動をもたらす要因として、太平洋十年規模振動(PDO)が知られている。PDOは主に黒潮-親潮続流域(KOE)の海面水温とアリューシャン低気圧(AL)との大気海洋相互作用系として認識されており、ALが発達する冬季から春季の北太平洋10年規模変動が説明できる。しかし、夏季はALに代わり太平洋高気圧が発達するため、冬季と同様のメカニズムでPDOを理解することは難しい。夏季はENSOが発達する季節であると同時に、前年のENSOがインド洋を介して太平洋高気圧の変動をもたらしている(Xie et al. 2009⁷⁾)。一方、KOE SST変動に伴う亜熱帯ジェットのスフトに起因すると思われる近年の梅雨降水帯の北上も太平洋高気圧の強化およびオホーツク海高気圧の弱화에寄与している。よって、太平洋高気圧の変動には複合的な要因が働き、その理解は未だ途上である。そこで、ENSOに加えて、PDOが太平洋高気圧、さらにはオホーツク海高気圧の変動に果たす役割を明らかにする。

(c) CMIP5データベースを用いた、将来予測に関する研究

世界中の研究機関が協力して作り上げた、気候モデルの出力を集めたCMIP5データベースには、様々な物理量が収録されている。それを活用し、詳細な解析を実施することで、予測のばらつきだけでなく、それを引き起こすメカニズムの診断も可能である。本研究では、上に挙げた諸研究の知見をもとに、新たな視点でCMIP5データの解析を行う。

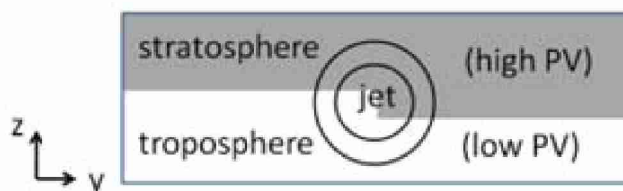
Seo et al (2013)⁸⁾ は、CMIP5マルチモデルアンサンブルより、今世紀末までに予想される変化としては、東アジア夏季モンスーンの降水分布はほとんど位置を変えないと結論付けた。しかし、個別のモデルの研究では様々な変化が言われている。よって、モデル中でそれを決める要因を明らかにし、将来変化への知見を得て、行政にも提案できるようにしたい。そのための視点として、ジェットと海面水温という要素を考えることが有用であると考えられる。解析の際は、CMIP5データベースで広く用いられる月平均データだけでなく、より時間分解能が高い1日ごとのデータを用いることで、気象学的な時間スケールから、季節内スケール、さらに気候学的な時間スケールまでを貫く規則性が得られ、将来予測に役立つことが期待される。

さらに、大気海洋結合モデルによるシミュレーションにおけるジェットの将来変化に対して、モデル中の海洋が果たす役割を、CMIP5の月平均データを用いて明らかにする。過去数十年に起こった梅雨降水帯の北上や太平洋高気圧の強化は、CMIP5マルチモデルアンサンブルによる近未来予想には見られない。それはなぜなのかを明らかにする。

3. 研究開発方法

(a) 日々の降水分布とジェットの関係ならびに気候理解への応用の基礎研究

東アジア・北西太平洋域における日々の降水と上層のジェット気流の変動の関係性を、後者に関わる波動擾乱の位相という観点で統計的に明らかにする。このため、JRA-55再解析(気象庁による長期に同じシステムを用いた客観解析)の日々データ(一部解析は確認のため6時間データも使用)、ならびに、複数のマイクロ波受信衛星にもとづく日々の降水の全球データであるTRMM 3B42データを用いて、コンボジット解析を行う。その際、温位が350 K、渦位が2 PVUとなる等値線を求め、さらに、その水平面内の湾曲をもとに、上層(上部対流圏から成層圏にかけて)の波動擾乱の位相を定義し、位相を東西にそろえたうえで、コンボジット対象となる物理量を南北にずらして重ねるという手法を用いる。これによって、降水やその他の諸物理量が上層擾乱との関係で平均的にどのように分布するかを定量的に示すことができる。



図(3)-1 概念モデルの渦位分布の基本設定。横軸は南北、縦軸は鉛直座標を表し、成層圏に対応する渦位の値をもつところを灰色であらわす。図の中央より左側は対流圏が相対的に深く（対流圏界面が高く）なっており赤道側を、右側はより浅くなっていて極側を表す。このような渦位分布に対応する風速は、図中の丸を等値線に見立てて示されるジェット様の分布を持つ。

結果の力学的な解釈には、数値計算を援用する。その際、 f 平面での準地衡近似を採用し、無次元化した準地衡渦位が、対流圏に対応する一定値と成層圏に対応する一定値の二値のみを持つという、理想化されたモデル分布を構築する。それを図(3)-1のように配置すると、自然にジェットが現れる。上層の擾乱は、図中の低緯度側と極側の境界を経度にそって南北に波打たせることによって導入される。

このシンプルなモデルをもとに、部分的渦位逆解析(Piecewise potential vorticity inversion: PPVI)を用いることで、力学的な強制による上昇流が診断できる。さらに、潜熱の効果を取り入れることで、凝結加熱によるフィードバックも表現できる。シンプルなモデルであるため、数式に立ち返って説明できるという利点がある。得られた結果を、上記のコンポジット解析の結果と比較し、妥当性を議論する。

以上の研究のほかに、東アジアの特徴を浮き彫りにするため、上述のHorinouchi (2014)⁵⁾と同様な解析を、他の経度帯、さらに南半球にも適用する研究も行う。

(b) 降水分布、ジェット、海面水温の関係の気候学的な解析

過去数十年の降水分布の変化と、ジェット、海面水温の関係を、以下の方法で明らかにする。用いるデータは主に、JRA-55再解析データおよびERA-Interim 再解析データ、GPCP プロジェクトによる長期の降水量データ、「最適補間」海面水温データ OISST 並びにハドレーセンターによるHadISSTの、それぞれ月平均データである（同種の複数のデータセットを用いる理由は、対象とする期間等の要因によるものである。個々の選択による結果への影響は小さいと考えられる）。さらに、気象庁による根室および八丈島における気象観測データも用いる。

黒潮-親潮続流域(KOE)との関連の研究では、データ解析の対象とする期間は1982～2012 年である。KOEで海面水温の変動の指標として、KOE を含めた領域(30° - 45° N, 145° - 165° E)で平均する“KOE SST index”を定義し、解析に用いる。また、大気場の変動パターンを抽出するため、EOF（経験的直交関数）解析を行う。

結果の解釈のため、領域気象モデルWRFを用いた数値実験を実施する。夏季1982～2012 年の観測SSTを与えた標準実験に対し、雲微物理過程の潜熱をオフにした実験、気候値SSTを与えた実験を行い、比較する。

より長期のPDOとの関連を調べる研究では、データ解析の対象期間は1958年から2015年とする。冬季(11～1月)で平均した Nino-3.4 SSTをENSO indexとし、夏季(6～8月)のPDO index（ワシントン大学による）を平均して用いる。この研究でもEOF解析を用いる。

(c) CMIP5データベースを用いた、将来予測に関する研究

CMIP5データベースのhistorical, RCP4.5, RCP8.5の3種の実験設定によるモデル出力データを用いる。RCPに続く4.5, 8.5は、2100年における放射強制力が、産業革命以前に比べてそれぞれ4.5 W, 8.5 W増大するような温室効果ガス濃度の推移を与える実験である。この研究では主に、環境省環境研究総合推進費2A-1201「CMIP5マルチモデルデータを用いたアジア域気候の将来変化予測に関する研究」（代表：高菰緑）⁹⁾で整備された、2.5度間隔補間データを用いる。

1日ごとおよび月平均データを用いる研究においては、現在気候(historical)は主に1979年から1999年、将来気候(RCP4.5, RCP8.5)は2079年から2099年にあたるデータを用いる。日平均データおよび月平均データを用いて、250 hPaの等圧面におけるジェット軸の位置に対して相対的に南北にずらすコンボジット解析を行う。なお、これはこれまでの等温位等渦位線に基づくコンボジットと同様な結果をもたらす（概念的には図(3)-1参照）。CMIP5の日平均データの鉛直分解能は非常に粗く、それをもとに計算される渦位を用いるメリットがあまりないことと、わかりやすさのために、ここでは風速を用いた。

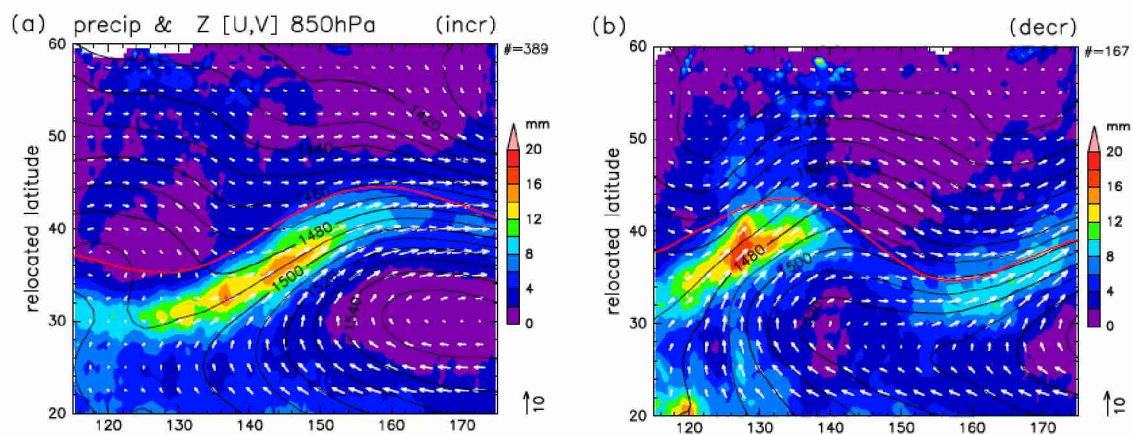
この研究ではさらに、ジェット軸の緯度に対する、相関および回帰分析も行う。その際、基準となる（そこからの偏差をとる）平均を、目的に合わせて設定する。具体的には、モデルごとに設定する場合と、マルチモデルアンサンブルを用いる場合がある。

ジェットの変化に対する海洋の役割を調べる研究では、CMIP5の月平均データのみを用いる。現在気候(historical)は1970年から1999年、将来気候(RCP8.5)は2070年から2099年を対象とする（対象期間が上記と少し異なるが、その影響は小さいと考えられる）。モデルアンサンブルの変化を中心に、さまざまな物理量データを活用する。さらに、海面水温を固定した大気モデルによる数値実験を数通り行う。

4. 結果及び考察

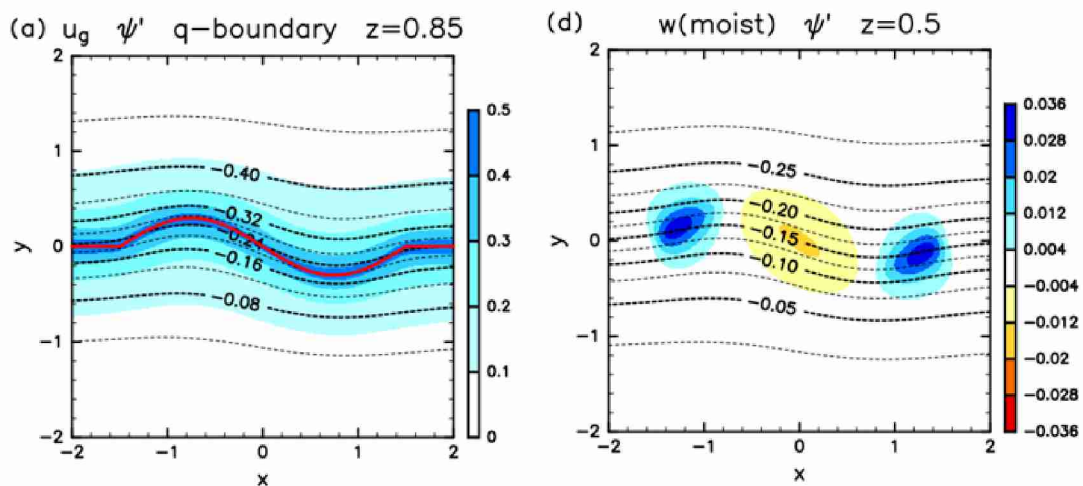
(a) 日々の降水分布とジェットの関係ならびに気候理解への応用の基礎研究

JRA-55再解析データとTRMM 3B42降水の一日毎のデータを用いた夏季のコンボジット解析により、上層の波動擾乱と地表の降水分布の関係性を定量的に明らかにした。図(3)-2は上層擾乱が特定の位相をも

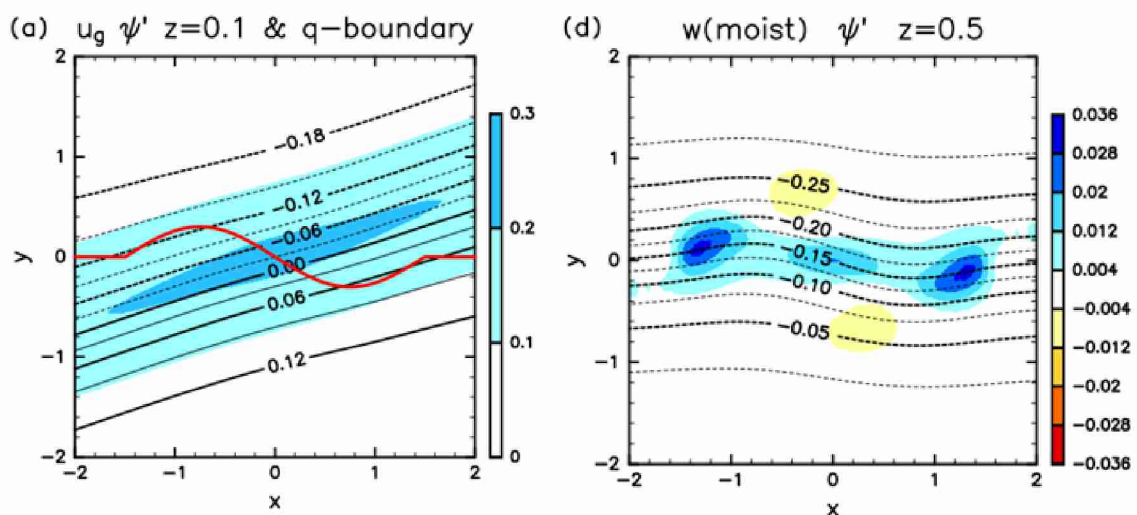


図(3)-2 温位 350 K, 渦位 2 PVU の等値線（上層のジェット軸とよく対応）に相対的に南北にずらして行ったコンボジット解析結果。同線の南北変異をもとに上層擾乱の経度的な特定の位相を抽出し、その平均の位置を赤い太線で表示する。横軸は東経。パネル(a)は上層のトラフ（赤線が南に張り出しているところ）が表示領域の西側にある場合、(b)は東側にある場合の結果。カラーシェーディングは降水(mm/day)、コンターは 850 hPa のジオポテンシャルハイット、矢印は水平風速（10 m/s に相当する長さを右下の矢印で示す）。

つ場合を抽出して行ったコンポジット結果である。赤い線で表された等温位等渦位線（ジェット軸との対応が良い）の南に沿って降水が強化されることがわかる。同線の南への張り出しによって表される上層のトラフの前面（東側）では特に降水が強いが、それ以外でも線に沿って強化されることがはじめて定量的に示された。図から、上層トラフの位相に合わせて、下層（850 hPa）の太平洋高気圧が変調を受け、流れが曲げられることがわかる。これは、Horinouchi (2014)⁵⁾で示された、上層からの力学影響で説明できる。下層の強い流れは下層ジェットと呼ばれるが、トラフの前面（東側）の南側を通り、その東のトラフの後面（西側）へと続く。トラフの後面での降水が特に強い場合は、下層ジェットが上層トラフの後面の下により直接的に流れ込む混む形になっていることも示された。



図(3)-3 シンプルな（理想化された渦位配置の）準地衡渦位モデルにおいてジェット（左）を波打たせた場合に得られる鉛直流の解の例（右：湿潤過程を考慮）。寒色系のシェーディングは上昇流、暖色系は下降流を表す。



図(3)-4 図(3)-3 と同様だが、上層トラフの後面に向かう下層ジェットがあるとき。

この状況をシンプルな準地衡の診断モデルを構築し、再現した。上層にトラフ・リッジが存在するよう等渦位線が波打つだけの場合（図(3)-3），トラフの後面は下降流となり，湿潤対流の発達を抑えられる。これは総観気象学で広く知られている知見である（逆にトラフの前面では上昇流により対流が促進される）。しかし，下層ジェットが上層トラフの後面に南東から吹く場合，トラフの後面でも上昇流となる場合がある（図(3)-4）。簡単な数式により，この現象が明快に説明できることを示した。

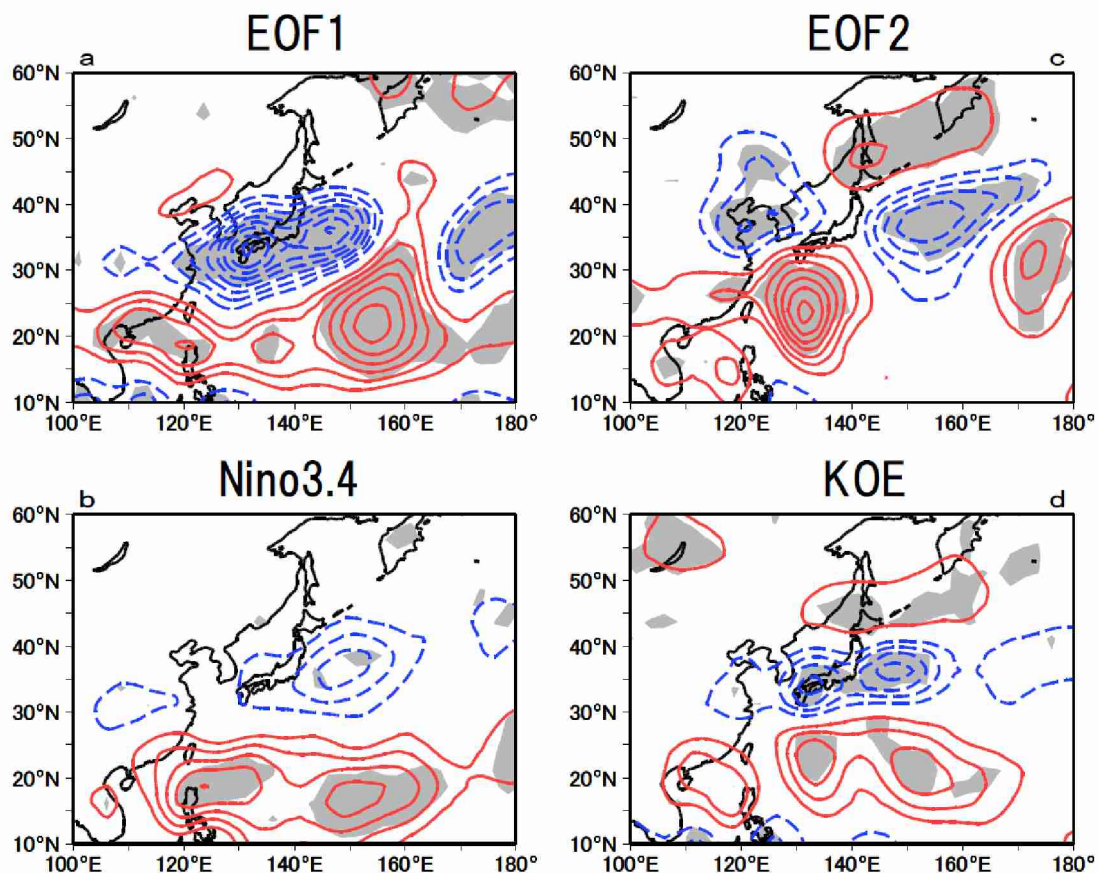
本研究によって，ジェットの南に沿った降水の強化は，上層擾乱と下層ジェットの相互作用によって形作られること，それは，下層ジェットが南寄りとなりやすい，太平洋高気圧の西側領域において発生しやすいことが明らかになった。この知見は，日々の気象の説明だけでなく，気候学的な平均場の説明にも応用できる。

以上の研究はHorinouchi and Hayashi (2017)¹⁰⁾として出版された。

サブ課題1と共同で行った研究(Yokoyama et al, 2017¹¹⁾)においては，準地衡 ω 方程式を用いた上昇流の誘起の診断によって貢献した。この研究は，II-1で報告する。

(b) 降水分布，ジェット，海面水温の関係の気候学的な解析

過去数十年における降水分布，ジェット，海面水温における年々変動の間の関係を，ERA-Interim 再解析，GPCP 降水量，OISST海面水温の月平均値を用いて調べた。梅雨降水帯の変動特性を明らかにするために，PJパターンによる降水ダイポールが最も顕著な7月の降水量に関して，緯度 20° - 60° N，経度 100° E - 180° の領域を対象にEOF解析を行った。EOF1（EOF解析で得られる第一モード）は南北にダイポ



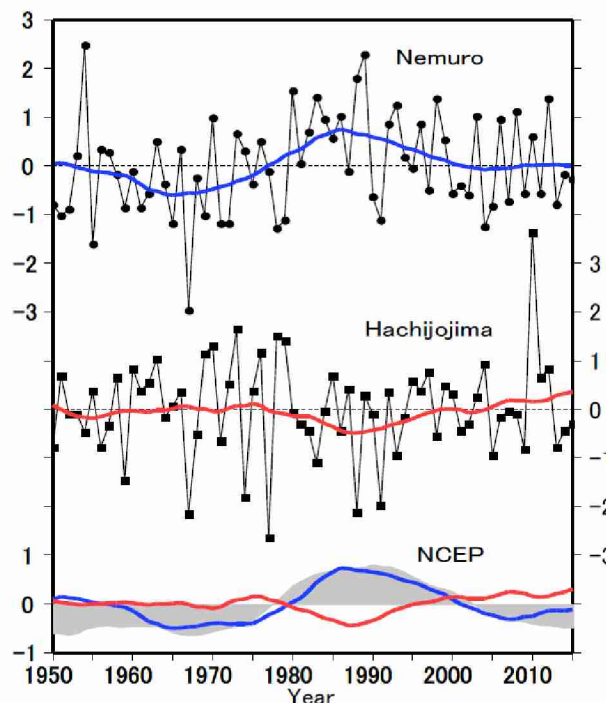
図(3)-5 7月の降水量への回帰。(a)，(b)，(c)，(d)はそれぞれ，PC1，Nino-3.4 SST，PC2，KOE SST への回帰結果を表す。コンター間隔は 0.3 mm/day で，0 線は消去。実線は正，破線は負，陰影は 95%の有意水準を表す。

ール構造となっており、ENSOが励起するPJパターンを良く反映していた(図(3)-5a)。一方、EOF2は、梅雨降水帯に位置する黒潮-親潮続流域(KOE)上の負の降水偏差とその北側の正偏差が特徴的である。得られた第二主成分(PC2)を、KOE SST に回帰を施すと、PJパターンとEOF2の北西太平洋上における南北変動を合わせ持つようなトリポールパターンが得られる(図(3)-5d)。このことは、ENSOが励起するPJパターンがKOE SST 偏差を強制するのに加えて、北西太平洋上の降水の南北変動もKOE SSTと関連していることを示唆する。

EOF解析から得られた示唆を検証するため、領域気象モデルによる数値実験を行った。その結果、KOE SST 変動が梅雨降水帯の南北変動と高気圧偏差の強化に寄与することが示された。なお、8月においてもKOE SST 強制力による高気圧偏差は持続しており、KOE 上の大気海洋相互作用が、梅雨期だけでなく、夏季全体の気候変動要因の一つであると考えられる。以上の成果は、Matsumura et al (2016)¹²⁾として出版された。

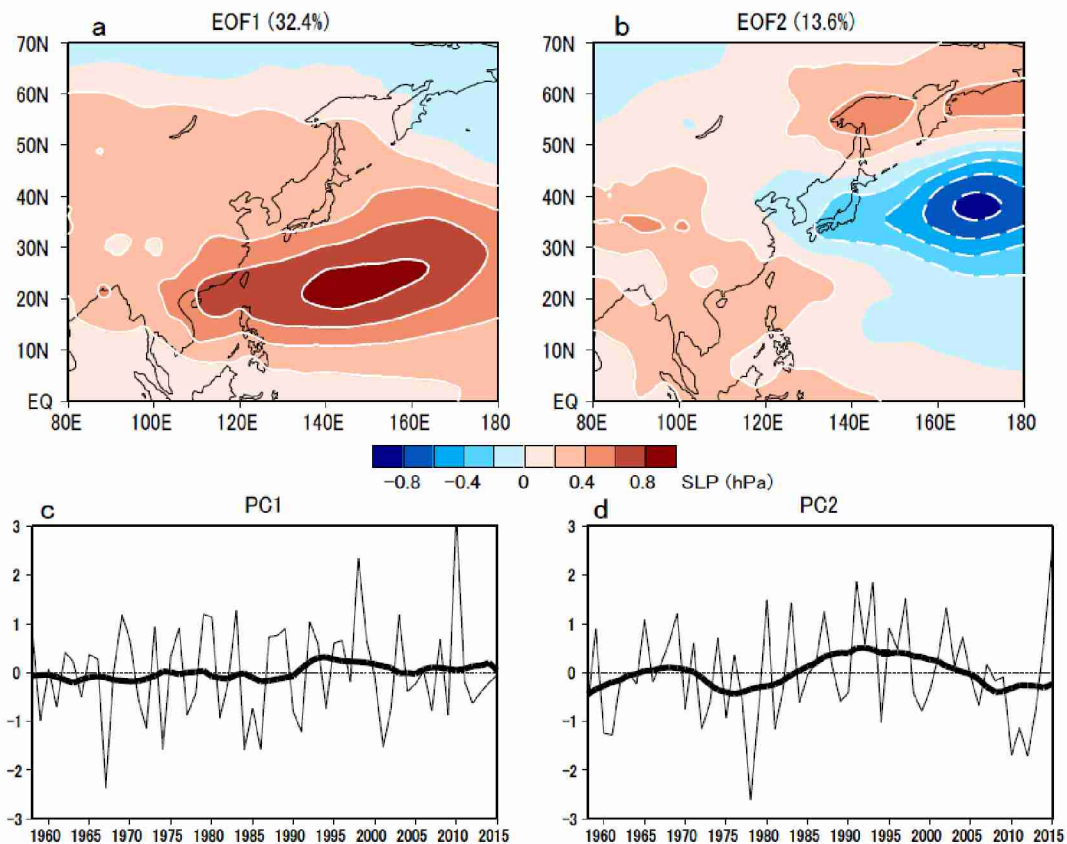
過去数十年間における変化傾向を、JRA55再解析, HadISST, 気象庁の地上観測の月平均値を用い、JRA55がカバーする1958~2015年を対象として調べた。1980年代以降の最近30年間では、太平洋高気圧は気候学的リッジの北側に沿って強まり、オホーツク海高気圧は弱まっている。しかし、1960年からの30年間では変化傾向がそれとは逆転する(図(3)-6)。つまり、80年代を境に太平洋高気圧とオホーツク海高気圧は対照的な変化をしている。緯度 0° - 70° N, 経度 80° E- 180° の領域を対象とするEOF解析を行ったところ(図(3)-7), この傾向は第2主成分に現れることが示された(なお、第一主成分はENSOに対応する)。EOF2はリッジの北側に負偏差、オホーツク海周辺で正偏差が強い(図(3)-7b)。PC2に対する夏季SSTへの応答は明瞭な正位相のPDO分布を示した。

実際に、PDO indexを海面較正気圧に対して回帰させると、EOF2のように、オホーツク海高気圧の強化、太平洋高気圧の弱化する構造となり、冬季の分布と大きく異なっている。一方、第一主成分はENSOに対応するが、長期変化は小さく年々変動成分が強い(図(3)-7c)。PDOに対応する第二主成分は、寄与率がより小さいものの、長周期変動においては支配的である。以上より、ENSOとPDOはそれぞれ独立



図(3)-6 夏季海面気圧の時系列(hPa)。上から根室、八丈島、NCEP 再解析によるオホーツク海と北西太平洋の領域平均。陰影は夏季 PDO index を示す。太線と陰影は 11 年移動平均を施したもの。

した太平洋高気圧の変動要因であると示唆される。特に、最近30年間では太平洋高気圧はリッジの北側に沿って強まっているため、負位相のPD0による影響が強まっていると考えられる。以上の成果は、Matsumura and Horinouchi (2016)¹³⁾として出版された。

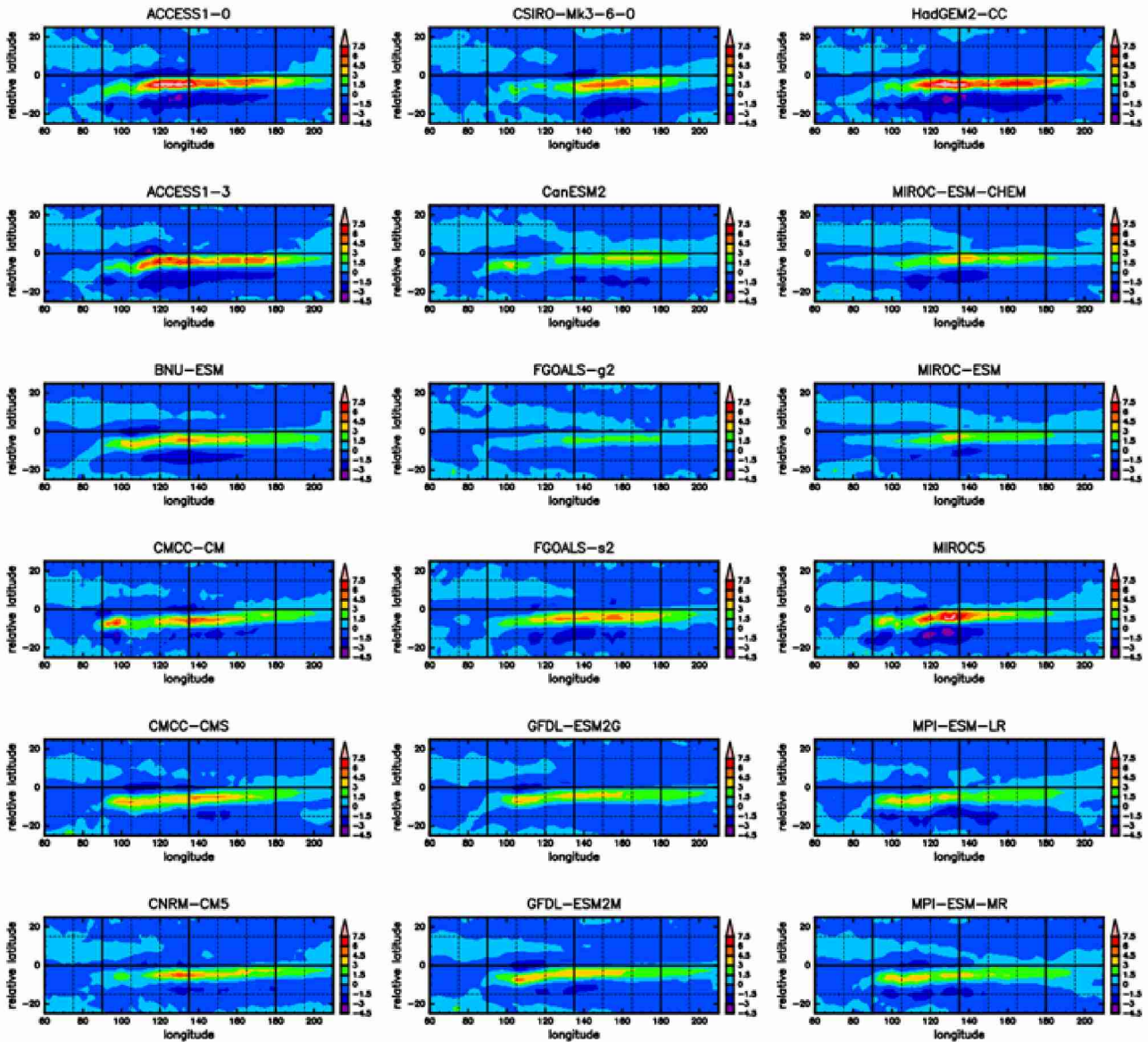


図(3)-7 夏季の海面校正気圧の EOF 解析の結果。(a) EOF1, (b) EOF2, (c) PC1 (第一主成分), (d) PC2。コンター間隔は 0.2 hPa で 0 線は消去した。実線は正、破線は負を表す。PC の太線は 11 年移動平均を表す。

