

課題名	S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究
課題代表者名	高藪 縁（東京大学大気海洋研究所）
研究実施期間	平成19～23年度
累計予算額	518,675千円（うち23年度 107,779千円） 予算額は、間接経費を含む。

## 研究体制

- (1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象の再現性比較とその将来変化に関する研究  
（東京大学大気海洋研究所）
- (2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の再現性とその将来変化に関する研究  
（東京大学先端科学技術研究センター）
- (3) 季節予測に係わる短期気候変動の再現性とその将来変化（国交省気象庁気象研究所）
- (4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化に関する研究（北海道大学）
- (5) アジアモンスーンのモデル再現性と温暖化時の変化予測に関する研究（筑波大学）
- (6) 熱帯大気海洋相互作用現象の再現性とその将来変化に関する研究（（独）海洋研究開発機構）
- (7) 季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性とその将来変化に関する研究  
（（独）海洋研究開発機構）
- (8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性とその将来変化（名古屋大学）
- (9) CMIP3マルチモデルを用いた将来気候における季節進行の変化予測（国交省気象庁）
- (10) 河川流域の水文循環の再現性とその将来変化に関する研究（京都大学防災研究所）

## I. 戦略課題S-5テーマ2の全体構成

本研究課題の全体構成を図1に示す。各サブテーマは各々アジア気候にとって重要と考えられる現象に焦点を絞り解析を行う。まず第一に各現象に関して、気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC AR4)のため「気候モデルの診断と相互比較プログラム(PCMDI)」の下に集約されたマルチモデル実験データ(CMIP3データ)の20世紀結合実験データと観測データとの比較解析を行い、各々の気候モデルが現在気候の条件下で各現象をいかに再現しているかを調べる。その際、現象のメカニズ的な再現性に注目するとともに、再現性の適切な指標（以降「メトリック」と呼ぶ）を抽出する。次にその結果に基づいて温暖化時の将来予測についてのモデル結果の信頼性を検討する。さらに、個々の現象の解析から得られた結果を課題全体で総合的に解析し、現象間の相互関係、およびモデルを総合的に評価する方法を検討する。また、各サブテーマの扱った現象の再現性と気候場との関係を持ち寄って比較することを通して、アジア域の大気海洋現象の再現性とリンクした気候場を議論すると共に統計的に総合評価指標である「アジアメトリック」を開発する。

各サブテーマは以下の項目を受け持つ：(1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象とテーマの総括(2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動(3) 季節予測に係わる短期気候変動(4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動(5) アジアモンスーン(6) 熱帯大気海洋相互作用現象(7) 季節性気象現象とその放射フィードバック(8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性(9) 日本および周辺域の季節進行(10) 河川流域の水文循環。



## 2. 研究開発目的

国民の日々の生活において身近な気象や海洋現象が将来どのように変化するかという問に対して、気候モデル予測結果からより信頼性の高い答えを得るために、それぞれの現象の気候モデル再現性および再現のメカニズムを評価し、その結果を利用する。本テーマでは、10サブグループがCMIP3プロジェクトに参加している24個の気候モデルシミュレーションデータおよび観測データを解析する。プロジェクトの前期3年(平成19-21年度)では、以下の4段階で成果を出すことを目的とした。(1)様々な身近な現象の再現性をいかに評価するかの指標(メトリック)を観測データ解析から定義する。(2)CMIP3の20世紀再現実験出力データを用い、それぞれの気候モデルの現象メトリックを計算し比較した。(3)各サブグループが分担して受け持つ現象メトリックの値を集約して比較した。(4)現象メトリックのモデル間の成績に対応するアジア域の気候場メトリック(気温、気圧、風速などの気象場の再現性)を代表する「アジアメトリック」をデザインする。この成果に基づき、後期2年(平成22-23年度)は、身近な各現象の将来変化をより信頼のおける形で予測すること、および、アジアメトリックを作成することを目的とした。さらに、応用研究として、河川流域の水文循環についての不確実性の幅を含めた将来予測について統計的ダウンスケーリングすることを目的とした。

## 3. 研究開発の方法

### (1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

CMIP3の20世紀再現実験データと観測データを用いて比較解析し、台風の発生と経路、および熱帯域の降水分布のモデル再現性を調べる指標を検討した。世界の各機関の気候モデルにおける再現性を比較評価し、再現性の良し悪しを決定づけるメカニズムについて調べた。その結果を利用して、台風および熱帯降水表現のそれぞれにつき、より信頼性の高いモデルの21世紀シナリオ実験結果を用いて将来変化を議論した。また、サブグループが担当する様々な大気海洋現象についての再現性評価を関連づけて、アジア域の気候をまとめて評価する指標「アジアメトリック」を作成した。さらに、テーマ全体の成果を一般市民にわかりやすく伝えるためのパンフレットをまとめた。

### (2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の再現性とその将来変化に関する研究

上記20世紀再現実験及び21世紀期気候予測実験データ(A1Bシナリオ)を解析に用いた。検証用の観測データは、気象庁全球大気再解析データ(JRA-25)や衛星観測を含む降水量データである。持続的な夏季の循環偏差パターンは月平均循環偏差場に経験直交関数(EOF)展開を施してその卓越シグナルを抽出した。一方、大気循環に与える中緯度海洋の影響評価には、地球シミュレータの大気大循環モデル(AFES)による「水惑星」実験を用いた。移動性高低気圧(ストームトラック)活動のメトリックとしては、対流圏下層での擾乱による極向き熱輸送量を採用した。さらに、海洋前線帯近傍の水温長期変化の評価には8つの水温・海上気温データセットを利用した。

### (3) 季節予測に係わる短期気候変動の再現性とその将来変化

WCRP\_CMIP3モデルの20世紀再現実験(20C3M)における地上気温変動および季節予測に係わる夏冬モンスーンやエルニーニョ南方振動(ENSO)の再現性について、観測データ・再解析データを用いて比較・解析し、さらに将来予測実験(SRES A1B)をもとに将来変化について調査した。

### (4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化に関する研究

北太平洋における中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化を明らかにするため、第3次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)マルチ気候モデルによる20世紀再現実験と中程度の温室効果ガス排出シナリオ(A1B)に基づく温暖化実験を用いて解析を行った。北太平洋において主要な海面水温(SST)の長期自然変動である太平洋10年スケール変動(PDO)について、PDOの空間構造に基づくメトリックを算出して再現性を評価した。

### (5) アジアモンスーンのモデル再現性と温暖化時の変化予測に関する研究

CMIP3マルチ気候モデルにおける、夏季アジア・西部北太平洋モンスーンやエルニーニョ-南方振動(ENSO)の気候平均場や季節進行の再現性について、観測データと照合することにより検証を行った。また、これらの諸現象の再現性に関する定量的指標(メトリック)を作成し、加重マルチモデル平均の結果より、モンスーン季節進行に関する将来的な変化を調べ、変化をもたらす物理的メカニズムについて考察を行った。

### (6) 熱帯大気海洋相互作用現象の再現性とその将来変化に関する研究

気候モデルにおける、熱帯域の大気海洋相互作用現象の再現性を評価し、将来変化予測の信頼性を向上させることを目的とし、熱帯域の大気海洋結合系の現象として特徴的な、エルニーニョに密接な関係がある西風バーストや季節内振動に着目し、観測データとの比較及び現在気候モデル間、温暖化シナリオ実験間の比較を行った。

### (7) 季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性とその将来変化に関する研究

CMIP3のマルチモデル出力データと観測値との比較により、季節性気象現象とその放射フィードバックに関するモデル再現能力の評価をおこない、それに基づいて将来予測実験の予測精度の検討を行った。梅雨前線・太平洋高気圧、雲・放射フィードバック、対流圏・成層圏大規模循環場を主な研究ターゲットとし、CMIP3データを利用した追加実験も行った。

### (8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性とその将来変化

本研究の目的は、主として衛星観測をもとにした観測データセットを用い、雲・降水・放射フラックスに関する気候モデルの再現性評価を行い、またその将来変化を議論することである。本研究では、モデルにより予測される雲・降水・放射フラックスに関する将来変化の不確実性が大きいと思われる熱帯・亜熱帯域を対象として解析を行った。

### (9) CMIP3マルチモデルを用いた将来気候における季節進行の変化予測

夏の季節進行の将来変化を調査するにあたり、CMIP3モデルにおける、ジェット気流の季節変化の再現性能を評価するための指標(メトリック)を考案した。これにより、再現性能の高いモデルの客観的な選別を行い、将来変化を調査した。続いて、冬の日本付近の気温の将来変化について、線形大気モデル(LBM)を利用し、熱帯の成層安定化による寄与を調査した。

### (10) 河川流域の水文循環の再現性とその将来変化に関する研究

CMIP3マルチ気候モデルの実験結果を日本国内の地域1次メッシュ(緯度差40分、経度差1度、約80km四方)ごとに整理し、観測値や再解析値などの情報も統合した汎用的な気候変動情報データベースを構築した。このデータベースを用いて複数の気候モデルおよび温室効果ガス排出シナリオにおける将来の気温および降水量を推定し、分布型流出モデルや地表面熱収支モデルを用いて我が国の代表的な9流域における河川流出量の将来変化について解析を行った。

## 4. 結果及び考察

### (1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

1) モデル毎に適切に調節した低気圧性渦度や暖気核の閾値を用いて「台風型擾乱」を定義し、CMIP3モデルの台風発生分布を評価した。現在気候での再現性の良い5モデルにより将来変化を議論し、台風の最多発域が東方に移動することを示した。次に台風の通過経路の変化を発生分布変化と発生後の経路変化とに分けて評価する手法を作成し、将来変化を予測した。

2) 熱帯海上降水について衛星およびCMIP3データの解析、気候モデルによる理想化実験を行った。降水分布再現性が良いモデルは、積雲対流の対流圏中下層湿度への感度が高く、南半球東部熱帯太平洋等の乾燥域で深い対流が抑制され観測と一致した。再現性の低いモデルでは対流抑制効果が弱く、南半球の熱帯収束帯が現実より赤道寄りに分布してしまう「ダブルITCZ問題」が顕著であった。対流の湿度への感度が適切なモデルによる将来予測では、赤道域大規模東西循環(Walker循環)の弱化が示された。

3) 東アジアの夏の天候に影響の大きい梅雨前線、PJパターン、ジェット気流の3現象の再現性解析を統計的に利用し、気候場指標「東アジアメトリック」を作成した。全球指標に比べ現象再現性との調和が優れた地域指標ができた。

4) テーマ2の成果をパンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化—世界の気候モデルから読む日本の将来—」にまとめて出版、配布した。

### (2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の再現性とその将来変化に関する研究

夏季小笠原高気圧の変動に関わる「PJパターン」が、亜熱帯ジェット気流(STJ)から効率的にエネルギーを得て、かつ台風活動を変化させ自身維持できる「湿潤力学モード」であることを提唱した。この特性を反映し、同パターンのモデル再現性が気候平均場の再現性に依存し、夏季平均場のモデルバイアスにも同パターンが卓越すること、さらに同パターンが夏季平均場の将来変化にも明瞭で、予測のばらつきをもたらすことが分かった。小笠原高気圧の変動をもたらすもうひとつの要因である循環偏差「シルクロードパターン」も、亜熱帯ジェット気流から効率的にエネルギーを変換できる力学モードであることを提唱し、同パターンのモデル再現性のSTJ再現性への強い依存性を見出した。

北西太平洋域特有の移動性高低気圧活動の季節変化を再現できる気候モデルを特定し、それらの予測として将来は「春一番」の発現が現在より早まる確率が高いことを見出した。一方、数値実験から暖流と寒流が合流する中緯度海洋前線帯の存在が、ストームトラックや中緯度偏西風の形成・変動(環状モード)の現実的な再現に不可欠なことを見出した。さらに、世界の5大洋の海洋前線帯を伴う暖流域で、過去100年の海面水温上昇幅が全海洋平均の2~3倍も高かったことを見出した。

### (3) 季節予測に係わる短期気候変動の再現性とその将来変化

温暖化時の地上気温日々変動は、中緯度の夏季の陸上で増加、他の季節の陸上と1年を通しての海上では減少が見られた。夏季陸上での増加には陸面の乾燥化が影響している。ヤマセ発生頻度の将来変化については、温暖化に伴う熱帯大気循環の弱化和関連して5月に減少8月に増加する傾向を多くのモデルが示した。ヤマセの再現性が高いモデルでは、将来変化傾向に関するモデル間一致率はさらに高かった。梅雨期の降水強度の将来変化をマルチモデル平均で見ると東アジア域では降水強度が将来増加すること、アリューシャン低気圧は北または北東方向にシフトし、これにตอบสนองして黒潮統流は北へシフトまたは強化されることがわかった。

現在気候におけるエルニーニョに対する降水量変動が、多くの熱帯地域で降水量将来変化のモデル間の不確実性として見られることがわかった。関連して、エルニーニョに伴う西太平洋降水変動の再現性を評価したところ、赤道中央太平洋における降水量気候値の再現性と関係していることがわかった。エルニーニョ海域の海面水温変動から1~2季節遅れて全球の地上気温が高くなる傾向は多くのモデルの現在気候実験で再現されているが、成層圏のENSOシグナルは対流圏での微小な誤差が増幅され、その再現性は十分でない。

全球表層海洋メトリックから、熱帯太平洋海洋気候場の再現性が良いモデルはENSOの再現性が良いことがわかった。ENSO振幅の将来変化は熱帯太平洋における表層貯熱量の変化と関係が高かった。また、温暖化時には、低緯度においては昇温のため、緯度45°より高緯度では降水の増加のため、海洋ロスビー波の西進位相速度が増加し、長期海洋変動の時間スケールが短くなる傾向にある。

### (4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化に関する研究

24のCMIP3モデルのうちPDOメトリックの高いモデルは、中部北太平洋域と中東部熱帯太平洋域でSSTの10年スケール変動が熱帯-中緯度結合の特徴をよく再現しており、熱帯太平洋域のSSTの10年スケール変動(decadal-ENSO)に伴う大気応答は熱帯太平洋域、北太平洋域共に観測される特徴と一致していた。北太平洋域の21世紀100年間の海面気圧(SLP)トレンドはモデル間で大きく異なるため、SLPトレンドの予測は北太平洋域で高い不確実性を持つ。この不確実性には、温室効果ガス増加に対する応答がモデル毎に異なることに起因するモデル不確実性と、モデル内部で自立的に生じる大気海洋系の内部変動の両者が寄与し、21世紀前半50年間のSLPトレンドの不確実性には内部変動が大きく寄与することがわかった。さらに、モデル毎のアリューシャン低気圧の応答の違いと関連した海面熱フラックスと北太平洋亜熱帯循環系の変化は、SSTトレンドの地域分布に影響を与えることが明らかになった。

### (5) アジアモンスーンのモデル再現性と温暖化時の変化予測に関する研究

CMIP3マルチ気候モデルにおける、夏季アジアモンスーンの広域的な特徴は、多くのモデルで概ね良く再現されているが、西部北太平洋における対流圏下層風などについては、モデル間で再現性の差異が確認された。アジアモンスーンの気候場や季節進行などについて、各モデルの再現性に関する指標(メトリック)を作成し、定量的に明らかにした。このメトリックに基づく加重マルチモデル平均より、アジアモンスーン地域における対流圏下層西風の開始時期の将来変化を調べた。SRES-A1Bシナリオでは21世紀末において、南シナ海周辺における西風の開始が20世紀末に比べ5~10日前後遅くなると予測された。温暖化時において、インド付近上空の対流圏上層における南北気温勾配の季節的反転の時期が遅れることが、南シナ海周辺における下層の西風開始の遅れと関係している。また、西部北太平洋における7月中・下旬の急激な対流活発化(対流ジャンプ)と、日本の梅雨明けとの関係に着目し、温暖化時の梅雨明けの遅れに関する物理過程を調べた。温暖化時の西部北太平洋における対流活発化域は現在より南東に位置し、対流ジャンプの発生が遅れることと関係している。大気大循環モデルを用いた感度実験より、温暖化時における海面水温の昇温パターンの特徴が、対流ジャンプの位置の変化や発生時期の遅れをもたらす、日本の梅雨明けの遅れにとって重要な要因である可能性を示した。この他、エルニーニョ-南方振動(ENSO)の気候場とその遷移過程との関係について、中西部赤道太平洋の降水量の空間分布やその季節変化の再現性がENSOの遷移プロセスにおいて重要であることを示唆する結果を得た。