(c) CMIP5データベースを用いた、将来予測に関する研究

CMIP5データベースに収められた、現在気候(historical)および将来気候(RCP4.5, RCP8.5)に関する、大気海洋結合モデルによるシミュレーションデータ群(2.5度格子に補間したもの)を用いて、ジェット、降水ならびにその他の物理量の関係性を調べた。この研究では特に梅雨期に焦点を当てるため、6,7月のデータを用いた。

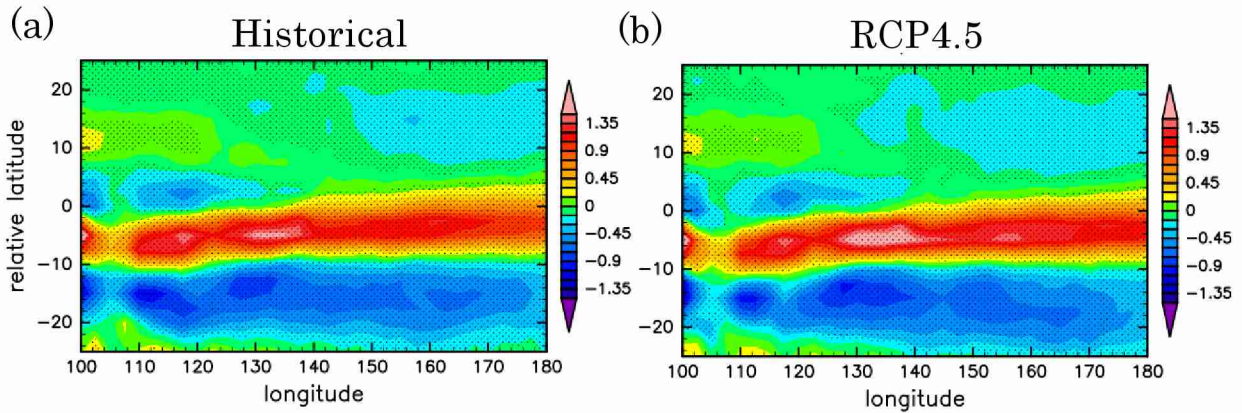
まず、一日ごとのデータを用いて、ジェットと降水の関係が、各モデルにおいて再現されているかをコンポジット解析によって調べた。図(3)-8に現在気候(1979-1999)の場合の結果を示す。各モデルの月平均(6,7月)気候値からの偏差の平均をとっているため、値が正(負)のところは、平均より降水が多い(少ない)ことを表す。いずれのモデルでも、東経100度(チベット高原の東側)あたりから東に、ジェット軸の南側に沿って値が正のところが伸びている。つまり、そこで降水が強化されるという観測的な関係が再現されている。なお、平均からの偏差を南北にずらして重ねているので、仮にジェット軸の位置が(各月で)動かず固定されていれば、コンポジット平均もゼロになる。この図より、ジ



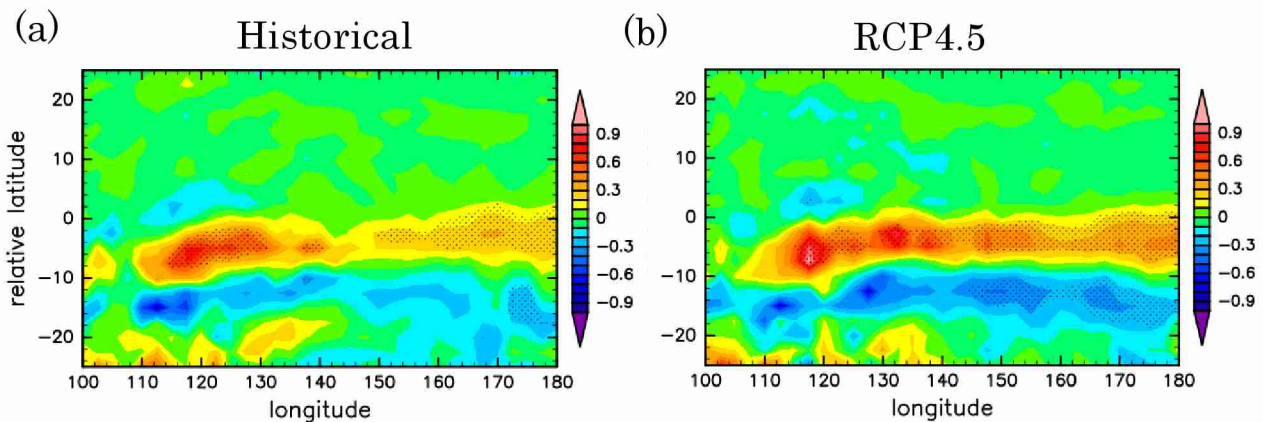
図(3)-8 CMIP5 の historical 実験の 6, 7 月の一日毎のデータを用い, 250 hPa のジェット軸に対して相対的に南北にずらして平均した降水量(mm/day)の各モデルの気候値からの偏差。横軸は経度, 縦軸はジェットに対する相対緯度。使用した大気海洋結合モデルの略称を各パネルの上に示す。カラスケールの範囲は, -4.5 mm/day から 7.5 mm/day まで。スペースの都合で一部モデルは割愛。

エットの南側の降水偏差の値はまちまちであることがわかるが, モデルごとに平均降水量や, どれだけ雨が一樣であるか/極端であるかが大きく異なるので, 主にはそれが反映されていると考えられる。なお, ジェット軸の代わりに, 温位350 K, 渦位2 PVUなどの等温位等渦位線を基準にコンボジットしても, 同様な結果が得られる。

将来気候(2079-2099)でも, コンボジット結果は同様になる(図は略)。いずれのモデルにおいても, 将来気候のコンボジット結果は, 現在気候のコンボジット結果とよく似ている。降水は全般的に増大するものの, 各モデルの現在気候から将来気候への変化よりは, モデル間の多様性のほうが大きい。どの経度で特に降水が多いか(少ないか)も, それぞれのモデルにおいて, 現在と将来の違いは小さい。



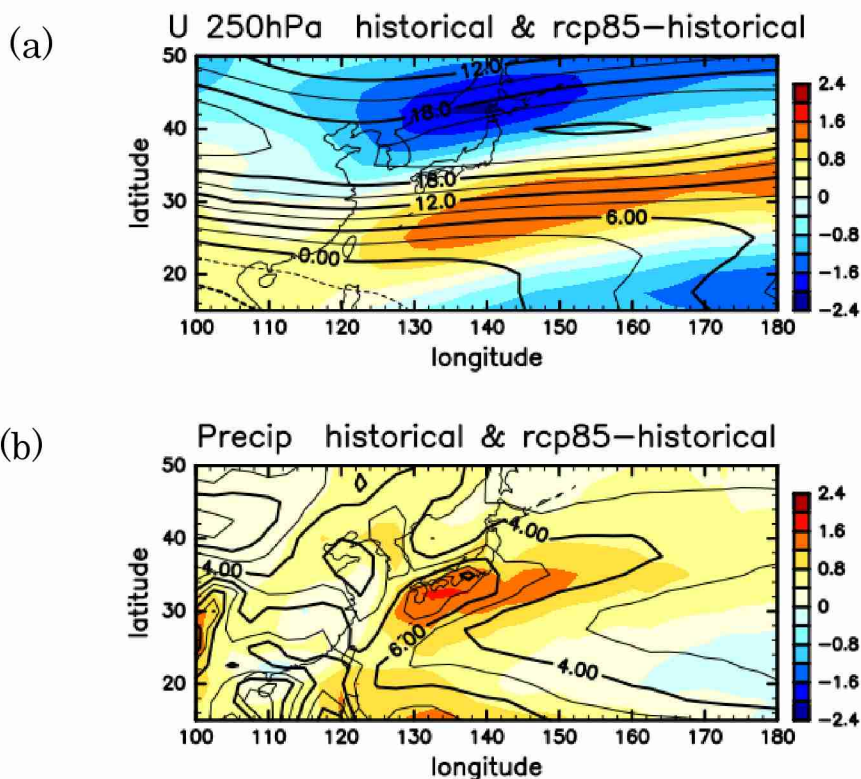
図(3)-9 図(3)-8と同様だが、月平均データを用い、使用した約30のモデルの結果をすべて平均したもの。(a)は現在気候(historical), (b)は将来気候のうちRCP4.5の結果を示す。ハッチをつけたところは正負の偏差が95%有意であるところを表す。なお、カースケールは図(3)-8より狭い(-1.5 ~ 1.5 mm/day)ことに注意。



図(3)-10 図(3)-9と同様だが、各モデルの6, 7月の気候値(30年平均値)平均データを用い、マルチモデル平均値からの偏差を平均したもの。ハッチをつけたところは正負の偏差が90%有意であるところを表す。

図(3)-9は、図(3)-8と同様だが、月平均値データを用い、さらに使用した約30のモデルの結果をすべて重ねたものである。偏差の大きさは日データを用いた場合に比べて小さいが、ジェットの内側に沿って、日データの場合と同様に降水偏差が正になっている。さらにその内側では負になっているのも同様である。偏差の大きさが図(3)-8よりも小さいことは、月平均操作によってジェット的位置がその月における日々の値から平均的なものに置き換わり、降水は一か月間地点ごと単純に平均したものとなることによる。いわば、日々ジェットとともに動く降水が一か月間均されることによって、長時間露出でぼけた写真のようになるのである。しかし、図(3)-8と同様な構造が残るということは、月平均のジェット軸の位置と降水帯の位置の年々の変動が相関を持つことを示している。図(3)-9はhistoricalランとRCP4.5ランの結果を示すが、RCP8.5でも結果は同様である。

図(3)-10ではさらに平均を推し進め、各モデルの月平均降水量の気候値の、マルチモデルアンサン



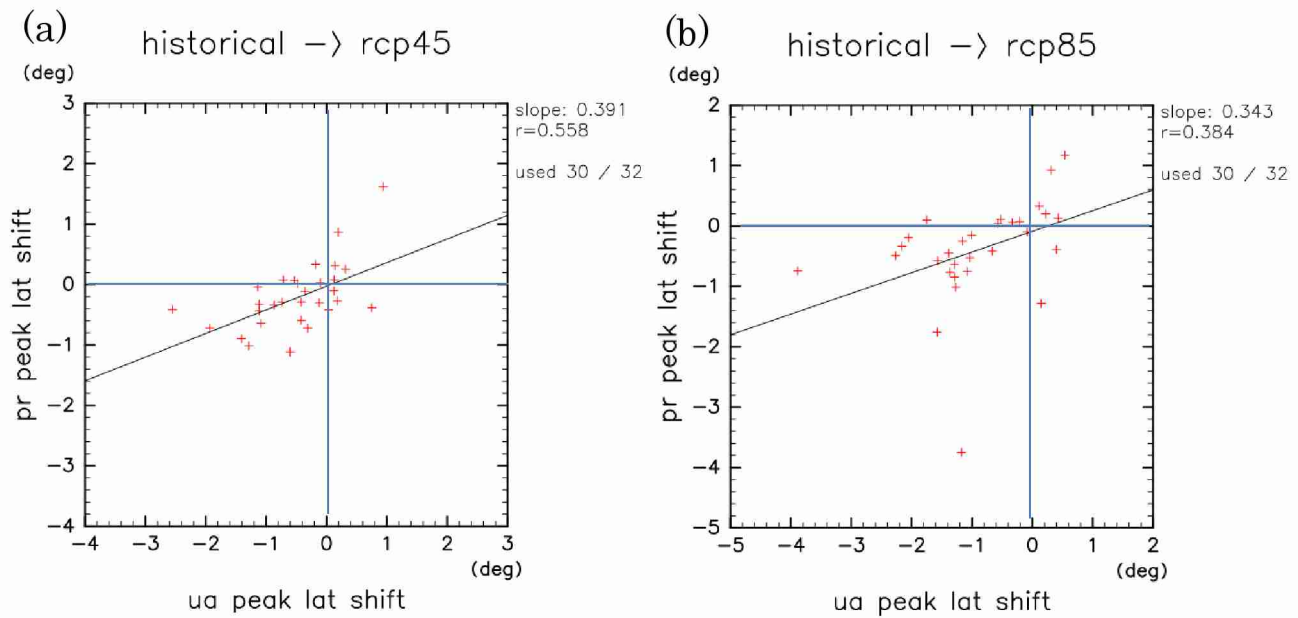
図(3)-11 (a) 250 hPa の東西風 (m/s) と、(b) 平均降水量 (mm/day) のモデルアンサンブル平均の将来気候 (RCP8.5) と現在気候 (historical) の差 (前者から後者を引いたもの。K ラーシェード) ならびに現在気候の気候値 (コンター)。

ブル平均 (全モデルの平均) からの偏差を、各モデルの月平均気候値のジェット軸の位置を基準に南北にずらして行ったコンポジット平均を示す。結果は、図(3)-9 と定性的に同様である。このことは、各モデルにおける気候学的な降水帯の緯度は、それぞれにおける気候学的なジェットの緯度と相関があり、ジェットの南側に沿って降水帯ができる傾向があることを意味する。定量的には、図(3)-9 より平均偏差が小さいのは、図(3)-8 から図(3)-9 への変化と同様である。すなわち、平均期間が長くなるほど、いわば長時間露出でさらに像がぼけるようになるので、期待される変化である。

以上のように、ジェットと降水の関係は、日々の気象の時間スケールから気候学的な時間スケールまで成り立つことがわかる。以上を予備知識とすることで、現在気候から将来気候への変化をよりよく解釈することができる。

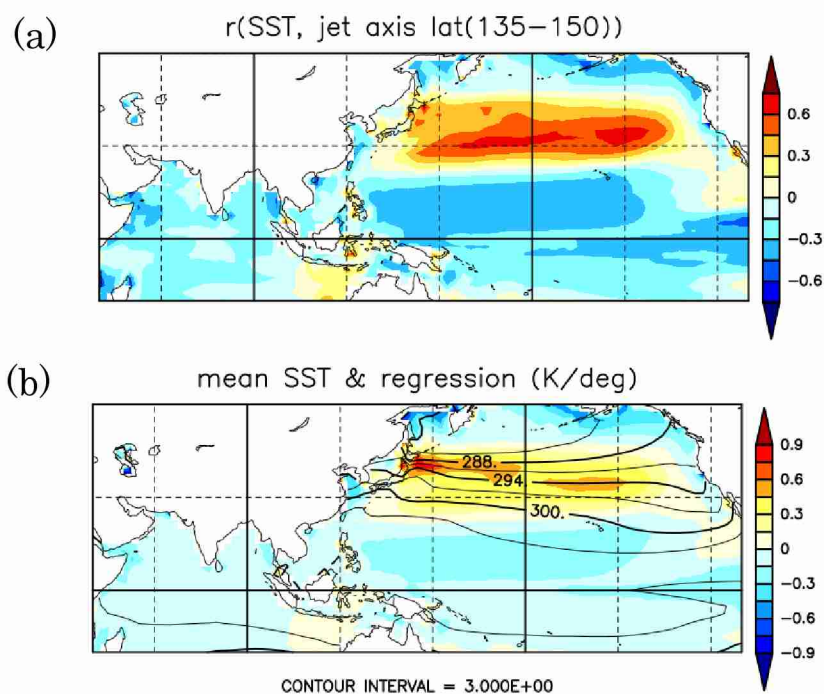
図(3)-11 は、250 hPaでの東西風速と地表での降水量の6,7月のモデルアンサンブル平均の現在気候から将来気候への変化を表す。東西風速は、ジェットの南側で強まり、北側で弱まっている。これは、ジェットが平均的には南下することを意味する。一方、降水は、よく知られているように全般に強まるという変化傾向となる。その変化をよく見ると、九州西岸の沖合から東の梅雨降水帯において、現在気候の降水ピークの南側のほうが北側よりも降水の増大が大きいことがわかる。つまり、梅雨は強化されるだけでなく、南下するというのが、モデルアンサンブルによる予報となる。東西風の変化に比べると、この変化は小さいように見える。しかし、モデルアンサンブルにみられるジェットは、降水帯よりも南北に広いので、仮に同じように南にシフトしても、差分の南北の分布はより広くなることに注意する必要がある。そこで次にピーク緯度に着目する。

図3-12 に、135E-150Eの経度帯のジェット軸と降水ピークの緯度が、各モデルで現在から将来にかけ

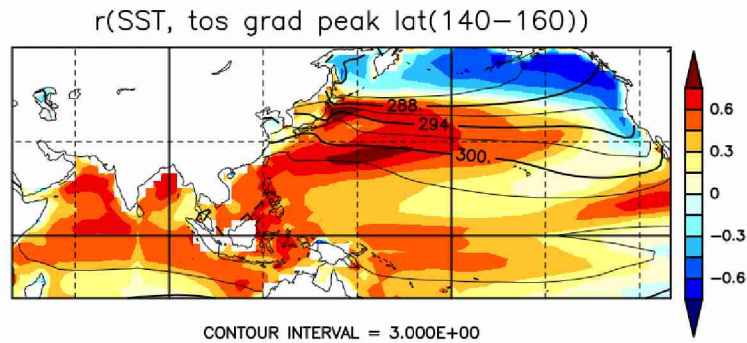


図(3)-12 現在気候から将来気候 (a: RCP4.5, b: RCP8.5) への、各モデルにおける経度 135E-150E の 6-7 月の気候学的なジェット軸の変化 (横軸) と降水ピークの緯度の変化。

てどのように変化するかを示す。平均するといずれも南下であるが、モデルによっては北上するものもある。そして、両者は相関していることがわかる (相関係数は両ケースとも 99% 以上有意)。相関は直接には因果関係を意味しない。しかし、これまでの研究の蓄積から、ジェットから降水へという因果関



図(3)-13 RCP8.5 の各モデルの 6 月の東西風の気候値より求めた 135-150E のジェット軸の緯度と、各点での海面水温の気候値の (a) 相関, ならびに, (b) 海面水温のジェット軸緯度への回帰係数 (カラーシェーディング) と海面水温のモデルアンサンブル平均 (コンター)。



図(3)-14 図(3)-13aと同様だが、ジェット軸の緯度の代わりに140-160Eの水温勾配の最大になる緯度を用いた場合。コンターは図(3)-13bと同様。

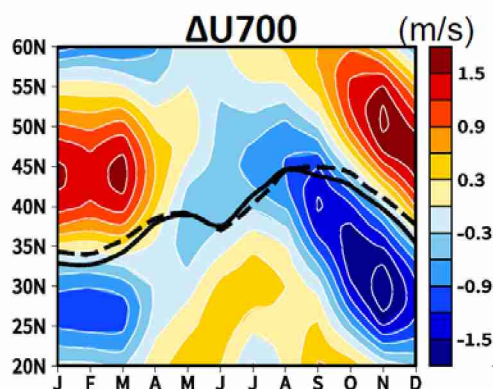
係は確かにあると考えられる。よって、梅雨降水帯の位置の気候値の将来変化は、ジェット軸のそれに追従する可能性が高いと考えられる。

そこでジェット軸の位置に大きな影響を与える海面水温について調べた。図(3)-13aは、135-150Eの各モデルの東西風の6月気候値から得られたジェット軸の緯度と、同じときの各点の海面水温の気候値からもとめた相関係数を示す。中緯度では正の相関で高緯度にかけて符号が逆転する。これを回帰係数(図(3)-13a)で見ると、(ア)水温前線がより北にあるモデルほどジェット軸が北にあるという関係にある。一方、(イ)熱帯とは負の相関であり、熱帯の海面水温が高い(低い)モデルほどジェット軸が北にあるという関係にある。水温前線の緯度と低緯度の海面水温の相関をみるとむしろ正である

(図(3)-14)ことから、(ア)、(イ)は、海面水温のモデル間の相違の共通する構造から見かけのうえで結びついているのではない。さらに、熱帯の海面水温のモデル間の差が小さいhistoricalランでは、(ア)に関わる相関はRCP8.5より高い。これらより、(ア)、(イ)は気候学的なジェット軸の緯度を左右する独立な要素であると考えられる。すなわち、水温前線が南にあるモデルほど、また熱帯の海面水温が高いモデルほど、ジェット軸が南にあることを意味する。これらをより確からしく予測できるようになれば、梅雨降水帯の緯度変化もより確からしく予想できるようになると考えられる。なお、(イ)は、放射強制に対する感度がモデル間で異なることに主に起因する。つまり、温暖化予測の全般的な定量的確からしさによる。

以上の成果を公にするための投稿論文を準備中である。

さらに、RCP8.5月平均データを使って、ジェットの将来変化をモデル中の大気海洋相互作用との関連で調べる研究を行った。この研究ではまず、現在気候から将来気候へのジェットの变化の季節進行を調



図(3)-15 700 hPa 西太平洋上空の東西風の現在気候から将来気候への変化(色)、ならびに、現在気候(実線)と将来気候(点線)のジェット軸(すべてマルチモデルアンサンブル平均)。

べた。モデルアンサンブル平均では、東アジアから北西太平洋にかけての下部対流圏でのジェットは、初夏には弱化しつつ南にシフト、盛夏期には単純に弱化、そして冬季にかけては弱化しつつ北上するという変化になる（図(3)-15）。なお、上層でも初夏には南下することは既に述べた。東西風の弱化は、黒潮-親潮続流域の海面水温の勾配の弱化と対応するよう見える。そこで、大気大循環モデルを用いた数値実験を行い、水温勾配の弱化がジェットの弱化を生むことを示した。この結果をPDOの将来変化との関係で論じる投稿論文を準備中である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

本研究により、東アジアの夏季の降水に対する上層のジェットの影響が、日々の気象に関する時間スケールから、数10年の平均まで、基本的に同じ原理で成り立つことが示された。このことは、降水の将来変化を予測し解釈する上で大きな意味を持つ。過去の研究から、降水の将来変化は、全般に増える傾向があること、その傾向はもともと雨の多いところで大きくなりがちであることは、コンセンサスとなっているものの、予測の不確実性は高いと考えられている。東アジアや、さらに日本という地域レベルで、降水の分布がどのように変化するかということは、気候モデルを走らせれば一定の結果は得られるものの、その確からしさを知ることや、結果を解釈することは簡単ではない。本研究では、降水にくらべて力学的に解釈がしやすく、変化の因果関係がとらえやすいジェット気流に着目することが、降水分布の将来変化の予測の解釈に役立つことが示された。CMIP5マルチモデルアンサンブルによると、梅雨降水帯が将来やや南下する。一部のモデルはその逆の傾向を持つことから、その確実性はまだまだ高いが、本研究で得られた知見より、その不確実性の原因は主に、初夏のジェットの軸の位置変化の予測の不確実性によることがわかる。本研究ではさらに、ジェット軸の予測を左右する要因として、黒潮-親潮続流域の海面水温勾配と熱帯の海面水温が重要であることが示唆された。従って、この点の予測の向上が今後の不確実性低減に重要であると言える。このように、メカニズムに踏み込んだ研究により、現在の予測の不確実性の要因がわかり今後の指針が得られたことの科学的意義は大きい。

なお、将来気候への変化では、「熱帯の拡大」ということが知られている。雨の降り方においても、将来は熱帯的な降雨がより高い緯度まで広がると予想されている。梅雨前線帯のピーク緯度の変化はそれとは独立に異なる方向（やや南下）になるのが見込まれることは興味深い。

現在、次期IPCC評価報告書の基礎となる大気海洋結合モデルによる予測が世界中で行われており、現在のCMIP5より確からしさが大きく改善することが期待されている。それでも、降水という予測が難しい物理量については、それだけをみている限りでは、確実に言えることは限られることが予想される。しかし、本研究で得られた知見をもとに結果を丹念に解析することで、より確かなこと、総合的な知見が得られると期待される。

(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>

上述した本研究による成果の意義は、科学的な意義に留まらず、将来予測への実用的な意義も大きい。梅雨降水帯は、不確実性はあるものの南下する可能性が高いことを、その要因とともに明らかにしたことは、行政が活用しうる成果であると考えられる。また、今後、次期IPCCのためのCMIP6データベースが公開されれば、本研究と同様な解析を行うことで、より良い提言ができると考えられる。本研究はそのための準備としての意義もある。

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) S. MATSUMURA, T. HORINOCHI, S. SUGIMOTO and T. SATO: J.Climate, 29, 8, 3075-3093, doi:http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0691.1 (2016), Response of the Baiu rainband to northwest Pacific SST anomalies and its impact on atmospheric circulation.
- 2) S. MATSUMURA, and T. HORINOCHI: Scientific Reports, 6: 37765, doi:10.1038/srep377652016 (2016), Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high.
- 3) T. HORINOCHI and A. HAYASHI: J. Atmos. Sci., 74(4), 1233-1247 (2017), Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific.
- 4) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and T. HORINOCHI: J. Climate, 30 (20), 8127-8147 (2017), Precipitation characteristics over East Asia in early summer: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability.

<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) 松村伸治、堀之内武、杉本詩織、佐藤友徳: 日本気象学会2015年度秋季大会 (2015)
「北西太平洋SST変動に対する梅雨降水帯の応答」
- 2) T. HORINOCHI: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
“Summer subtropical jet and precipitation: from day-to-day variability to climatological understanding”
- 3) S. MATSUMURA, T. HORINOCHI, S. SUGIMOTO and T. SATO: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016.
“Response of the Baiu rainband to northwest Pacific SST anomalies and its impact on atmospheric circulation”
- 4) 堀之内 武: 日本気象学会 2016 年春季大会 (2016)
「夏季の大陸東岸から洋上にかけての降水帯とその日々の分布の概念モデル」
- 5) T. HORINOCHI: Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 13th Annual Meeting, Beijing, China, 2016)
“Jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific: from day-to-day variability to climatological understanding” “Jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific: from day-to-day variability to climatological understanding”
- 6) 松村伸治・堀之内武: 日本気象学会 2016 年秋季大会 (2016).