### (6) 熱帯大気海洋相互作用現象の再現性とその将来変化に関する研究

現在気候実験において、西太平洋の西風バーストがエルニーニョ前に適切に発生しているモデルでは、背景風の経年変動やエルニーニョの再現性が高いことがわかった。また、温暖化実験では、東太平洋での西風バーストが増えるモデルで温暖化の傾向が強いことが示された。インド洋での季節内変動(MJO)に関しては、気候平均での海面水温の再現性の良し悪しが、MJOの再現性に有意に相関することが示され、MJOの再現における基本場や大気海洋結合の重要性が示唆された。熱帯域と東アジア域の対流活動との関連は、MJOが比較的良く再現されているモデルで顕著であり、温暖化時にも遠隔効果がみられたが、MJOそのものの再現において、全体的に見れば十分な精度を持っているとは言えなかった。これらは、東アジア域の気候変動予測にとっては、MJO

等、熱帯域現象の将来変化が適切に予測されていることの重要性を意味していた。

### (7) 季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性とその将来変化に関する研究

CMIP3マルチモデルの20世紀再現実験では、6月のメイユ・梅雨前線降水帯の気候値分布はほぼ適切に再現されるが、多くのモデルでメイユ・梅雨降水帯の年々変動・強雨の空間的・時間的集中性の再現性が良くないことが分かった。8月の太平洋高気圧に関しては、太平洋高気圧が西へ張り出す西方伸張型と、東へ後退する東方後退型のモデルに分けられた。西方伸張型モデルは東方後退型モデルに比べ、弱いインドモンスーンの西風、フィリピン東方の少ない降水量、太平洋高気圧西部での小さい年々及び月内変動 という特徴が見られた。

CMIP3モデルデータを利用して赤道準2年振動(QBO)の将来変化に関するモデル実験を行った。海面水温の上昇と二酸化炭素濃度の増加は、それぞれQBOの周期を1-3か月、1か月長くする効果があることが分かった。また、波動と平均場の相互作用のデータ解析で有用な3次元波フラックスを導いた。

季節変化における放射フィードバックについて、衛星データとCMIP3マルチモデルデータの比較解析を行った。モデルの放射フィードバックは全天放射、晴天放射、雲放射強制力において、概ね観測と一致しているが、日射の反射、地球放射に分けてみると、雲放射強制力フィードバックでモデルと観測のバイアス及びばらつきが顕著であった。地球放射ではほとんどのモデルで雲の温室効果の強まりが見られることが分かった。

### (8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性とその将来変化

1) 力学場を介してのアンビル(鉄床雲)や巻雲を含めた上層雲の水平的広がりについて、複数の気候モデルの再現性を評価した結果、モデルは、全体として、対流圏上層の発散の中心位置付近での上層雲の分布の水平的広がりを、観測に比べて過小評価していることがわかった。

2) 大気の大熱力学的指標により同定された、対流活動が著しく活発であり、強い下降流が生じづらいと考えられる海洋域を対象とし、雲の短波放射への影響(SWCRF)に対する長波放射への影響(LWCRF)の割合(R)と、大規模大気循環場の指標としての大気中層の上昇流強度との関係について、複数の気候モデルの再現性を評価した結果、モデルは、全体として、上昇流が強い地域においてRを上手く再現する一方で、上昇流・下降流が弱い地域においてRを過小評価することがわかった。上昇流が強い地域における結果は、モデルが光学的に厚い上層雲の雲量を過大評価することに伴うLWCRFとSWCRFの誤差の相殺効果によりもたらされ、一方、上昇流・下降流が弱い地域における結果は、モデルが光学的に薄い上層雲の雲量を過小評価し、光学的に厚い下層雲の雲量を過大評価することに伴うLWCRFとSWCRFの誤差の相乗効果によりもたされることもわかった。

3) Rの二酸化炭素増加時の変化を調べた結果、複数のモデルで予測されるRの二酸化炭素増加時の変化は、上昇流が強い地域に比べ、上昇流・下降流が弱い地域において、ばらつきが大きく、それは、モデル間における中層雲量の変化の大小によりもたらされることがわかった。

### (9) CMIP3マルチモデルを用いた将来気候における季節進行の変化予測

CMIP3による夏の将来変化予測では、梅雨明けに対応する降水量の減少が弱く、現在より降水量の多い状態が続くことから、温暖化すると、日本付近では梅雨が長引き、梅雨明け後も不順な天候になりやすいと予想される。この要因として、先行研究では日本への水蒸気フラックス流入の増加が梅雨末期の雨量の増加に寄与していることが指摘されている。本調査では、こうした効果に加わるものとして、太平洋熱帯域西部の対流圏鉛直循環の弱化にともなって、チベット高気圧の縮小やアジアジェット南下が見られることを示した。また、日本付近では、ジェット気流が前線帯を日本付近で強める強制力として作用していることを示した。冬については、対流圏熱帯域の成層安定化とともに、対流圏上層の大規模発散が弱化する変化を示すモデルが多く、線形大気モデルを利用した追加実験の結果などから、こうした変化が、プラネタリ波の変化を通じて、CMIP3の冬季北半球の東西非対称な将来変化の形成に寄与していることを示した。日本の将来気候変化において、夏・冬ともに熱帯における変化の影響が及びることから、熱帯域での予測の不確実性を減らすことも重要である。

### (10) 河川流域の水文循環の再現性とその将来変化に関する研究

日本国内で評価した場合、気候モデルの出力値から算出した将来変化は、モデル間のばらつきの方が排出シナリオによる違いよりも大きかった。総観規模の現象(アジアモンスーンや梅雨など)に応じて気候モデルを評価した現象メトリックと降水量の再現性との間には関連性が認められ、降水現象について気候場の精緻な予測が必要であることが示唆された。流域別にみると、気温の上昇幅は北に行くほど大きくなるため、蒸発散量の将来変化も北日本の流域で相対的に大きく増加する。量的に水収支に大きく影響するのは、将来の気温上昇により降雪から降雨に変化することと、融雪時期が早期化することであり、どの排出シナリオについても、積雪地域では春先の融雪量が大きく低下することが明らかとなった。河川流量については、北日本の流域で降雪量の減少に伴い融雪量が低下することから、河川流量の季節変化が現在よりも平滑化されることが示唆された。南西日

本の流域については、流量変化の絶対値は小さいものの、夏季以外において流量が低下傾向にあり、渇水リスクが若干増加することがわかった。

## 5. 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) Takayabu, Y. N. and M. Kimoto(2008): Diurnal variations in rainfall simulated using the CCSR/NIES/FRCGC AGCM and dependence on cumulus schemes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 163-173.
- 2) Suzuki, T., K. Ninomiya, Y. N. Takayabu, and S. Emori(2008): AGCM experiment of the effect of cumulus suppression on convection center formation over the Bay of Bengal, *J. Geophys. Res.*, 113, D16104, doi: 10.1029/2007JD009686.
- 3) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2008): A comparative study of the Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern based on reanalysis datasets SOLA, 4, 1, 9-12.
- 4) Nakamura, H., T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie (2008) : On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 35, 15, L15709, doi : 10.1029/2008GL034010.
- 5) Ninomiya, K., T. Suzuki, and T. Nishimura (2008): Differences between the intense precipitation associated with subsynoptic-scale Baiu frontal depression simulated by an AGCM and described in observational studies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 563-573.
- 6) Kawatani, Y., K. Ninomiya and T. Tokioka (2008): The North Pacific subtropical high characterized separately for June, July, and August: zonal displacement associated with submonthly variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 4, 505-530.
- 7) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan (2009): Tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific simulated in medium-resolution coupled general circulation models. *Clim. Dyn.*, 33, 665-683, doi:10.1007/s00382-009-0593-9.
- 8) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu (2009): Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 525-538. doi:10.2151/jmsj.87.525.
- 9) Kosaka, Y., H. Nakamura, M. Watanabe, and M. Kimoto (2009) : Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime asian jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 3, 561-580.
- 10) Nishii, K., T. Miyasaka, Y. Kosaka, and H. Nakamura (2009) : Reproducibility and future projection of the midwinter storm-track activity over the far east in the CMIP3 climate models in relation to the occurrence of the first spring storm (Haru-Ichiban) over Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 3, 581-588.
- 11) Kitoh, A. and T. Mukano (2009): Changes in daily and monthly surface air temperature variability by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 513-524.
- 12) Ose, T. and O. Arakawa (2009): Characteristics of the CMIP3 models simulating realistic response of tropical western Pacific precipitation to Nino3 SST variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 807-819.
- 13) Sueyoshi, M. and T. Yasuda (2009): Reproducibility and future projection of the ocean first baroclinic Rossby radius based on the CMIP3 multi-model model dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 821-827.
- 14) Oshima, K. and Y. Tanimoto (2009): An evaluation of reproducibility of the Pacific Decadal Oscillation in the CMIP3 simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 4, 755-770, doi:10.2151/jmsj.87.755.
- 15) Inoue, T. and H. Ueda (2009): Evaluation for the seasonal evolution of the summer monsoon over the Asian and western North Pacific sector in the WCRP CMIP3 multi-model experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 539-560.
- 16) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailikun, H. Ueda, and T. Inoue (2009): Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res.*, 114, D24110, doi:10.1029/2009JD011803.

- 17) Sato, N., C. Takahashi, A. Seiki, K. Yoneyama, R. Shirooka, and Y.N. Takayabu (2009): An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian Oscillation in the CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 791–805. doi:10.2151/jmsj.87.791.
- 18) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, N. Sato, and M. Yoshizaki (2009): The oceanic response to the Madden-Julian Oscillation and ENSO, *SOLA*, 5, 93–96. doi:10.2151/sola.2009-024.
- 19) Ninomiya, K. (2009): Characteristics of precipitation in the Meiyu-Baiu season in the CMIP3 20th Century climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 829–843.
- 20) Ichikawa, H., H. Masunaga, and H. Kanzawa (2009): Evaluation of precipitation and high-level cloud areas associated with large-scale circulation over the tropical Pacific in the CMIP3 models. *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 87, NO.4, 771–789. doi: 10.2151/jmsj.87.771.
- 21) Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao, and N. Hirota(2010): Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR Spectral Latent Heating data. *J. Climate*, 23, 2030–2046.
- 22) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu (2010): Environmental and external factors in the genesis of tropical cyclone Nargis in April 2008 over the Bay of Bengal. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 88, 425–435. doi:10.2151/jmsj.2010-310.
- 23) Miyasaka, T. and H. Nakamura (2010) : Structure and mechanisms of the southern hemisphere summertime subtropical anticyclones. *J. Climate*, 23, 8, 2115–2130.
- 24) Nishii, K., H. Nakamura, and Y. J. Orsolini (2010) : Cooling of the wintertime arctic stratosphere induced by the Western Pacific teleconnection pattern. *Geophys. Res. Lett.*, 37, 13, L13805, doi:10.1029/2010 GL043551.
- 25) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010a) : Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan Pattern. *J. Climate*, 23, 19, 5085–5108.
- 26) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010b) : Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part II: A Global Survey. *J. Climate*, 23, 19, 5109–5125.
- 27) Nakamura, H., T. Miyasaka, Y. Kosaka, K. Takaya, and M. Honda (2010) : Northern hemisphere extratropical tropospheric planetary waves and their low-frequency variability: Their vertical structure and interaction with transient eddies and surface thermal contrasts. *Climate Dynamics: Why Does Climate Vary?* D. Sun, F. Bryan, Eds., *Geophys. Monogr.*, 189, AGU, 149–179.
- 28) Tanimoto, Y., T. Kajitani, H. Okajima, and S.-P. Xie (2010): A peculiar feature of the seasonal migration of the South American rain band. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79–90, doi:10.2151/jmsj.2010-106.
- 29) Ohba, M., D. Nohara, and H. Ueda (2010): Simulation of asymmetric ENSO transition in WCRP CMIP3 multimodel experiments. *J. Climate*, 23, 6051–6067.
- 30) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, and R. Shirooka (2010): The impact of trade surges on the Madden-Julian Oscillation under different ENSO conditions. *SOLA*, 6, 49–52.
- 31) Noda, A. (2010): A general three-dimensional transformed Eulerian mean formulation. *SOLA*, 6, 85–88, doi:10.2151/sola.2010-022.
- 32) Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, and M. Kimoto(2011): Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, 24, 4859–4873. doi:10.1175/2011JCLI4156.1
- 33) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe(2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1666–1675. doi:10.1175/2011JAMC2643.1.
- 34) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2011) : Dominant mode of climate variability, inter-model diversity and projected future changes over the summertime western North Pacific simulated in the CMIP3 models. *J. Climate*, 24, 15, 3935–3955.
- 35) Kosaka, Y., S.-P. Xie and H. Nakamura (2011) : Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia. *J. Climate*, 24, 20, 5435–5453.
- 36) Ose, T. and O. Arakawa (2011): Uncertainty of future precipitation change due to global warming



- associated with sea surface temperature change in the tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 539–552.
- 37) Kusunoki, S. and O. Arakawa (2011): Change in the precipitation intensity of the East Asian summer monsoon projected by CMIP3 models. *Climate Dynamics*, doi 10.1007/s00382-011-1234-7.
  - 38) Tanimoto, Y., T. Kanenari, H. Tokinaga, and S.-P. Xie (2011): Sea level pressure minimum along the Kuroshio and its extension. *J. Climate*, 24, 4419–4434, doi:10.1175/2011JCLI4062.1.
  - 39) Inoue, T. and H. Ueda (2011): Delay of the first transition of Asian summer monsoon under global warming condition. *SOLA*, 7, 81–84.
  - 40) Seiki, A., Y.N. Takayabu, T. Yasuda, N. Sato, C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka (2011): Westerly wind bursts and their relationship with ENSO in CMIP3 models. *J. Geophys. Res.*, 116, D03303.
  - 41) Takahashi, C., N. Sato, A. Seiki, K. Yoneyama, and R. Shirooka (2011): Projected future change of MJO and its extratropical teleconnection in East Asia during the northern winter simulated in IPCC AR4 models. *SOLA*, 7, 201–204.
  - 42) Ninomiya, K. (2011): Characteristics of the Meiyu and Baiu frontal precipitation zone in the CMIP3 20th century simulation and 21st century projection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 151–159
  - 43) Kawatani, Y. and K. Ninomiya (2011): The North Pacific subtropical high in August in twentieth-century CMIP3 multimodel dataset. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 375–386.
  - 44) Kawatani, Y., K. Hamilton, and S. Watanabe (2011): The Quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate. *J. Atmos. Sci.*, 68, 265–283.
  - 45) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖 (2011): CMIP3マルチ気候モデルにおける日本陸域を対象として地上気象要素の再現性・不確実性評価. *水文・水資源学会誌*, 24, 5, 280–291.
  - 46) 道広有理, 鈴木靖, 佐藤嘉展 (2011): 気候変動情報データベースの開発とその利用. *土木学会論文集B2(海岸工学)*, 67, 2, 1\_1211–1\_1215.
  - 47) Hirota, N. and Y. N. Takayabu (2012): Inter-model differences of future precipitation changes in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 307–316. doi: 10.2151/jmsj.2012-A16.
  - 48) Nishii, K., T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y. N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012) : Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 87–100.
  - 49) Wu, L., W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M. J. McPhaden, M. A. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang, and B. Giese (2012) : Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, 2, 3, 161–166, doi:10.1038/nclimate1353.
  - 50) Endo, H. (2012): Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 123–136.
  - 51) Oshima, K., Y. Tanimoto, and S.-P. Xie (2012): Regional patterns of wintertime SLP change over the North Pacific and their uncertainty in CMIP3 multi-model projections. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 385–396.
  - 52) Takahashi, C., K. Yoneyama, N. Sato, A. Seiki, R. Shirooka, and Y.N. Takayabu (2012): The Madden-Julian Oscillation and extratropical teleconnection over East Asia during the Northern winter in IPCC AR4 climate models, *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 361–371.
  - 53) Ninomiya, K. (2012): Year-to-year variations in the Meiyu and Baiu frontal precipitation zone in the CMIP3 20th century simulation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 317–325.
  - 54) Ninomiya, K. (2012): Characteristics of intense rainfalls over southwestern Japan in the CMIP3 20th century simulation and 21st century projection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 327–338.
  - 55) Kawatani, Y., K. Hamilton, and A. Noda (2012): The effects of changes in sea surface temperature and CO2 concentration on the quasi-biennial oscillation. *J. Atmos. Sci.*, in press.
  - 56) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa (2012): Reproducibility by climate models of cloud radiative forcing associated with tropical convection. *J. Climate*, Vol. 25, NO.4, 1247–1262. doi: 10.1175/JCLL-D-11-00114.1.
  - 57) Yara, Y., K. Oshima, M. Fujii, H. Yamano, Y. Yamanaka, and N. Okada (2012): Projection and uncertainty of the poleward range expansion of coral habitats in response to sea surface temperature warming: A multiple climate model study. *Galaxea*, in press.

- 58) Adachi, S.A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue, and H. Ueda (2012): Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area. J. Appl. Meteor. Climatol, in press.

他20編

<査読付論文に準ずる成果発表> (「持続可能な社会・政策研究分野」の課題のみ記載可)  
特に記載すべき事項はない。

## (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Takayabu, Y. N.: Evaluations of CMIP3 Model Performances for Various Phenomena in the Atmosphere and Oceans, in the Present-Day Climate and in Future Projections in the MOE S-5 project. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, Japan, Feb. 2009.
- 2) Nakamura, H.: Pacific-Japan teleconnection pattern: Its dynamics, model reproducibility and future projection. Wallace Symposium, Seattle, U.S.A., 2010.

他277件 (リスト省略)

## 6. 研究者略歴

課題代表者: 高 薮 縁

1959生まれ、東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、博士(理学)  
国立環境研究所主任研究員、現在、東京大学大気海洋研究所教授

研究参画者

(1): (同上)

(2): 中村 尚

1960年生まれ、東北大学理学部卒業、ワシントン大学大気科学科博士課程修了、学術博士(Ph. D.)、  
東京大学大学院理学系研究科准教授、現在、東京大学先端科学技術研究センター教授

(3): 尾瀬智昭

1957生まれ、山口大学文理学部卒業、九州大学大学院修士課程修了、理学博士、気象庁気候情報課、現在、気象研究所気候研究部室長

(4): 谷本陽一

1966生まれ、東北大学理学部卒業、博士(理学)、東京都立大学理学部助手、現在、北海道大学大学院地球環境科学研究院准教授

(5): 植田宏昭

1969生まれ、筑波大学自然学類卒業、博士(理学)、日本学術振興会特別研究員、気象庁気象研究所研究官、現在、筑波大学生命環境系教授

(6): 城岡竜一

1964生まれ、気象大学校卒業、北海道大学大学院理学研究科修了、博士(理学)、農水省北海道農業試験場主任研究官、現在、海洋研究開発機構熱帯気候変動研究プログラムチームリーダー

(7): 河谷芳雄

1976年生まれ、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、独立行政法人海洋研究開発機構地球環境変動領域主任研究員

(8): 神沢 博

1953生まれ、京都大学理学部卒業、大学院理学研究科修了、理学博士、国立極地研究所助手、国立環境研究所大気物理研究室長、現在、名古屋大学大学院環境学研究科教授

(9): 前田修平

1960生まれ、気象大学校卒業、気象研究所主任研究官、現在、気象庁地球環境・海洋部気候情報課予報官

(10): 鈴木 靖

1960生まれ、東京大学理学部卒業、東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、博士(理学)、(財)日本気象協会首都圏支社調査部部長、現在、京都大学防災研究所特定教授

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (1) 熱帯亜熱帯域における雲降水現象の再現性とその将来変化に関する研究

東京大学大気海洋研究所

高菽 緑・木本昌秀

〈研究協力者〉

東京大学大気海洋研究所

横井 覚・廣田渚郎

宮川知己・横山千恵

(独) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター

鈴木恒明

平成19年度～23年度累計予算額：136,572千円

(うち、平成23年度予算額：33,564千円)

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】本サブテーマでは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次報告書のため世界気候研究計画(WCRP)第3次結合モデル相互比較プログラム(CMIP3)に集約された気候モデルによる20世紀再現実験および21世紀シナリオ実験を比較解析し、地球温暖化に伴う熱帯亜熱帯域の雲降水現象の変化について調べた。また、サブグループによる様々な大気海洋現象についての研究成果を関連づけまとめる役割を担った。将来変化を議論する際には、現在気候において、現象が気象・気候学と整合的に再現されている点を重視した指標を作成し、CMIP3の24モデルを観測データと比較して評価した上で信頼性の高いモデルを利用した。1) 台風、2) 熱帯降水分布、3) アジアメトリック、4) 一般向けパンフレット作成の4項目において、以下に示す主要な成果をあげた。

1) 台風の発生分布と経路の将来変化を調べた。発生分布の評価手法を検討し、現在気候での再現性の良い5モデルにより将来変化を議論し、台風の最多発域が東方に移動することを示した。次に台風の通過経路の変化を発生分布変化と発生後の経路変化とに分けて評価する手法を作成し、将来変化を予測した。2) 熱帯海上降水について衛星とCMIP3データの解析、気候モデルによる理想化実験を行った。降水分布再現性が良いモデルは、積雲対流の対流圏中下層湿度への感度が高く、南半球東部熱帯太平洋等の乾燥域で深い対流が抑制され観測と一致した。再現性の低いモデルでは対流抑制効果が弱く、「ダブルITCZ問題」が顕著であった。対流の湿度への感度が適切なモデルによる将来予測では、赤道域東西大循環(Walker循環)の弱化が示された。3) 東アジアの夏の天候に影響の大きい梅雨前線、PJパターン、ジェット気流の3現象の再現性解析を統計的に利用し、東アジア気候を総合的に評価する指標「東アジアメトリック」を作成した。全球指標に比べ現象再現性との調和が優れた地域指標ができた。4) テーマ2の成果をパンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化—世界の気候モデルから読む日本の将来—」にまとめて出版、配布した。

【キーワード】CMIP3マルチモデル、台風、熱帯降水特性、ダブルITCZ、東アジアメトリック

#### 1. はじめに

私たちの社会生活は、温帯低気圧や台風の強さや経路、熱波や寒波、豪雨や干ばつといった、日々の天候を左右する短周期の気象・海象の強さや場所に大きく影響される。そのため、地球温暖化の進行に伴う短周期現象の将来変化についての見通しは人間社会にとってたいへん重要である。将来気候の解析には世界気候研究計画(WCRP)第3次結合モデル相互比較プログラム(CMIP3)の21世紀シナリオ実験結果などが利用されるが、世界の気候モデルによる答えには、ある程度のばらつきがある。テーマ2では、このばらつきを含むマルチ気候モデルの比較解析の特長を生かして、現象のメカニズムとモデル再現性についての理解を深める。また、気候変化に伴ってそれらが将来どのように変化・変調するかについての予測結果を解釈し、統計解析的手法により気候モデルによる答えの不確実性を減らすことを目指す。本サブテーマ1は、地球温暖化に伴う熱帯亜熱帯域の雲降水現象の変化について調べると共に、10のサブテーマの各グループが担当する様々な大気海洋現象の気候モデル再現性についての研究成果を関連づけてまとめる役割を担う。平成19～23年度の5年間のプロジェクトにおいて、(1)台風、(2)熱帯降水特性、(3)東アジア域の気候評価指標(東アジアメトリック)について研究成果を得た。また、(4)テーマ2それぞれのサブグループによる成果を一般向けにわかりやすくまとめたパンフレットを出版・配布した。各項目に関する背景を以下に記す。

(1) 台風発生と経路の再現性とその将来変化：西太平洋で発生する台風は温暖化に伴い減少することが複数の研究グループにより示されている(例えばBengtsson et al. 1996<sup>1)</sup>; Sugi et al. 2002<sup>8)</sup>)。しかし、多種の気候モデルによる予測のばらつきを考慮した研究は少ない。本サブテーマでは、CMIP3気候モデル(CGCM)の20世紀再現実験および温暖化予測実験結果を用いてこの問題に取り組んだ。しかし、これらのCGCMは空間解像度が最高でも100km程度であり、台風を表現するには粗いという問題点がある。本研究では台風発生頻度を左右する環境場の変化を調べることで発生頻度の変化を推測する発生指標(Gray 1975<sup>3)</sup>, Emanuel and Nolan, 2004<sup>4)</sup>)を用いた「間接的アプローチ」、および再現された台風そのものを検出して発生頻度の変化を議論する「直接的アプローチ」を検討した。また、台風の通過経路の将来変化についての評価も行った。

(2) 熱帯降水分布の再現性とその将来変化：気候モデルにおける熱帯降水分布は非断熱加熱を通じて地球大気の大循環を左右するため、その正しい表現は全球気候にとって大変重要である。しかしながら、これは大気モデルにおける古くからの難しい課題であり、例えば、多くの気候モデルが「ダブルITCZ問題」と呼ばれる熱帯東部南太平洋(西経100°-150°, 南緯20°-赤道付近)の非現実的な降水帯分布を作る傾向を持つことなどが指摘されている。熱帯降水分布は、積雲対流パラメタリゼーションと呼ばれる物理過程の表現にも大きく依存するが、この方法は気候モデルによって様々である。そこで、本研究では、CMIP3に集められた多くの気候モデルの熱帯降水分布の再現性およびダブルITCZ問題について、観測と比較しながら、積雲対流パラメタリゼーションの特性に着目して比較解析し、積雲対流パラメタリゼーションの特性との関係を明らかにすることに成功した。

(3) 東アジアメトリックの作成：テーマ2の成果を総合化する研究として、東アジア域における気候場の再現性能を総合的に評価する指標「東アジアメトリック」のプロトタイプを設計した。作成した東アジアメトリックが、広く受け入れられ活用されるものとなるためには、以下の条件を満たしている必要がある。a) 全球の気候場を評価する全球メトリック(Greckler et al. 2008<sup>2)</sup>, Reichler and Kim, 2008<sup>7)</sup>)と比較して、注目する東アジア域の現象の再現性能を評価する精度が

明らかに優れていること。b)用法がシンプルで扱いやすいこと。c)評価手法の物理的な意味が解釈できること。本サブテーマではまず、a) クラスタ解析（変数を、相互の関連性によりグループ化する手法）により、指標に利用する変数の冗長性を減らし、結果をより物理的に解釈可能なものにした。次に、b) 東アジアの夏の天候に影響の大きい梅雨前線、太平洋・日本(PJ)パターン、ジェット気流の3現象の再現性解析を統計的に利用し、気候場指標「東アジアメトリック」を作成した。全球指標に比べ現象再現性との調和が優れた地域指標のプロトタイプができた。

## 2. 研究開発目的

台風および熱帯亜熱帯における降水プロセスに関して、CMIP3の20世紀再現実験における再現性を、観測データを用いて比較・評価し、その将来変化について不確実性に関する評価を含めて議論する。同時に、気候モデルにおける熱帯亜熱帯の降水過程の表現方法について知見を得る。

また、サブグループが様々な現象について比較解析した結果をとりまとめると共に、現象の再現性評価データを統計的に利用し、東アジア域の天候を左右する現象を適切に評価できる地域気候の評価指標「東アジアメトリック」を作成する。

## 3. 研究開発方法

(1) 台風発生頻度の変化を、海面水温や対流圏の循環場といった大規模場の変化から診断する発生ポテンシャルの評価が将来変化の議論に適切か検討する（間接手法）。一方、モデル毎に適切に調節した低気圧性渦度や暖気核の閾値を用いて「台風型擾乱」を定義し、CMIP3の日別データから適切な擾乱を抽出する（直接手法）。作成した台風トラックデータを用いて、西太平洋域での台風発生分布のモデル再現性および経路を評価し、将来変化についての知見を得る。

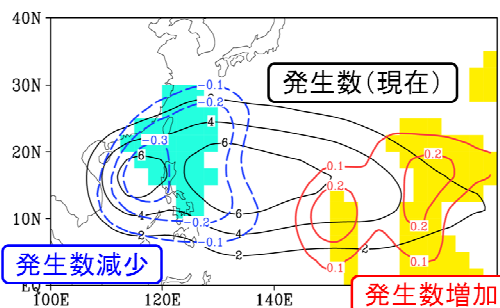
(2) 熱帯降雨観測衛星 (TRMM) PR2A25の降水データ、ハドレーセンターのSSTデータ、気象庁再解析データ、及び、CMIP3・CMIP5マルチ気候モデルによる現在気候再現実験・将来予測実験出力データを解析する。東大大気海洋研究所・国立環境研究所・海洋研究開発機構 (AORI/NIES/JAMSTEC) でCMIP5に向けて改良された気候モデルMIRROC5による理想化実験も行う。

(3) サブグループが担当する様々な大気海洋現象についての再現性評価を関連づけて、アジア域の気候をまとめて評価する指標「アジアメトリック」を作成する。さらに、テーマ全体の成果を一般にわかりやすく伝えるためのパンフレットをまとめる。

## 4. 結果及び考察

### (1) 台風発生と経路の再現性とその将来変化

モデル毎に適切に調節した低気圧性渦度や暖気核の閾値を用いて「台風型擾乱」を定義し、上記直接手法によって作成した台風データを用いて、西太平洋域での台風発生分布のモデル再現性を評価したところ、12モデル中5モデルが高い再現性能



図(1)-1 5つの気候モデルが再現した台風発生数の分布（実線）と将来変化予測（増加はラベル付き実線，減少はラベル付き破線）。5つのモデルの予測傾向が一致する地域を陰影で示してある。

を有していたことがわかった（平成19-20年度）。

直接法により台風発生分布の再現性のよい5つの気候モデルを用い、発生頻度分布変化のマルチモデル予測を行った（平成20-21年度）。その結果、5モデルに共通して、中部太平洋で増加し、南シナ海からフィリピン海で減少すると予測された（図(1)-1）。これは、現在はフィリピン海付近にある台風最多発域が、将来はよりやや東に移動することを意味する。中部太平洋での増加は、多くのCMIP3モデルの共通した特徴であるエルニーニョ型の熱帯海面水温変化パターンに伴って生ずる、西太平洋域での台風の主要発生環境場であるモンスーントラフが中部太平洋まで伸びるという大気循環場の変化に起因すると考えられる。一方、南シナ海からフィリピン海での減少は、台風の種である熱帯渦擾乱が不活発になっていることと関係があると考えられる。