「PDO による太平洋高気圧とオホーツク海高気圧の変動」

- 7) T. HORINOUCI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific”
- 8) S. MATSUMURA and T. HORINOUCI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
“Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high”
- 9) 堀之内武・館野愛実：日本気象学会2017年春季大会（2017）
「ジェット・渦位分布と降水分布」
- 10) 松村伸治・堀之内武：日本気象学会2017年秋季大会（2017）
「夏季北太平洋における亜熱帯ジェットの将来変化」
- 11) T. HORINOUCI, Y. TAKAYABU, C. YOKOYAMA, T. OSE and S. MATSUMURA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
“East Asian summertime jet and precipitation in CMIP5 models”
- 12) S. MATSUMURA AND T. HORINOUCI: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
“Weakening of the midlatitude jet over the North Pacific in a warming climate”

（３）知的財産権

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) I. M. HELD and B. J. SODEN: J. Climate, 19, 5686-5699 (2006)
Robust responses of the hydrological cycle to global warming
- 2) IPCC (2013). CLIMATE CHANGE 2013: The Physical Science Basis (IPCC第5次評価報告書, Working Group 1 報告).
- 3) A. KITOH and T. UCHIYAMA: J. Meteorol. Soc. Japan, 84(2), 247-258 (2006)
Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments
- 4) Y. KODAMA: J. Meteor. Soc. Japan, 71, 581-610 (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
- 5) T. HORINOUCI: J. Meteor. Soc. Japan, 92(6), 519-541 (2014)

- Influence of upper tropospheric disturbances on the synoptic variability of precipitation and moisture transport over summertime East Asia and the northwestern Pacific
- 6) S. MATSUMURA, S. SUGIMOTO and T. SATO: *Journal of Climate*, 28(7), 2873-2883 (2015)
Recent intensification of the western Pacific subtropical high associated with the East Asian summer monsoon
 - 7) S. P. XIE, K. HU, J. HAFNER, H. TOKINAGA, Y. DU, G. HUANG and T. SAMPE: *J. Climate*, 22(3), 730-747 (2009)
Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño
 - 8) K. H. SEO, J. OK, J. H. SON and D. H. CHA: *J. Climate*, 26(19), 7662-7675 (2013)
Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models
 - 9) 高薮縁、中村尚、尾瀬智昭、植田宏昭、城岡竜一、河谷芳雄：平成26年度 環境省「環境研究総合推進費」終了成果報告書 (2015)
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 (課題番号：2A-1201)
 - 10) T. HORINOCHI and A. HAYASHI: *J. Atmos. Sci.* (2017)
Meandering subtropical jet and precipitation over summertime East Asia and the northwestern Pacific.
 - 11) C. YOKOYAMA, Y. N. TAKAYABU and T. HORINOCHI: *J. Climate*, 30 (20), 8127-8147 (2017).
Precipitation characteristics over East Asia in early summer: effects of the subtropical jet and lower-tropospheric convective instability.
 - 12) S. MATSUMURA, T. HORINOCHI, S. SUGIMOTO and T. SATO: *J. Climate*, 29, 8, 3075-3093, doi:<http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0691.1> (2016)
Response of the Baiu rainband to northwest Pacific SST anomalies and its impact on atmospheric circulation
 - 13) S. MATSUMURA and T. HORINOCHI: *Scientific Reports*, 6: 37765, doi:10.1038/srep37765 (2016)
Pacific Ocean decadal forcing of long-term changes in the western Pacific subtropical high

Ⅱ－４ 温暖化に伴う北極圏雪氷の変化に起因する日本・東アジア降水への影響解明

国立大学法人岡山大学

自然科学研究科

野沢 徹

平成27～29年度累計予算額：5,978千円（うち平成29年度：1,916千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

近年の地球温暖化にともなって北極圏雪氷が顕著に減少していることが報告されている。また、北極圏雪氷の変動が日本や東アジア域の降水現象に少なからぬ影響を及ぼしているとも指摘されている。以上のことから、本研究では主にユーラシア大陸における春季の積雪に着目し、地球温暖化に伴う北極圏雪氷の減少が、日本や東アジア域の降水現象に及ぼし得る影響について調査した。従来の陸域積雪データには少なからぬ問題点のあることが指摘されていることから、ここでの解析には、これらの問題点を改善した衛星観測データを用いた。ユーラシア大陸における平均的な積雪被覆率の季節変化には大きな差異は認められなかったものの、年々変動の空間分布や経年変化には若干の差異が認められた。同様に、先行研究とはやや傾向が異なるものの、春季平均した積雪被覆率と西日本を中心とした領域で平均した夏季降水量との間には有意な相関が認められた。春季ユーラシア大陸における月平均積雪被覆率の長期変化傾向を調査した結果、積雪被覆率が有意に減少している領域が、3月から6月にかけて中央アジアから西シベリア、中央シベリア、北極海沿岸の北シベリアへと北東方向に推移することが分かった。ユーラシア大陸の春季積雪減少と日本や東アジア域の大気循環場の変化との関連性を調べるため、西シベリアで領域平均した4月の積雪被覆率を基準として、全球客観解析データの大気場および陸面の合成図解析を行った。西シベリアにおいて4月に少雪である時には、西シベリア南部～中央アジアにおいて、地表面温度や土壌水分量に6月まで継続して有意な差が見られた。また、日本からその東側の太平洋上では6月の200hPa面高度が有意に低く、気圧の谷が形成されることで上層のジェット気流が南へ蛇行していることが示された。4月の西シベリアにおける積雪変動と6月の日本付近における大気変動との相関について、大気大循環モデルを用いた感度実験を行ったものの、その具体的なメカニズムの特定には至らなかった。ここで見られた有意な相関が偶然出会った可能性は否定できないものの、モデルのバイアスや感度実験の設定に問題があった可能性もあり、継続した調査が必要である。

〔キーワード〕

地球温暖化、積雪減少、大気陸面相互作用

1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC）の第5次評価報告書によれば、近年の地球温暖化に伴い、北極海における夏季の海氷面積や北半球高緯度陸域における春季の積雪面積など、北極圏雪氷が顕著に減少している。北極海における夏季の海氷面積は1980年頃から減少し始め、2000年頃を境として海氷減少が加速し、2013年には9月の平均値として観測史上最小を記録している。北半球高緯度陸域における春季の積雪面積も、北極海の海氷面積ほどではないものの、少なくとも2000年以降には顕著な減少傾向が観測されている。

このような北極圏雪氷の変動は、日本・東アジア域の降水現象にも少なからぬ影響を及ぼしていることが指摘されている¹⁾。例えば、北極海における夏季の海氷面積の減少は、冬季日本における降水（降

雪)現象に影響を及ぼしていることが明らかになってきた¹⁾。北半球の夏季における北極海の海水面積の減少は、主にロシア北中部の北極海沿岸にあるバレンツ海で生じているが、海水が減少して海水面が露出した結果、続く秋季に、温暖化した北極海からその上空の大気に過剰な熱が供給され、北極海上空の大気温度は上昇する。一方で、その南側にある北半球高緯度陸域では下層大気が冷却される。シベリア域に貯えられた寒気は、続く冬季に風下側に位置する日本海へと流出して、さらに下流に位置する日本に寒波をもたらす。また、温暖化した日本海からの豊富な水蒸気供給とも相まって、日本海側の山沿いの地域には豪雪をもたらしている可能性が高い。

一方で、北半球高緯度陸域における春季もしくは初夏の積雪面積の減少が、北半球中緯度における夏季の極端な気象現象に影響を及ぼしている可能性を指摘する研究も存在しているが²⁾、統計解析におけるシグナルの有意性はさほど高くはない上に、そのメカニズムについては明らかになっていない。このような北半球高緯度域の積雪に関する研究においては、従来から米国海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA)の積雪分布データが利用されてきた。当該データは1966年から存在するものの、初期のデータは担当者による手描き図をデジタル化したものであり、担当者交代等にもなうバイアスの存在が指摘されている。また、空間解像度も初期には約190kmと粗く、解析手法の変遷にもなう経年変化の存在も懸念されている。

2. 研究開発目的

上述のように、地球温暖化にともなって北極圏雪氷が有意に減少しており、また北極圏雪氷の変動は日本および東アジア域の大気循環変動にも少なからず影響を及ぼしている可能性がある。北極圏雪氷のうち、北極海の夏季海水面積の減少が日本・東アジア域の冬季大気循環および降水(降雪)現象に及ぼす影響については、複数の先行研究により調査・研究が進められているものの、北半球高緯度陸域における積雪減少が日本・東アジア域の冬季大気循環および降水現象に及ぼす影響については、必ずしも十分には調べられていない。また、従来利用されている北極圏の海水や積雪の衛星観測データ(NOAAのデータ)には、手描き作業の担当者交代等にもなうバイアスや解析手法の変遷にもなう経年変化など、複数の問題点が存在することが分かっている。以上より、本研究では、後で述べるような様々な改善が施されている新たな衛星観測データと全球客観解析データの解析、および大気大循環モデルを用いた感度実験などにより、近年の地球温暖化に伴う北極圏雪氷の変化、特にユーラシア大陸における春季積雪の変動が、日本および東アジア域の対流圏における大気循環の変動に与える影響について検討し、日本・東アジア域降水の将来変化に関する知見を得ることを目的とする。

3. 研究開発方法

先にも述べたように、北半球高緯度域の積雪に関する研究においては、従来からNOAAの積雪分布データが利用されてきた。当該データは1966年から存在するものの、初期のデータは担当者による手描き図をデジタル化したものであり、担当者交代等にもなうバイアスの存在が指摘されていた。また、空間解像度も初期には約190kmと粗く、解析手法の変遷にもなう経年変化の存在も懸念されていた。一方、宇宙航空研究開発機構(Japan Aerospace eXploration Agency; JAXA)地球観測研究センター(Earth Observation Research Center; EORC)では、次期気候変動観測衛星(Global Change Observation Mission - Climate; GCOM-C)による観測データの気候値的なデータベースとするため、AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)およびMODIS(MODERate resolution Imaging Spectroradiometer)センサを用いた長期間にわたる衛星観測データ(JAXA Satellite Monitoring for Environmental Studies; JASMES)を開発してきた。このJASMES積雪分布データは、1979年以降のデータに対して処理されており、統一かつ客観的な基準で解析されていること、異なるセンサ間のバイアスが抑制されていること、将来的にはGCOM-C搭載センサへの接続も考慮されていること、など、長期的な気候変動・変化の解析に適している点に特徴がある。

以上より、本研究では、緯度0.05度×経度0.05度毎の積雪フラグであるJASMES積雪分布データから、任意の解像度(緯度1度×経度1度毎、など)の積雪面積/積雪被覆率を求めるプログラムを作成した。空

間解像度を任意の解像度に対して対応させるため、その変換に際して厳密な定式化は採用せず、JASMESオリジナルの解像度（緯度0.05度×経度0.05度）における各格子点の面積を求めておき、その中心が含まれる変換後の任意解像度の格子に、当該面積をすべて含めることで計算プログラムの簡略化および計算コストの低減を図った。これにより、一般的な観測データが採用している等緯度経度格子だけでなく、緯度方向に不等間隔であるような、全球数値モデルが採用している格子点にも簡単に適用することが可能となっている。

このようにして求めた任意解像度の積雪面積/積雪被覆率データと、先行研究で利用されてきた米国海洋大気庁（NOAA）の積雪データとを比較しながら、本研究での主要な対象領域であるユーラシア大陸上における積雪被覆率の季節変化や長期変動特性について統計的に解析した。本研究で用いるJASMESの積雪データには、従来にはない新たな試みとして、積雪と判断された格子点に対して、それが湿った雪（湿雪）なのか、あるいは乾いた雪（乾雪）なのか、の情報も付加されている。近年のように地球温暖化が進行していく段階では、積雪域の境界（雪線）付近では顕著な積雪域の後退（積雪面積の減少）が見られると予想されるが、雪線から離れた地域では、積雪面積/積雪被覆率に大きな変化は見られないと思われる。一方で、積雪域の上空にある大気温度が上昇することで積雪面の融解が始まり、積雪面の放射特性が変化して短波放射のアルベドが変化することで放射収支が変化し、雪面上空の大気温度をさらに変化させるようなフィードバックがはたらくことも考えられる。今回、JASMESで新たに付加された乾雪/湿雪の情報を用いれば、このようなフィードバックの影響も検討することが可能であるが、現段階では、直接観測との比較・検証などがまだ不十分と判断されたため、本研究での活用は見送っている。

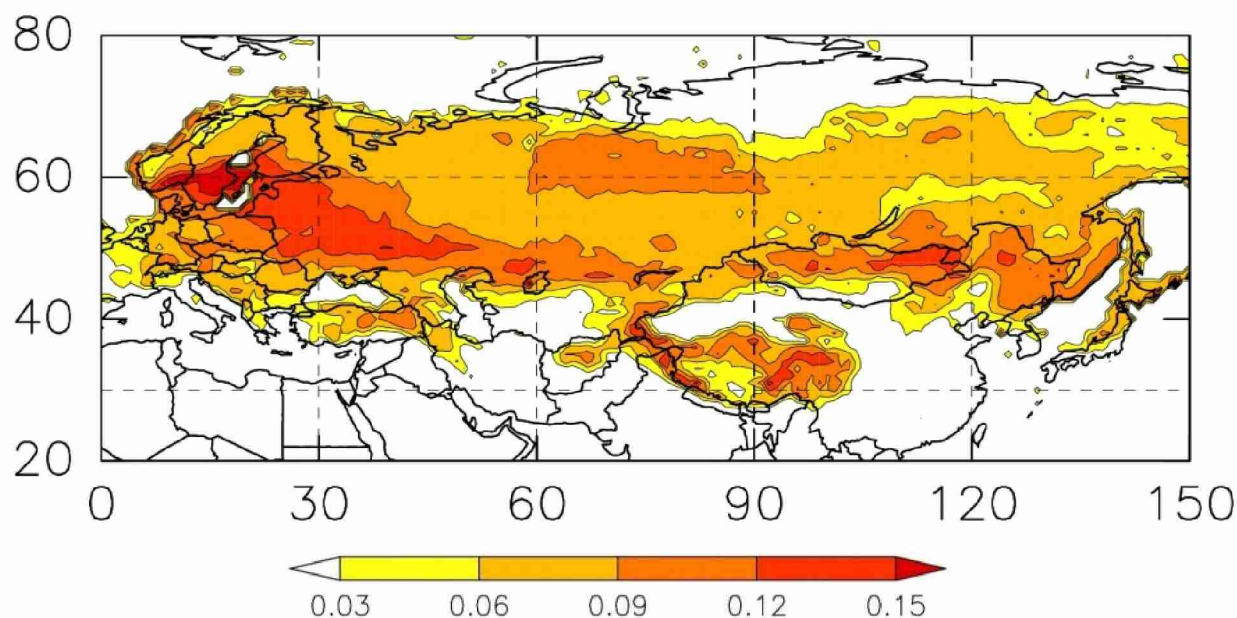
春季シベリア域における積雪減少と、日本および東アジア付近の夏季大気循環場との相関について検討するため、上述した手法により解像度を粗くするとともに積雪判別データから積雪被覆率に変換したJASMESデータと、気象庁より提供されている55年長期再解析データ（the Japanese 55-year Reanalysis; JRA-55）を用いて、統計解析を行った。解析期間は、両データが共に存在する1979～2015年とした。下記4.でも詳しく説明するが、ユーラシア大陸における春季積雪被覆率は、近年の地球温暖化にともない顕著な減少傾向を示している。そのような積雪の変動と高い相関を持つ大気・陸域の変動を調べるため、有意な積雪被覆率の減少トレンドが見られたエリアで領域平均した積雪被覆率を基準として、大気循環場および陸面状態との相関解析を行った。積雪の変化が気候に及ぼす影響としては、地表面のアルベドが大きく変化することで放射収支を変化させるアルベド効果と、融雪時期が変化することにより地表面の土壌水分量が変化することで放射収支を変化させる融雪水効果がある。後者は、時間遅れを伴う気候応答をもたらす可能性があるため、解析には同時相関に加えてラグ相関も対象として行った。

春季シベリア域における積雪減少と、日本および東アジア付近における夏季大気循環場との間に何らかの有意な相関関係が見られたとしても、衛星観測データおよび客観解析データを用いた統計解析だけでは、その背景にある具体的なメカニズムを知ることはできない。そこで、全球大気大循環モデルを用いた感度実験にも着手した。実験に用いたモデルは、東京大学大気海洋研究所と国立環境研究所、海洋研究開発機構が中心となって開発・改良してきたMIROCである。積雪減少にともなう気候影響について調べるため、海面水温と海水分布のデータは気候値を用いている。本来、積雪面積の減少は大気側の変動に応じて生じる現象と考えられるが、ここでは、いわゆる気候値を与え続けたコントロール実験と、積雪アルベドの時空間変化を人工的に減少させることにより、春季ユーラシア大陸における積雪を強制的に減少させた実験を行い、両者の差を見ることで解析を行った。

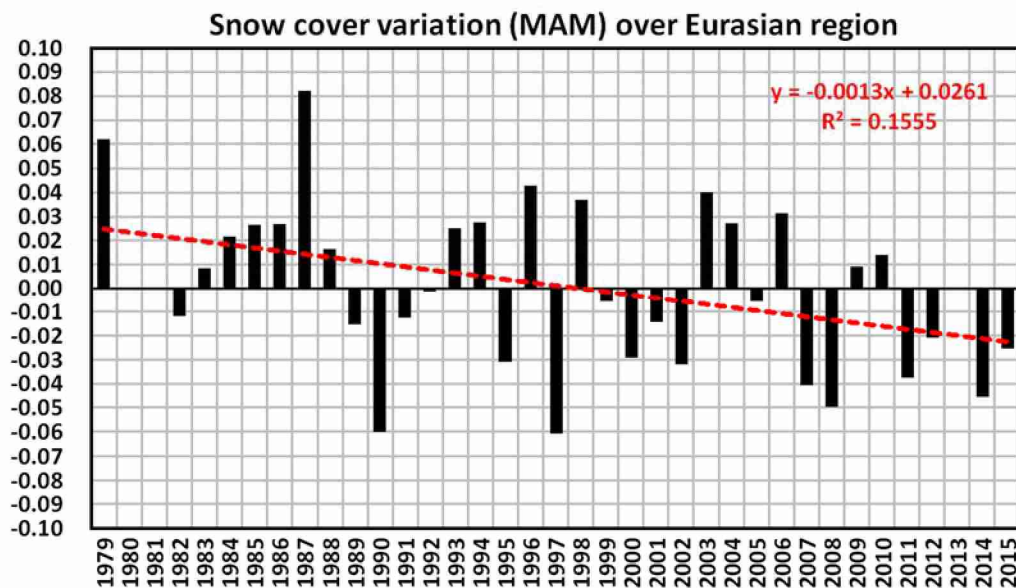
4. 結果及び考察

北半球高緯度陸域における積雪面積/積雪被覆率の観測値として、多くの先行研究で用いられてきたNOAAの積雪データとの相違について調査するため、緯度0.05度×経度0.05度毎の積雪フラグであるJASMESの積雪分布データから、緯度1度×経度1度毎の積雪面積/積雪被覆率を求め、比較・解析を行った。季節平均したユーラシア大陸上での積雪分布は、冬季、春季、夏季いずれについても、先行研究と比較して大きな差異は認められなかった。ユーラシア大陸上の北緯45～70度、東経20～140度の範囲で領域平均した積雪被覆率の季節変化を見ると、NOAAの積雪分布データと比較して、夏から秋にかけてはJASMESデータでもほぼ同じ季節変化を示しているが、冬から春にかけては、JASMESデータの方がやや少ない傾向が見られた。これは、（地球温暖化の影響をあまり受けていないために近年よりも積雪面積が後退していないと期待される）1970年代のデータがJASMESには含まれていないこと、NOAAデータは、特に空間解像度の粗い初期の頃に積雪分布を過大評価している可能性が高いことが原因と考えられる。

日本・東アジア域の夏季降水に影響を及ぼしていると考えられる、春季ユーラシア大陸上の積雪被覆率について、1979～2015年の期間で求めた標準偏差を図(4)-1に示す。緯度方向に見ると、北緯40～50度付近を中心として、春季平均した積雪被覆率の年々変動が大きいことが分かる。また、経度方向には、東経20～40度付近と東経110～130度付近に変動のピークが見られる。解析期間が異なるものの、これらの特徴はNOAAデータと概ね一致していた。一方で、年々変動の大きさはNOAAデータに比べてやや小さめであり、NOAAの積雪分布データに過大評価傾向があることと整合的な結果となった。図(4)-2は、ユーラシア大陸上（北緯45～70度、東経20～140度）で領域平均した春季積雪被覆率の経年変化を、期間平均からの偏差で示す。ユーラシア大陸上で平均した春季積雪被覆率の年々変動は、NOAAデータとあまり大きな差異は見られなかったが、JASMESデータの方が全体的に振幅が小さく、1980年代後半から1990年代前半にかけてNOAAデータとは異なる変動を示していた。赤い破線は線形回帰した長期変化傾向を示しており、ユーラシア大陸上で平均した春季積雪被覆率の減少傾向は、信頼度95%で有意であった。

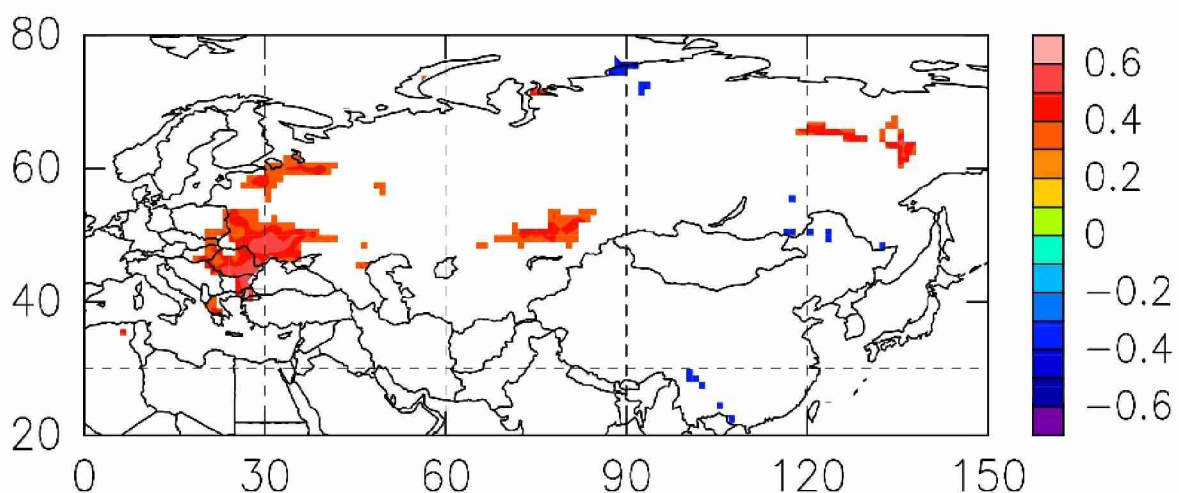


図(4)-1 春季平均した積雪被覆率の標準偏差の地理分布。1979～2015年の平均からの偏差より求めた。



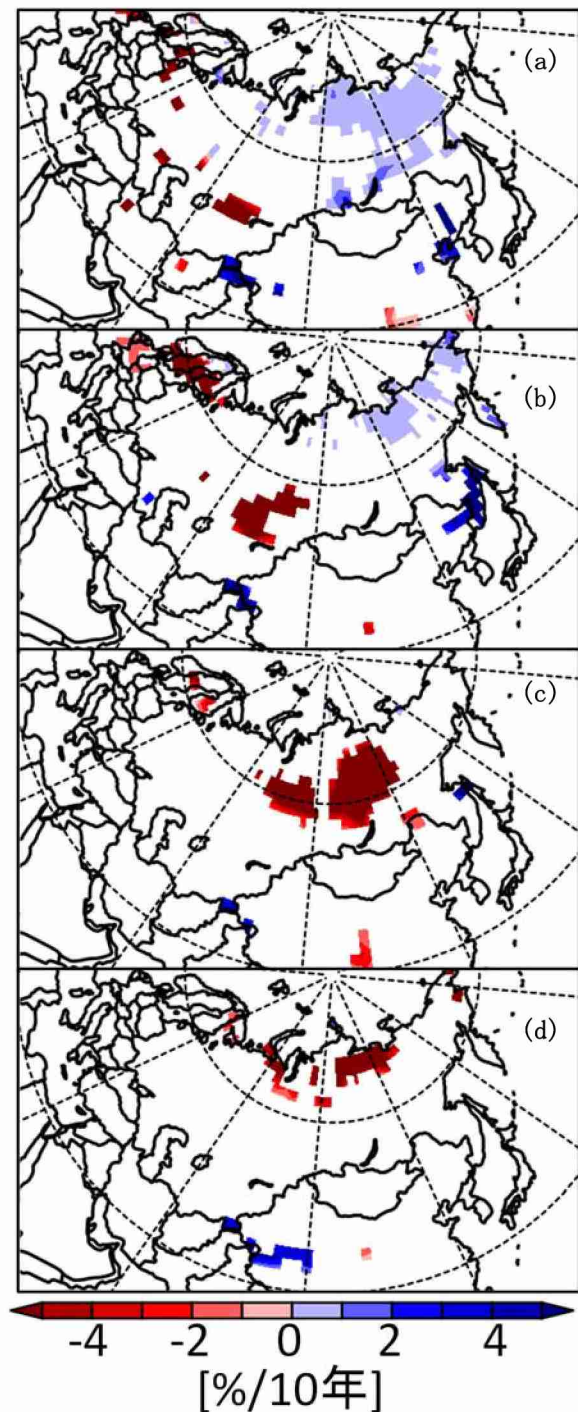
図(4)-2 ユーラシア大陸上の北緯 45～70 度、東経 20～140 度の領域で平均した春季積雪被覆率の経年変化。赤い破線は線形回帰直線を示す。

春季積雪被覆率の年々変動が、日本・東アジア域の降水にどのような影響を及ぼしているか検討するため、ユーラシア大陸の春季積雪被覆率と日本・東アジア域の夏季降水量との相関を調べた。図(4)-3は、西日本を中心とした東アジア域（北緯30～45度、東経115～140度）で領域平均した夏季降水量とユーラシア大陸の春季平均積雪被覆率との相関係数の地理分布を示す。なお、降水量のデータにはドイツ気象局（Deutscher Wetterdienst; DWD）の全球降水気候センター（Global Precipitation Climatology Centre; GPCC）から提供されている、緯度1度×経度1度格子の月平均陸域降水量データを用いている。また、相関係数の信頼度90%以上の領域しか図示していない点に注意が必要である。これを見ると、ユーラシア大陸の西側に位置する東ヨーロッパ付近、中央アジア北部、東シベリアの領域で、春季平均積雪被覆率の年々変動と日本・東アジア域の夏季降水量の年々変動の間に有意な相関のあることが分かる。NOAAの積雪データを用いた先行研究³⁾による同様の解析結果では、東ヨーロッパから中央アジアにかけての北緯50度あたりに有意な正の相関を示す領域が見られたが、今回のJASMESデータを用いた解析結果にはそのような領域に有意なシグナルは見られなかった。また、先行研究では北緯50度東経120度の中露国境付近を中心とした領域で有意な負のシグナルが見られていたが、そのようなシグナルは図(4)-3にもわずかに見られるものの、ほとんど有意とは言えないものとなった。



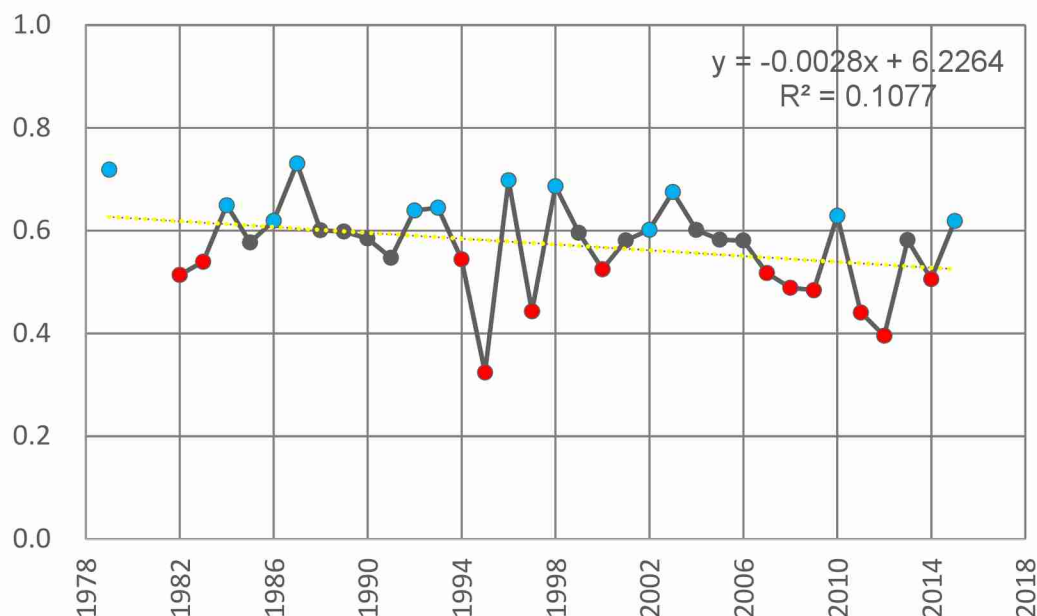
図(4)-3 西日本を中心とした東アジア域（北緯 30～45 度、東経 115～140 度）で領域平均した夏季降水量とユーラシア大陸の春季平均積雪被覆率との相関係数の地理分布。有意水準 90%以上の領域のみを図示している。

図(4)-2からも明らかなように、人工衛星観測に基づく広域積雪データの解析から、春から初夏にかけての季節において、ユーラシア大陸上の積雪が減少傾向にある。具体的にどの季節にユーラシア大陸上のどの領域において顕著に積雪が減少しているのか調べるために、月平均積雪被覆率の長期変化傾向を求めた。図(4)-4は、3月から6月にかけての月平均積雪被覆率の長期トレンドの地理分布を示す。図(4)-3と同様に、線形トレンドが信頼度95%以上で有意な領域のみ図示している。3月には、北半球陸域において積雪被覆率が顕著に減少している領域はあまり多くはないが、アラル海とバルハシ湖に挟まれた中央アジアの狭い範囲において、積雪被覆率が有意に減少している。4月になると、積雪被覆率が長期間にわたって減少している領域がバルハシ湖の北側に広がっていることが分かる。加えて、4月には北ヨーロッパのバルト海沿岸地域においても、積雪被覆率が有意に減少していることが分かる。また、図には示さないが、4月には西シベリア低地から中央シベリア高原にかけての広い範囲で、積雪表面を覆う雪が乾雪から湿雪へと変化し、積雪被覆率には大きな変化はなくても、積雪表面の融解が温暖化とともに進行していることが示唆された。なお、狭い範囲ではあるものの、4月には日本海の北側に位置するロシアの沿海州において、積雪被覆率の有意な増加傾向も見られている。5月には、積雪被覆率が有意に減少している領域がさらに北上して西シベリア低地の中北部にまで広がるとともに、その東側の中央シベリア高原（バイカル湖の北側）にも拡大している。6月になって初夏を迎えると、積雪被覆率が有意に減少している領域は北極海沿岸の北シベリア低地に到達している。以上のことを総合すると、ユーラシア大陸上で積雪被覆率が統計的に有意に減少している地域は、3月から6月にかけて、中央アジアから西シベリア低地の南部、西シベリア低地中北部～中央シベリア高原、北極海沿岸の北シベリア低地へと、北東方向に推移していくことが分かった。これらの地域では、近年の地球温暖化にともない、積雪域が後退することで地表面が露出してきていることが示唆される。



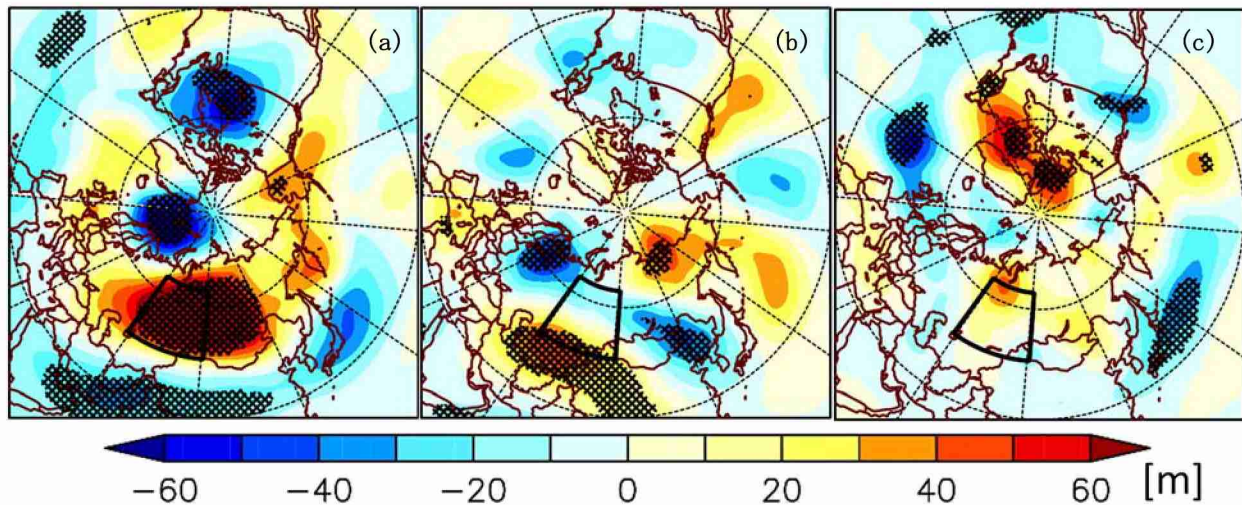
図(4)-4 1979～2015年における月平均積雪被覆率の長期変化傾向の地理分布。線形トレンドが有意水準95%で有意な領域のみ図示している。単位は %/10年。上段より、(a) 3月、(b) 4月、(c) 5月、(d) 6月を示す。

春季シベリア域における積雪減少と関連した、日本および東アジア付近における大気循環場の変動を抽出するため、有意な積雪被覆率の減少トレンドが見られたエリアで領域平均した積雪被覆率を基準として、大気循環場および陸面状態との相関解析を行った。図(4)-5には、4月に統計的に有意な長期積雪減少トレンドを示した北緯45～65度、東経60～90度の領域で平均した積雪被覆率の経年変化を示す。領域平均した積雪被覆率は年々変動を示しつつ減少しているが、全35年のうち、領域平均した積雪被覆率の大きい方から12年（図(4)-5において青丸となっている年）を多雪年、少ない方から12年（図(4)-5において赤丸となっている年）を少雪年とし、気象庁より提供されている55年長期再解析データ（JRA-55）に対して多雪年および少雪年それぞれ12年の平均値（合成図）を求め、多雪年の合成図から少雪年の合成図を差し引くことで、ユーラシア大陸における4月の積雪減少と相関の高い大気循環場のパターンを抽出した。

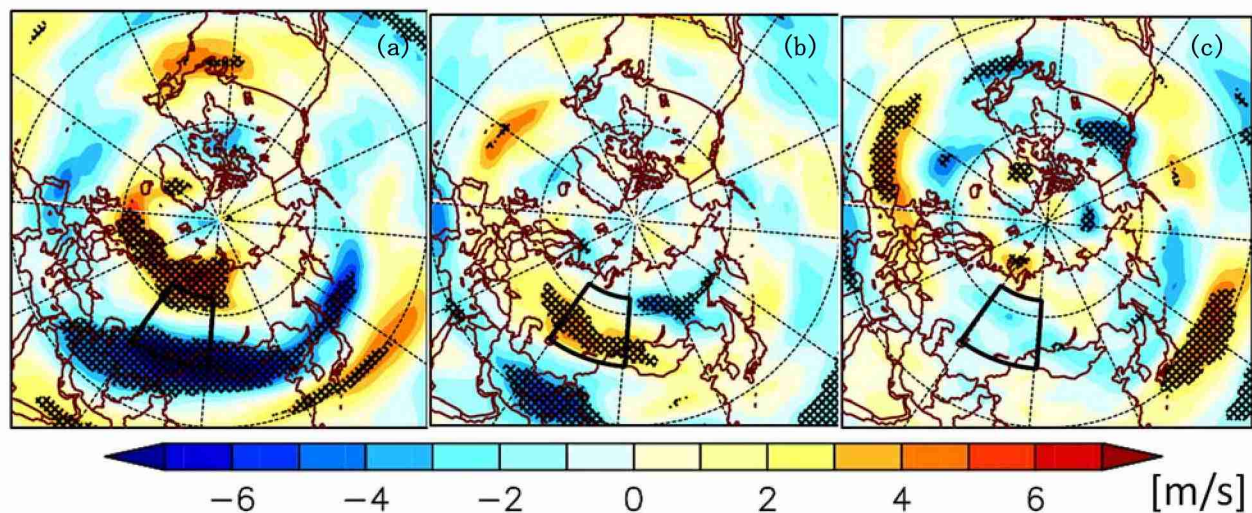


図(4)-5 ユーラシア大陸において4月の積雪被覆率が有意に減少した北緯45～65度、東経60～90度の領域で平均した積雪被覆率の経年変化。黄色い破線は線形回帰直線を示す。青丸は領域平均した積雪被覆率の上位12年（多雪年）、赤丸は下位12年（少雪年）であることを示している。

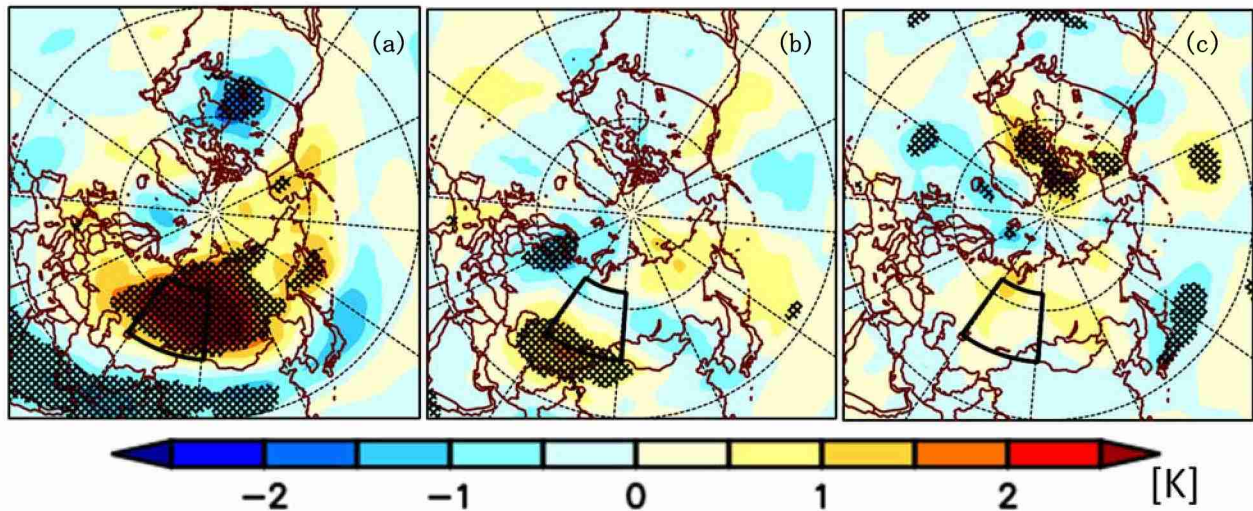
図(4)-6は、統計的に有意な減少トレンドが見られた西シベリア域（北緯45～65度、東経60～90度）で領域平均した4月の積雪被覆率を基準として、上記手順にしたがって求めた月平均300hPa面ジオポテンシャル高度場の差（少雪年－多雪年）を示す。4月（図(4)-6(a)）には、積雪被覆率が統計的に有意に減少している西シベリア域の上空およびそのやや東側において、対流圏上層の300hPa面ジオポテンシャル高度が有意に高い。この図は、少雪年12年の平均値から多雪年12年の平均値を差し引いた差であるから、このことは、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と同領域上空の4月のジオポテンシャル高度の上昇の間により同時相関があることを示唆している。また、北ヨーロッパのスカンジナビア半島上空やカナダのハドソン湾上空では、逆に300hPa面ジオポテンシャル高度が有意に低下しているシグナルも見受けられる。5月（図(4)-6(b)）になると、西シベリア域や北ヨーロッパ域における300hPa面ジオポテンシャル高度場の差が有意である領域は狭くなるとともにその中心がやや南側へと移動している。一方で、シグナルが必ずしも有意ではないものの、ジオポテンシャル高度場の上昇域および低下域が、西シベリア域南部を開始点として北緯50度付近を東側に連なる波列状の構造を呈していることが見て取れる。日本・東アジア域に着目すると、4～5月の対流圏上層のジオポテンシャル高度場には、4月の西シベリア域における積雪被覆率と有意に関係するようなシグナルは特に見られなかった。ところが、6月（図(4)-6(c)）になると、日本の本州南部をすっぽり含み、その東側にも伸びた領域において、300hPa面ジオポテンシャル高度の有意な低下が見られることが分かった。



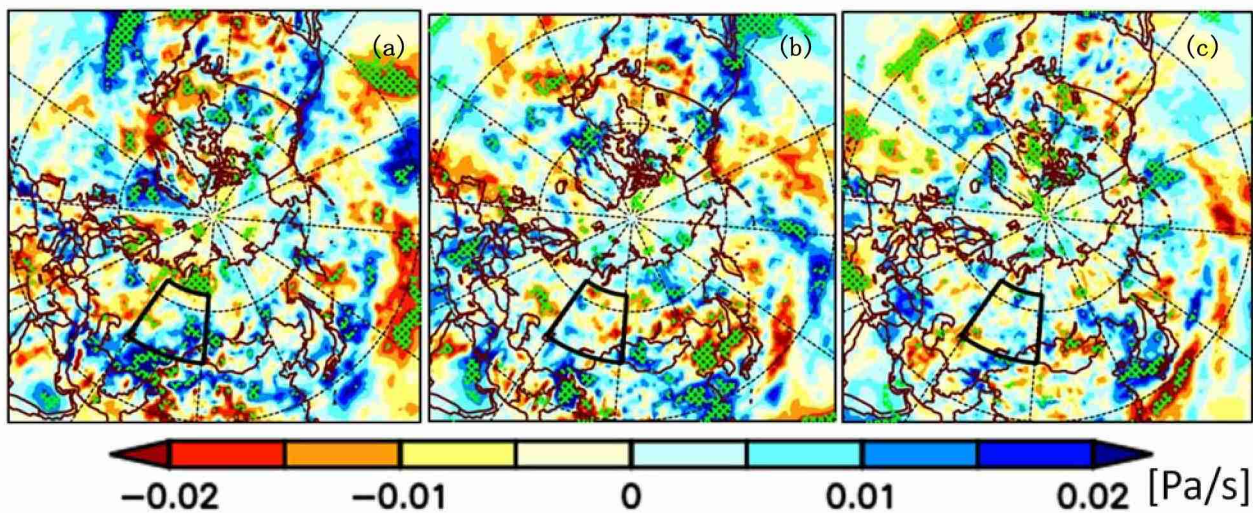
図(4)-6 月平均した 300hPa 面ジオポテンシャル高度場の差。(a) 4 月、(b)5 月、および (c) 6 月。太実線で囲まれた西シベリア域における 4 月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも 12 年平均）を示す。単位は m。網掛け領域は有意水準 95% で差が有意な領域を意味する。



図(4)-7 月平均した300hPa面東西風の差。(a) 4月、(b)5月、および (c) 6月。太実線で囲まれた西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位はm/s。網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。



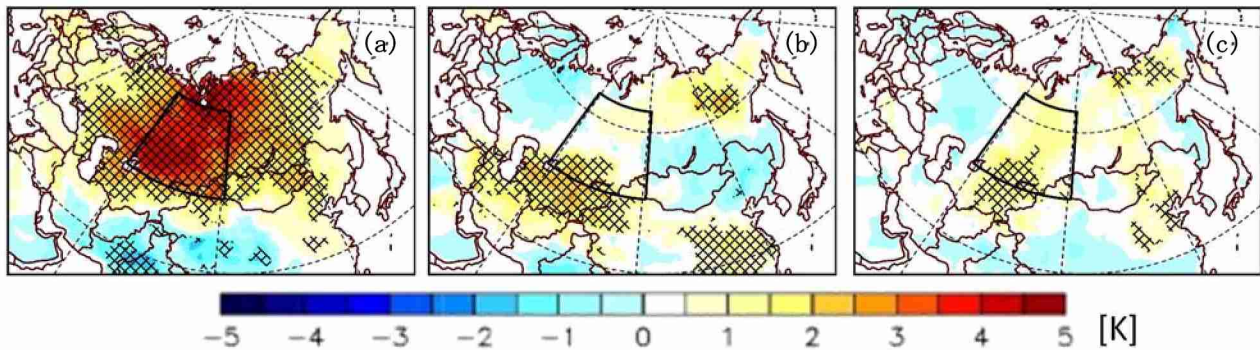
図(4)-8 月平均した500hPa面気温の差。(a) 4月、(b)5月、および (c) 6月。太実線で囲まれた西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位はK。網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。



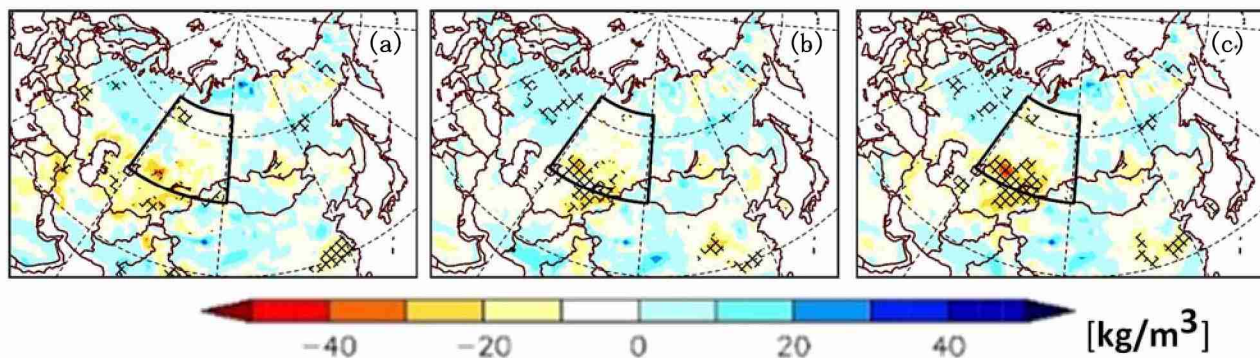
図(4)-9 月平均した500hPa面鉛直気圧速度の差。(a) 4月、(b)5月、および (c) 6月。太実線で囲まれた西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位はPa/s。緑色の網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。

同様に、図(4)-7は、西シベリア域（北緯45～65度、東経60～90度）で領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準とした、月平均300hPa面東西風の差（少雪年－多雪年）を示している。4月（図(4)-7(a)）には、積雪被覆率が統計的に有意に減少している西シベリア域の南側で、対流圏上層の300hPa面東西風が西向き偏差を示している。少雪年12年の平均値から多雪年12年の平均値を差し引いた差であることを考慮すると、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と同領域の南側上空における4月の東西風の西向き加速の間により同時相関があることを示唆している。また、西シベリア域の北側では対流圏上層の300hPa面東西風が東向き偏差を示しており、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と同領域の北側上空における4月の東西風の東向き加速の間により同時相関があることを示唆している。西シベリア域上空の東西風が南側で西向き加速、北側で東向き加速の傾向があることから、同領域上空のジェット気流は北側に移動することが示唆される。すなわち、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と同領域上空の4月のジェット気流の北向き移動の間により同時相関があることになる。なお、このことは、図(4)-6(a)で示した300hPa面ジオポテンシャル高度場のシグナル（西シベリア域上空の高度場の上昇）とも整合的である。5月（図(4)-7(b)）になると、西シベリア域上空においてジェット気流を北向きに移動させるようなシグナルは弱くなるものの、基本的には4月とほぼ同様のシグナルが見られている。また、シグナルの統計的有意性は見られないものの、北緯50度付近の西シベリア域から北米大陸にかけて（ジェット気流の風下側）の範囲で、図(4)-6(b)の高度場と同様に波列状の構造が存在していることも特徴的である。日本・東アジア域に着目すると、4～5月の対流圏上層のジェット気流には必ずしも明瞭なシグナルは見られなかったが、6月（図(4)-6(c)）になると、日本の本州南岸から日付変更線付近にかけて東側に伸びた領域において、300hPa面東西風が東向きに有意な偏差を示していることが分かった。シグナルは有意ではないものの、その北側上空に弱い西向き偏差が見られることから、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と、日本付近の6月における対流圏上層ジェット気流の南下との間に、2カ月の遅れ（ラグ）を持った相関があることが示唆される。

対流圏中層におけるシグナルについても調べるため、500hPa面の気温（図(4)-8）および500hPa面の鉛直気圧速度（図(4)-9）についても同様の解析を行った。西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と関連した500hPa面気温の変化分布は、300hPa面ジオポテンシャル高度の変化（図(4)-6）と非常によい一致を示している。このことは、対流圏中層の大気温度が上昇もしくは下降したことにもない、対流圏上層のジオポテンシャル高度が上昇もしくは下降していることを示しており、両者の変化が基本的には熱力学で強く関係づけられていることを示唆している。一方で、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と関連した500hPa面の鉛直気圧速度の変化は、その分布の空間構造が細かくやや複雑であり、他の大気変数と比較して、統計的に有意な領域もやや少なくなっている。しかしながら、5月（図(4)-9(b)）になると、他の大気変数の偏差に波列状の構造が明瞭に見られることに呼応して、500hPa面鉛直気圧速度場においても、日本・東アジア域から北米大陸西岸にかけての北緯40～50度付近において、上昇流偏差を示す（寒色系）領域と下降流偏差を示す（暖色系）領域とが交互に並んでいる構造が見受けられる。ただし、その位相は、300hPa面ジオポテンシャル高度など他の変数と比較して、4分の1波長程度ずれているように見える。例えば、日本列島の上空付近では、300hPa面ジオポテンシャル高度の差は、西側の負偏差（高度低下）と東側の正偏差（高度上昇）にはさまれて、ほぼ差がない状況にあるが、500hPa面の鉛直気圧速度の差でみると、ピークが2ヵ所に分裂しているものの、大雑把には下降流偏差の中心の位置に当たっており、このようなズレが東西方向に広がっていることが確認できる。このことは、西シベリア域における4月の積雪被覆率の減少と関連して、1カ月の遅れ（ラグ）を持った相関が、日本・東アジア域から東側、北米大陸西岸に至る領域の大気循環場に、波列状の構造を持って広く存在することを示唆している。

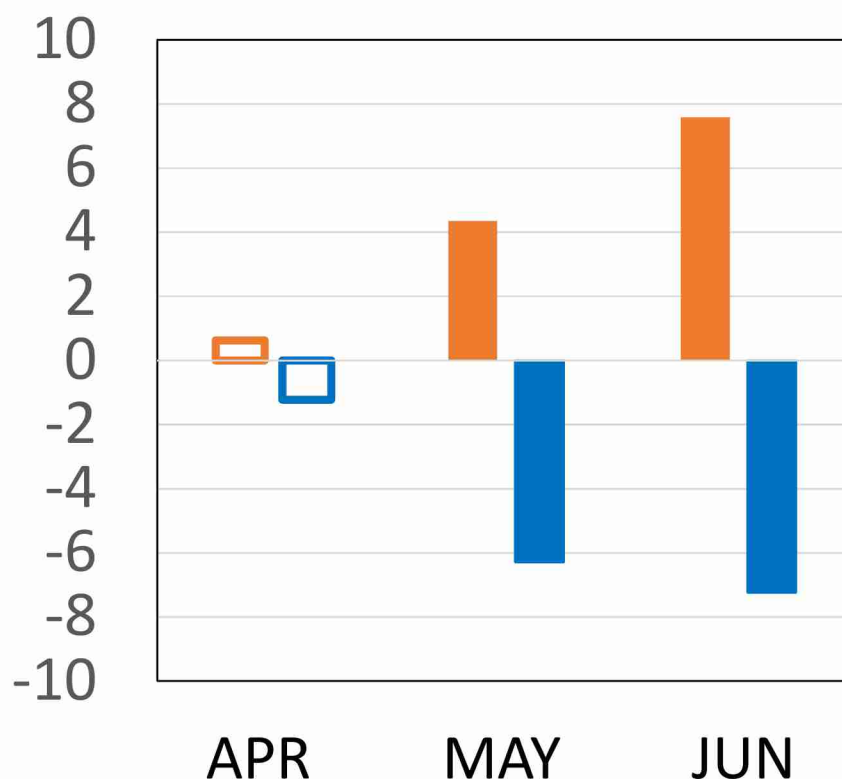


図(4)-10 月平均した地表面温度の差。(a) 4月、(b) 5月、および (c) 6月。太実線で囲まれた西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位はK。網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。



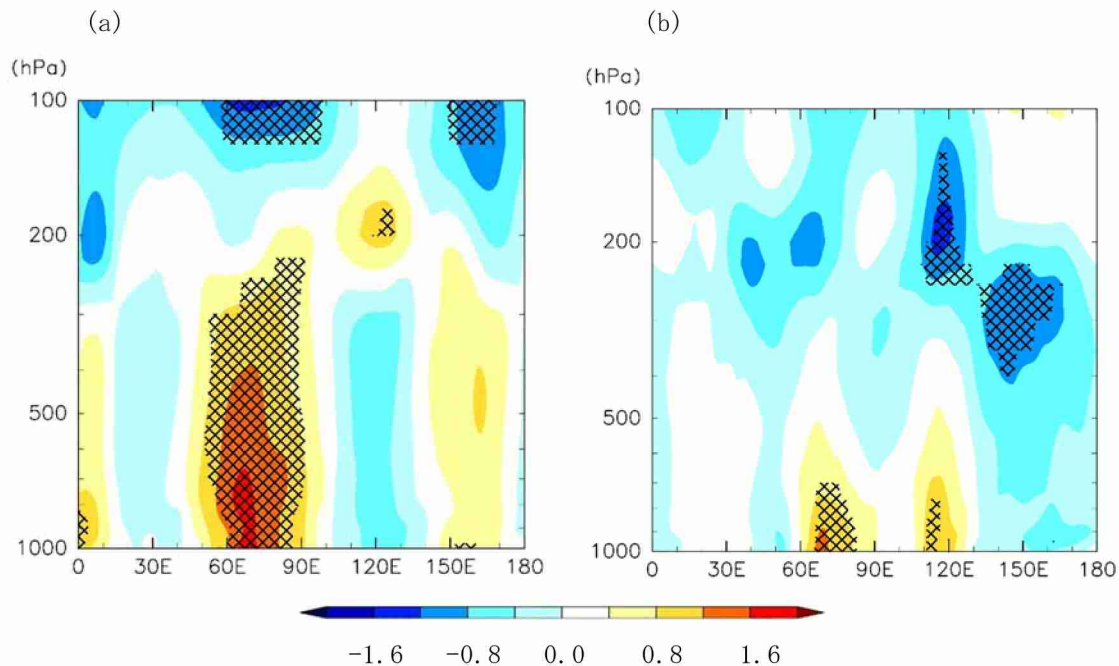
図(4)-11 月平均した土壌水分量の差。(a) 4月、(b) 5月、および (c) 6月。太実線で囲まれた西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位は kg/m^3 。網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。

過去35年間の衛星観測データ（JASMES）の解析から、積雪被覆率の有意な長期減少傾向が確認された西シベリア域（北緯45～65度、東経60～90度）を対象として、領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準とした大気循環場の合成図解析を行った結果、1ヶ月後の5月に、弱いながらも広い範囲で波列状のシグナルが見られるとともに、2ヵ月後の6月には、日本付近で上層のジェット気流が南へ有意に蛇行するようなシグナルが見られた。ここでの相関的な解析では、これらの因果関係については何も言えないが、仮に積雪変動のシグナルが2ヵ月もの時間遅れを持って大気へと伝わるとしたら、大気よりも熱容量が大きい地表面における何らかのプロセスが介在している可能性が高いと考えられる。このような観点から、地表面温度と土壌水分量についても同様に合成図解析を行った。図(4)-10は、西シベリア域（北緯45～65度、東経60～90度）で領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準とした、月平均地表面温度の差（少雪年－多雪年）を示している。4月（図(4)-10(a)）にはユーラシア大陸の広範囲で統計的に有意な差が見られ、少雪年の方が多雪年より地表面温度が高いことを示しているが、この傾向は、西シベリア域の南側に位置する中央アジア域で5～6月まで持続していることが分かった。また、図(4)-11は、西シベリア域で領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準とした、月平均土壌水分量の差（少雪年－多雪年）を示しているが、地表面温度の差が顕著に見られる西シベリア域南側の中央アジア域において土壌水分量が少ない傾向が見られ、このシグナルはむしろ5～6月に向かうにつれて統計的に有意となっている。



図(4)-12 月平均した顕熱フラックス（オレンジ色）および潜熱フラックス（青色）の差。左から順に、4月、5月、6月を示す。図(4)-10、図(4)-11の地表面気温および土壌水分量の合成図解析において、有意な差が見られた中央アジア域（北緯40～50度、東経60～90度）で領域平均した上向きフラックスの、少雪年12年平均から多雪年12年平均を差し引いている。単位は W/m^2 。色塗りした（白抜きでない）棒グラフは有意水準95%で差が有意であることを意味する。

地表面温度および土壌水分量に有意な差が見られた中央アジア域（北緯40～50度、東経60～90度）において、西シベリア域における4月の積雪被覆率の多寡にともなう地表面熱フラックスの差異を調べた。図(4)-12は、中央アジア域で領域平均した上向き顕熱フラックスと潜熱フラックスに対して、これまでと同様に、西シベリア域で領域平均した4月の積雪被覆率の多寡にともなう差（少雪年－多雪年）を求めたものである。4～6月いずれについても、西シベリアにおける4月の積雪被覆率が少ない年には、その南側に位置する中央アジア域において上向き顕熱フラックスが多く、潜熱フラックスは少ないことが分かる。特に、その傾向は5～6月に強く、シグナルも統計的に有意となっている。上向き顕熱フラックスが多いということは、地表面温度が高いことと整合的である。また、上向き潜熱フラックスが少ないということは、土壌水分量が少なく地表面が乾いていることと整合的である。上向き潜熱フラックスが少ないということは地表面から大気への水分蒸発が少なく地表面に熱がこもりやすくなる、すなわち、地表面温度が高くなることと整合的であり、因果関係は明らかではないものの、日本・東アジア域の大気循環場との1～2カ月遅れの相関に対して、地表面過程が何らかの関係を持っている可能性を示唆していると考えられる。



図(4)-13 (a) 5月および (b) 6月における月平均気温の差。西シベリア域における4月の積雪被覆率を基準として、領域平均値が小さい年から大きい年を引いた差（少雪年 - 多雪年、いずれも12年平均）を示す。単位はK。網掛け領域は有意水準95%で差が有意な領域を意味する。

図(4)-13は、西シベリア域（北緯45～65度、東経60～90度）で領域平均した4月の積雪被覆率の多寡を基準とした月平均大気温度の差（少雪年－多雪年）を、中央アジア域（北緯40～50度）で緯度方向に平均を取った経度－高さ（気圧）断面で示している。5月（図(4)-13(a)）には、顕熱および潜熱フラックスの差を取った東経60～90度付近の上空において、統計的に有意な気温差が存在しており、そのシグナルは対流圏界面付近の300hPa前後の高さにまで到達している。また、先の大気循環場の合成図解析の結果からも容易に推測できるように、シグナルの有意性はないものの、この緯度円に沿って東西に順圧的な（鉛直方向に立った形の）波状の構造が見られる。一方で、6月（図(4)-13(b)）になると、5月に見られたような構造ははっきりしなくなり、シグナルが有意である高度も下部対流圏に限定されている。

ここまでの解析を総合すると、ユーラシア大陸上の積雪変化に起因する日本・東アジア域の大気循環場への影響として、以下のような仮説を立てることができる。西シベリア域における4月の積雪減少にとともに、同地域および南側に隣接する中央アジア域における4月の融雪水が減少するとともに消雪後の土壌水分量を減少させ、陸面から大気への蒸発が抑制されるとともに地表面を加熱する。加えて、地表面から大気への顕熱フラックスが増加していることから、地表面が大気を加熱し、大気循環場に順圧的な波動現象を励起することで、日本・東アジア域やその下流側において、対流圏上層のジェット気流を南方へと蛇行させる。残念ながら、本解析結果からは因果関係について確認することは不可能であるため、数値モデルを用いた感度実験を行う等により、この仮説について検討する必要がある。

以上のことから、春季シベリア域における積雪減少と日本・東アジア付近における夏季大気循環場との間の有意な相関関係の妥当性、およびその背景にあるメカニズムについて検討するために、全球大気大循環モデルを用いた感度実験を行った。大気大循環モデルは、東京大学大気海洋研究所と国立環境研究所、海洋研究開発機構が中心となって開発・改良したMIROCを用いた。解像度は水平2.8度×2.8度（切断波数42）鉛直40層である。ここでは、積雪減少にともなう気候影響のみを抽出したいため、海面水温と海水分布のデータは気候値を用いた。温室効果気体の濃度などの外部境界条件を2000年の数値に固定した、いわゆる気候値を与え続けたコントロール実験を行った結果、北半球高緯度陸域における春季平均積雪の分布には、ユーラシア大陸上の積雪面積/被覆率を過小評価するバイアスが見られた。このバイアスを解消すべく、陸面過程を中心としたいくつかのパラメータに対して再チューニングを行ったが、

バイアスの大幅な改善には至らなかったため、初期のパラメータ設定で行ったものをコントロール実験とした。また、積雪アルベドの時空間変化を人工的に減少させることにより、春季（4月）ユーラシア大陸（西シベリア）における積雪を強制的に減少させた実験を行い、両者の差を見ることで解析を行った。数値実験はそれぞれ10年間ずつ実施した結果を月毎に平均し、両実験間の差異を見た。解析の結果、実験設定の根本的な差である積雪や地表面温度、土壌水分量などの陸面変数には、4月に有意な差は見られるものの、残念ながら、大気循環場には統計的に有意な差異が見られなかった。実験設定に何らかの不備があった可能性は否定できないものの、大きな原因の一つとして、コントロール実験のユーラシア大陸上で積雪の過小評価バイアスが考えられる。そもそも、コントロール実験で積雪が過小評価であったことから、積雪アルベドを変えることで一部の地域・時期に積雪を減少させたとしても、その効果も過小評価されてしまったのかも知れない。大気大循環モデルにおける北半球高緯度域のバイアスは従来から指摘されている問題点ではあるものの、今なお解決が難しいため、コントロール実験における積雪の再現性を向上させる、何らかの実験設定を検討する必要がある。また、もう一つの可能性として、春季シベリア域における積雪減少と日本・東アジア付近における夏季大気循環場との間の有意な相関は偶然得られた結果であることが考えられる。統計的有意性の判断には、一般的な信頼度95%を用いてはいるものの、確率的には20回に1回は判断を誤る可能性があるのも事実であり、更なる調査・検討が必要である。

5. 本研究により得られた成果

（1）科学的意義

北半球高緯度陸域の積雪面積/積雪被覆率データとして多くの先行研究で用いられてきた、NOAAの衛星観測データに存在する複数の問題点を改善したJASMESの広域積雪データを用いて、主にユーラシア大陸における春季の積雪面積/積雪被覆率の年々変動や長期変化傾向などの変動特性を把握した。これにより、主として亜大陸規模での長期積雪変動・変化に関する信頼度の高い情報を得ることが可能となった。また、近年の地球温暖化に伴うユーラシア大陸上の積雪減少域が、春から初夏にかけてどのように推移していくのかを明らかにするとともに、気象庁の長期積雪解析データであるJRA-55と合わせて統計解析することにより、西シベリア域における春季積雪減少が、地表面状態の変化を介して、日本および東アジア域の大気循環場に影響を及ぼしている可能性を示唆する結果を得た。