一方で、台風発生頻度の変化を、海面水温や対流圏の循環場といった大規模場の変化から「発生ポテンシャル」を定義して診断する手法も試みた。Emanuel and Nolan (2004)<sup>4)</sup>の発生ポテンシャルを将来予測に用いたところ、上記のような最多発域の東方移動ではなく、熱帯西太平洋全域で増加するという予測が得られた。この不一致は、現在気候の平均的な空間分布や季節変化を用いて発生ポテンシャルを定義しているため生じたと考えられ、このままでは将来予測に応用することは難しいことが示された（平成20-21年度）。

さらに、5つのCMIP3モデルと2つの気象研究所モデルの計7モデルによる台風通過頻度変化のマルチモデル予測を行った（平成22-23年度）。その結果、多くのモデルが東経140° 以東の中部太平洋で増加し、その西側と北西側で減少すると予測していることがわかった。

通過頻度の変化は、1. 西太平洋域の総発生数、2. 発生頻度の空間分布、3. 発生後の代表的経路の3つの台風統計特性の変化により生ずる。通過頻度変化のメカニズムや確率を議論するためには、この3項目の寄与を定量化する必要がある。本研究では、十分なサンプル数の台風がある場合に、台風トラックデータのみを用いてこの定量化を行う手法を開発した。この手法を予測に適用したところ、通過頻度変化の大まかな空間構造は発生頻度の空間分布の変化、すなわち主要発生域の東方移動に起因することがわかった。さらに、日本付近では、代表的経路の変化に伴い、西日本で減少、東日本で増加していた。これは、偏西風の軸が将来はやや南に移動することで、日本の南海上の西風が強まることにより台風の経路が東よりになるためだと考察できた。

## （2）熱帯降水分布の再現性とその将来変化

熱帯域に大きな降水量をもたらす深い対流活動は、従来、基本的に海面水温(SST)に伴って発生すると考えられてきた。Takayabu et al. (2010)<sup>9)</sup>は、熱帯降雨観測衛星(TRMM)観測から求められた積雲対流加熱データを用い、SSTの高い地域においても、大気循環の大規模下降域では、中層までで発達を止められる雄大積雲が雨の大半を占め、深い対流による雨は抑制されていることを示した（平成19-20年度）。

関連して、CMIP3による現在気候再現実験の出力データを解析した（平成20-21年度）。まず、現実の降水分布を、CMIP3の各モデルがどの程度再現しているか、Taylor (2001)<sup>10)</sup>により定義されたスキルスコアを用いて評価し、再現性の高い5モデル(HSM)、低い5モデル(LSM)を選択した。観測、HSM、LSMにおける降水、SST、鉛直流を図(1)-2に示す。HSMでは観測と同様に、東部南太平洋の下降流域で対流が抑制されており、南太平洋収束帯(SPCZ)が西太平洋から南東に伸びる。

一方、LSMでは、SST等値線に沿って降水帯が東に伸び、ダブルITCZ問題が見られる。対流の深さと対流圏中下層の湿度の関係を解析した結果、LSMは、観測やHSMに比べて深い対流の湿度依存性が弱く、上昇する対流空気塊が周りの乾燥空気を取り込むこと（エントレインメント）による対流抑制効果が十分に表現されていないことが問題であることが示された(Hirota et al. 2011<sup>5)</sup>。

CMIP3モデルによる将来予測実験では（平成22-23年度）、多くのモデルが、赤道域中央から東太平洋の降水量増加、及び熱帯太平洋域の東西のWalker循環の弱化を共通して予測していることがわかった。ただし、その変化の大きさは、モデル間で大きくばらつく。前述のHSMとLSMを比較すると、HSMの変化幅はLSMのものより有意に大きい。HSMでは、降水が増えると環境場が湿るため、対流抑制が効きにくくなり、更に増加するという正のフィードバックが働くからであると考えられる(Hirota and Takayabu, 2011<sup>6)</sup>。

CMIP5の一部のモデルの降水分布とダブルITCZを調べた。MIROC5など一部のモデルでは改善が見られたが、依然としてダブルITCZが顕著に見られるモデルもある。MIROC5による理想化実験を行い、前述の改善は、主にエントレインメントの表現の変更によるものであることが示された（平成23年度）。

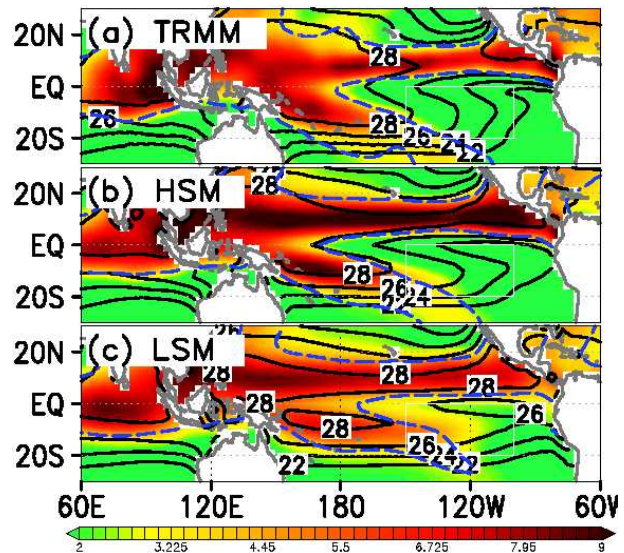
### (3) 東アジアメトリック

#### 1) クラスタ解析による変数のグループ化（平成20-21年度）

まず、「アジア域」を（北緯50° -南緯15°、東経60° -東経160°）に設定し、23個の大気海洋の変数を選び、自乗誤差値（RMSE）を利用してアジアメトリック（AMPI）の第1試算を行った。さらに、AMPIを校正する変数の冗長性（相関する変数のダブルカウント）を削減するため、各変数についてのマルチモデルの誤差値パターンを利用してクラスタ解析(Wilks, 2006<sup>12)</sup>)を試みた。同様に、現象の20世紀再現性の評価指標のモデル間分布についても、クラスタ解析を試みた。これらを比較解析してみると、20世紀再現性メトリックに近い現象は、気候場メトリックのクラスタ特性に近い傾向が見られる。このことは、現象群と気候場要素との効果的な対応付けの可能性を示唆し、現象と結びついたより効果的なアジアメトリックを設計するためのデータを得ることができた。この結果を論文にまとめて発表した。

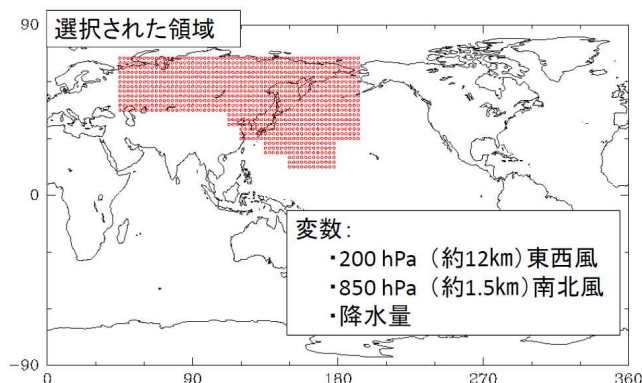
#### 2) 夏季の東アジアメトリックの作成（平成22-23年度）

次に、実際に東アジアの夏季の気候を左右する複数の現象を選択し、それらの現象の再現性を全球気候メトリックに比べて顕著によく表現する東アジアメトリックを以下の3ステップで開発



図(1)-2 (a) 観測、(b) HSM、(c) LSM の降水(色;mm/day)、SST(黒等値線;°C)。青点線は、500hPa 面の上昇流域と下降流域の境界を示す。

した。東アジアメトリックは、例えばアジア域気候を領域気候モデルでダウンスケーリングし、より詳細な気候予測結果が知りたい場合、どの気候モデルを親モデルとして使うべきか等の情報を



図(1)-3 東アジアの夏の気候を評価するメトリックの変数と領域。赤色の影をつけた領域で右下の3つの変数、即ち、上空12kmの東西風、高度1.5kmの南北風、及び降水量の3変数がよく再現されるモデルは、ジェット気流、PJパターン、梅雨をよく再現す

を与えてくれる。

- ステップ1：東アジアの夏の気候の決め手となる現象を選択。ここでは、ジェット気流の位置、PJパターン（フィリピン域と日本域の夏の雨がシーソーする現象）、梅雨の3つの現象を選択。
- ステップ2：選択した3つの現象の現象メトリック値を各モデルについて計算。それと相関のよい気候場メトリックを作り出す基本場の変数と領域を選択。（図1-(3)）
- ステップ3：東アジアメトリックと現象メトリックとの相関で両者の親和性を評価。

ステップ1、2で作成した東アジアメトリックと従来の全球メトリックとを、現象メトリックとの相関の観点から比較すると、PJパターンについては、もともと全球メトリックとの相関もよいがやや改善、梅雨との相関（ $-0.02 \rightarrow 0.55$ ）、および3現象の総合評価（ $0.49 \rightarrow 0.92$ ）が著しく改善した。「ジェット気流」の再現性も大きく改善した。このように東アジアの夏の気候の代表性が高い指標ができたことが確認された。

#### （4）一般向けパンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化」の出版

テーマ2の各サブテーマの成果から、日本の気候の将来変化に関するわかりやすい成果をテーマ2の各サブテーマの成果から、日本の気候の将来変化に関するわかりやすい成果を抽出し、一般向けのパンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化—世界の気候モデルから読む日本の将来—」を編集出版し、一般向け講演会やインターネットを通じて広く配布した。

## 5. 本研究により得られた成果

### （1）科学的意義

本研究より以前には、台風の統計特性に関するマルチモデル予測はほとんど行われておらず、単一モデルのみを用いた予測に比べて不確実性が小さいと考えられる予測情報を抽出できたことは意義がある。また、通過頻度変化を要因別に分解する手法は、直接的手法による予測の信頼性評価以外にも、通過頻度の季節内変動や年々変動の解析など、多くの研究への応用が期待される。

気候モデルの熱帯降水分布再現性および、長く気候モデルに頻出する問題点であった「ダブルITCZ」を、対流活動と環境場の関係性から解明した。実際にMIR0C5の理想化実験を行い、対流空



気塊による環境場の空気の取り込み効果の表現によって降水分布再現性と「ダブルITCZ」問題を、大きく改善できることが示された。CMIP5でも多くのモデルにダブルITCZ問題は存在するが、同様の改良が可能であることを示唆される。また、CMIP3による将来予測実験において、対流と環境場の関係性が、太平洋赤道域の降水量・循環場の変化の大きさを決める一因となっていることを示した。対流と環境場湿度の関係を適切に表現できるモデルを選択することで、より現実的な熱帯域の将来予測を行うことができると考えられる。

## (2) 環境政策への貢献

CMIP3、CMIP5のマルチモデル比較によって得られた成果論文は、IPCC第5次評価報告書（AR5）のWG1の報告の原稿への引用論文となっており、国際的な環境政策に貢献している。また、一般向けパンフレット「暑いだけじゃない地球温暖化—世界の気候モデルに読む日本の将来—」は、既に1300部程度が一般に配布されており、地球温暖化問題とそれへの取り組みを一般市民に知ってもらうために貢献している。

## 6. 国際共同研究等の状況

熱帯降水分布の再現性と将来変化の研究において利用している熱帯降雨観測衛星データを用いた3次元潜熱加熱推定データは、アメリカ航空宇宙局(NASA)/GSFCのW.-K. Tao博士との共同研究において、高藪を含む日本チームが主体的に開発しているものである。台風発生および経路の将来変化研究においては、香港市立大学のJ. C. L. Chan教授と共同研究を行った。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Yokoyama, C. and Y. N. Takayabu(2008): A statistical study on rain characteristics of tropical cyclones using TRMM satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 3848-3862. doi: 10.1175/2008MWR2408.1.
- 2) Suzuki, T., K. Ninomiya, Y. N. Takayabu, and S. Emori(2008): AGCM experiment of the effect of cumulus suppression on convection center formation over the Bay of Bengal, *J. Geophys. Res.*, 113, D16104. doi: 10.1029/2007JD009686.
- 3) Takayabu, Y. N. and M. Kimoto(2008): Diurnal variations in rainfall simulated using the CCSR/NIES/FRCGC AGCM and dependence on cumulus schemes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 163-173.
- 4) Kug, J.-S., K. P. Sooraj, D. Kim, I.-S. Kang, F.-F. Jin, Y. N. Takayabu, M. Kimoto(2009): Simulation of state-dependent high-frequency atmospheric variability associated with ENSO. *Clim. Dyn.*, 32, 635-648. doi 10.1007/s00382-008-0434-2.
- 5) Takayabu, Y. N. and K. Hikosaka(2009): Statistical analysis of oceanic rainfall characteristics in the Baiu season utilizing TRMM PR data. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87A, 339-352. doi:10.2151/jmsj.87A.339.
- 6) Sato, N., C. Takahashi, A. Seiki, K. Yoneyama, R. Shirooka, and Y.N. Takayabu (2009):

- An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian Oscillation in the CMIP3 multi-models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 791-805. doi:10.2151/jmsj.87.791.
- 7) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, N. Sato, and M. Yoshizaki (2009): The oceanic response to the Madden-Julian Oscillation and ENSO, *SOLA*, 5, 93-96. doi:10.2151/sola.2009-024.
  - 8) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan (2009): Tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific simulated in medium-resolution coupled general circulation models. *Clim. Dyn.*, 33, 665-683. doi:10.1007/s00382-009-0593-9.
  - 9) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu (2009): Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 525-538. doi:10.2151/jmsj.87.525.
  - 10) Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao, and N. Hirota (2010): Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR Spectral Latent Heating data. *J. Climate*, 23, 2030-2046.
  - 11) Sato, N., K. Yoneyama, Y. N. Takayabu, R. Shirooka, and M. Yoshizaki (2010): Variability of oceanic surface and subsurface layers associated with the northward-propagating intraseasonal variability. *Deep-Sea Research II*, 57, 1201-1211. doi:10.1016/j.dsr2.2009.12.009.
  - 12) Seiki, A., Y. N. Takayabu, K. Yoneyama, and R. Shirooka (2010): The impact of trade surges on the Madden-Julian Oscillation under different ENSO conditions, *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 6, 49-52. doi:10.2151/sola.2009-024.
  - 13) Seiki, A., Y. N. Takayabu, T. Yasuda, N. Sato, C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka, (2011): Westerly wind bursts and their relationship with ENSO in CMIP3 models. *J. Geophys. Res.*, 116, D03303. doi:10.1029/2010JD015039.
  - 14) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu (2010): Environmental and external factors in the genesis of tropical cyclone Nargis in April 2008 over the Bay of Bengal. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 88, 425-435. doi:10.2151/jmsj.2010-310.
  - 15) Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, M. Kimoto (2011): Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, 24, 4859-4873. doi:10.1175/2011JCLI4156.1
  - 16) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1666-1675. doi:10.1175/2011JAMC2643.1.
  - 17) Hirota, N. and Y. N. Takayabu (2012): Inter-model differences of future precipitation changes in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 307-316. doi: 10.2151/jmsj.2012-A16.
  - 18) Miyakawa, T., Y. N. Takayabu, T. Nasuno, H. Miura, M. Satoh, and M. W. Moncrieff (2012): Convective Momentum Transport by Rainbands within a Madden-Julian Oscillation in a

Global Nonhydrostatic Model with Explicit Deep Convective Processes. Part I: Methodology and general results. J. Atmos. Sci., 69, 1317-1338.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 高薮縁(2009): 心に残る一冊「猿橋勝子という生き方, 科学, 2009年8月号, 933-934.
- 2) 高薮縁(分担執筆)(2011): 科学者の本棚「鉄腕アトム」から「ユークリッド原論」まで. 科学編集部, 岩波書店, 263頁.
- 3) 高薮縁, 横井覚, 廣田渚郎, 宮川知己(2011): 暑いだけじゃない地球温暖化--世界の気候モデルから読む日本の将来. 東京大学大気海洋研究所, 22頁.