（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>

従来の長期気候変動・変化の解析に用いられてきた広域積雪データに存在する様々な問題点を改良した、日本発の新たな広域積雪データの有用性を確認できた意義は大きい。また、当該データの解析から得た亜大陸規模での長期積雪変動・変化に関する信頼度の高い情報は、次期IPCCにも貢献し得る重要な成果である。

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）>

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) T. NOZAWA and S. FUJIWARA : The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan (2016)
“Revisiting impacts of spring Eurasian snow cover change on the East Asian summer precipitation”
- 2) 野沢徹、藤原昂：日本地球惑星科学連合大会2016年大会（2016）
「ユーラシア大陸の春季積雪面積変化が東アジアの夏季降水量に及ぼす影響の再考」
- 3) 藤原昂、野沢徹：第7回極域科学シンポジウム（2016）
「ユーラシア大陸における初夏の積雪減少が局所的な大気循環場に及ぼす影響」
- 4) S. FUJIWARA and T. NOZAWA : American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, USA (2016)
“Impacts of Early-Summer Eurasian Snow Cover Change on Atmospheric Circulation in Northern Mid-Latitudes”
- 5) T. NOZAWA and S. FUJIWARA : The Second International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan (2017)
“Influence of Springtime Eurasian Snow Cover Retreat on Atmospheric Circulation over East Asia “
- 6) 野沢徹、藤原昂：日本地球惑星科学連合大会2017年大会（2017）
「シベリアの春季積雪減少が東アジア域の大気循環場に与える影響」
- 7) 野沢徹、藤原昂：日本気象学会2017年度秋季大会（2017）
「温暖化に伴うユーラシア大陸の春季積雪減少と日本・東アジア域における夏季大気循環場の変化との関連性について」
- 8) T. NOZAWA and S. FUJIWARA : The Third International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia” , Tokyo, Japan (2018)
“On the linkage between springtime Eurasian snow cover retreat due to the global warming and changes in summertime atmospheric circulation over Japan and East Asia “

（３）知的財産権

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) 笠岡市環境フェスティバルでの講演「地球温暖化の現在・過去・未来～地球の気候はどうなるの？」（実施者：野沢徹、主催：笠岡市、平成27年10月18日、聴講者約50名、場所：笠岡市民会館）
- 2) 東京都中央区民カレッジ（連携講座）での講演「地球温暖化の原因を正しく理解する～100年後の世代のために～」（実施者：野沢徹、主催：東京都中央区、平成27年11月6日、参加聴講者：約180名、場所：中央区立築地社会教育会館）
- 3) STOP温暖化くらしき2017大人の科学講座での講演「地球温暖化を科学の視点で検証する」（実施者：野沢徹、主催：倉敷市、平成29年12月10日、聴講者約50名、場所：水島愛あいサロン）

（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. HONDA, J. INOUE and S. YAMANE: Geophys. Res. Lett., 36, L08707 (2009)
Influence of low Arctic sea-ice minima on anomalously cold Eurasian winters
- 2) Q. TANG, X. ZHANG and J. A. FRANCIS: Nature Clim. Change, 4, 45-50 (2014)
Extreme summer weather in northern mid-latitudes linked to a vanishing cryosphere
- 3) S.-Y. YIM, J.-G. JHUN, R. LU and B. WANG: J. Geophys. Res., 115, D22113 (2010)
Two distinct patterns of spring Eurasian snow cover anomaly and their impacts on the East Asian summer monsoon

Ⅱ－５ 温暖化に伴う成層圏循環の変動の解明

国立研究開発法人海洋研究開発機構

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 野田 彰（平成27～29年度）

平成27～29年度累計予算額：6,116千円（うち平成29年度：1,716千円）

予算額は、間接経費を含む。

[要旨]

赤道成層圏東西風に関して再解析データ間の相違点・類似点を明らかにした。成層圏を含むハイトップモデルとそうでないロートップモデルの間に対流圏－成層圏循環の再現性にどのような系統的差異が生ずるか調査した。CMIP5モデル群の解析に加え、同一の物理過程を組み込んだ自前のハイトップ、ロートップ版気候モデル実験を行い、両者において成層圏極夜ジェット及び対流圏亜熱帯・寒帯ジェットの位置や変化など、大規模循環場の違いを明らかにした。気候変動の予測の為には、成層圏を含むモデルが必要であることを示した。対流圏－成層圏相互作用の三次元データ解析に適用可能な解析手法を開発した。

[キーワード]

対流圏－成層圏相互作用、三次元変換オイラー法（3D-TEM）

1. はじめに

数日～100年規模の気象・気候変動予測の不確実性低減の為には、対流圏－成層圏を一つの系として捉えた統合的な研究が必要である。CMIP5では全気候モデルの30%程度が成層圏を含むなど、成層圏を含んだ気候変動研究の重要性が近年増してきている。成層圏が対流圏循環場、気圧配置、降水分布に具体的にどのような影響を与えているか、その定量的な評価が求められている。

2. 研究開発目的

世界中の気候モデルデータ、自身による気候モデル実験、及び各種観測データを用いて、対流圏の大規模循環に対する成層圏の役割を理解する。対流圏－成層圏相互作用に地理的な影響があるかどうかを検証し、東アジアの気候変動に関する成層圏の寄与の重要性を明らかにする。

3. 研究開発方法

CMIP5気候モデルデータ、自身による気候モデル実験、再解析データ及び各種観測データを組み合わせた解析を行い、成層圏循環の変動が、どのような仕組みで日本・東アジア域の降水現象の変化に影響するかを評価する。更に同一の物理過程を組み込んだ成層圏を含むハイトップ、含まないロートップ版気候モデル実験を行い、両者において亜熱帯ジェットの位置や変化など、対流圏循環の違いを明らかにする。また気候モデルの検証に使われる再解析データについて、特に赤道域東西風に関して、再解析間の相違点・類似点を明らかにする。成層圏－対流圏結合の考察に必要な、3次元空間での波動と平均場の相互作用について、理論面だけでなく実際のデータ解析に適用可能な解析手法を導く。

4. 結果及び考察

CMIP5モデル群データを集めて、成層圏を完全に含むハイトップモデルとそうでないロートップモデル

とに分別して解析した。東西風の年々変動成分を再解析データと比較したところ、ハイトップモデルの方が現実的な変動成分を再現していることが明らかになった。ハイトップモデルの中で、赤道準2年振動(QB0)を再現しているモデルが4つあったが、それらのモデルの再現性が一番良いことが判明した。しかしながら各々のCMIP5気候モデルで用いられている物理過程が異なり、得られた現象が成層圏の有無やQB0の再現性によるものかどうかの理解は難しいことが改めて分かった。理解を進めるためには、同一の物理過程を組み込んだ自前のハイトップ、ロートップ版気候モデル実験を行い、両者において成層圏—対流圏の大規模場の違いを精査する必要を再認識した。

上記実験を行う前に、気候モデルの検証に使われる再解析データについて、その成層圏での再現性を検証した。一昔前と比べて、近年では利用可能な再解析データの種類は格段に増え、再解析データ間の定量的な違いが認識されるようになった。再解析間でどのような類似点・相違点が見られるのか、その成因を調べることは科学的意義があるとともに、気候モデルの検証の際にも有意義である。東西風の再解析間の違いは、中高緯度に比べて赤道域で非常に大きいことが判明した(図略)。そこで赤道域東西風データとQB0に関する再解析データ間の比較・検証を行った。再解析データ間の相違を定量的に診断する為、月平均データを用いて再解析間の標準偏差を各月で計算した。標準偏差が大きいほど、再解析間でバラつきが大きいことを意味する。

図(5)-1aに高度50-70hPaにおける東西風の標準偏差分布を示す(1979-2001年平均)。熱帯域成層圏東西風の再解析間の違いは、下部成層圏で一番大きく、東西非一様な構造をしている。標準偏差は高度20-30hPaで小さく、且つ東西一様に近い構造になるが(図略)、高度10hPaで再び大きくなる。偏差は高度10hPaの偏差ではQB0が東風位相の時は東西一様で、西風位相の時は東西非一様な分布をし、値も大きい(図(5)-1b-d)。これはQB0西風時にのみ中緯度から熱帯域へ伝播可能な定常プラネタリー波の再現性が、各再解析で異なることに起因している。西風・東風位相共にシンガポール付近では再解析間の違いが顕著に小さい(図(5)-1d矢印参照)。

次に下部成層圏の東西風の差異について詳しく調べた。図(5)-2aに高度70hPaにおける東西風の標準偏差分布と各観測点におけるデータカバー率を示す(1979-2001年平均)。地点観測の特に少ない東太平洋上で顕著な違いが見られ、東西非一様な分布をしている。データカバー率が高い地点で再解析間の相違が小さい。東太平洋上ではラジオゾンデ観測が疎であり標準偏差が大きい。再解析時に成層圏解析場は十分に修正されず、予報モデル単体による東西風の再現が難しいことを示唆する。

次に再解析間の違いが時間と共にどのように変わるかを調査した。図(5)-2bに各再解析東西風データのシンガポール観測値からのズレ(RMS:二乗平均平方根誤差)を示す(10-70hPa平均)。RMSは時間と共に小さくなり、2000年代以降は観測とよく一致し、再解析間の相違も小さくなる。本研究から、再解析の熱帯域東西風データにおいて地点観測が決定的な役割を果たしていること、また再解析データを用いたトレンド解析には注意が必要であることが示された(Kawatani et al. 2016)¹⁾。

同一の物理過程・パラメータ、水平解像度に設定したMIROC-AGCMを用いて、モデルトップの高度を変えた複数の実験を行い、成層圏の有無が対流圏循環の形成にどのような影響を及ぼすか調べた。更に成層圏の鉛直解像度を変えた実験も行い、成層圏解像度が対流圏循環に及ぼす影響も考察した。

使用したモデルはMIROC3.2をベースとした大気大循環モデルMIROC-AGCM(Kawatani et al. 2011)²⁾である。水平解像度はT106で、モデル上端と鉛直総数をそれぞれ(a) 28km, L34, (b) 48km, L42, (c) 48km, L72, (d) 95km, L168に設定した4種類のモデルを100年間積分した(図(5)-3参照)。対流圏の鉛直解像度は全て同じである。成層圏の鉛直解像度は(c)と(d)で550mに設定しており、QB0が再現されているが、(a)と(b)ではQB0は再現されない。用いた物理過程やパラメータは全て同じに設定している為、(a)と(b)の比較から成層圏、(b)と(c)の比較から成層圏解像度、(c)と(d)の比較から中間圏が対流圏循環形成に与える影響を、更に(b)と(d)の比較から、モデル高度と成層圏解像度を組み合わせた影響が考察可能になる。

スポンジ層でのレイリー摩擦を渦度・発散に掛けると、その場所で擬似的な角運動量を大気を与えることに相当し、全球角運動量保存が満たされなくなる。本研究ではモデル上端の違いによる影響を調べることを目的とする為、各モデルのスポンジ層でのレイリー摩擦は帯状平均からのズレ成分にのみ作用

させた。なお、非定常重力波パラメタリゼーションは用いていない。本稿では全て100年平均したDJFの結果について議論する。

最初にL34とL42を比較し、成層圏の有無が対流圏循環場に与える影響について考察する。図(5)-4aはL42の残差鉛直循環の緯度-高度断面図である。成層圏ではブリューワー・ドブソン循環(BDC)に伴って低緯度で上昇流、高緯度では下降流になっている。図(5)-4bはL34からL42を引いた残差鉛直循環である。L34は成層圏を殆ど含んでおらず、BDCを表現することができない為、高緯度で正偏差(上昇流偏差)になっている。成層圏を含まないL34では高緯度の下降流が弱いことを意味する。

図(5)-5に帯状平均温度と東西風の差を示す。成層圏が解像されないL34モデルではL42モデルに比べ高緯度の下降流が弱い為、極域成層圏で低温偏差になっている。温度風の関係から、成層圏ジェット領域では西風偏差になる。西風偏差は対流圏下層まで伸びており、対流圏ジェットは高緯度側へのシフトしている。

図(5)-6は帯状平均したL42の周期2-8日成分 $\overline{u'v'}$ と東西風と、L34からL42を引いた $\overline{u'v'}$ である。 $\overline{u'v'}$ は低緯度から中高緯度へ運ばれるが、成層圏が無い場合(L34)は、 $\overline{u'v'}$ がより高緯度まで運ばれ、西風の高緯度側へのシフトと対応する。対流圏中上層での西風偏差と $\overline{u'v'}$ の偏差について、どちらが原因・結果であるかは明確ではないが、 $\overline{u'v'}$ のシフトが地表風の変化を引き起こすと考えられる(ちなみに $\overline{u'v'}$ について、2-8日周期のみならず、全変動成分で見た場合も定性的に同じ結果を示す)。

ここで簡単の為、南北の運動量輸送のみの方程式で考察する。

$$\partial \bar{u} / \partial t - f \bar{v}^* = \rho^{-1} \partial / \partial y (-\rho \overline{u'v'}) - \rho_s C_M |\bar{v}| u_s \quad (1)$$

ここで右辺第2項は地表フラックスの東西成分を示す。 C_M はバルク係数、 s は地表を示す。その他の文字は気象学の慣例に従う。ここで、(1)式について気候値且つ緯度円に沿って鉛直積分した場合、(2)式になる。

$$\int_{z=surface}^{z=top} \left\{ \partial / \partial y (-\rho \overline{u'v'}) \right\} dz - \rho \rho_s C_M |\bar{v}| u_s = 0 \quad (2)$$

この式から、 $\overline{u'v'}$ が高緯度側へシフトすると地表面東西風が $u_s > 0$ になる必要があり、西風が強くなる。Sakazaki and Hamilton (2017)³⁾では、 C_M を大きくしても、上層の帯状平均 $\overline{u'v'}$ は殆ど変わらず、 u_s が小さくなることで地表フラックスが不変になることを示している。つまり、上層ジェット変化が下層の東西風の変化に対して支配している。本実験で見られた成層圏-対流圏ジェットの結合は、SSW、A0、QB0などの現象でも見られ、観測データ及び数値実験結果から、経験的には知られている。しかしながらそのメカニズムは明確には理解されていない(Kidston et al. 2015)⁴⁾。

図(5)-7にL34からL42を引いた地表面気圧と降水の偏差を示す。成層圏の有無による対流圏下層の東西風偏差と対応して、地表面気圧分布が変化している。成層圏が無いと(L34)、中緯度で正偏差、高緯度で負偏差となり、A0+に類似した様相を示している。またL34ではアリューシャン低気圧が西寄り且つ弱く、L42の方が再解析データ結果に近い。降水偏差を見ると、緯度30度より極側では、第0近似で地表面気圧偏差と対応している。つまり高(低)気圧偏差の領域で降水が少(多)くなっている。一方で熱帯域では成層圏を含むL42の方で降水が多く、成層圏循環や鉛直安定度と関連していることが示唆される。

以上を北半球の視点でまとめた模式図を図(5)-8に示す。成層圏が無いモデルでは、(1)BDCが十分に表現されず、高緯度下降流が弱くなり、(2)高緯度下部成層圏で低温偏差になる。(3)温度風の関係から成層圏ジェットが強化され、(4)対流圏ジェットも強化、北へシフトする。 $\overline{u'v'}$ も北へシフトする為、運動量収支の関係から、地表面で西風が強くなる。その結果、(5)地表風、地表面気圧、降水分布も変化する。この対流圏-成層圏結合は、南半球や北半球の大西洋では明確であるが、北半球太平洋ではより複雑な構造をしている。ちょうどA0レスポンスが太平洋に比べて大西洋で明確なこと類似している。

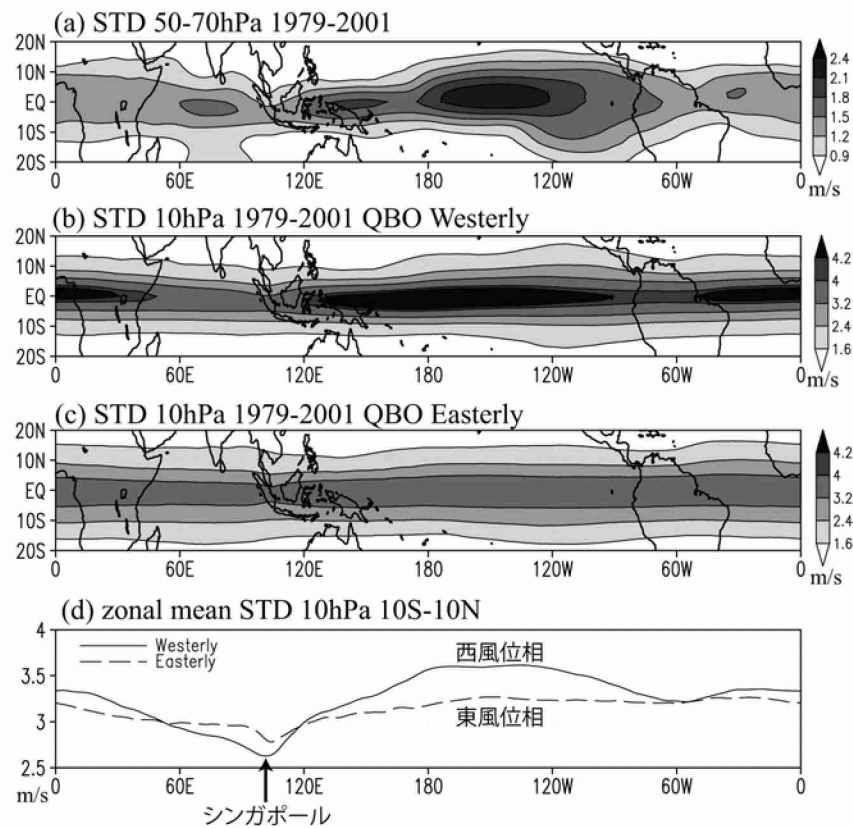
次にL42、L72、L168を比較する。L72に比べL42成層圏鉛直解像度が粗い為、中高緯度成層圏のEP-flux収束が小さく、BDCに伴う高緯度下降流が弱い。高度40km以上がスポンジであるL72は上部BDCが表現できず、その差がL72とL168の差で顕著になる。図(5)-9にL42-L72及びL72-L168の帯状平均東西風、図(5)-10

に北半球領域を拡大したL42、L72、L168の帯状平均東西風の気候値を示す。L42→L72→L168の順に、高度と共に赤道に傾く極夜ジェット、及び極夜ジェットの中心緯度が現実的になる。成層圏高緯度での西風偏差は、L34-L42と同じ理由で、対流圏の東西風に影響を与えている。成層圏有無（L34-L42）と比べると差は小さいが、L42-L168でも対流圏循環場や気圧配置に有意な差が見られ、成層圏の高解像度化と上部成層圏～中間圏の有無も、対流圏に影響を与えていた。

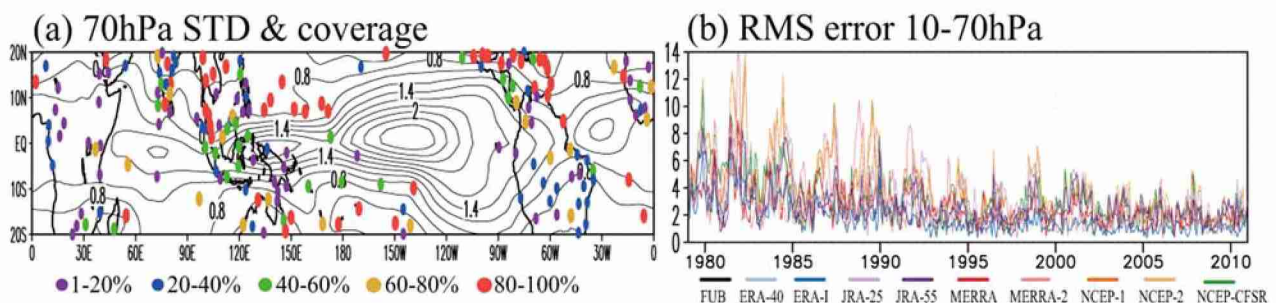
本研究から成層圏の有無・成層圏の解像度が対流圏下層の循環場、気圧配置、降水分布にまで影響を及ぼすことが明らかになった。地球温暖化が進むと、Brewer-Dobson循環が強化されることが知られている為(Butchart et al. 2006⁵⁾; Kawatani and Hamilton 2013⁶⁾)、成層圏の有無は地表面付近の温暖化レスポンスにも影響を与え得ることが強く示唆される。

また、再解析データ及び観測データを用いて、QBOが地表面に与える影響を詳細に調べた。QBO西風時には北大西洋振動の位相が正になり、北極域での気圧が負偏差になることを確認した。またQBO西風時に熱帯大西洋で降水が増えること、特に北半球が夏の季節にその傾向が顕著であることを明らかにした。また熱帯太平洋収束帯と呼ばれる太平洋で東西に伸びる降水帯はQBO西風時に南偏することが分かった(Gray et al. 2017)⁷⁾。太平洋の降水帯がQBOによって変化することは、その影響が東アジア域まで遠隔伝播していることが推察され、今後更なる研究を進める予定である。

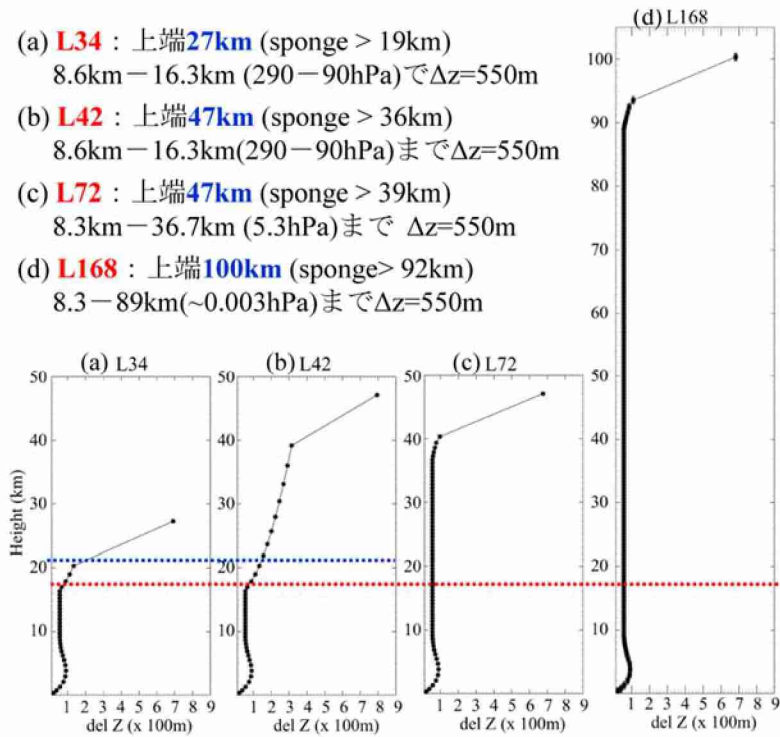
さらに2016年1月に観測史上初めて起きた、QBO崩壊現象についてメカニズムを調べた。QBOは西風位相、東風位相が約28ヶ月周期で交互に変わり、それぞれの位相は大気上層に現れた後、時間と共に下方伝播する。しかし2016年1月、西風位相が下降している最中の高度22km付近に突如東風が形成され、西風が上方伝播し始めた。この観測史上類を見ない現象は上述した理論では説明不可能で、世界中の研究者を驚かせた。QBOがマッデンジュリアン振動を含む熱帯降水活動を変え、さらに東アジアへ影響することが徐々に分かりつつあるため、この変則的なQBOメカニズムを解き明かすことは、季節予報や将来の東アジア域の気候変動予測にとって重要である。本研究ではMIROCをベースとした高解像度気候モデル、JAGUAR(Watanabe and Miyahara 2009)⁸⁾を用いて、その再現に成功した。メカニズムを調べたところ、中緯度起源のロスビー波がQBO西風帯まで侵入し砕波することで東風を形成していることが分かった(Watanabe et al. 2018)⁹⁾。さらに再解析データの解析及びMIROC気候モデルアンサンブル実験を行い、2016年のQBO崩壊にはエルニーニョと海氷の減少が関わっていることを示唆することができた(Hirota et al. 2018)¹⁰⁾。



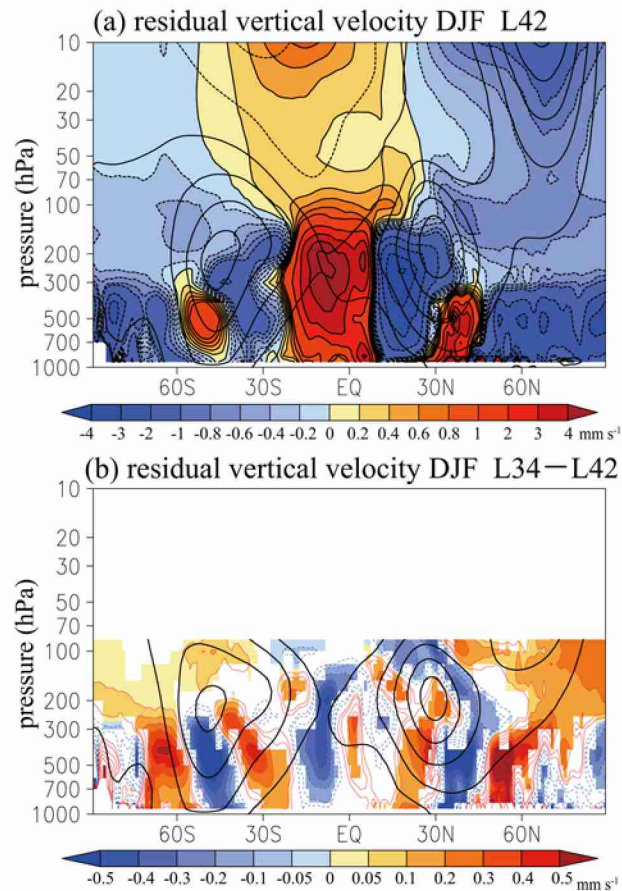
図(5)-1 (a)1981-1990年の高度50-70hPaにおける東西風の再解析間の標準偏差分布 (m/s)。帯状平均した(b)高度50-70hPaと(c)高度10hPaにおける標準偏差の時間変化。



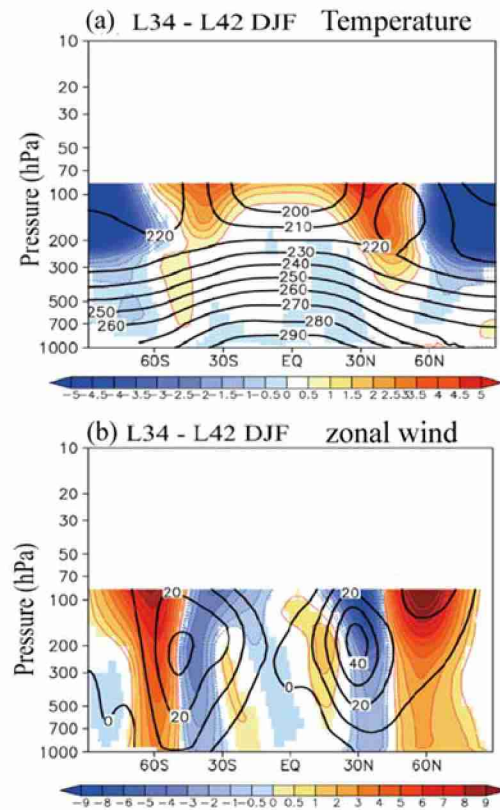
図(5)-2 (a) 高度70hPaにおける再解析間の標準偏差 (コンター) とラジオゾンデ観測カバー率。(b) 各再解析東西風データにおける高度70hPaのシンガポール観測値からのズレ。



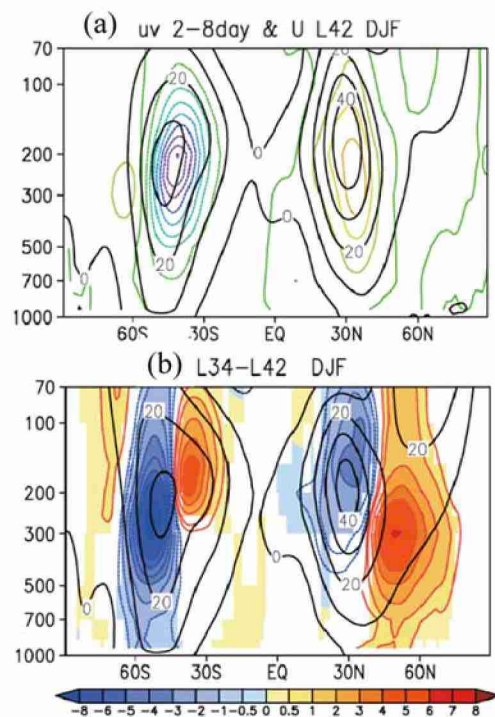
図(5)-3 本実験で用いたモデル上端と鉛直総数。(a) 27km, L34, (b) 47km, L42, (c) 47km, L72, (d) 100km, L168。対流圏の鉛直解像度は全て同じである。成層圏の鉛直解像度は(c)と(d)で550mに設定。



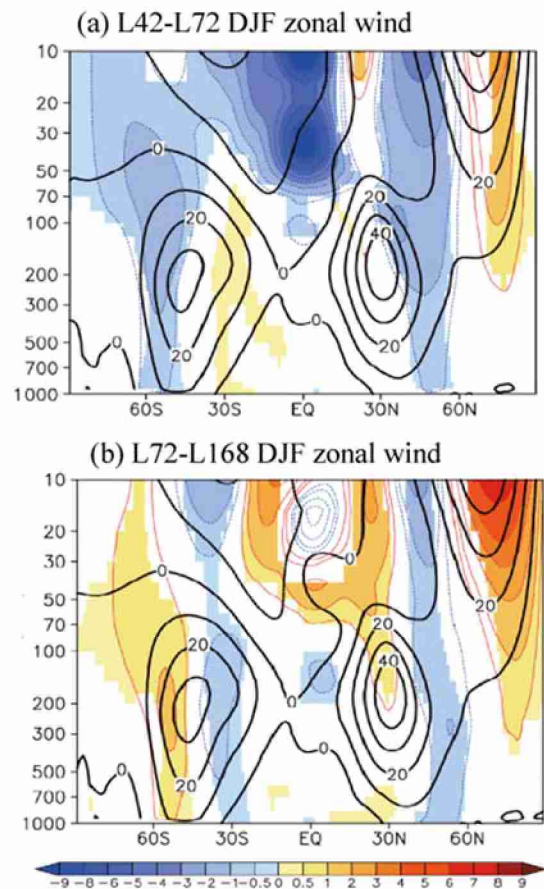
図(5)-4 (a)L42の残差鉛直循環の緯度–高度断面図(色)。コンターはL42の東西風。(b)L34からL42を引いた残差鉛直循環。95%以上有意な場所に色。コンターはL34の東西風。



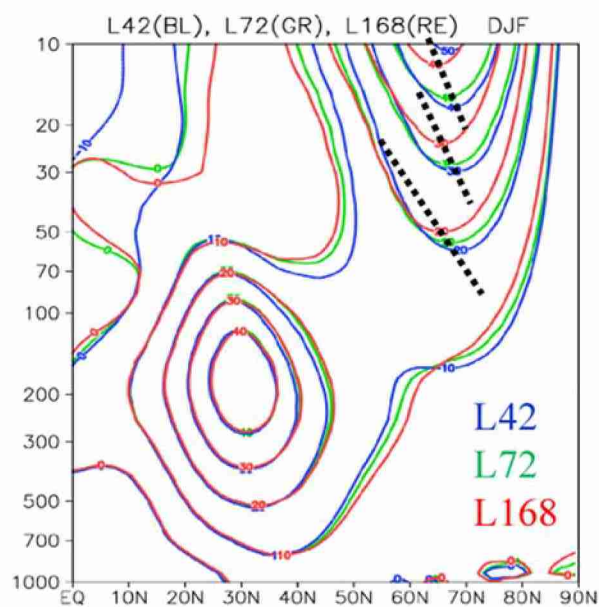
図(5)-5 L34からL42を引いた帯状平均(a)温度と(b)東西風の偏差。95%以上有意な場所に色。コンターはL34の気候値を示す。



図(5)-6 (a)帯状平均したL42の周期2-8日成分 $\overline{u'v'}$ (色コンター)と東西風(黒線)。(b)L34からL42を引いた $\overline{u'v'}$ 。95%以上有意な場所に色。コンターはL34の気候値を示す。



図(5)-9 (a) L42-L72、(b)L72-L168の帯状平均東西風。



図(5)-10 L42 (青)、L72 (緑)、L168 (赤) の帯状平均東西風の気候値。

過去40年近く標準的な解析方法として広く用いられている変換オイラー法 (TEM) を拡張し、本研究テーマの課題である成層圏擾乱と日本・東アジア 域の降水現象の変化に影響を解明するツールとして、減衰・発達する一般的な擾乱の効果を取り入れたGTEM を導いた(Noda 2014)¹¹⁾。しかし、GTEMを実際のデータ解析に応用する上で、a) 波の伝搬方向に4 分の1 波長ずらしたデータ (Hilbert 変換) が必要、b) Rossby 波(B 効果) の取り扱いに不備、c) 渦拡散テンソルの成分の分母の主要項がCoriolisパラメ

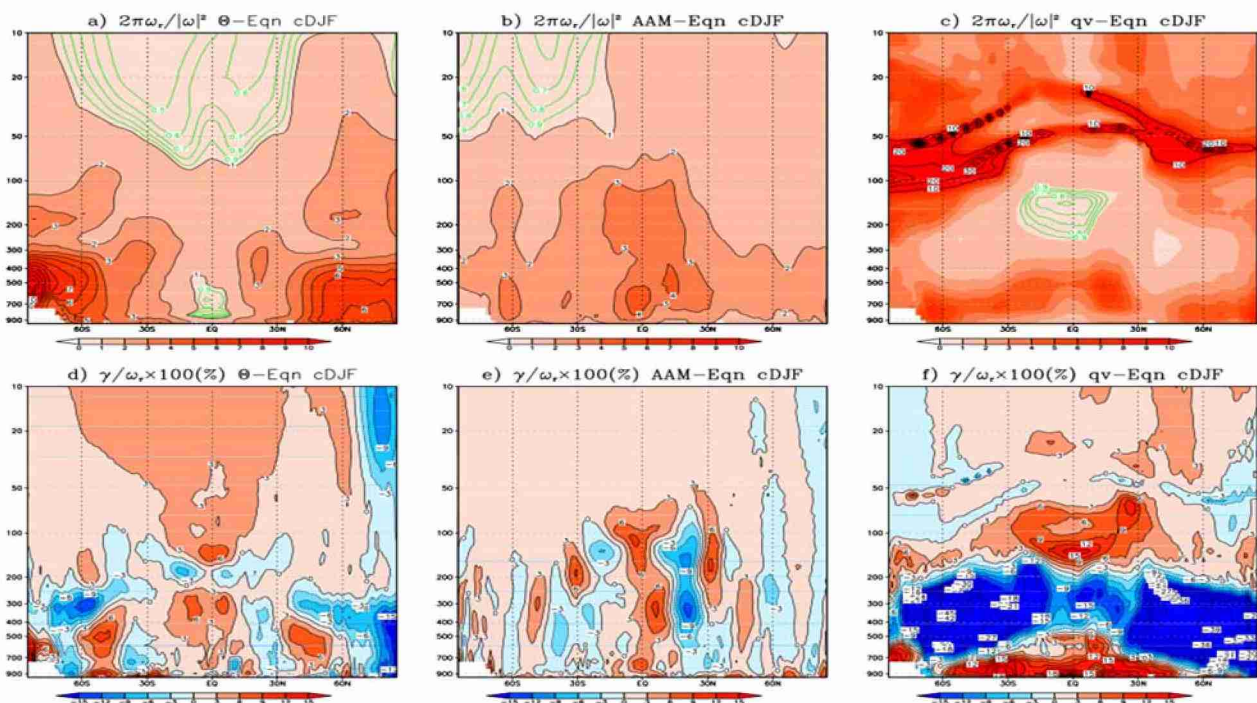
ータ f のため、赤道付近 ($f \approx 0$) で適用出来ない等の問題点があった。a) はGTEM固有の問題だが、b) とc) は三次元TEM 共通の問題点である。これらの問題点について、GTEM の枠組みでの解決策を見だし、改良版のGTEMとして定式化し、プログラミングも行った。

改良版GTEMの実際の大気データへの応用として、先ず、温位、絶対角運動量、水蒸気等の渦フラックスは共通の渦拡散テンソルを持つという従来のTEMにおける微小振幅擾乱の仮定が、実際のGCM データで成立するか検証した。12,1,2 月東西平均子午面循環について、温位保存、絶対角運動量保存、水蒸気保存則から求めた各の渦フラックスの特徴的周期と成長率を図(5)-11に示す。温位、絶対角運動量、水蒸気は相互に明確に異なる時間スケールの渦輸送が卓越していることが解析された。特に、水循環と熱・角運動量循環の差が顕著である。

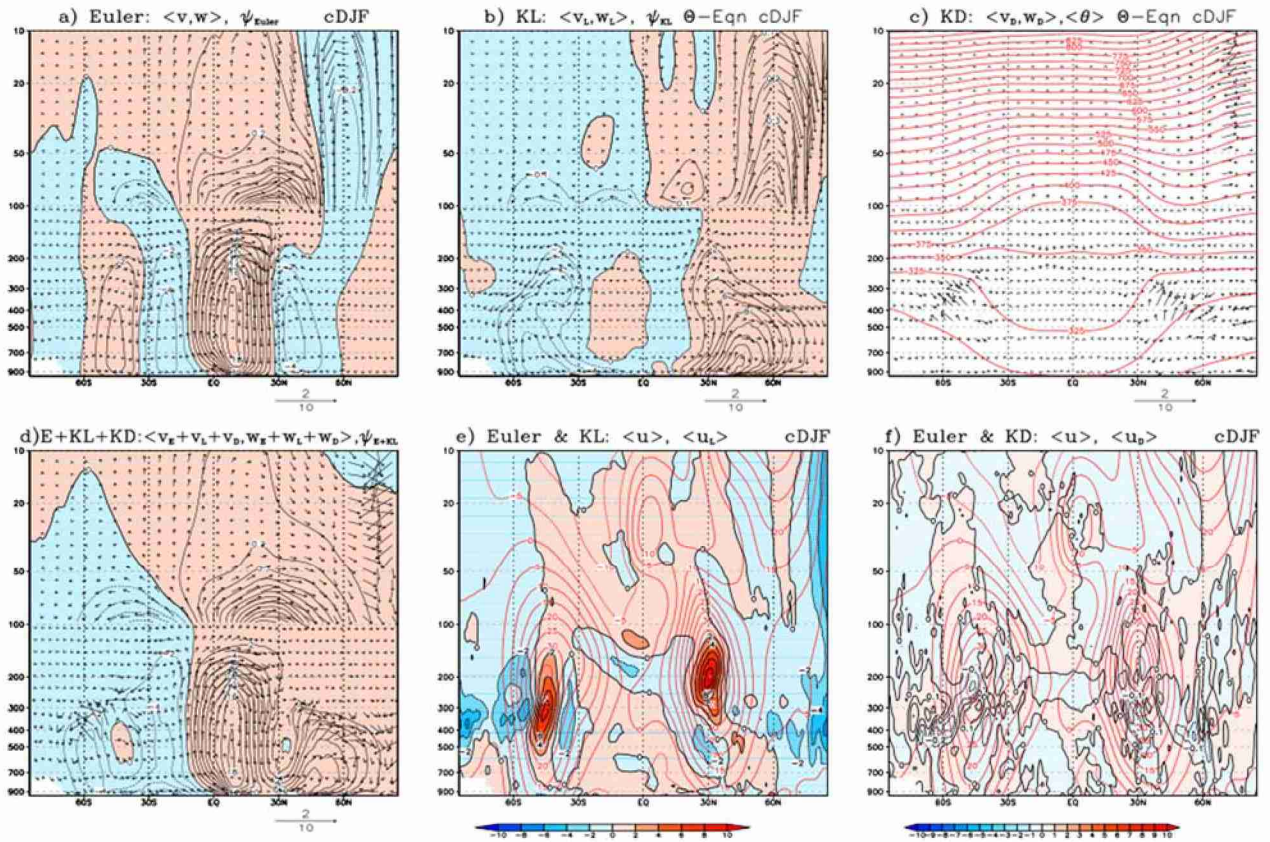
図(5)-12に東西平均子午面循環を示す。Euler平均循環(a) では、よく知られた半球3細胞循環がみられる。反対称渦拡散テンソルの発散から計算される循環(b)では、対流圏中緯度での傾圧波動、成層圏中高緯度の惑星波動に伴う熱、東西運動量の輸送が卓越する効果によって、間接循環(フェレル循環)と逆向きの循環が卓越している。また、波動の成長・減衰の効果を反映した対称渦拡散テンソルの発散から計算される循環(c)は、中緯度対流圏上層で卓越することが分かる。(d)はこれらの効果を合計した正味の輸送を表す子午面循環(残差循環)を示す。残差循環では間接循環が打ち消され、ほぼ、直接循環になっている。これまでの残差循環では議論されてこなかった、反対称および対称渦拡散テンソルの発散から計算される東西平均風を、それぞれ(e)と(f)に示す。中緯度の残差子午面循環ではフェレル循環が打ち消されたが、残差東西風では、顕著に亜熱帯ジェットが強まっている。

図(5)-13には3次元の残差循環の水平分布を示す例として、850 h Pa気圧面における平均速度場から計算された流線を示す。Euler平均場(a)では、気圧配置から予想される地衡風流線が卓越している。対流圏中低緯度の反対称渦拡散テンソルの発散から計算される流線(b)では、図(5)-12bから予想される赤道から低緯度に向かう流れの経度依存性が小さいことが分かる。

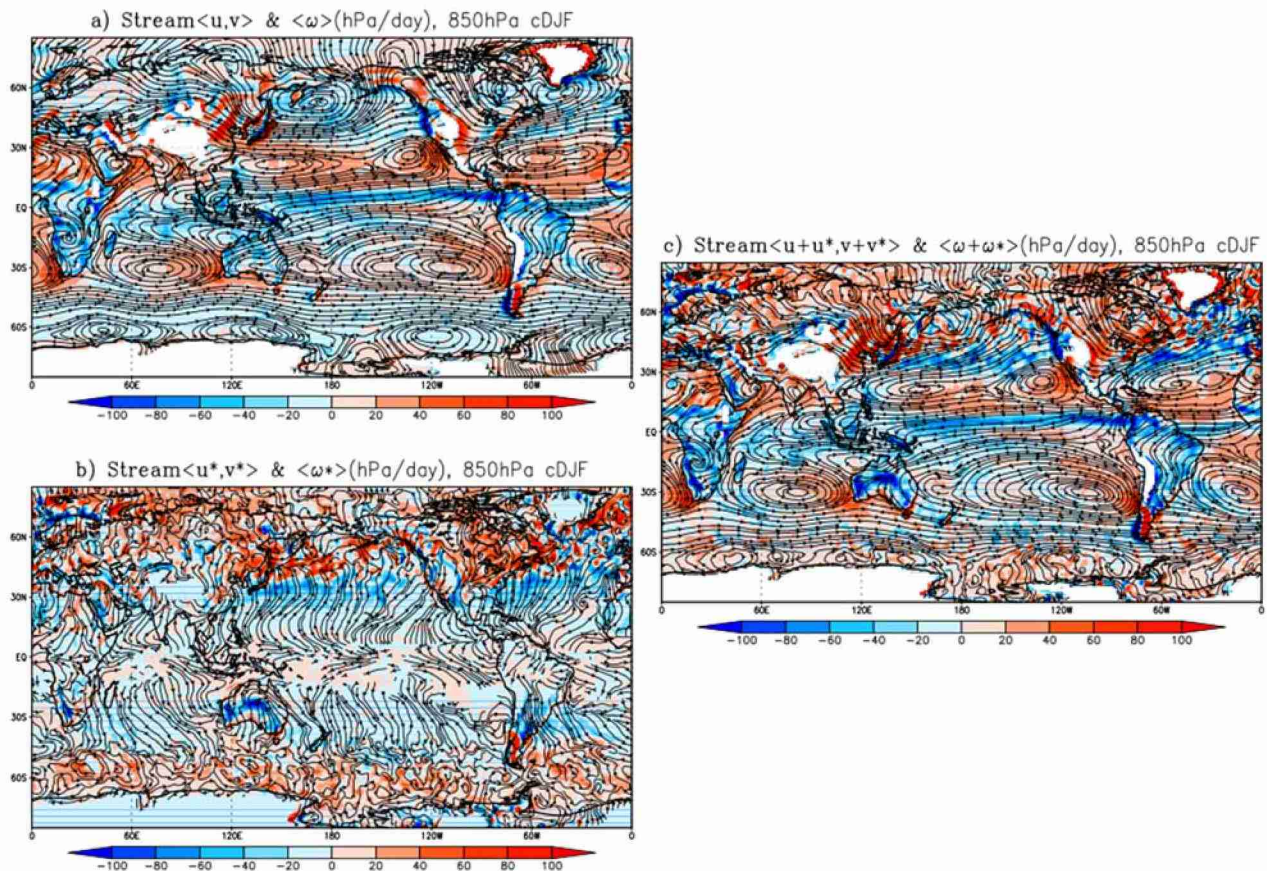
これら新しい解析手法で得られた循環には特有の特徴が見られるが、その科学的な意味の解明は今後の課題である。



図(5)-11 GTEM に基づく12,1,2 月東西平均子午面循環に伴う渦輸送の特徴的周期(上図;単位Day)及び、特徴的増幅率と特徴的周期の比(下図;単位%)。a,d) 温位保存、b,e) 絶対角運動量保存、c,f) 水蒸気保存に基づいて求めた。



図(5)-12 GTEM に基づく12,1,2 月東西平均子午面循環と基本場。a)Euler平均質量流線関数(等値線; 10^{10} kg/sec)と速度(矢印;m/sec)、b)反対称渦拡散テンソルに基づく平均質量流線関数(等値線)と子午面速度(矢印)、c) 対称渦拡散テンソルに基づく子午面速度(矢印)と温位(等値線)、d) 残差質量流線関数(a+b;等値線)と残差子午面速度(a+b+c;矢印)、e) Euler平均東西速度(赤等値線)と反対称渦拡散テンソルに基づく東西速度(黒等値線)、f) Euler平均東西速度(赤等値線)と反対称渦拡散テンソルに基づく東西速度(黒等値線)。a)、b)、c)、d)の速度は100hPa以上の高度で5倍の長さで表示されている。



図(5)-13 GTEMに基づく12,1,2月平均850hPa面流線。a)Euler平均流線、b)反対称渦拡散テンソルに基づく流線、c)残差流線(a+b;等値線)

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

これまでに様々な研究に使用されてきた再解析データを集約し、観測と詳細に比較・検証し、熱帯成層圏で地点観測の重要性を定量的に示し、トレンド研究には注意が必要なことを明確に示した科学的意義は大きい。同一の物理過程を組み込んだ高解像度気候モデルのハイトップ、ロートップ版実験はこれまでに先行研究が殆ど無く、成層圏が対流圏の循環場へ与える影響を直接調べることを可能にしたのは挑戦的で科学的意義がある。減衰・発達する一般的な擾乱の効果を取り入れ、赤道域を含む全球を一様な手法で取り扱い可能なGTEMは、成層圏擾乱と日本・東アジア域の降水現象の変化に影響を解明するツールとして重要である。GTEMを実際のデータに適用した結果、擾乱による熱・運動量・水蒸気平均輸送の違いについて新たな知見を得た科学的意義は大きい。

(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>

成層圏を含む気候モデルでは含まないモデルと比べて、対流圏循環場、地表面気圧、降水分布に影響を与えることが明らかになった。この科学的知見は、将来の気候変動予測をする気候モデルでは成層圏を含む必要があることを強く示唆するもので、IPCCの取り組みへ貢献する。

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)、James Anstey博士(加国気候モデリングおよび解析センター)が世話人として進められている、気候モデルQBO国際比較プロジェクト(QBOi)に主要メンバーとして参画し、共同研究を進めている。本研究と関連するQBOが対流圏循環場へ与える影響も調べている。成層圏再解析比較国際プロジェクト(S-RIP)のQBO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。本研究で得られた再解析間の赤道域成層圏東西風の相違・類似点に関する論文が出版された。

7. 研究成果の発表状況

(1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: Atmos. Chem. Phys., 16, 6681-6699, doi:10.5194/acp-16-6681-2016 (2016), Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalysis.
- 2) S. WATANABE, K. HAMILTON, S. OSPREY, Y. KAWATANI and E. NISHIMOTO: Geophys. Res. Lett., 45, 1602-1610, <https://doi.org/10.1002/2017GL076406> (2018), First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasibiennial Oscillation.
- 3) N. BUTCHART, J. ANSTEY, K. HAMILTON, S. OSPREY, C. MCLANDRESS, A. BUSHELL, Y. KAWATANI, Y-H. KIM, F. LOTT, J. SCINOCCA, T. STCKDALE, O. BELLPRAT, P. BRAESICKE, B. CANGAZZO, C-C. CHEN, H-Y. CHUN, M. DOBRYNIN, R. GARCIA, J. GARCIA-SERRANO, L. GRAY, L. HOLT, T. KERZENMACHER, H. NAOE, H. POHLMANN, J. RITCHER, A. SCAIFE, V. SCHENZINGER, F. SERVA, S. VERSICK, S. WATANABE, K. YOSHIDA, and S. YUKIMOTO: Geosci. Model. Dev., 11, 1009-1032, doi: 10.5194/gmd-11-1009-2018 (2018), Overview of experiment design and comparison of models participating in phase 1 of the SPARC Quasi-Biennial Oscillation initiative (QBOi).
- 4) L. J. GRAY, J. ANSTEY, Y. KAWATANI, H. LU, S. OSPREY and V. SCHENZINGER: Atmos. Chem. Phys. Discuss., doi:10.5194/acp-2017-1065 (2017), Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation.
- 5) N. HIROTA, H. SHIOGAMA, H. AKIYOSHI, T. OGURA, M. TAKAHASHI, Y. KAWATANI, M. KIMOTO and M. MORI: npj Climate and Atmospheric Science (2018), The El Nino and the Arctic sea-ice influence on the unexpected disruption of the QBO in February 2016. (in press)

<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) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Comparison of the Quasi-biennial Oscillation amplitudes among several reanalysis data”
- 2) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: ACM2015, Paris, France, 2015
“Comparison of the zonal wind in the tropical stratosphere among several reanalysis data”

- 3) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: SPARC Reanalysis Intercomparison Project (S-RIP) Workshop and SPARC Data Assimilation (DA) workshop, Kyoto, Japan, 2015
 “Comparison of the zonal wind in the tropical stratosphere among several reanalysis datasets”
- 4) 河谷芳雄, Kevin Hamilton, 宮崎和幸, 藤原正智, James Anstey: 日本気象学会 2015 年度秋季大会 (2015)
 「複数の再解析データを用いた赤道域成層圏東西風の比較と検証」
- 5) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Representation of the Tropical Stratospheric Zonal Wind in Global Atmospheric Reanalyses”
- 6) 野田彰, 河谷芳雄: 日本気象学会春季大会 (2016)
 「一般化された変換 Euler 平均 (GTEM) から見た平均子午面循環 (II) ---絶対角運動量保存と Eliassen-Palm フラックス」
- 7) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: The QBO and its Global impacts - Past, Present & Future, Oxford, United Kingdom, 2016
 “Representation of the Tropical Stratospheric Zonal Wind in Global Atmospheric Reanalyses”
- 8) 野田彰, 河谷芳雄: 日本気象学会秋季大会 (2016)
 「一般化された変換 Euler 平均 (GTEM) のデータ解析上の問題点とその解決策」
- 9) Y. KAWATANI, S. WATANABE, L. GRAY and S. OSPREY: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2017
 “The effects of well-resolved stratosphere on representations of the tropospheric circulations in climate model simulations”
- 10) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. SATO, S. WATANABE and T. J. DUNKERTON: Joint SPARC Dynamics & Observations Workshop - QBOi, FISAPS & SATIO-TCS, Kyoto, Japan, 2017
 “ENSO modulation of the QBO: Results from MIROC models with and without nonstationary gravity wave parameterization”
- 11) 河谷芳雄, 渡辺 真吾, Lesley Gray, Scott Osprey: 日本気象学会 2017 年度秋季大会 (2017)
 「成層圏が対流圏循環に及ぼす影響: MIROC-AGCM を用いた考察」
- 12) 河谷芳雄, Kevin Hamilton, Lesley Gray, Scott Osprey, 渡辺真吾, 山下陽介: 「様々な結合過程がもたらす異常気象の実態とそのメカニズム」に関する研究集会 (2017)
 「成層圏が対流圏循環に及ぼす影響: MIROC-AGCM を用いた考察」
- 13) 野田彰: 日本気象学会春季大会 (2017)
 「データ解析における残差循環の任意性と多様性」
- 14) 野田彰, 河谷芳雄: 日本気象学会秋季大会 (2017)
 「一般化された変換 Euler 平均 (GTEM) から見た平均子午面循環 (III) ---対称渦拡散テンソル (非定常擾乱) の効果」
- 15) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, L. GRAY, S. OSPREY, S. WATANABE and Y. YAMASHITA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
 “The effects of well-resolved stratosphere on representations of the Northern winter tropospheric circulations in the MIROC-AGCM simulations”
- 16) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. SATO, S. WATANABE, T. J. DUNKERTON and K. KUKUCHI: 熱帯気象研究会 (2017)
 “The QBO modulations associated with ENSO in the MIROC models with and without nonstationary gravity wave parameterization”

(3) 知的財産権

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) 第 27 回日本気象学会夏期特別セミナー「気候変動に伴う成層圏赤道準 2 年振動の変化&研究の裏話」(実施者: 河谷芳雄、主催: 九州大学、平成 27 年 9 月 6 日、参加者: 約 80 名)
- 2) The Yokohama Science Frontier Forum for International Research in Science and Technology (ysfFIRST)「成層圏大気力学と気候変動」(実施者: 河谷芳雄、主催: 横浜サイエンスフロンティア高校、平成 28 年 3 月 17 日、参加者約 80 名)

(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

- 1) 渡邊真吾、河谷芳雄: 重力波解像モデルを用いた中層大気大循環の研究、2017年度日本気象学会賞

8. 引用文献

- 1) Y. KAWATANI, K. HAMILTON, K. MIYAZAKI, M. FUJIWARA and J. ANSTEY: *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 6681-6699, doi:10.5194/acp-16-6681 (2016)
Representation of the tropical stratospheric zonal wind in global atmospheric reanalysis
- 2) Y. KAWATANI, K. HAMILTON and S. WATANABE: *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283 (2011)
The Quasi-biennial oscillation in a double CO₂ climate
- 3) T. SAKAZAKI and K. HAMILTON: *J. Atmos. Sci.*, 74 (8), 2467-2487, doi:10.1175/JAS-D-17-0080.1 (2017)
Physical Processes Controlling the Tide in the Tropical Lower Atmosphere Investigated Using a Comprehensive Numerical Model
- 4) J. KIDSTON, A. A. SCAIFE, S. C. HARDIMAN, D. M. MITCHELL, N. BUTCHART, M. P. BALDWIN and L. J. GRAY: *Nature Geoscience*, 8, 433-440, doi:10.1038/ngeo2424 (2015)
Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather
- 5) N. BUTCHART, A. A. SCAIFE, M. BOURQUI, J. DE GRANDPRE, H. E. HARE, J. KETTLEBOROUGH U. LANGEMATZ, E. MANZINI, F. SASSI, K. SHIBATA, D. SHINDELL and M. SIGMOND: *Climate Dyn.*, 27, 727-741. (2006)
Simulations of anthropogenic change in the strength of the Brewer-Dobson circulation
- 6) Y. KAWATANI and K. HAMILTON: *Nature*, 497, 478-481, doi:10.1038/nature12140 (2013)
Weakened stratospheric Quasi-biennial Oscillation driven by increased tropical mean upwelling
- 7) L. J. GRAY, J. A. ANSTEY, Y. KAWATANI, H. LU, S. OSPREY and V. SCHENZINGER: *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2017-1065> (2017)
Surface impacts of the Quasi Biennial Oscillation,
- 8) S. WATANABE and S. MIYAHARA: *J. Geophys. Res.*, 114, D07110. <https://doi.org/10.1029/2008JD011218> (2009)
Quantification of the gravity wave forcing of the migrating diurnal tide in a gravity wave-resolving general circulation model
- 9) S. WATANABE, K. HAMILTON, S. OSPREY, Y. KAWATANI and E. NISHIMOTO: *Geophys. Res. Lett.*, 45, 1602-1610, <https://doi.org/10.1002/2017GL076406> (2018)
First Successful Hindcasts of the 2016 Disruption of the Stratospheric Quasibiennial Oscillation

- 10) N. HIROTA, H. SHIOGAMA, H. AKIYOSHI, T. OGURA, M. TAKAHASHI, Y. KAWATANI, M. KIMOTO and M. MORI: npj Climate and Atmospheric Science, accepted (2018)
The influences of El Nino and Arctic sea-ice on the QBO disruption in February 2016
- 11) A. NODA: J. Meteor. Soc. Japan, 92, 411-431 (2014)
Generalized transformed Eulerian mean (GTEM) description for Boussinesq fluids

Ⅱ－６ 東アジアの気象に対する熱帯擾乱の影響

国立研究開発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 覚・佐藤 尚毅

平成27～29年度累計予算額：6,216千円（うち平成29年度：1,766千円）

予算額は、間接経費を含む。

〔要旨〕

温暖化に伴う日本を含む東アジア域の降水の変化に関して、MJOや台風などの熱帯・亜熱帯域現象が南岸低気圧などの中緯度現象に及ぼす影響に着目し、観測データの解析に基づいて気候モデルの将来変化予測を評価した。現在気候において、南岸低気圧の発達に関してはMJOの位相や黒潮の蛇行が影響していることが確認された。温暖化時には熱帯域のMJOが強化されると予測するモデルが多いが、その場合には日本周辺の南岸低気圧の活動が活発化すると考えられる。また、観測で得られた台風の長期変動を解析し、気候モデルから得られた台風の将来変化の妥当性を評価した。観測データの長期変動は気候モデルの予測と整合的であり、温暖化時には台風の平均移動経路が変動する可能性が高いことが示された。

〔キーワード〕

南岸低気圧、台風、MJO、黒潮、温暖化

1. はじめに

温暖化に伴う東アジア域の降水の変化を把握するため、本サブテーマでは熱帯・亜熱帯域の現象が中緯度域に及ぼす影響を精査することを目的として研究を実施する。日本周辺に顕著な降水をもたらす現象のひとつとして南岸低気圧に注目し、熱帯擾乱としてのMJO (Madden-Julian Oscillation: マッデン・ジュリアン振動) や亜熱帯循環としての黒潮／黒潮続流の影響を考察し、温暖化による将来変化を含めて解析する。また、台風の将来変化については、これまでに得られている気候モデルの予測に対し、観測データに基づいた評価を行う。

本州南岸を発達しながら通過する南岸低気圧は、普段は降雪の少ない太平洋側の地域に大雪をもたらすことがあり、防災上も重要であるといえる。南岸低気圧は東シナ海で発生することが多く、熱帯・亜熱帯域での気候変動の影響を受ける可能性が考えられる。特に、北半球冬季に卓越する熱帯じょう乱であるMJOはインド洋から太平洋にわたる非常に空間スケールの大きい現象であり、一般に中高緯度の気候に影響を与える可能性が考えられる。また、南岸低気圧の経路は、黒潮／黒潮続流域に沿っている。黒潮／黒潮続流域は全地球規模でみても顕著な暖流であり、海面から大気に供給される熱や水蒸気は南岸低気圧の発生や発達にも影響を与えていると考えられる。したがって、地球温暖化によってMJOのような熱帯じょう乱や黒潮のような亜熱帯循環が変化した場合、南岸低気圧も大きな影響を受ける可能性がある。

台風は我が国をはじめ北西太平洋沿岸諸国に豪雨や暴風、高潮などの気象災害をもたらすと共に、水資源の供給源でもあるため、その統計特性の将来変化予測は社会的に重要であり、これまで多くの研究がなされてきた。特に我が国における台風の上陸数、接近数の変化を予測しその不確実性を評価するためには、台風の総発生数のみならず、平均発生位置や発生後の平均移動経路の将来変化も考慮せねばならない。そこで、平成19-23年度に実施された環境省環境研究総合推進費S-5テーマ2及び平成24-26年度に実施された同2A-1201の一環として、本サブテーマ研究分担者らは第3次及び第5次気候モデル相互比較計画 (CMIP3、CMIP5) の現在気候・将来気候実験データを用いて我が国への台風接近数将来変化のマルチモデル予測を実施した (Yokoi et al. 2013)¹⁾。その結果、平均移動経路の変化により西日本で接近数が減少、東日本で増加する傾向になるとの予測を得た。この予測は多数の気候モデルの一致した意見であるという点である程度の信頼性があると言えるが、この予測の妥当性・現実性をさらに評価する手