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 高薮縁 : 次世代静止気象衛星による雲・降水・雷観測への期待 -熱帯気象の立場から-. 日本気象学会2007年度秋季大会, 札幌, 2007.
- 2) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan : A climate model intercomparison of the tropical cyclogenesis over the western north Pacific. 2nd Workshop on Climate Risk Assessment, Yokohama, Japan, 2008.
- 3) Takayabu, Y. N. and S. Shige: Tropical and subtropical latent heating distribution estimated with the Spectral Latent Heating algorithm using TRMM PR. ISAM6, Fukuoka , 2007.
- 4) Takayabu, Y. N. S. Shige, and S. Yokoi: Three-dimensional distributions of tropical and subtropical latent heating obtained from the SLH algorithm. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2008.
- 5) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan: Seasonal march of tropical cyclogenesis simulated in eight climate models from WCRP CMIP3 multimodel dataset. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2008.
- 6) Takayabu, Y. N.: Evaluations of CMIP3 Model Performances for Various Phenomena in the Atmosphere and Oceans, in the Present-Day Climate and in Future Projections in the MOE S-5 project. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, Japan, Feb. 2009.
- 7) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Multi-model Projection of Tropical Cyclogenesis over the Western North Pacific using CMIP3 Archive. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, Japan, Feb. 2009.
- 8) Takayabu, Y. N. and S. Shige: Dynamical and Thermodynamical Controls on Tropical and Subtropical Convective Activity Inferred from Three Dimensional Latent Heating Distributions with TRMM SLH Data. 2008 American Geophysical Union Fall Meeting, San

- Francisco, U.S.A., Dec. 2008.
- 9) Takayabu, Y. N. S. Shige, and W.-K. Tao: Examination of cumulus convective regimes utilizing TRMM PR-based SLH estimates of Q1-QR. Third International Workshop on High-Resolution and Cloud Modeling, Honolulu, Dec. 2-4, 2008.
  - 10) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Multi-model comparison of global warming impacts on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. 2008 American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, U.S.A., Dec. 2008.
  - 11) 高薮 縁, 重 尚一: TRMM SLHデータを用いた熱帯域の積雲対流活動に対する大規模場効果の解析. 日本気象学会秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 12) 横井 覚, 高薮 縁: CMIP3マルチモデルデータを用いた温暖化時の台風発生頻度変化予測. 日本気象学会秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 13) 横井 覚, 高薮 縁: ベンガル湾におけるサイクロンの発生環境について. 日本気象学会秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 14) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu, J. C. L. Chan: Seasonal march of tropical cyclogenesis simulated in eight climate models from WCRP CMIP3 multimodel dataset. JSPS 5th University Allied Workshop on Climate and Environmental Studies for Global Sustainability, Chiba, Japan, Jul. 2008.
  - 15) 横井 覚, 高薮 縁: サイクロンNargis発生時のTC genesis potentialに関する考察. 日本地球惑星科学連合2008年大会, 千葉, 2008年5月.
  - 16) 高薮 縁, 重 尚一: TRMM SLH  $\beta$  版データによる潜熱加熱分布解析. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 17) 横井 覚, 高薮 縁, J. C. L. Chan: 西太平洋域における台風発生数のマルチモデル比較. 日本気象学会春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 18) Takayabu, Y. N. and S. Shige: Three-dimensional distributions of tropical and subtropical latent heating obtained from the SLH algorithm. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, Apr. 2008.
  - 19) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan: Seasonal march of tropical cyclogenesis simulated in eight climate models from WCRP CMIP3 multimodel dataset. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, Apr. 2008.
  - 20) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. The University Allied Workshop on Climate and Environmental Changes, Korea, 2009.
  - 21) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Climate model intercomparison and multi-model based future projection on tropical cyclogenesis distribution over the western North Pacific. MOCA-09, the IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly, Canada, 2009.
  - 22) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan: Multi-model based projection of tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific basin using CMIP3 archive. Fourth Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Japan, 2009.
  - 23) 廣田渚郎, 高薮縁: CMIP3マルチモデルにおける熱帯海上の非断熱加熱の鉛直構造. 熱帯気象

- 研究会，札幌，2009.
- 24) 横井覚，高薮縁，西井和晃，宮坂貴文，小坂優，中村尚：クラスタ解析を用いた気候モデルの気候場再現性能評価の試み．アジアメトリックWG，日本気象学会秋季大会，福岡，2009.
  - 25) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, and J. C. L. Chan : Tropical cyclogenesis frequency simulated by CMIP3 climate models and multi-model based future projection. International Workshop on Advancement of Typhoon Track Forecast Technique, Japan, 2009.
  - 26) 廣田渚郎，高薮縁：CMIP3マルチモデルにおける熱帯海洋上の非断熱加熱の鉛直構造．日本気象学会2009年秋季大会，福岡，2009.
  - 27) Hirota, N. and Y. Takayabu: Vertical structure of convective heating over tropical oceans in the CMIP3 models. AGU Fall Meeting, Carifornia, U.S.A., 2009.
  - 28) Takayabu, Yukari N. : Shallow and deep modes of tropical precipitation heating and their relationship to large-scale environments. BIRS Conference on Multiscale processes in the tropics, Apr. 27-May 01, 2009, Banff, CA, 2009.
  - 29) Takayabu, Yukari N. : Climate Change Impacts on Typhoon. The 5th International Coordination Group (ICG) Meeting GEOSS Asian Water Cycle Initiative (AWCI) Tokyo, Japan, 2009.
  - 30) Takayabu, Yukari N. : Evaluations of CMIP3 Model Performances for Various Phenomena in the Atmosphere and Oceans, in the Present-Day Climate and in Future Projections. IPCC Expert meeting on assessing and combining multi model climate projections. Boulder, U. S. A. , 2010.
  - 31) Takayabu, Yukari N. : A collaborative attempt to project future changes of atmospheric and oceanic phenomena utilizing CMIP3 multi climate model outputs. Second International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 3rd International Workshop on KAKUSHIN Program, Tsukuba, Japan, 2010.
  - 32) 横井覚，高薮縁：西太平洋における台風存在頻度の長期変化とその要因．日本気象学会2010年度春季大会，東京，2010.
  - 33) 廣田渚郎，高薮縁：CMIP3マルチモデルにおけるダブルITCZ．日本気象学会2010年度春季大会，東京，2010.
  - 34) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Attribution of long-term variability in tropical cyclone occurrence frequency over the western North Pacific. Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, 2010.
  - 35) 横井覚，高薮縁：大西洋における熱帯低気圧の存在頻度の長期変動．日本気象学会2010年度秋季大会，京都，2010.
  - 36) 廣田渚郎，高薮縁，住明正：2001年以降の再解析データを用いたCMIP3将来予測実験の検証の試み．日本気象学会2010年度秋季大会，京都，2010.
  - 37) Takayabu, Y. N. and H. Higuchi: Inter-and intraseasonal variations of cloud and precipitation characteristics over the Amazon Basin observed with TRMM PR and Cloudsat CPR data. 29th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology of the American Meteorological Society, Tucson, U. S. A. , 2010.

- 38) Hirota, N., Y. N. Takayabu, M. Watanabe, and M. Kimoto : Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. Third International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 4th International Workshop on KAKUSHIN Program, Tsukuba, Japan, 2011.
- 39) Miyakawa, T., Y. N. Takayabu, T. Nasuno, H. Miura, M. Satoh, and M. W. Moncrieff : Convective momentum transport associated with rain bands within a Madden-Julian Oscillation in a global cloud-system resolving model. Third International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 4th International Workshop on KAKUSHIN Program, Tsukuba, Japan, 2011.
- 40) Miyakawa, T. and Y. N. Takayabu: A Study on the Effects of Convective Momentum Transport Associated with Rain Bands within the Madden-Julian Oscillation. Western Pacific Geophysical Meeting 2010, Taipei, Taiwan, 2010.
- 41) Takayabu, Y. N. : Evaluation of CMIP3 multi-model performances for various phenomena. AAMP Monsoon Diagnostics Task Team Meeting, Tsukuba, Japan, 2011.
- 42) 横井 覚, 高菽 縁, 村上 裕之: 「発生地別台風統計法」を用いた台風存在頻度の将来変化予測の要因解析. 日本気象学会春季大会, 東京, 2011.
- 43) 廣田渚郎・高菽縁: 熱帯海上における降水特性による降水・循環の将来変化パターンのマルチモデル間の違い. 日本気象学会春季大会, 東京, 2011.
- 44) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu: Attribution of Decadal Variability in Tropical Cyclone Occurrence Frequency. International Union of Geodesy and Geophysics, 2011.
- 45) Takayabu, Y. N. : Effects of the large scale circulation on tropical cumulus convection. The 2011 Gordon Research Conference on Radiation and Climate, Waterville, U.S.A., 2011.
- 46) Takayabu, Y. N. and Nagio Hirota: Multi climate model intercomparison of precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem. Asia Oceania Geosciences Society, Taipei, Taiwan, 2011.
- 47) Hirota, N. and Y. N. Takayabu: Inter-model differences of precipitation change in CMIP3 and MIROC5 climate models. Asia Oceania Geosciences Society, Taipei, Taiwan, 2011.
- 48) 横井 覚, 高菽 縁, 村上 裕之: 「発生地別台風統計法」を利用した台風存在頻度変化の要因別分解. 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011.
- 49) 廣田渚郎・高菽縁: 降水分布・循環場およびその将来変化の積雲エントレインメント率に対する感度. 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011.
- 50) Takayabu, Y. N. : How can we detect extreme rainfalls from satellite data? AMS annual meeting, Maui, HI, U.S.A., 2012.
- 51) Miyakawa, T. Y. N. Takayabu, M. W. Moncrieff, T. Nasuno, H. Miura, and M. Satoh: Diagnosis of convective momentum transport by rainbands within a Madden-Julian Oscillation in a global nonhydrostatic model NICAM. Workshop on Tropical Dynamics & the MJO, Maui, HI, U.S.A., 2012.
- 52) Miyakawa, T. Y. N. Takayabu, S. Yokoi, N. Hirota, S. Hirahara, and T. Inoue : Selective

- compilation of performance metrics for CMIP3 GCMs: Methodology and its application to the Eastern Asia. 4th Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Maui, HI, U. S. A., 2012.
- 53) Takayabu, Y. N. : Summary of CMIP3 Studies in the S-5 Project and a Perspective for CMIP5 Studies. 4th Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Maui, HI, U. S. A., 2012.
- 54) Yokoi, S : Attribution of multi-model based future projection of tropical cyclone passage frequency over the Western North Pacific. 4th Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Maui, Hawaii, 2012.
- 55) Hirota, N. : Roles of Convective Entrainment In Spatial and Time Contrast of Precipitation. 4th Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Maui, HI, U. S. A., 2012.
- 56) Hirota, N. : Reproducibility of precipitation distribution over the tropical oceans in CMIP5 multi climate models and a comparison to CMIP3 results. 4th Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Maui, HI, U. S. A., 2012.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 2008年度日本気象学会春季大会専門分科会（2008年5月18日，横浜開港記念館，参加約200名）
- 2) 2008年度日本気象学会秋季大会研究会（2008年11月18日，仙台市国際会議場，参加約60名）
- 3) International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program（2009年2月18-20日，横浜ベイシェラトンホテル，参加者89名，海外機関から15名）
- 4) 2009年度日本気象学会秋季大会スペシャルセッション（2009年11月27日，福岡市アクロス 福岡，参加約200名）
- 5) Second International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 3rd International Workshop on KAKUSHIN Program（2010年2月25-27日，つくば国際会議場，参加者105名）
- 6) 日本気象学会2010年度秋季大会スペシャルセッション「マルチ気候モデルデータ解析による地球温暖化現象の理解」（2010年10月29日，京都テルサ，京都，参加者約200名）
- 7) Third International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, jointly with 4th International Workshop on KAKUSHIN Program（2011年3月9日-11日，つくば国際会議場，参加者130名）
- 8) International Workshop on Climate Change Projection and High Performance Computing : 4<sup>th</sup> Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment Climate 2012-（2012年3月12-15日，ウェスティンホテルマウイ，参加者54名）

### (5) マスコミ等への公表・報道等

- 1) 高薮縁：温暖化の影響を検証（東京発元気甲州人）山梨日日新聞，2007年7月1日。
- 2) 高薮縁：報道ステーション，テレビ朝日，2007年9月18日。
- 3) 高薮縁：爆笑問題ニッポンの教養，NHK，2007年11月20日。
- 4) 高薮縁：NHK教育番組サイエンスZERO「進化する台風予報」2008年10月26，30，31日
- 5) 高薮縁，横井覚：「今年の台風、過去最少？」朝日新聞夕刊10面，2010年11月9日，朝日新聞社。
- 6) 高薮縁，横井覚：「地球温暖化：台風発生海域が東に移動か 大型化の可能性も」毎日新聞夕刊10面，2011年1月19日，毎日新聞社。
- 7) 高薮縁：「梅雨長引き『雨期』に 温暖化100年後 台風は上陸減 東大など予測」産経新聞，2011年10月14日，全国版，産経新聞社。
- 8) 田中裕二・太田光・高薮縁：爆笑問題の日本の教養 「人類の明日は晴れか雨か？」気象学，2008年4月23日発行，講談社。139頁。

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献

- 1) Bengtsson, L., K. I. Hodges, M. Esch, N. Keenlyside, L. Kornblueh, J.-J. Luo, and T. Yamagata, (2007): How may tropical cyclones change in a warmer climate? *Tellus*, 59A, 539-561.
- 2) Gleckler, P. J., K. E. Taylor, and C. Doutriaux (2008): Performance metrics for climate models. *J. Geophys. Res.*, 113, D06104. doi:10.1029/2007JD008972.
- 3) Gray, W. M. (1975): Tropical Cyclone Genesis, Dept. of Atmospheric Science Paper, 234, Colorado State University, Fort Collins, CO, 121.
- 4) Emanuel, K. A. and D. S. Nolan (2004): Tropical cyclone activity and global climate. Preprints of 26th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 240-241.
- 5) Hirota, N. and Y. N. Takayabu, M. Watanabe, and M. Kimoto (2011): Precipitation reproducibility over tropical oceans and its relationship to the double ITCZ problem in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Climate*, 24, 4859-4873.
- 6) Hirota, N. and Y. N. Takayabu: Inter-model differences of future precipitation changes in CMIP3 and MIROC5 climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 307-316.
- 7) Reichler, T. and J. Kim (2008): How well do coupled models simulate today's climate? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 303-311.
- 8) Sugi, M., A. Noda, and N. Sato (2002): Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80, 249-272.
- 9) Takayabu, Y. N., S. Shige, W.-K. Tao, and N. Hirota (2010): Shallow and deep latent heating modes over tropical oceans observed with TRMM PR Spectral Latent Heating data,



- J. Climate, 23, 2030–2046.
- 10) Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183–7192.
  - 11) Yokoi, S. and Y. N. Takayabu (2009): Multi-model projection of global warming impact on tropical cyclone genesis frequency over the western North Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 525–538. doi:10.2151/jmsj.87.525.
  - 12) Wilks, D. S. (2006): Cluster Analysis, Chap. 14 of *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Academic Press, 549–562.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (2) 中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の再現性とその将来変化に関する研究