段のひとつとして、これまで観測された長期変動の特徴と比較することは意義深いと考えられる。

2. 研究開発目的

地球温暖化を含む気候変動に伴い、全球の大気循環の変動し、それらが日本・東アジア域の降水を大きく変化させている。熱帯・亜熱帯域からも様々な現象を介して、直接的・間接的に中緯度へと影響を及ぼしている。近年では「爆弾低気圧」に対する関心が高まっているが、爆弾低気圧としては、日本海を通るものよりも日本の南岸を通るもののほうが多い。本州南岸を発達しながら通過する南岸低気圧は、普段は降雪の少ない太平洋側の地域に大雪をもたらすことがあり、この点においても防災上重要であるといえる。南岸低気圧は東シナ海で発生することが多く、熱帯・亜熱帯域での気候変動の影響を受ける可能性が考えられる。また、地球温暖化によってMJ0が活発化し、強い降水事例の発生頻度に影響を与える可能性も考えられる。そこで、現在気候において、MJ0の位相や振幅によって、災害につながるような大雪事例の発生頻度がどのように変動しているか解析する。解析の結果に基づいて、MJ0の振幅の増加による強い降水の発生頻度の変化を見積もる。春季の低気圧活動は、冬季に比べ気温が上がり水蒸気量も増えることから降水活動や対流活動としても重要性が高くなる。そこで、春季の低気圧活動について解析を進める。低気圧活動全般に関しては、MJ0に加え、過去の研究から亜熱帯循環、つまり黒潮との関係が指摘されているため、低気圧活動の変動と黒潮流路の変動との関係を統計的に調べる。一方、北半球夏季に顕著な現象としての台風は、我が国へ接近する際の直接的な影響が大きいことから、移動経路に関する予測精度の高度化が望まれている。近年の西太平洋における台風通過頻度の長期変動の特徴を明らかにし、Yokoi et al. (2013)¹⁾で得られた予測情報との類似性を議論する。

3. 研究開発方法

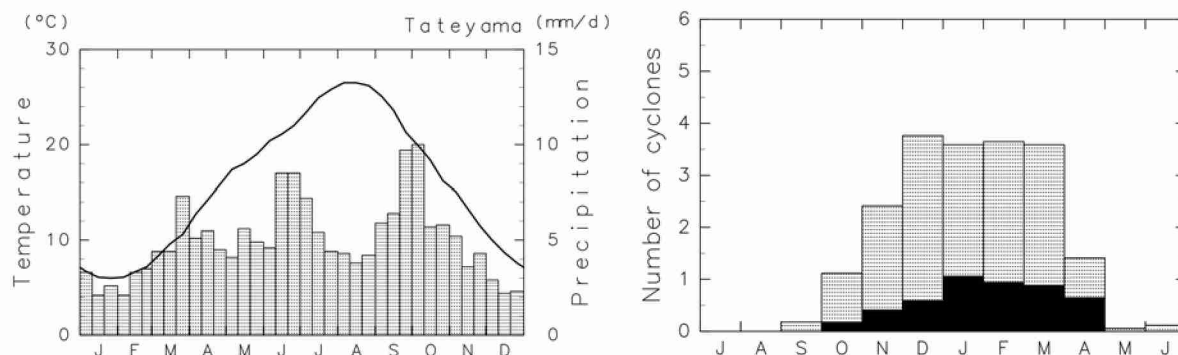
東アジア域では、真冬には低気圧活動は抑制され、むしろ晩冬から早春にかけて活発になる傾向がある。これに伴い、南岸低気圧が多く発生するのも、真冬というよりは晩冬から早春の時期であるため、以下では1～3月の南岸低気圧を解析の対象とする。はじめに、九州大学による爆弾低気圧データベースを用いて、1～3月に日本の南岸で発生、発達した爆弾低気圧を抽出した。次に、Wheeler and Hendon (2004)²⁾を参考にしながら、日別のOLRデータを用いてMJ0の位相を同定した。さらに、それぞれの位相における南岸低気圧発生の前5日間の熱力学場を調べた。ここでは、JRA25再解析データを用いて、比湿と水蒸気フラックスの偏差を解析した。また、低気圧通過時の温度偏差の分布にも同様に調べた。

低気圧活動の変動に対応して、大雪の発生頻度にMJ0依存性があるか解析した。3月には気温が高くなり雪よりも雨になることが多いため、ここでは12～2月のデータを解析した。積雪事例は発生頻度が低く、統計的なばらつきが大きいので、降水についても同様の解析を行った。

地球温暖化によって大気中の水蒸気が増えると積雲対流活動が活発化するため、MJ0も活発化する可能性が考えられる。そこで、CMIP5に参加している気候モデルにおいて、日降水量の出力データを用いてMJ0の将来変化を調べた。はじめに、各気候モデルにおいて、Sato et al. (2009)³⁾を参考にしながら、現在気候におけるMJ0の再現性を評価し、再現性の高い8つの気候モデルを選択した。次に、各モデルが計算した、RCP4.5シナリオにおける2090～2100年のMJ0の振幅を解析し、現在気候と比較した。

MJ0の振幅の増大が、強い降水事例の発生頻度に与える影響を調べるため、現在気候において、東京での降水事例の発生頻度をMJ0の振幅ごとに集計した。次に、東京での日降水30mm以上の強い降水事例の発生頻度を、MJ0の振幅の3次関数としてフィッティングした。このようにして得られた関数を用いて、MJ0の振幅の増加による強い降水の発生頻度の変化を見積もった。

図(6)-1(左)に示すように、関東地方の南部では3月下旬に梅雨や秋雨と並ぶ、降水の極大が明瞭に見られる。この時期の降水極大は「菜種梅雨」とよばれており、従来から日常生活の中でもその存在は認識されている。菜種梅雨は、梅雨や秋雨とは異なって寒候季の現象であり、降水の極大には低気圧活動が関係していると予想される。実際に九州大学の爆弾低気圧データベースによると、爆弾低気圧の発生数は3月から4月にかけて大幅に減少するものの、そのうち日本の南岸を通るものは4月になっても比較的に多く(図(6)-1)、3～4月という時期においても低気圧活動の影響は無視できない。



図(6)-1 (左) アメダスによる館山(千葉)の旬別気温と日降水量の季節進行(気候平均)
(右) 爆弾低気圧の年平均発生数(気候平均)。灰色は全体、黒は南岸低気圧。

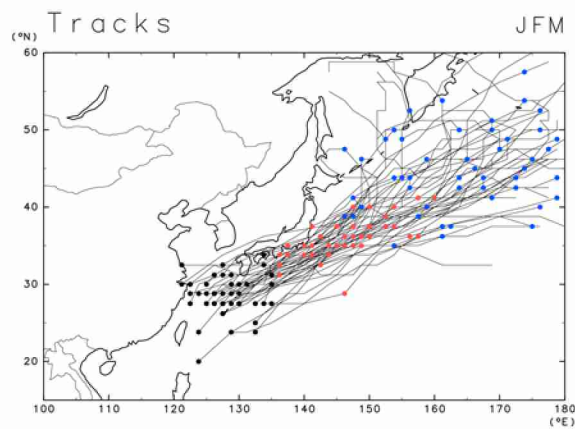
そこで、客観解析データを用いて、本州南岸での低気圧活動の分布を調べた。ここでは、低気圧活動の指標として、比較的短い周期(周期8日以下)の変動成分による正味の水蒸気輸送($[\nu q]$ 、 ν は南北風偏差、 q は比湿偏差)を対流圏下層(850hPa面)で解析した(統計期間は1994~2013年)。

過去の研究から、南岸低気圧の発達には黒潮の流路の影響を受けることが分かっている。すなわち、非大蛇行時には、大蛇行時に比べて、南岸低気圧が発達しやすいことが、観測データの統計的な解析によって明らかになっている。一方、地球温暖化時の黒潮の変動の予測は、一般には高解像度かつ長期の数値シミュレーションを必要とするため、容易ではなく不確実性が大きい。しかし、いくつかの報告では、地球温暖化が進行すると亜熱帯循環の強化に伴い黒潮の流量は増えると予測されている。観測事実として、黒潮の流量が正偏差になっている時には非大蛇行流路をとることが多いことが知られているので、地球温暖化により非大蛇行流路をとることが多くなる可能性も考えられる。黒潮の流量や流路の変動は、地球温暖化以外のさまざまな変動の影響を受けているが、いずれにしても、亜熱帯循環の変動に伴って生じる黒潮の流量や流路の違いが、低気圧活動に与える影響を評価しておくことは重要であろう。そこで、海面水温(SST)データを用い、1994~2013年の3月下旬のSSTの分布を、「非大蛇行接岸流路」に近いタイプ(接岸型)で黒潮の流路が沿岸に近くなっている10年と、それ以外(離岸型)の10年とに分けた。その上で、「接岸型」と「離岸型」の年のそれぞれで、低気圧活動の分布を調べた。

気象庁の台風ベストトラックデータを用い、1961~2016年の56年間について、台風活動が最も活発な7~9月を対象に、台風通過頻度の長期変動を解析した。まず、北西太平洋各域での56年間の変化を大まかに把握するため、期間を前半(1961~1988年:期間1)と後半(1989~2016年:期間2)に分け、緯度経度5度の格子内の通過頻度の差を議論する。次に、東日本の通過頻度の変動を詳細に調べるため、北緯40度東経139度~北緯40度東経146度の線分上での通過頻度について、7年移動平均(1961~1967年、1962~1968年、・・・、2010~2016年)の1961~2016年平均(平年値)からの偏差を解析した。どちらのアプローチにおいても、Yokoi and Takayabu (2013)⁴⁾により開発され、Yokoi et al. (2013)¹⁾でも用いられた「発生地別台風統計法(ISTAGL)」を用いて、通過頻度の差・変動の要因分析を行った。この手法を用いると、通過頻度の差を、台風の総発生数の差の影響、発生分布の差の影響、平均移動経路の差の影響、及びそれらの複合的(非線型的)な影響に分離することができる(なお、本研究では複合的な影響は全般的に小さかったため、議論しない)。また、本研究では台風の「発生」は最大風速が17[m/s]を超えた時点とし、弱化して最大風速がこの値を下回るか、または温帯低気圧化するまで追跡した。すなわち、台風が温帯低気圧に変化した後は通過頻度の計数から除外した。

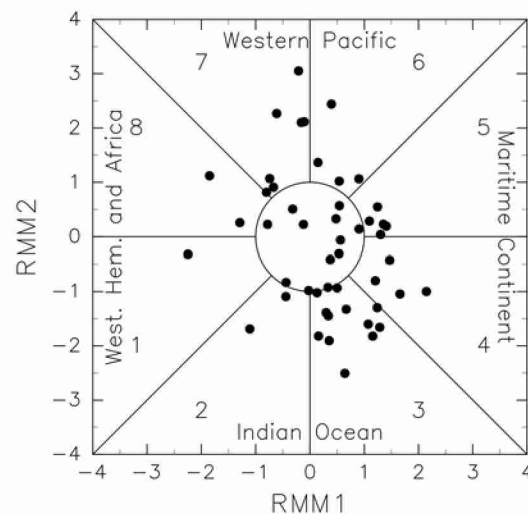
4. 結果及び考察

日本の南岸で発生、発達した爆弾低気圧を抽出した結果、爆弾低気圧になるような強い南岸低気圧は、東シナ海付近で発生し、日本の南岸を東または北東へ進みながら発達していることが確かめられた(図(6)-2)。

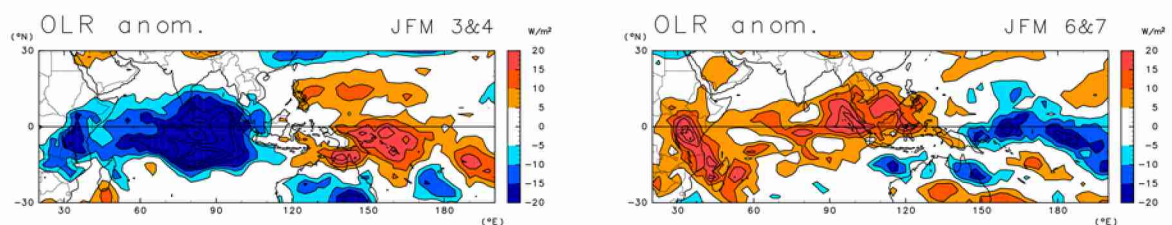


図(6)-2 1～3月の南岸低気圧の経路

次に、図(6)-3に南岸低気圧が発生した時のMJ0の位相を示す。図(6)-4と見比べると、インド洋で対流が活発になっている位相3と4のときに南岸低気圧が多く発達していることがわかる。また、それとは別に、海洋大陸から西太平洋にかけての領域で対流が活発になっている位相6と7のときにも、南岸低気圧の発生が多い。位相3と4での南岸低気圧の発生は冬の前半である11～12月にもみられるが、位相6と7での南岸低気圧の発生はこの時期に特有である。



図(6)-3 南岸低気圧発生時のMJ0の位相



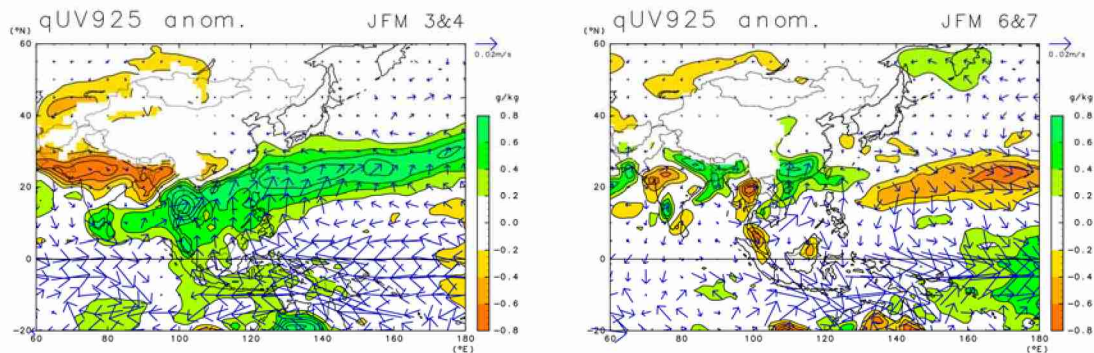
図(6)-4 位相3、4（左）、位相6、7（右）で南岸低気圧が発生したときのOLR偏差

それぞれの位相における南岸低気圧発生の前5日間の熱力学場を調べた結果、位相3、4で南岸低気圧が発生する時には、熱帯の対流活動はインド洋で活発であるが、日本の南東の太平洋域からの水蒸気の供給が増えていることがわかった(図(6)-5)。赤道太平洋域での対流不活潑域にともなう下層の高気圧性循環の一部が水蒸気の供給に奇与しているようにみえる。これに伴い、東アジア域で傾圧性が強化

されていた。この傾圧性の強化に伴って、南岸低気圧に対応する低気圧活動が平均よりも強くなっていることが示された。低気圧発生時に限定しないで解析した平均的な低気圧活動の偏差、爆弾低気圧の発生数とも、この位相の時に最も大きい。

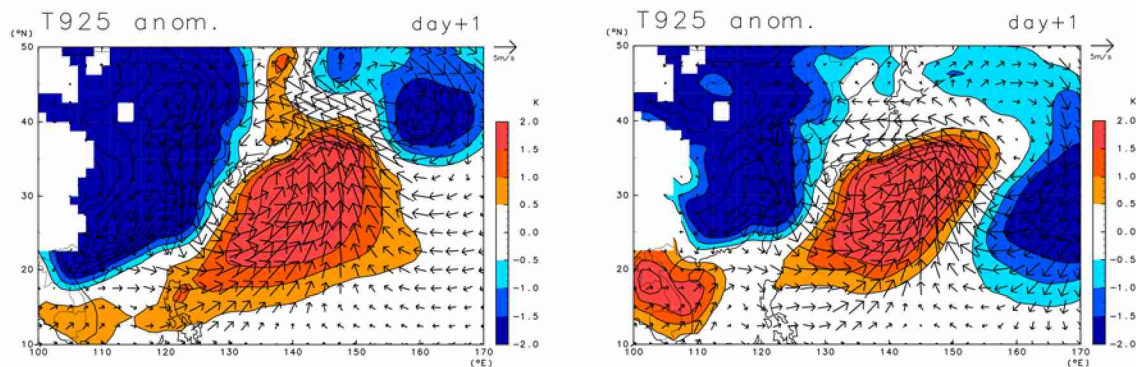
一方、位相 6、7 で南岸低気圧が発生する時には、太平洋域で活発であるにもかかわらず、東部インド洋から東南アジアを通して水蒸気が供給されていることがわかる（図(6)-5）。位相 6、7 における東南アジアからの水蒸気供給の増加は、低気圧発生時以外にはみられない。東アジア域の平均場においては、傾圧性の強化のような有意な偏差は生じていない。平均的な低気圧活動も強くなってはおらず、一方で、顕著事例としての爆弾低気圧は増加していた。この原因については未解明である。

最も大きな偏差がみられた、インド洋で対流活動が活発な位相での東アジア域の低気圧活動の状態から、地球温暖化時の低気圧活動の変化には、インド洋での対流活動と西太平洋域での対流活動のバランスの変化が重要であることが強く示唆される。



図(6)-5 位相 3、4（左）と 6、7（右）で南岸低気圧が発生したときの 925hPa 比湿、水蒸気フラックス偏差

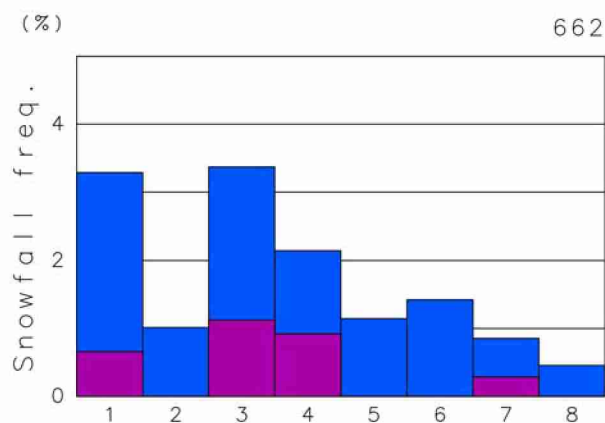
また、低気圧通過時の温度偏差の分布にも MJ0 の位相による差異が見られた。図(6)-6 は、位相 3、4 と位相 6、7 で発生した南岸低気圧（発生後 1 日）に伴う気温、風偏差を示している。位相 3、4 で発生した低気圧は典型的な傾圧不安定波の構造に似ているように見えるが、位相 6、7 で発生した低気圧は東西に連なる波型の構造がやや不明瞭で、低気圧前面での暖気の流入が弱くなっている。このことは、位相 6、7 で発生した低気圧の東側は、位相 3、4 の場合と比べて気温が低くなっていることを意味し、南岸低気圧によってもたらされる降水が雨になるか雪になるかという違いにも MJ0 が影響している可能性がある。



図(6)-6 位相 3、4（左）と 6、7（右）で発生した南岸低気圧（発生後 1 日）に伴う気温、風偏差

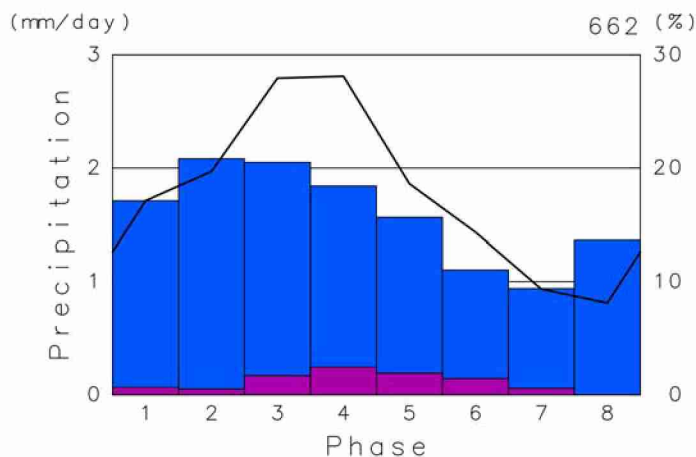
図(6)-7 に示されるように、MJ0 の位相が 3、4 のときに東京では積雪が観測されやすいことがわかる。関東南部では他の観測地点でも同じような傾向がみられる（図は省略）。とくに、10cm 以上の大雪事例の大半は、MJ0 の位相が 3、4 のときに発生している。これは、MJ0 に伴う対流活発域がインド洋に位置しているときに大雪になりやすいことを示している。これは、図(6)-3 に示された、MJ0 の位相が 3、4

のときに強い南岸低気圧が発生しやすいという結果と整合的である。たとえば、2014年2月8、14日や2016年1月18日、2018年1月22日のような、最近の大雪事例も位相3、4のときに発生している。一方、MJ0の位相が6、7のときには、強い南岸低気圧は発生しやすいが、積雪事例が増えるわけではない。この原因は現在のところ未解明である。



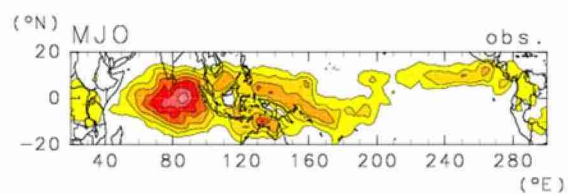
図(6)-7 現在気候の12～2月においてMJ0の位相ごとに集計した東京での積雪事例の発生頻度。1日あたり発生確率を示す。青色は1cm以上の積雪、紫色は10cm以上の積雪。

図(6)-8に示されるように、MJ0の位相が3、4のときに東京では平均日降水量が多く、30mm以上という冬季としては比較的強い降水が発生する頻度も高いことがわかる。ここまでの結果は、位相3、4では南岸低気圧が発生しやすく、降水が生じる確率が高くなり、雪も降りやすいと考えれば整合的に理解できる。

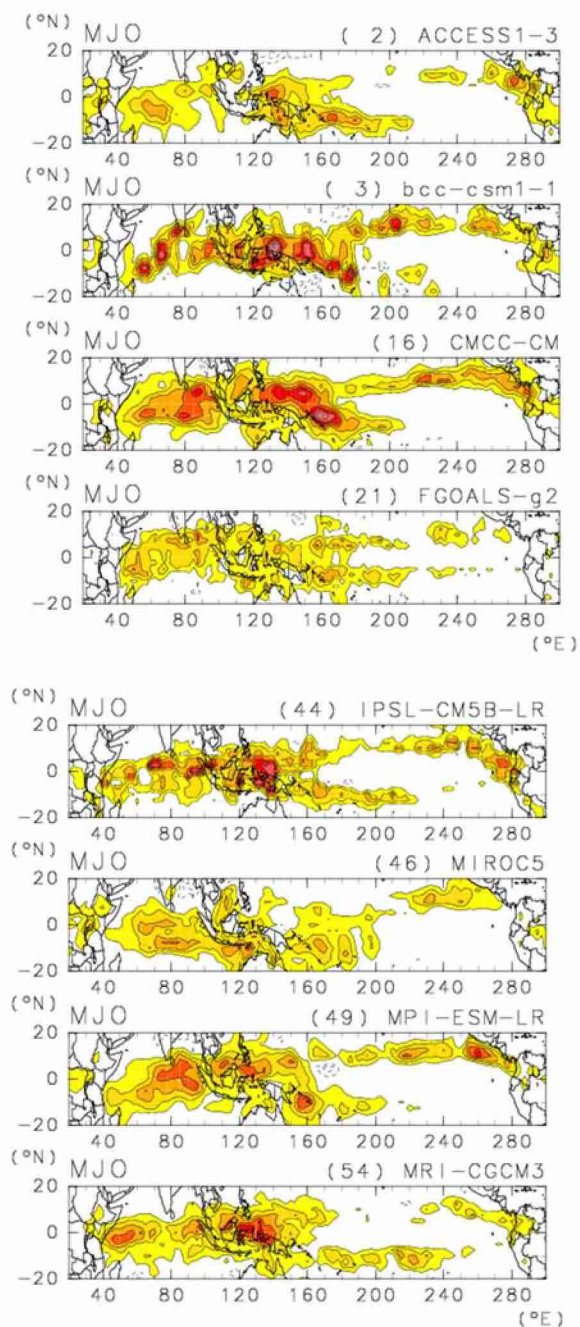


図(6)-8 現在気候の12～2月においてMJ0の位相ごとに集計した東京での降水事例の発生頻度。1日あたり発生確率を示す。青色は1mm以上の降水、紫色は30mm以上の降水。黒の実線は日平均降水量。

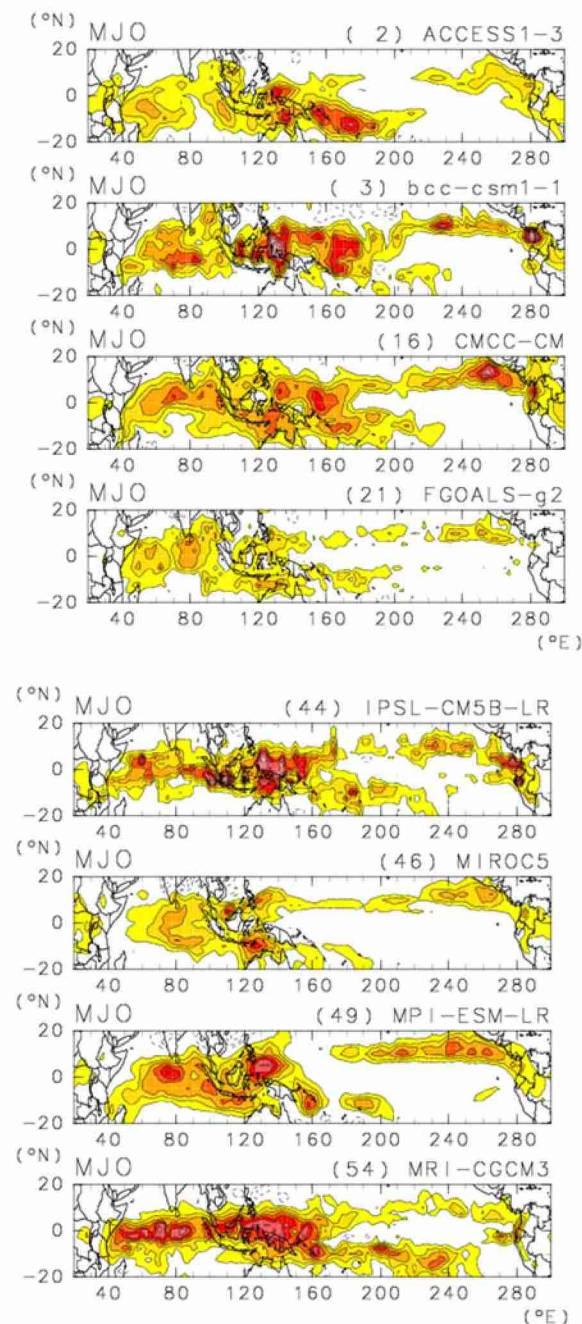
観測データから得られたMJ0の振幅の分布を図(6)-9に示す。次に、選択された8つの気候モデルにおけるMJ0の振幅の分布を図(6)-10に示す。図(6)-9と10を比較すると、今回選択された8つの気候モデルにおいてはMJ0がある程度の精度で再現されていることがわかる。図(6)-11に、各モデルが計算した、RCP4.5シナリオにおける2090～2100年のMJ0の振幅の分布を示す。8個中7個のモデルでMJ0の振幅は増加している。増加の幅は最も小さいモデルで+3.7%、最も大きいモデルで+47.9%である。このように増加幅はモデルによってばらつくが、大半のモデルがMJ0の強化を予想しており、現時点では、地球温暖化によってMJ0の振幅は大きくなると考えるのが妥当と思われる。



図(6)-9 観測された日降水量データにおけるMJOの振幅の分布。



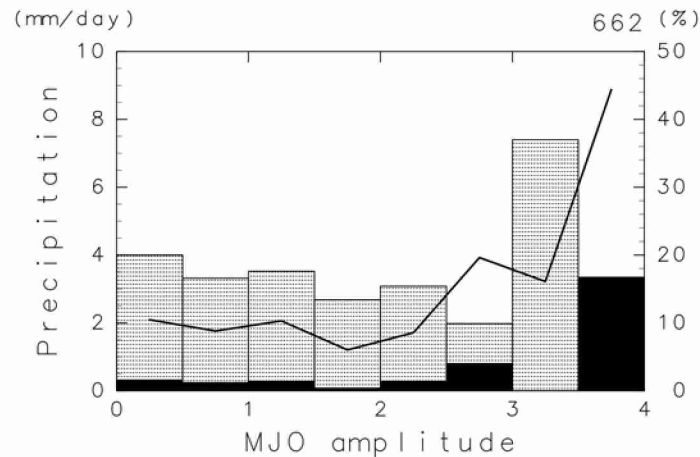
図(6)-10 historical runにおけるMJOの振幅の分布。



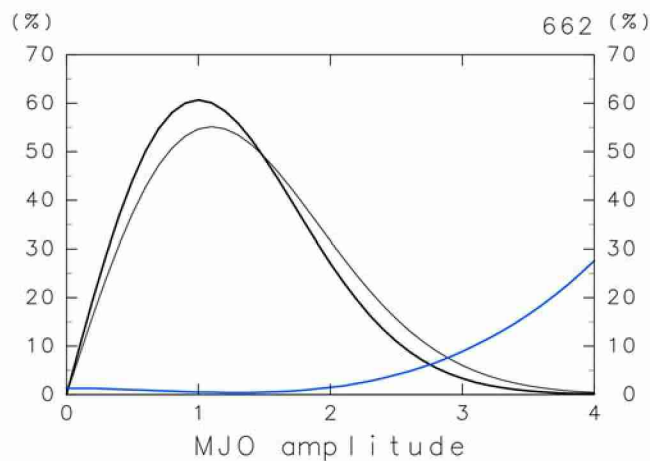
図(6)-11 図(6)-10と同じ。ただし、RCP4.5における2091～2100年。