東京大学先端科学技術研究センター

中村 尚

〈研究協力者〉

東京大学先端科学技術研究センター

西井和晃・宮坂貴文

小坂 優（平成19～21年度）

Alexandre LAINE（平成23年度）

平成19～23年度累計予算額：50,478千円

（うち、平成23年度予算額：10,122千円）

予算額は、間接経費を含む。

【要旨】夏季の小笠原高気圧を変動させる循環偏差「PJパターン」が、亜熱帯ジェット気流から効率的にエネルギーを得、かつ台風活動も変化させて自身を効率的に維持できる「湿潤力学モード」であることを提唱した。この特性を反映し、同パターンのモデル再現性が夏季平均場の再現性とともに向し、その再現性を左右するモデルバイアスや夏季平均場の将来変化にも同パターンが大きなモデル間ばらつきを生むことを見出した。但し、アンサンブル平均としてはPJの負位相に相当し高気圧の北への張出しが抑制される変化傾向であり、これはフィリピン付近の降水増加が他の熱帯域より抑制される傾向と整合的なことが分かった。小笠原高気圧を変動させる別の循環偏差「シルクロードパターン」も、亜熱帯ジェット気流から効率的にエネルギー変換できる力学モードであることを提唱し、そのモデル再現性が亜熱帯ジェット気流の再現性に強く依存することを見出した。さらに、亜熱帯ジェット気流による対流圏中層の暖気移流対流が降水帯の組織化を促す傾向を反映し、ジェット気流の変動に伴い梅雨の降水分布が変動することを示した。

一方、真冬に移動性高低気圧活動が却って低下するという北西太平洋域の特有の季節変化を再現できる気候モデルの予測から、将来は「春一番」の発現が現在より早まる確率が高いことを見出した。また、暖流と寒流が合流する中緯度海洋前線帯を挟んでの海洋からの熱供給差が、海上気温の南北勾配を効率的に維持することで、移動性高低気圧が頻繁に発達する「ストームトラック」が形成されると言う「海洋傾圧調節」過程を提唱し、これがストームトラックや中緯度偏西風の形成・変動（環状モード）の再現に不可欠なことを見出した。なお、世界の5大洋いずれにおいても、海洋前線帯を伴う暖流域で過去100年間の海面水温の上昇幅が全海洋平均の2～3倍も高かったことを見出した。これは温暖化に伴う放射を介した直接的な昇温だけでなく、大気循環の変化が海洋亜熱帯循環系の強化や中緯度への拡大を通じて暖流域で温暖化を顕著化していることを示す重要な発見である。

【キーワード】小笠原高気圧、PJパターン、ストームトラック、春一番、暖流

## 1. はじめに

我が国の寒候期の天候は、日々の天気変化をもたらす移動性高低気圧、及び冬季モンスーンシステムを形成するシベリア高気圧とアリューシャン低気圧という持続的な大規模循環系の影響下にある。一方、夏季の天候は、亜熱帯の小笠原高気圧と北方のオホーツク海高気圧の勢力関係に依存し、それらの間に形成される梅雨前線の動向にも左右される。ただし、南北気温傾度が弱まるため、移動性高低気圧の活動は冬季よりはかなり弱まる。

本推進費による研究活動の重要な目的の1つは、進行する温暖化が今世紀後半の我が国の四季の天候にもたらし得る変化に関する具体的な情報を、「気候変動に関する政府間パネル(IPCC)」第4次報告書(AR4)に記載された24の気候モデルによる予測結果から引き出すことにある。そのためには、上記のような各季節を特徴づける平均的な大気循環がどう変化し、各季節に卓越する循環変動パターンがどのような変調を受けるかを実験結果から予測する必要がある。その前提として、それらの現象の現在気候における再現性が気候モデルでいかに異なるかを調査する必要がある。そこで、IPCC-AR4に記載された第3次気候モデル比較実験(CMIP3)出力データを用いて、20世紀再現実験及び21世紀期気候予測実験についての解析を実施するためには、それらの現象のメカニズムについてより深い理解とそれに基づく評価指標の的確な定義が必要となる。そのため、観測データの解析や理想化された大気モデル実験を実施した。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマの目的は、我が国の四季の天候状況に影響を与える中緯度・亜熱帯の大気循環系の季節・経年変動について、気候モデルにおける現在気候再現実験からその再現性を検証し、それに基づき将来変化予測結果に対する各モデルの信頼性を評価し、その物理的・力学的解釈を与えることである。その目的のために、現在気候の再現実験結果と現実データとの比較解析に基づき、中緯度・亜熱帯循環系の季節・経年変動の時空間構造を抽出し得るメトリックを求める。そして、メトリックという視点を通じ、エルニーニョ・南方振動(ENSO)など他の変動現象との相互関係についても解析検討し、極東域の循環変化の要因分析に繋げる。

## 3. 研究開発方法

CMIP3に関わる20世紀再現実験及び21世紀期気候予測実験データを、米国の気候モデル診断・相互比較プログラム(PCMDI)から東京大学のデータ統合・解析システム(DIAS)に移して解析した。再現性検証に用いる全球大気再解析データとしては、気象庁(JRA-25)及び欧州中期予報センター(ERA-40)によるものを用いた。一方、大気循環に与える中緯度海洋の影響評価には、地球シミュレータの大気大循環モデル(AFES)の下方境界を全球海面とし東西一様な海面水温分布を与える「水惑星」実験を用いた。さらに、海洋前線帯近傍の水温長期変化の評価には8つの水温・海上気温データセットを利用した。

夏季(6~8月)のPJ(Pacific-Japan)パターンについては、それを特徴づける対流圏下層の渦度偏差の南北双極子を捉えるため、北西太平洋上にて850-hPa渦度の月平均循環偏差場からシグナルを経験直交関数 EOF 展開により抽出し、再現性評価のための指標(メトリック)とした。「シルクロードパターン」のメトリックの定義には、アジアジェットに沿った対流圏上層200hPa南北

風の夏季月平均偏差にEOF展開を用いた。現在気候における平均場と月平均偏差は1980～99年の20年間、温暖化シグナルは温室効果ガス排出のA1Bシナリオに基づく将来予測から2080～99年の20年間の夏季平均に基づき算出した。

一方、移動性高低気圧に伴う数日周期の循環変動成分は、モデル出力・現実データともに、日毎のデータ時系列に切離周期 8 日の高周波フィルターを施すことで抽出した。各地点におけるストームトラック活動のメトリックとしては、移動性高気圧の傾圧的発達の際の指標ともなる対流圏下層 850hPa 面での移動性高低気圧による極向き熱輸送量を採用した。上空では擾乱による熱輸送は本質的でなくなるので、代わりに指標として高周波フィルターされた南北風の分散を用いた。

## 4. 結果及び考察

### (1) 夏季の循環変動

夏季の小笠原高気圧の変動に関わる循環偏差「PJパターン」が、夏季アジアモンスーンに伴い形成される亜熱帯ジェット気流や貿易風から効率的に有効位置エネルギーや運動エネルギーを変換し、台風活動を変化させて自身を効率的に維持できる「湿潤力学モード」であることを提唱した(成果論文1・11・12)。それに基づき同パターンの再現性のメトリックを提案し、現在気候再現実験における再現性が気候平均場の再現性に強く依存することを見出した。24の気候モデルの20世紀再現実験のデータをこのメトリックで評価したところ、同パターン再現性が気候平均場の再現性とともに向する傾向を確認し、気候平均場のバイアスにも、PJパターンの極性に依り真夏でも梅雨のような状態が持続するグループと、6月に真夏のような状況になる2つのモデルグループが生ずることが分かった(成果論文15)。また、温暖化に伴う夏季平均場の変化にも同パターンの明瞭なシグナルが見られ、その極性は赤道太平洋の海面水温の上昇の大きさと密接に関連する傾向も見出された。即ち、モデルアンサンブル平均の予測では、中東部赤道太平洋で特に水温上昇が著しく、下層循環場ではPJの負位相に対応して小笠原高気圧の北への張出しが抑制されるという変化傾向であり、この両者の関係は現実気候に於けるENSOの位相と夏季平均偏差場におけるPJパターンの極性との関係性と整合的であった(成果論文15)。但し、負のPJパターンとの整合性には、フィリピン付近の降水増加が他の熱帯・亜熱帯よりも抑制される中、潜熱放出増加による成層度の顕著な増加により大気循環の駆動に関わる上昇運動が逆に現在よりも抑制される傾向を考慮する必要がある。なお、再現性のばらつきの大きさを反映して、各モデルの将来予測にも大きなばらつきが見られた(成果論文15)。モデルアンサンブルに見られた変化は、PJパターンの力学モード性を反映して大きくばらつく予測の重ね合わせであることに留意すべきである。

小笠原高気圧の変動に関わるもう 1 つの循環偏差「シルクロードパターン」も、傾圧的な(南北気温差を伴う)アジアジェットから効率的に有効位置エネルギーを変換できる力学モードであることを提唱し、それに基づきジェット気流の再現性と同パターンの再現性のメトリックを提案し、現代気候再現実験における再現性を評価した(成果論文 3)。さらに、夏季アジアジェットを含む気候平均場を基本場とする線型バランス方程式系(水平解像度約 300km, 鉛直 20 層)の特異値分解解析を行ない、シルクロードパターンに酷似した擾乱が北半球で最も減衰し難い力学モードであることを確認した。この循環偏差は「アジアジェット」に沿って伝播する停滞性ロスビー波束と従来解釈されてきたが(Enomoto et al. 2003)<sup>1)</sup>、アジアジェットの有効位置エネルギーを効率的に変換することで自身を支え、かつ運動エネルギー変換がアジアジェットの僅かな東西非一様

性に敏感なため、最もエネルギー損失が少ない地理的位相が選択され易いと解釈できることが分かった。この位相は小笠原高気圧の勢力に強く影響するものである。

観測された気候平均場に見られる亜熱帯ジェット気流による対流圏中層の暖気移流と梅雨前線に伴う降水帯との良い対応関係<sup>2)</sup>が、経年変動にも存在することを見出した(成果論文17)。これは、対流圏中層の暖気移流が降水帯の組織化を促すと共に、ジェット気流の変動に伴い、梅雨の降水分布も変動することを示す結果である。こうした知見を踏まえ、CMIP3の各モデルにみられる梅雨降水分布のバイアスを評価したところ、そのばらつきが北西太平洋の海面水温の不確実性だけでなく、ジェット気流による暖気移流のバイアスにもかなり依存することが見出された。

## (2) 移動性高低気圧活動と大気大循環系の形成・変動における中緯度海洋の役割

### 1) 寒候期の移動性高低気圧活動と「春一番」

寒候期天候を左右する移動性高低気圧を伴う傾圧性波動擾乱の発達率は偏西風に伴う南北気温差に比例するという普遍理論があるものの、極東・北西太平洋域においては南北気温差が最大となる真冬に擾乱活動が却って弱まるという特有の季節変化を示すことが我々の研究で見出されている(Nakamura et al. 2002)<sup>3)</sup>。擾乱活動のメトリックを日平均データが利用可能な19のCMIP3気候モデルに適用し、このうち8個で上記の季節変化が再現されることを確認した(成果論文4)。そして、これらモデルの統一的傾向として、21世紀末には冬季モンスーンの弱化に伴い亜寒帯ジェットの南下も弱まる結果、日本付近における真冬の擾乱活動が現在よりも活発化することが分かった(成果論文4)。

こうした擾乱活動の変化を実感できる現象として「春一番」があるが、地域的に定義される現象故にCMIP3クラスの気候モデルで捉えることが難しい。そこで、「春一番」が早春における移動性擾乱の再活発化の現れであることに鑑み、過去40年に東京で「春一番」が最も早かった10年と最も遅かった10年とについて、真冬の擾乱による極向き熱輸送をERA-40再解析データから別個に評価し、前者の方が後者より真冬の擾乱活動が強い傾向が明瞭に確認された。この観測された傾向と気候モデルによる21世紀末の擾乱活動の変化予測から、温暖化に伴い「春一番」の観測は現在より早まるだろうと推察した(成果論文4)。

### 2) 中緯度海洋前線帯における大気海洋相互作用が大気循環系・気候系に及ぼす役割

地球シミュレータを用いた様々な数値実験から、移動性高低気圧に伴う暖気流・寒気流が海洋前線帯を横切る際に、暖水側・寒水側で夫々生ずる大量の顕熱放出と大気冷却とが、暖気流・寒気流により地表気温の南北差が緩和されようとする働きに抗して気温差を効率的に回復させることで、高低気圧が繰り返し発達できてストームトラックの形成が可能となる「海洋傾圧調節過程」を提唱した(成果論文2・5・6・7・14)。大気大循環モデルに現実的な海面水温勾配を中緯度に与えた理想化実験では、この「海洋傾圧調節過程」を通じて地表傾圧帯が維持され、それに沿ってストームトラックと西風ジェット気流が形成された。このジェット気流は、移動性擾乱が西風角運動量を亜熱帯から中緯度へと輸送することで駆動される極前線ジェットである。冬半球では、強いハドレー循環により維持される亜熱帯ジェットとともに、南半球で観測されるようなダブルジェット構造が再現された(成果論文2・5・6・7・14)。一方、水温勾配を緩和させた実験では、ストームトラックが低緯度側へ変位し擾乱活動が著しく弱化する結果、極前線ジェットが弱化した(成果論文2・7)。夏半球ではジェットが南下して亜寒帯域の西風が弱化する一方、冬半球では

亜熱帯ジェットのみ卓越するという非現実的なシングルジェット状態となる。また、中緯度海洋前線帯の存在が、ストームトラックや中緯度偏西風の形成・変動（環状モード）の現実的な再現に不可欠なことを見出した（成果論文2・23）。さらに、系統的なモデル実験から、ストームトラックや中緯度偏西風の緯度は、偏西風と移動性高低気圧波の相互作用という大気の内力学と海洋前線帯に伴う「海洋傾圧調節」の効果との兼ね合いで決まり、後者は下層ほど、また海洋前線が中緯度・亜熱帯（緯度30°～45°）にある場合ほど強く、下層のストームトラックと海上偏西風帯が前線帯近傍に形成される傾向が顕著なことを見出した（成果論文22）。

なお、世界の5大洋いずれにおいても、海洋前線帯を伴う暖流域で過去100年間の海面水温の上昇幅が全海洋平均の2～3倍も高かったことを見出した（成果論文21）。これは温暖化に伴う放射を介した直接的な昇温だけでなく、大気循環の変化が海洋亜熱帯循環系の強化や中緯度への拡大を通じて暖流域で温暖化を顕著化していることを示す重要な発見である。

## 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、極東・北西太平洋域における夏季大気循環の卓越自然変動であるPJパターンがその湿潤力学モード性の反映として、夏季平均大気循環場の気候モデル再現性に大きな不確実性をもたらすことを見出した。また、その将来予測にもPJパターンが明確に寄与すると同時に、その予測にはモデル毎の不確実性が不可避であることを認識させた。さらに、シルクロードパターンにも力学モード性を同定したことは、小笠原高気圧が元来変動しやすい特性を有し、これが我が国の夏季天候の将来予測に不可避な不確実性の根拠を与える重要な成果である。なお、シルクロードパターンの力学モード性の発見は、夏季アジアジェットが従来考えられたような波状擾乱に対する純粋な導波管ではなく、力学モードとしての擾乱を維持させる機能があることを初めて明らかにした画期的成果である。

一方、上空の西風ジェット気流が最も強まる真冬に移動性高低気圧の活動が却って弱まると言う、気象力学の指導原理に一見反するような極東・北西太平洋域に特徴的な季節変化も、複数のモデルできちんと再現されることが確認できたことは、日本の冬季気候の将来予測にとって心強い成果である。これに基づく「春一番」の早期化予測は、低気圧という総観規模現象のモデル予測から地域的現象の予測情報を引き出す1つの典型的応用例である。また、海洋循環による維持される海洋前線帯の存在が、「海洋傾圧調節過程」を通じて対流圏大循環に本質的な影響を与えることを確認し、ストームトラックや中緯度偏西風の変動（環状モード）の再現に不可欠なことも見出した。さらに、前線帯近傍の暖流域で水温上昇が特に顕著な傾向の発見は、中緯度海洋前線帯における大気海洋相互作用が中緯度気候の長期変動に果たす役割が将来益々重要となる可能性を示唆する重要な成果である。

### （2）環境政策への貢献

本サブテーマ課題の成果論文の幾つかは、IPCC第5次報告書の数名の主著者に既にわたっており、同報告書に反映される可能性が高い。これには、メトリックの定義法に関する本質的な問いかけも含まれる（成果論文16・20）。今後、本研究課題主催のシンポジウムでの講演や、中・高校

生向けのパンフレットの制作、成果論文のプレス発表、並びに本研究課題（1）に関わる広報活動を通じ、成果の一層の広報・普及に努める。

## 6. 国際共同研究等の状況

本サブテーマ課題の推進に当たっては、米国気候変動研究計画（US-CLIVAR）の西岸境界流ワーキンググループ（WBC-WG）と連携した。WGには中村が正式メンバーとして参加し、WGのメンバーとともに中緯度海洋前線帯固有の大気海洋相互作用、とくにストートラックの形成や長期気候変動との関連についてレビュー論文（成果論文10）を米国気象学会専門誌に発表した。関連して、米国海洋大気庁（NOAA）と海洋研究開発機構が共同で実施する黒潮続流域の集中観測国際研究（KIP）とも連携を保つとともに、中国海洋大学の研究者とも海洋前線帯域の水温の長期変化に関する共同研究を推進し、その成果論文(21)がNature Climate Changeに掲載され、一部マスコミでも採り上げられた。一方、長周期の大気循環偏差と成層圏変動との関連についてはノルウェー大気研究所との共同研究を進めており、成果論文(9・18)が米国専門誌に掲載されている。

## 7. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表

<論文（査読あり）>

- 1) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2008): A comparative study of the Pacific-Japan (PJ) teleconnection pattern based on reanalysis datasets SOLA, 4, 1, 9-12.
- 2) Nakamura, H. T. Sampe, A. Goto, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie (2008): On the importance of midlatitude oceanic frontal zones for the mean state and dominant variability in the tropospheric circulation. *Geophys. Res. Lett.*, 35, 15, L15709. doi: 10.1029/2008GL034010.
- 3) Kosaka, Y. H. Nakamura, M. Watanabe, and M. Kimoto (2009): Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian Jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 3, 561-580.
- 4) Nishii, K. T. Miyasaka, Y. Kosaka, and H. Nakamura (2009): Reproducibility and future projection of the midwinter storm-track activity over the far east in the CMIP3 climate models in relation to the occurrence of the first spring storm (Haru-Ichiban) over Japan. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 3, 581-588.
- 5) Nonaka, M. H. Nakamura, B. Taguchi, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, and K. Takaya (2009): air-sea heat exchanges characteristic to a prominent midlatitude oceanic front in the South Indian ocean simulated in a high-resolution coupled GCM. *J. Climate*, 22, 24, 6515-6535.
- 6) Taguchi, B. H. Nakamura, M. Nonaka, and S.-P. Xie (2009): Influences of the Kuroshio/Oyashio Extensions on air-sea heat exchanges and storm track activity as revealed in regional atmospheric model simulations for the 2003/4 Cold Season. *J.*

- Climate, 22, 24, 6536-6550.
- 7) Sampe, T. H. Nakamura, A. Goto, and W. Ohfuchi (2010): Significance of a midlatitude oceanic frontal zone in the formation of a storm track and an eddy-driven westerly jet. *J. Climate*, 23, 7, 1793-1814.
  - 8) Miyasaka, T. and H. Nakamura (2010): Structure and mechanisms of the southern hemisphere summertime subtropical anticyclones. *J. Climate*, 23, 8, 2115-2130.
  - 9) Nishii, K. H. Nakamura and Y. J. Orsolini (2010): Cooling of the wintertime Arctic stratosphere induced by the Western Pacific teleconnection pattern. *Geophys. Res. Lett.*, 37, 13, L13805. doi:10.1029/2010 GL043551.
  - 10) Kwon, Y-O. M. A. Alexander, N. A. Bond, C. Frankignoul, H. Nakamura, B. Qiu, and L. A. Thompson (2010): Role of Gulf Stream and Kuroshio-Oyashio systems in large-scale atmosphere-ocean interaction: A review. *J. Climate*, 23, 12, 3249-3281.
  - 11) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010a): Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan Pattern. *J. Climate*, 23, 19, 5085-5108.
  - 12) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010b): Mechanisms of meridional teleconnection observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part II: A Global Survey. *J. Climate*, 23, 19, 5109-5125.
  - 13) Nakamura, H. T. Miyasaka, Y. Kosaka, K. Takaya, and M. Honda (2010): Northern hemisphere extratropical tropospheric planetary waves and their low-frequency variability: Their vertical structure and interaction with transient eddies and surface thermal contrasts. *Climate Dynamics: Why Does Climate Vary?* D. Sun, F. Bryan, Eds., *Geophys. Monogr.*, 189, AGU, 149-179.
  - 14) Hotta, D. and H. Nakamura (2011): On the significance of sensible heat supply from the ocean in the maintenance of mean baroclinicity along storm tracks. *J. Climate*, 24, 13, 3377-3401.
  - 15) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2011): Dominant mode of climate variability, inter-model diversity and projected future changes over the summertime Western North Pacific simulated in the CMIP3 models. *J. Climate*, 24, 15, 3935-3955.
  - 16) Yokoi, S. Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 8, 1666-1675.
  - 17) Kosaka, Y., S-P. Xie, and H. Nakamura (2011): Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia. *J. Climate*, 24, 20, 5435-5453.
  - 18) Nishii, K. H. Nakamura, and Y. J. Orsolini (2011): Geographical dependence observed in blocking high influence on the stratospheric variability through enhancement or suppression of upward planetary-wave propagation. *J. Climate*, 24, 24, 6408-6423.
  - 19) Taguchi, B. H. Nakamura, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, K. Takaya, and A.



- Goto (2012): Seasonal evolution of atmospheric response to decadal SST anomalies in the North Pacific subarctic frontal zone: Observations and a coupled model simulation. *J. Climate*, 25, 1, 111-139.
- 20) Nishii, T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y. N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012) : Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 87-100.
- 21) Wu, L. W. Cai, L. Zhang, H. Nakamura, A. Timmermann, T. Joyce, M. J. McPhaden, M. A. Alexander, B. Qiu, M. Visbeck, P. Chang, and B. Giese (2012) : Enhanced warming over the global subtropical western boundary currents. *Nature Climate Change*, 2, 3, 161-166. doi:10.1038/nclimate1353.
- 22) Ogawa, F. H. Nakamura, K. Nishii, T. Miyasaka, and A. Kuwano-Yoshida (2012) : Dependence of the climatological axial latitudes of the tropospheric westerlies storm tracks on the latitude of an extratropical oceanic front. *Geophys. Res. Lett.*, 39, 5, L05804. doi:10.1029/2011GL0499222012.
- 23) Sampe, T. H. Nakamura, and A. Goto (2012) : Potential influence of a midlatitude oceanic frontal zone on the annular variability in the extratropical atmosphere as revealed by aqua-planet experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90C, in press.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) Kosaka, Y. and H. Nakamura (2010): The Pacific-Japan pattern: A meridional teleconnection over the summertime western North Pacific. *CLIVAR Exchanges*, 54, 22-25.

**(2) 口頭発表（学会等）**

- 1) Nakamura, H. : Models/projections: Japanese waters. Workshop for Evaluation of Future ESSAS (Ecosystem Study of Sub-Arctic Seas) Climate Scenarios, Hakodate, Japan, 2007.
- 2) Nakamura, H. and T. Miyasaka: Dynamics and seasonality of the subtropical anticyclones. XXIV General Assembly of IUGG, Perugia, Italy, 2007.
- 3) Nakamura, H. and Y. Kosaka: Structure and dynamics of a summertime teleconnection pattern associated with anomalous convective activity over the tropical Northwestern Pacific. XXIV General Assembly of IUGG, Perugia, Italy, 2007.
- 4) Nakamura, H. T. Sampe, A. Goto, D. Hotta, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie: Influence of a mid-latitude oceanic frontal zone on the mean state of the tropospheric circulation and its annular variability. 15th Conference on Air-Sea Interaction, Amer. Meteor. Soc., Portland, OR, U. S. A., 2007.
- 5) Nakamura, H. Y. Kosaka, D. Hotta, K. Nishii, T. Miyasaka, and K. Takaya: Usage of

- atmospheric reanalysis data for dynamical diagnoses of the atmospheric circulation and climate variability. 3rd WCRP International Conference on Reanalysis, Tokyo, Japan, 2008.
- 6) Nakamura, H. T. Sampe, A. Goto, B. Taguchi, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie: Impact of a mid-latitude oceanic frontal zone on the tropospheric general circulation and its annular variability: Importance of "oceanic baroclinic adjustment". 16th Conf. on Air-Sea Interaction, Amer. Meteor. Soc., Phoenix, AZ, U.S.A., 2009.
  - 7) Nakamura, H.: Importance of midlatitude oceans in the formation of storm-tracks and westerly jets and in their variability: A review. Workshop of US-CLIVAR Western Boundary Current Working Group, Phoenix, AZ, U.S.A., 2009.
  - 8) Kosaka, Y. and H. Nakamura: International Workshop on Global Change Projection: Atmospheric circulation and its variability over the summertime Northwestern Pacific simulated in the CMIP3 climate models. Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, Japan, 2009.
  - 9) Nakamura, H. T. Sampe, A. Goto, D. Hotta, B. Taguchi, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, W. Ohfuchi, and S.-P. Xie: Impact of sharp SST Gradient in midlatitude on the atmospheric general circulation and its annular variability: Importance of oceanic baroclinic adjustment. IAMAS-IAPSO-IACS General Assembly (MOCA-09), Montreal, Canada, 2009.
  - 10) Nakamura, H. T. Sampe, A. Goto, D. Hotta, B. Taguchi, and M. Nonaka: On the significance of sensible heat supply from the ocean in the maintenance of mean baroclinicity along storm-tracks. IAMAS-IAPSO-IACS General Assembly (MOCA-09), Montreal, Canada, 2009.
  - 11) Nakamura, H. T. Miyasaka, and Y. Kosaka: Dynamics of the North Pacific summertime subtropical anticyclone and interannual variability in its western portion. IAMAS-IAPSO-IACS General Assembly (MOCA-09), Montreal, Canada, 2009.
  - 12) Nakamura, H. and T. Miyasaka: Structure and Mechanisms of the Southern Hemisphere Summertime Subtropical Anticyclones. IAMAS-IAPSO-IACS General Assembly (MOCA-09), Montreal, Canada, 2009.
  - 13) Kosaka, Y. H. Nakamura, M. Watanabe, and M. Kimoto: Dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian Jet. 4<sup>th</sup> Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan, 2009.
  - 14) Nishii, K. T. Miyasaka, Y. Kosaka, and H. Nakamura: Reproducibility and future projection of the midwinter storm-track activity over the Far East in the CMIP3 climate models in relation to Haru-Ichiban. 4<sup>th</sup> Japan-China-Korea Joint Conference on Meteorology, Tsukuba, Japan, 2009.
  - 15) Nakamura, H. T. Sampe, F. Ogawa, A. Goto, D. Hotta, B. Taguchi, M. Nonaka, N. Komori, A. Kuwano-Yoshida, W. Ohfuchi and S.-P. Xie: Influence of midlatitude oceans on the formation of storm-tracks and westerly jets and on their variability. Ocean Sciences

- Meeting, Portland, OR, U.S.A., 2010.
- 16) Nakamura, H. : Midwinter minimum in the North Pacific storm-track activity: Its dynamics, model reproducibility and future projection. AGU Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, 2010.
  - 17) Nakamura, H. : AGU Western Pacific Geophysics Meeting, Taipei, Taiwan, 2010.
  - 18) Nakamura, H. : Pacific-Japan teleconnection pattern: Its dynamics, model reproducibility and future projection. Wallace Symposium, Seattle, U.S.A., 2010.
  - 19) Nakamura, H. H. Sato, Y. Kosaka, T. Miyasaka, and K. Nishii: Dynamics of dominant wavy anomaly patterns in winter along the Asian-Pacific subtropical jet. XXV General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 2011.
  - 20) Nakamura, H. F. Ogawa, T. Sampe, A. Goto, and A. Kuwano-Yoshida: Influence of a midlatitude oceanic frontal zone on the annular variability of the extratropical atmosphere and its vertical connectivity. XXV General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 2011.
  - 21) Nishii, K. H. Nakamura, and Y. J. Orsolini: Cooling of the wintertime arctic stratosphere induced by the western pacific teleconnection pattern. XXV General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 2011.
  - 22) Nishii, K. H. Nakamura, and Y. J. Orsolini: Geographical dependence observed in blocking high influence on the stratospheric variability through enhancement and suppression of upward planetary-wave propagation. XXV General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 2011.
  - 23) Miyasaka, T. and H. Nakamura: Dynamics and seasonality of the subtropical highs. XXV General Assembly of IUGG, Melbourne, Australia, 2011.
  - 24) Nakamura, H. and Y. Kosaka: Dynamics, model-reproducibility and future projection of the Pacific-Japan teleconnection pattern. AOGS Meeting, Taipei, Taiwan, 2011.
  - 25) Nakamura, H. T. Miyasaka, B. Taguchi, and M. Nonaka: Long-term modulations in the decadal climate variability over the North Pacific: Observations and a coupled model simulation. Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City, U.S.A., 2012.
  - 26) Laine, H. Nakamura, K. Nishii, and T. Miyasaka: Northern-hemisphere wintertime precipitation changes under global warming conditions. Climate 2012 - International Workshop on Climate Change Projection and High Performance Computing, Lahaina, HI, U.S.A., 2012.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

- 1) 2008年度日本気象学会春季大会専門分科会（2008年5月18日，横浜開港記念館，参加約200名）
- 2) 2008年度日本気象学会秋季大会研究会（2008年11月18日，仙台市国際会議場，参加約60名）

- 3) 2009年度日本気象学会秋季大会スペシャルセッション（2008年11月27日，福岡市アクロス 福岡，参加約200名）
- 4) 2010年度日本気象学会秋季大会スペシャルセッション（2010年10月29日，京都テルサ，参加約200名）

#### （5）マスコミ等への公表・報道等

- 1) 中村尚：「2008年の「低温」を巡る解釈「寒冷化に向かう」は本当か？」日経エコロジー，2009年4月号，2009年3月8日発行，日経BP社.
- 2) 中村尚：「海水温：世界の主要5暖流で急上昇 国際チーム解析」毎日新聞，2012年2月16日，毎日新聞社，全国版（総合14新版），29頁。  
<http://mainichi.jp/select/science/news/20120216k0000m040173000c.html>
- 3) 中村尚：Nature Climate Changeに発表した成果を含めた人物紹介．小学館 Japan Knowledge, Who's Who. 2012年3月17日.