図(6)-12より、MJ0の振幅が大きいほど平均降水量も、強い降水の発生頻度も増加していることがわかる。図(6)-8より位相3、4のときに強い降水が増えることがわかっているが、MJ0の振幅が大きいほど、このような傾向が顕著に表れていると考えられる。次に、強い降水事例の発生頻度を、MJ0の振幅の3次関数としてフィッティングした結果を図(6)-13に示す。MJ0の振幅が極端に強い場合を除くと、強い降水事例の頻度は非常に低いことがわかる。しかし、MJ0の振幅が極端に強い場合には急激に頻度が増加している。黒い線で示された振幅ごとの頻度分布と、青い線で示された関数との積の積分が、強い降水の発生頻度になる。このため、MJ0の振幅が全体に少し増加して、頻度分布が図(6)-13中で太い線から細い線に変化しただけであっても、積分して得られる強い降水事例の発生頻度は急に大きくなる。たとえば、MJ0の振幅の増加幅が5%、10%、20%、50%の場合、日降水30mm以上の強い降水事例の頻度は、それぞれ13%、28%、68%、245%増加することになる。この計算では、全体的な平均気温の上昇による降水量の増加は考慮にいれておらず、将来気候においてもMJ0の振幅と強い降水の発生頻度は変わらないという仮定のもとで見積もりを行っている。実際には温暖化によって気温が上昇すれば、大気中の水蒸

気が増え降水も増加するため、強い降水の頻度はこれよりもさらに大きく増加する可能性がある。大雪事例については統計的な標本数が十分ではないため頻度の将来変化の解析を行っていないが、気温が上昇しても、関東地方の山間部のようにもともと気温が低い地域では、雪が雨に変わる効果よりも、強い降水事例の増加の効果のほうが大きく働くと考えられ、大雪による災害が発生しやすくなる可能性に注意が必要である。逆に、気温の高い南部の平野部では、冬季にはこれまであまり注意がはられてこなかった大雨による災害にも留意する必要がある。

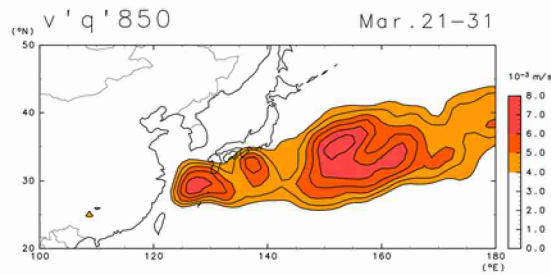


図(6)-12 現在気候の12～2月においてMJOの振幅ごとに集計した東京での降水事例の発生頻度。1日あたり発生確率を示す。灰色は1mm以上の降水、黒色は30mm以上の降水。黒の実線は日平均降水量。



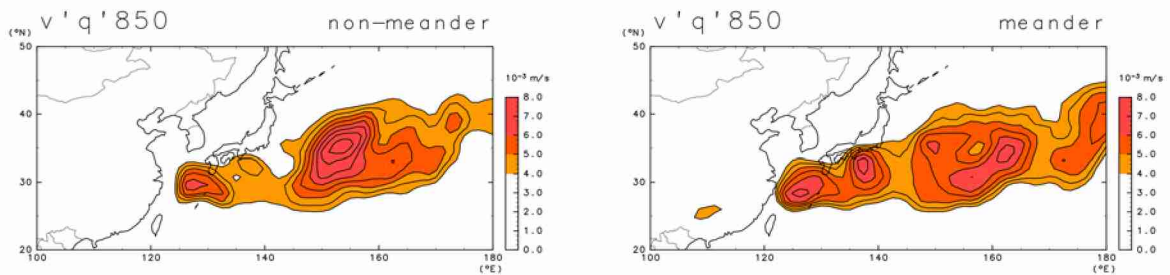
図(6)-13 ガウス分布を仮定した場合のMJOの振幅の頻度分布（太い線）、MJOの振幅が10%増加した場合の頻度分布（細い線）、図(6)-12に示された30mm以上の降水事例の発生頻度を3次関数でフィッティングしたもの（青線）。

本州南岸での低気圧活動の分布を調べたところ、図(6)-14に示すように、東シナ海と本州の南岸に低気圧活動の極大がみられた。日本付近に注目した場合、3月中旬や4月上旬よりも3月下旬のほうが低気圧活動は強くなっている。



図(6)-14 3月下旬における850hPa面の $[v'q']$ (気候平均)

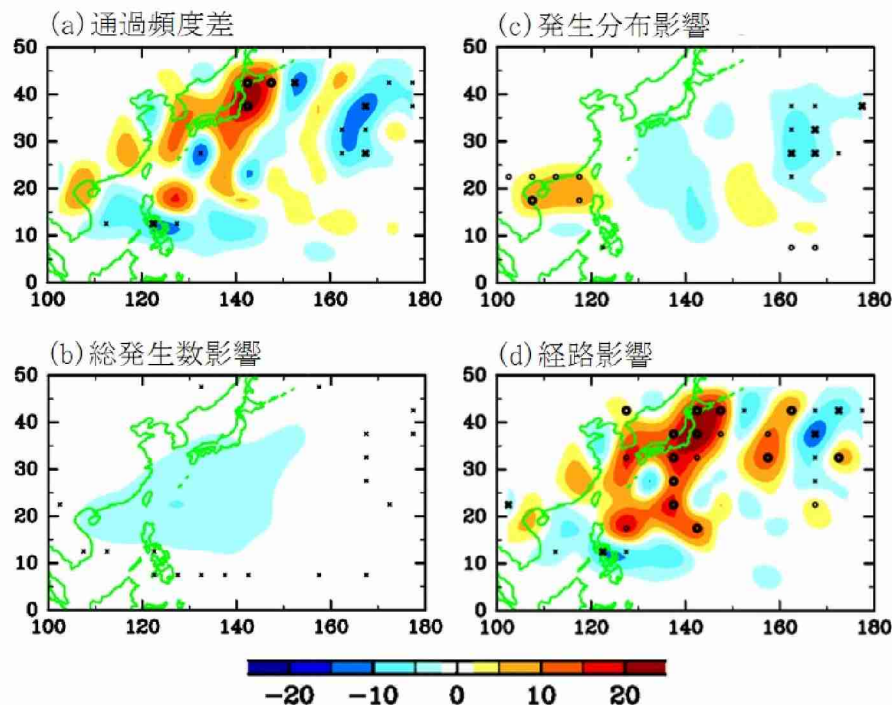
黒潮の流路が「接岸型」になっている年と「離岸型」になっている年のそれぞれで、低気圧活動の分布を調べた結果、「離岸型」の場合のほうが、 $[v'q']$ で評価される低気圧活動が関東の南岸で強くなっていることが分かった(図(6)-15)。これは、上で紹介した過去の研究とは逆の結果である。ただし、黒潮続流域での低気圧活動は、SSTの南北勾配の大きい「接岸型」の年のほうが強く、過去の研究と整合する。



図(6)-15 3月下旬における850hPa面の $[v'q']$ (左は「接岸型」、右は「離岸型」)

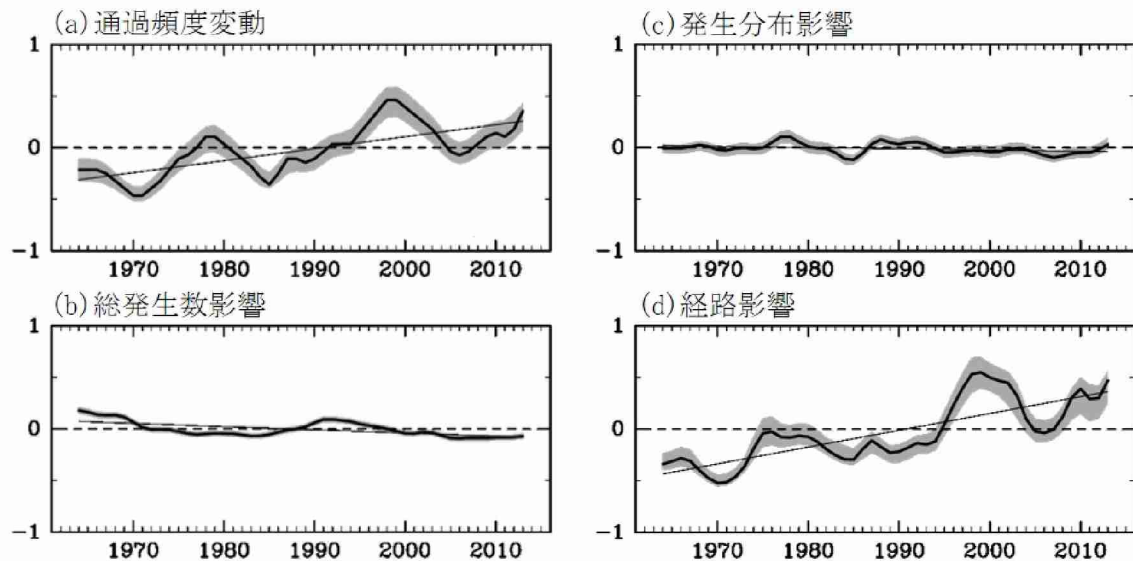
仮に、地球温暖化で黒潮が接岸型の流路をとる頻度が多くなった場合、冬季全体では南岸低気圧が活発化する一方で菜種梅雨は現れにくくなることになる。しかし、黒潮の将来予測の不確実性に加え、そもそも菜種梅雨のしくみ、とくに黒潮との関連が明らかではないので、まだ慎重な解析が必要である。3月下旬に降水極大が現れる原因については、たとえば、3月の終わりから4月になると黒潮を横切る北西季節風の風速が弱まるので黒潮域での水温前線の影響を受けやすくなる一方で、本州南岸での低気圧活動は全体的には早春を過ぎ4月以降になると季節進行とともに弱くなっていくことから、ちょうど3月下旬に低気圧活動の極大が生じている可能性が考えられる。また、沿岸域の水温が高くなる「接岸型」より、少し沖合に水温勾配が現れる「離岸型」のほうが低気圧活動が強くなる原因としては、低気圧の発達には、水温が高いことよりも、水温の勾配があることがより大きく寄与している、という仮説を立てることもできるが、過去の研究との整合性も含めて今後の研究が必要である。

図(6)-16aに期間1と2での台風通過頻度の差を示す。正值(負値)は期間2の方が頻度が高い(低い)ことをあらわす。東日本から日本の東海上で期間2に頻度が有意に増加していた一方、フィリピンから南シナ海、東経160度以東の洋上、西日本の南海上では有意に減少していた。この差についてISTAGL解析を施した結果が図(6)-16b-dである。3種類の影響のうち、最も大きなものは平均移動経路の影響である。特に、東経135-150度付近で有意な正の影響、すなわち期間2に期間1と比べて通過頻度を増加させるように働いていた。東日本から日本の東海上での通過頻度の有意な増加は平均移動経路変動の影響であると言える。一方、フィリピンから南シナ海においては有意な負となっており、平均移動経路変動はこれらの地域での通過頻度の減少に貢献していた。また、総発生数の影響は、期間2の方が台風の総数が少なかったことを反映して、西太平洋全域で負となっている。発生分布影響は、南シナ海北部での発生数が増加した影響でベトナム北部や中国南部で有意な正となっており、また東経160度以東で発生数が減少した影響でその海域で有意な負となっている。



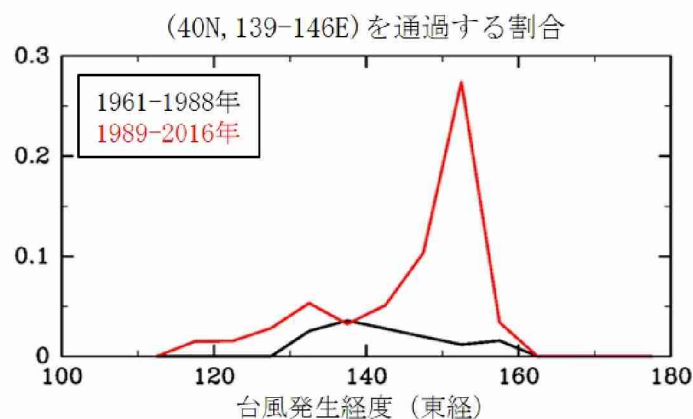
図(6)-16 (a)期間2における台風通過頻度の、期間1からの差、及び、(b-d)ISTAGL解析を用いた差の要因分析(b:総発生数影響、c:発生分布影響、d:平均移動経路影響)。○(×)印は有意水準95%で差が統計的に有意であることを示す。

次に、北緯40度東経139度ー北緯40度東経146度の線分上の通過頻度の長期変動とそのISTAGL解析結果を図(6)-17に示す。通過頻度は、1970年代後半と1990年代後半の極大、1970年代前半、1980年代中盤、2000年代中盤の極小で特徴づけられる15-20年程度の周期の変動を示しつつ、期間全体で緩やかに増加トレンド(0.58[個/シーズン/50年])にある。通過頻度の56年間の平均値は0.64[個/シーズン]であるので、大雑把に言えばこの56年で通過頻度が約3倍に増加したことになる。ISTAGL解析の結果によると、この15-20年周期変動と増加トレンドはほぼ平均移動経路変動の影響であることがわかる。

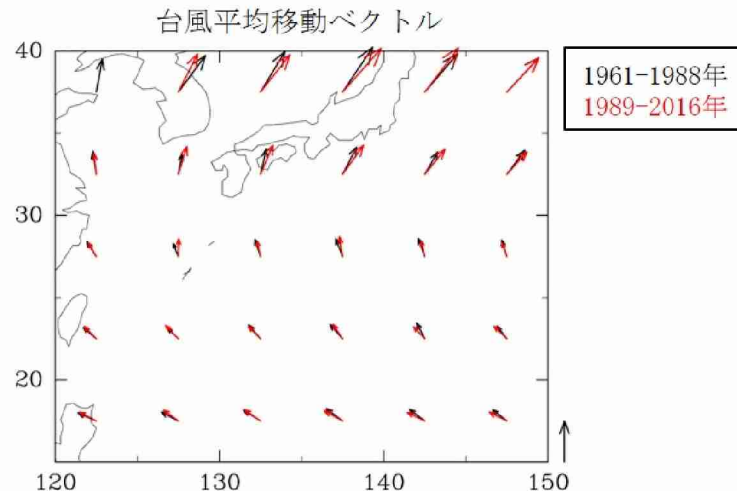


図(6)-17 北緯40度東経139度－北緯40度東経146度の線分上を通過する台風の個数の長期変動。(a)7年移動平均した通過頻度の平年偏差、及び、(b-d)ISTAGL解析を用いた偏差の要因分析（b:総発生数影響、c:発生分布影響、d:平均移動経路影響）。直線は線型トレンド。

平均移動経路変動についてより詳しく調べるため、北西太平洋の各経度帯で発生した台風がこの線分上を通過する割合について、期間1と2で比較した（図(6)-18）。その結果、どの経度でも期間2の方が割合が増加しており、特に東経150度付近で発生した台風が線分上を通過する割合が大幅に増加していたことがわかった。また、北西太平洋各域での台風の平均移動ベクトルについて期間1と2とで比較したところ（図(6)-19）、北緯25度以北の日本の南海上で、期間2には1と比べてより東向きを進路をとりやすかったことがわかった。この結果は通過頻度の増加と整合的である。また、亜熱帯中部太平洋（北緯25度以南、東経140度以東）では、期間2では1よりも台風が北上しにくい傾向にあったこともわかった。この地域を通過する台風の多くはその後日本の東海上を北東進することを考慮すると、この傾向はこの地域で発生した台風が線分上を通過する割合の増加と整合的である。



図(6)-18 北西太平洋の各経度帯で発生した台風が、北緯40度東経139度－北緯40度東経146度の線分上を通過する割合。黒線は期間1、赤線は期間2。



図(6)-19 台風平均移動ベクトルの空間分布。黒矢印は期間1、赤矢印は期間2。凡例は10m/sをあらわす。

これらの結果のうち、近年の東日本の通過頻度の増加、その原因が主に平均移動経路変動であること、そして日本の南海上でより東向きの進路を取りやすくなってきている点は、Yokoi et al. (2013)¹⁾によって出された「平均移動経路変化が東日本への台風接近数を増加(もしくは他の要因による減少の緩和)させる」という将来変化予測と同じ傾向であり、この予測が非現実的なものではなく、少なくとも現実には生じる可能性があることがわかった。なお、本研究で明らかとなったトレンドが人為起源の地球温暖化に伴うものなのか、より長周期の自然変動の一部であるのか、については、現時点では不明である。

5. 本研究により得られた成果

(1) 科学的意義

冬季の太平洋側の地方、特に関東地方での大雪は、社会的な影響も大きいですが、気候モデルの解像度の限界から、温暖化予測実験では直接的に予想することは困難であった。本研究では、現在気候において、大雪の発生につながるような熱帯、亜熱帯域での大きなスケールでの変動を検出し、その結果を温暖化予測実験の結果に適用することによって、大雪や大雨の変化の予想を可能にした。本研究での解析により、温暖化に伴って、関東地方南部での局地的な大雪や大雨の発生が増加するとの予測を提示した。

これまで、台風の強度や発生数などの統計特性の将来変化については多くの予測研究があるが、それらによって出された予測情報に対応するような変化はほとんど観測データから解析されてこなかった。本研究では、東日本への接近数に対する平均移動経路の影響という限定的な特性ながら、観測された長期変動とマルチモデル予測の結果が整合的な傾向にある統計特性を提示できたことは、興味深いものである。本研究を通して、これまでの環境研究総合推進費の一環として本サブテーマ研究分担者が出した将来予測情報の妥当性・現実性を確認できたことは意義がある。

(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>

熱帯・亜熱帯域の現象把握と解明は、日本周辺域への影響のみならず、アジア・太平洋地域の気候リスクの評価や適応計画の策定に直接的に資することとなり、「アジア太平洋適応情報プラットフォーム（AP-PLAT）」等の構築にむけた基盤的知見となり得る。

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) N. SATO, M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, Y. TANIMOTO, and R. SHIROOKA: J. Oceanography, 72(5), 697-705 (2016), Contribution of sea-surface wind curl to the maintenance of the SST gradient along the upstream Kuroshio Extension in early summer.
- 2) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI, and K. YONEYAMA: Mon. Wea. Rev, 145(9), 3745-3761, doi: 10.1175/MWR-D-16-0468.1 (2017), Diurnal Cycle of Precipitation Observed in the Western Coastal Area of Sumatra Island: Offshore Preconditioning by Gravity Waves.

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 城岡竜一、横井覚：北海道の農業気象, 68, 27-30 (2016)
「気候変動予測モデルにみられる将来の台風」

(2) 口頭発表（学会等）

- 1) S. YOKOI, and A. H. SOBEL: IUGG General Assembly 2015, Prague, Czech, 2015
“Intraseasonal variability of the moist static energy budget over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO field campaign.”
- 2) S. YOKOI, and A. H. SOBEL: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
“Seasonal march and intraseasonal variability of the moist static energy budget over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO.”
- 3) S. YOKOI: AOGS 12th Annual Meeting, Singapore, 2015
“Multi-reanalysis comparison of variability in analysis increment of column water vapor associated with Madden-Julian Oscillation.”
- 4) S. YOKOI: Tropical Meteorology Workshop, Aizuwakamatsu, Japan, 2015
“Moist static energy variability associated with Madden-Julian oscillation.”
- 5) 佐藤尚毅、野中正見、笹井義一、佐々木英治、城岡竜一、谷本陽一：2015年度日本海洋学会秋季大会（2015）
「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」
- 6) 横井覚：日本気象学会2015年度秋季大会（2015）
「インドシナ半島における季節内変動の地理的分布」
- 7) S. YOKOI: AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, USA, 2015
“Variability in moist static energy budget associated with the Madden-Julian Oscillation over the eastern Maritime Continent during CINDY2011/DYNAMO extended observing period.”

- 8) N. SATO, M. NONAKA, Y. SASAI, H. SASAKI, Y. TANIMOTO and R. SHIROOKA: CLIVAR/JAMSTEC Workshop on the Kuroshio Current and Extension System: Theory, Observations and Ocean Climate Modelling, Yokohama, 2016
 “Contribution of sea-surface wind curl to the maintenance of the SST gradient along the upstream Kuroshio Extension in early summer.”
- 9) N. SATO and R. SHIROOKA: The International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2016
 “Influence of the MJO on the extratropical cyclones passing along the southern coast of Japan.”
- 10) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, and K. YONEYAMA: Workshop on intraseasonal processes and prediction in the Maritime Continent, Singapore, 2016
 “Modulation of diurnal cycle by Madden-Julian Oscillation during Pre-YMC2015 field campaign.”
- 11) R. SHIROOKA, B. GENG, J. SUZUKI, H. KUBOTA, M. KATSUMATA, T. NASUNO, T. SHINODA and H. UYEDA: 32nd Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, San Juan, 2016
 “Intra-seasonal oscillation and typhoon activity during PALAU intensive observation around the tropical western Pacific.”
- 12) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会2016年度春季大会（2016）
 「MJOの位相が南岸低気圧に与える影響」
- 13) 横井覚、森修一、勝俣昌己、米山邦夫：日本気象学会2016年度春季大会（2016）
 「海陸同期ラジオゾンデ観測でとらえたスマトラ島西岸域の日変化 ～自由対流圏下部の気温変化～」
- 14) S. YOKOI: Workshop on global precipitation systems, Yokohama, Japan, 2016
 “Diurnal cycle of precipitation in western coastal area of Sumatra Island observed during Pre-YMC field campaign.”
- 15) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会2016年度秋季大会（2016）
 「MJOの位相が南岸低気圧の発生と構造に与える影響」
- 16) 横井覚、森修一、勝俣昌己、米山邦夫：日本気象学会2016年度秋季大会（2016）
 「Pre-YMC観測データを用いた降水日変化メカニズムの検証」
- 17) S. YOKOI: Workshop on global precipitation systems, Yokohama (2016)
 “Diurnal cycle of precipitation in western coastal area of Sumatra Island observed during Pre-YMC field campaign”
- 18) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, K. YASUNAGA and K. YONEYAMA: 2016 AGU Fall Meeting, San Francisco (2016)
 “Diurnal cycle and its modulation by Madden-Julian oscillation observed around western coast of Sumatra Island: preconditioning for offshore convection by gravity waves”
- 19) N. SATO, S. YOKOI and R. SHIROOKA: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan (2017)
 “Influence of the MJO and Kuroshio on the cyclone activity around Japan”
- 20) S. YOKOI: The 2nd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan (2017)
 “Future change of extreme precipitation projected by NICAM AMIP-type experiment”
- 21) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI, and K. YONEYAMA: EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria, 2017
 “Diurnal cycle of precipitation observed in the western coastal area of Sumatra Island, Indonesia: Offshore preconditioning by gravity waves.”

- 22) R. SHIROOKA: EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria, 2017
“Observational research study around tropical Western Pacific: PALAU (Pacific Area Long-term Atmospheric observation for Understanding climate change) project.”
- 23) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI, and K. YONEYAMA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Observational study of diurnal offshore migration of precipitation area over the Indonesian Maritime Continent.”
- 24) R. SHIROOKA: JpGU-AGU Joint Meeting 2017, Chiba, Japan, 2017
“Intra-seasonal oscillation and typhoon activity obtained by long-term observational project around warm pool region.”
- 25) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会2017年度春季大会（2017）
「早春における関東地方南岸での低気圧活動と降水の極大」
- 26) S. YOKOI, S. MORI, M. KATSUMATA, B. GENG, K. YASUNAGA, F. SYAMSUDIN, NURHAYATI, and K. YONEYAMA: AOGS 14th Annual Meeting, Singapore, 2017
“Diurnal offshore migration of precipitation area over western coastal waters of Sumatra Island observed during Pre-YMC field campaign: Offshore preconditioning due to gravity waves.”
- 27) R. SHIROOKA: Workshop on Aerosol Observation and its Impact in East and Southeast Asia, Toyama, Japan, 2017
“Current Status of the Continuous Observation at Palau Site.”
- 28) 横井覚：第48回メソ気象研究会・気象災害委員会研究会（2017）
「台風通過頻度の統計解析からみた2016年台風」
- 29) 佐藤尚毅、城岡竜一：日本気象学会2017年度秋季大会（2017）
「基本場の東西勾配を考慮した浅水方程式系におけるMJO的な東進モード」
- 30) N. SATO, S. YOKOI, and R. SHIROOKA: The 3rd International Workshop on “Climate Change and Precipitation in the East Asia”, Tokyo, Japan, 2018
“Influence of the MJO on the wintertime cyclone activity around Japan.”

（３）知的財産権

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) JAMSTEC横浜研究所193回公開セミナーにて講演「マッデン・ジュリアン振動（MJO）の解明をめざして」（実施者：横井覚、主催：JAMSTEC横浜研究所、平成27年6月20日）
- 2) 平成27年度理数系教員指導力向上研修「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成27年6月22日、参加者約20名）
- 3) 平成27年度理数系教員指導力向上研修「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成27年12月28日、参加者約20名）
- 4) 東京学芸大学カフェテリア講座「天気予報セミナー ～気象予報士に挑戦～」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学、平成28年4月17日）
- 5) 平成28年度理数系教員指導力向上研修「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成28年6月22日、23日、参加者計32名）
- 6) 東京学芸大学オープンキャンパスにおける模擬授業「天気予報に挑戦～明日の天気を予想してみよう」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学、平成28年7月23日、聴講者約60名）
- 7) 東京学芸大学公開講座「親子で学ぶ天気図講座」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学、平成28年8月3日、11日、聴講者計92名）

- 8) 三重大学 教育関係共同利用拠点シンポジウム（実施者：佐藤尚毅、主催：三重大学、平成28年12月22日、聴講者約100名）
- 9) 東京学芸大学理科教員支援センター出張研修「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（実施者：佐藤尚毅：平成29年3月13日、場所：名護市立屋我地ひるぎ学園、参加者約20名）
- 10) 平成29年度理数系教員指導力向上研修「天気図で学ぶ天気予報と気象学」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成29年6月22日、10月19日、参加者計48名）
- 11) 鎌倉市生涯学習センター講座「JAMSTEC/地球環境変動研究の最前線」第1回（実施者：横井覚、場所：大船学習センター、平成29年7月12日）
- 12) 東京学芸大学公開講座「気象予報士に挑戦」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学、平成29年7月15日、8月5日、12月9日、16日、聴講者計33名）
- 13) 平成29年度夏季教員セミナー「気象予報士に挑戦」（実施者：佐藤尚毅、主催：多摩六都科学館、平成29年7月25日、聴講者18名）
- 14) 東京学芸大学公開講座「親子で学ぶ天気図講座」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学、平成29年8月3日、11日、聴講者計188名）
- 15) 平成29年度理数系教員指導力向上研修「気象予報士に挑戦」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成29年8月10日、参加者34名）
- 16) 東京都立調布北高等学校向け模擬授業「気象予報士に挑戦」（実施者：佐藤尚毅、平成29年9月20日、聴講者12名）
- 17) 沖縄県立球陽高等学校向け模擬授業「気象予報士に挑戦」（実施者：佐藤尚毅、平成29年11月6日、聴講者40名）
- 18) 平成29年度理数系教員指導力向上研修「ウィンタースポーツのための天気図入門講座」（実施者：佐藤尚毅、主催：東京学芸大学理科教員支援センター、平成29年11月30日、参加者20名）

（５）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 朝日新聞（2015年10月11日朝刊、全国版、34頁）「10月10日…あれ、何の日？」
- 2) 朝日新聞（2015年10月19日、全国版、1頁）「台風時の高潮ハザードマップ 沿岸自治体、作成2割弱」

（６）その他

特に記載すべき事項はない。

8. 引用文献

- 1) S. YOKOI, S., Y. N. TAKAYABU, and H. MURAKAMI: J. Climate, 26, 4096-4111 (2013)
Attribution of Projected Future Changes in Tropical Cyclone Passage Frequency over the Western North Pacific
- 2) M. C. WHEELER, and H. H. HENDON: Mon. Wea. Rev., 132, 1917-1932 (2004)
An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction
- 3) N. SATO, C. TAKAHASHI, A. SEIKI, K. YONEYAMA, R. SHIROOKA, and Y. N. TAKAYABU: J. Meteor. Soc. Japan, 87, 791-805 (2009)
An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian oscillation in the CMIP3 multi-models
- 4) S. YOKOI, and Y. N. TAKAYABU: J. Climate, 26, 973-988 (2013)
Attribution of Decadal Variability in Tropical Cyclone Passage Frequency over the Western North Pacific: A New Approach Emphasizing the Genesis Location of Cyclones

III. 英文Abstract

Studies on Possible Changes of Climate and Precipitation Systems in East Asia and Around Japan Associated with the Global Warming

Principal Investigator: Yukari N. Takayabu

Institution: Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI)
The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan, JAPAN
Tel: +81-4-7136-4402 / Fax: +81-4-7136-4375
E-mail: yukari@aori.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Meteorological Research Institute, Hokkaido University, Okayama University, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

[Abstract]

Key Words: Global warming, Climate change, Japan and East Asia, Precipitation, Spaceborne precipitation radar, Climate model, Kuroshio, Asian monsoon, Jet stream, Troposphere-stratosphere interaction

Frequent occurrences of record-breaking floods and snow storms in recent years alert our society to an increase of extraordinary precipitation events associated with the global warming. The IPCC AR5 (2013) suggested that unlike temperature, which is predicted to increase almost everywhere on Earth, precipitation will change in a complex pattern. In addition, our scientific understanding of regional precipitation changes is very limited. Since Japan and East Asia, which are located between the Pacific Ocean to the east and the Asian continent to the west, are in a complex situation, the responses of daily weather and precipitation to climate change could be complex and very sensitive. To take appropriate actions for preventing disasters, studies are urgently needed to examine the future changes in the precipitation in this region.

This project aims to obtain accurate information concerning precipitation changes in the regions of East Asia and around Japan, focusing on the changes in the precipitation characteristics associated with global warming. Since precipitation is associated with subgrid-scale phenomena in numerical models, even state-of-the-art climate models have difficulty representing its characteristics. Therefore, in this project, we have used various novel observations, especially satellite data, in addition to the climate model outputs, to extract best accurate information, concerning the future changes in the precipitation characteristics based on a physical understanding of the link between large-scale environmental conditions and precipitation characteristics.

Among various important outcomes, an important result is that we successfully extracted the likely future changes in three different types of precipitation systems in early summer around Japan. Analyzing 3D precipitation data obtained from the spaceborne precipitation radar on the Global Precipitation Measurement core satellite, we classified the precipitation systems into the following three types: mid-latitude, organized, and small-sized systems. After physical and statistical analyses, look-up tables for the contributions from each

precipitation type related to large-scale conditions were constructed. Finally, using large-scale conditions from the RCP8.5 scenario runs of CMIP5 multi-model outputs, we extracted changes in the precipitation characteristics for the end of this century. Torrential rainfall events are generally attributed to the organized systems. While such organized systems are rarely found on the Tohoku and Japan Sea side in Japan in the current climate, the future projection shows a large increase in the organized systems in these regions, which will result in an increase in the torrential rainfall. Such information can be transmitted to policy makers to enable adequate actions toward disaster prevention.