#### （6）その他

研究協力者であった小坂 優 氏が、2010年度日本気象学会山本・正野論文賞（若手優秀論文賞）を受賞した。受賞対象論文は平成21年度の成果論文（成果論文3: Kosaka et al.2009）であり、当推進費S-5-2が企画・編集に携わった日本気象学会国際学術誌「気象集誌（Journal of Meteorological Society of Japan）」「CMIP3特集号」に掲載されたものである。

### 8. 引用文献

- 1) Enomoto, T., B. J. Hoskins and Y. Matsuda (2003) : The formation mechanism of the Bonin high in August. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 129, 157-178.
- 2) Sampe, T., and S.-P. Xie (2010) : Large-scale dynamics of the Meiyu-Baiu rainband: Environmental forcing by the westerly jet. J. Climate, 23, 113-134.
- 3) Nakamura, H., T. Izumi, and T. Sampe (2002) : Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon. J. Climate, 15, 1855-1874.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (3) 季節予測に係わる短期気候変動の再現性とその将来変化

国土交通省気象庁気象研究所

気候研究部 尾瀬智昭・鬼頭昭雄・楠昌司・保坂征宏・安田珠幾・行本誠史・遠藤洋和

〈研究協力者〉

国土交通省気象庁気象研究所

環境・応用気象研究部

柴田清孝

気候研究部

足立恭将・小林ちあき

支援研究員

末吉雅和

国土交通省気象庁

地球環境・海洋部 気候情報課

石原幸司

平成19～23年度合計予算額：75,416千円

(うち、平成23年度予算額：14,740千円)

予算額には、間接経費を含む。

**〔要旨〕** 世界気候研究計画結合モデル国際比較プロジェクト(WCRP\_CMIP3)モデルの現在気候ならびに将来気候実験から、地上気温変動、季節予測に係わる夏冬モンスーンやエルニーニョ南方振動(ENSO)の再現性と将来変化について以下の結果を得た。

温暖化時の地上気温日々変動は、中緯度の夏季の陸上で増加、他の季節の陸上と一年を通しての海上では減少する傾向が見られた。夏季陸上での増加には陸面の乾燥化が影響している。

ヤマセ発生頻度の将来変化については、温暖化に伴う熱帯大気循環の弱化と関連して5月に減少し8月に増加する傾向を多くのモデルが示した。ヤマセの再現性が高いモデルでは、将来変化傾向に関するモデル間一致率はさらに高かった。梅雨期の降水強度の将来変化をマルチモデル平均で見ると東アジア域では降水強度が将来増加すること、アリューシャン低気圧は北または北東方向にシフトし、これに応答して黒潮続流は北へシフトまたは強化されることがわかった。

現在気候におけるエルニーニョに対する降水量変動が、多くの熱帯地域で降水量将来変化のモデル間の不確定性として見られることがわかった。関連して、エルニーニョに伴う西太平洋降水変動の再現性を評価したところ、赤道中央太平洋における降水量気候値の再現性と関係していることがわかった。エルニーニョ海域の海面水温変動から1～2季節遅れて全球の地上気温が高くなる傾向は多くのモデルの現在気候実験で再現されているが、成層圏のエルニーニョ南方振動(ENSO)シグナルは対流圏での微小な誤差が増幅され、その再現性は十分でない。

全球表層海洋メトリックから、熱帯太平洋海洋気候場の再現性が良いモデルはENSOの再現性が良いことがわかった。ENSO振幅の将来変化は熱帯太平洋における表層貯熱量の変化と関係が高かった。温暖化時には、低緯度においては昇温のため、緯度45°より高緯度では降水の増加のため、海洋ロスビー波の西進位相速度が増加し、長期海洋変動の時間スケールが短くなる傾向にある。

[キーワード] CMIP3、梅雨、ヤマセ、エルニーニョ、黒潮

## 1. はじめに

この課題では、第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) マルチモデルデータセットの20世紀再現実験 (20C3M) および将来予測実験 (SRES A1B) の結果を解析し、季節予測に関わる短期気候変動の再現性とその将来変化の研究を実施した。

日本付近の気候は、ヤマセや梅雨など日本域や東アジア特有の気候要素に強く影響を受けている。これらの地域的な気候要素は、夏冬のアジアモンスーンやエルニーニョ・北極振動 (AO) といった、より広範囲の気候要素の影響を受けていることがこれまでの研究などを通してわかっている。したがって、気候システム全体の将来変化について知ることが、日本付近の将来変化とその不確実性・信頼性を検討するうえで重要である。

予測対象とする現象の現在気候におけるモデル再現性を確認することは、その現象の将来変化をモデルで予測するための前提であるが、さらに、現在気候における再現性の違いが系統的に将来予測の差となって現れる場合には、その事実は将来予測の不確実性・信頼性について一定の情報として利用できる可能性がある。モデルによる再現性が十分でない現象に関しては、その発生メカニズムや気候平均場との関係の理解を通して今後の気候モデルの改良にフィードバックさせていくことが、温暖化予測自体の将来的な収束につながっていくと考えられる。

## 2. 研究開発目的

地上気温の時間的空間的変動およびその季節予測に係わるエルニーニョ南方振動 (ENSO) ・夏冬モンスーン・北半球環状モード・雪氷などの短期気候変動の、20世紀再現実験における再現性を、観測データ・再解析データを用いて比較・評価することにより、その将来変化の不確実性・信頼性に関する知見を得る。

## 3. 研究開発方法

各モデルの20世紀再現実験データ・21世紀予測実験データを用いて、(1)地上気温、(2)ENSO・夏冬モンスーン・北半球環状モード、(3)積雪・海氷について、観測解析データとの比較やモデル間の相互比較を行い、各モデルの再現性を検討しまとめる。さらに、各モデルの将来予測実験結果の解析とその信頼性に対する評価を行う。

## 4. 結果及び考察

### (1) 地上気温変動の将来変化

14の全球モデルデータの各20年間分の日地上気温データを使用して、月平均地上気温の年々変動および日平均気温の月毎の日々変動の現在気候再現精度および将来変化を調べた。月平均地上気温の年々変動の将来の変化についてはモデル間の違いが大きいが、モデル平均では北半球高緯度の冬季に大きく年々変動が減少し、ヨーロッパやシベリアなどを中心とする北半球中緯度の夏季や低緯度陸上地域では年々変動の増加が見られた。モデルの現在気候での地上気温日々変動は再解析データと比べて過小評価しており、総観規模擾乱が弱いためと考えられる。将来の地上気

温日々変動の変化はモデル間の差は大きいですが、平均すると中緯度の夏季の陸上で増加、他の季節の陸上と1年を通しての海上では減少が見られた。夏季の増加には陸面の乾燥化が影響している。

## (2) 全球平均気温・帯状平均気温の再現性

20世紀再現実験(20C3M)から、全球平均気温、帯状平均気温について、再解析データと比較してその再現性を評価した。その結果、近年の上昇傾向や帯状平均気温はよく再現されていることが分かった。また、ENSOと全球気温とのラグ相関は多くのモデルで再現されている。

## (3) ヤマセ・オホーツク海高気圧の将来変化

18の全球大気海洋結合モデルの現在気候実験と将来気候実験データを用いて、5～8月のヤマセ頻度の将来変化を調べた。ヤマセ頻度を10日平均の地上風をもとに数えると、現在気候では、18モデル平均はヤマセ頻度の季節変化をある程度再現するが、その頻度は再解析データと比べて少なく、モデル間でばらつきが大きかった。将来気候では、多くのモデルはヤマセ頻度が5月に減少、8月に増加することを予測した。ウォーカー循環などの熱帯循環の弱화가8月のヤマセ増加に寄与している可能性がある。一方、6月、7月、5～8月合計のヤマセ頻度の変化傾向はモデル間で大きくばらついた。また、現在気候の再現性能の高い9モデルを選択して将来予測を試みた。8月のヤマセ頻度増加に加え、オホーツク海や東シベリアの平均海面気圧が6月に低下、7月に上昇する傾向が高い一致度で見られた。

## (4) 梅雨期降雨強度の将来変化

東アジアの夏季モンスーンの降水強度の将来変化を調べた。対象とした月は6月と7月であり、この期間は日本と韓国の主要な雨期に相当する。現在気候実験では、モデルによる降水量の気候値と単純降水強度指標(SDII)の再現性を、Taylor(2001)<sup>1)</sup>が提唱した精度Sを用いて定量的に評価した。降水量の気候値の再現性が高いモデルは、降水強度の再現性も高い傾向がある。将来気候実験では、全てのモデルによる単純なマルチ・モデル・アンサンブル(MME)平均によると、東アジアのほとんどの地域で降水強度が増える。Sを加重平均の重みとして導入しても、降水強度変化の地理分布に大きな違いはない。

## (5) アリューシャン低気圧と日本近海海面水位の将来変化

北太平洋西部の海面水位場の将来変化は、黒潮続流の強化と北上に関連する。黒潮続流が北上するモデルは強化が小さく、黒潮続流の北上(強化)はアリューシャン低気圧の北上(強化)と関係があった。北太平洋西部における海面水位の将来変化の不確実性は、東北太平洋東部の海面気圧変化のモデル間のばらつきが原因であった。さらに、このような海面気圧将来変化のモデル間の違いは、熱帯太平洋における海面水温上昇に対する大気の応答がモデルによって異なることが原因であると明らかとなった。

## (6) ENSOと熱帯太平洋表層貯熱量変動の将来変化

20世紀から21世紀へのENSOの周期と振幅の変化傾向は、モデルによって異なり、22モデルで平均すると、ENSOの周期と振幅に有意な変化がなかった。21世紀へのENSO振幅の変化は熱帯太平洋

における表層300m貯熱量の変化と関係（相関係数は-0.53）があり、期待される結果と一致する。

#### （7）エルニーニョに対する熱帯西太平洋の降水応答の再現性

20世紀再現実験において、赤道東太平洋エルニーニョ海域の海面水温変動に対する熱帯西太平洋の降水応答を数値的なスキルスコアを使って統計的に評価し、現実的な応答を再現しているモデルを選んでその特徴を調べた。高いスキルを示すモデルは、日付変更線東側の赤道中央太平洋において現実的な大きさの降水量変動を再現している。さらには、日付変更線の西側の赤道海域で現実に近い降水量気候値を再現していることが重要であるように見える。12-2月のNino3海面水温変動とこれに続く6-8月の熱帯西太平洋の降水量変動の間の統計的に有意な遅延関係については、数少ないモデルが高いスキルスコアを示し、熱帯太平洋北西部における海面水温偏差やインド洋における海面水温と降水量の偏差を現実的な大きさと再現しているのが共通した特徴である。

#### （8）熱帯太平洋海面水温変化と降水量将来変化予測の不確定性

熱帯太平洋海面水温の将来変化が地域の降水量の将来予測に与える影響について、北半球冬季と夏季に分けて統計的に調査した。現在気候のエルニーニョ海面水温変動に伴う降水量変動が、降水量の将来変化予測に関するCMIP3モデル間の不確定性として現れることがわかった。興味あることには、現在気候において冬季のエルニーニョ海面水温変動のあとの夏季に遅延して現れる降水量変動の特徴もまた、将来の冬季にエルニーニョ的・ラニーニャ的な海面水温変化を示すモデル間の夏季降水量変化の差異となって現れる。CMIP3モデルの解析によれば、冬季・夏季におけるエルニーニョ的な太平洋海面水温変化の将来予測値は、現在気候時の東太平洋赤道周辺における各季節のモデル降水量気候値と関係している。

#### （9）成層圏変動の再現性と将来変化

現在気候実験においてENSOシグナルは対流圏ではある程度再現されているように見えるが、成層圏ENSOシグナルは対流圏での微小な誤差が増幅されるので成層圏ENSOシグナルの再現は難しい。成層圏オゾンの経年変化を考慮したモデル平均のほうが、考慮しないモデル平均より、極域気温トレンドの季節変化、北半球亜熱帯ジェットトレンドを現実的に再現している。

温暖化時の北半球環状モード（NAM）およびその対流圏・成層圏結合の変化を調べた。帯状平均東西風の将来変化では、冬季の亜熱帯ジェットは背は高くなり、圏界面の上側で強化される。モデル平均では対流圏の変動シグナルが温暖化時にはより高く伸び、成層圏まで伸びるようになる。

#### （10）海洋メトリックによる海洋再現性評価と将来変化

海洋表層現在気候場の再現性についてのメトリックを作成し総合評価を試みた。表層水温の再現には海面フラックスの再現も重要であることがわかった。塩分の再現性については、降水や蒸発の再現性とは有意な相関がなく、海洋内部での移流拡散が重要であると示唆される。熱帯太平洋海洋気候場の再現性が良いモデルは、ENSOの再現性が良いことが明らかとなった。

一方で、海洋モデルの解像度が高いほど海洋気候場の再現性が高く、20の大気海洋結合モデルにおける海洋の第一傾圧変形半径を調べたところ、海洋モデルの水平解像度が高いほど観測データに基づく値を良く再現する傾向が見出された。将来変化について見ると、緯度15度から45度に



おいては、下層大気の昇温が大きい気候モデルほど第一傾圧変形半径の増加が大きくなる傾向があり、緯度45° から60° においては降水の増加が第一傾圧変形半径の増加に寄与することがわかった。長波長の傾圧ロスビー波の西進位相速度が第一傾圧変形半径の2乗に比例することを考えると、第一傾圧変形半径の増加は長期気候変動の卓越時間スケールが短くなる可能性を示唆する。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

CMIP3データを用いてヤマセ頻度の将来変化を調べた研究は本プロジェクトの研究が最初である。将来気候では多くのモデルはヤマセ頻度が8月に増加することを予測し「暑いだけじゃない地球温暖化」を示しており、地域ごとに丁寧な温暖化対策を検討する必要性を示している。学問的にも、ウォーカー循環などの熱帯循環の弱体化が8月のヤマセ増加に寄与している可能性を指摘するなど興味深い成果を上げている。温暖化時には地上気温日々変動が中緯度の夏季の陸上で増加する研究結果もこれを支持していて、本研究の成果を踏まえた今後の研究の展開が期待される。

熱帯太平洋海面水温の将来変化が地域の降水量の将来予測に与える影響が、過去に指摘されてきたような降水量の将来変化そのものでなく、降水量の将来変化の不確実性として現れることを指摘したことは学問的に新たな見解であり、降水量の将来予測精度向上に今後、貢献することが期待される。

### (2) 環境政策への貢献

CMIP3モデルを使用して東アジアの梅雨降水強度の将来変化を定量的に評価した研究は本プロジェクトの研究が最初である。東アジアのほとんどの地域で降水強度が増えることを示したマルチモデルの評価結果は、文科省革新プログラムの高分解能モデルの結果を定性的に支持しており、今後、信頼できる防災・環境対策に貢献すると思われる。

北太平洋西部の海面水位場の将来変化に関して、黒潮続流の北上（強化）がアリューシャン低気圧の北上（強化）と密接な関係があることを発見したが、不確実性の少ない日本域海面水位予測に貢献するよう、今後、詳細なモデル研究が期待される。

## 6. 国際共同研究等の状況

CMIP3（国際結合モデル比較プロジェクト）は、世界気候研究計画（WCRP）の結合モデル作業グループ（WGCM）により提案され、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）に参加する気候モデルデータの解析のチャンスを世界の科学者に提供するプロジェクトである。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

< 論文（査読あり） >

- 1) Kitoh, A. and T. Mukano (2009): Changes in daily and monthly surface air temperature variability by multi-model global warming experiments. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 513-524.

- 2) Ose, T. and O. Arakawa (2009): Characteristics of the CMIP3 models simulating realistic response of tropical western Pacific precipitation to Nino3 SST variability. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 807-819.
- 3) Sueyoshi, M. and T. Yasuda (2009): Reproducibility and future projection of the ocean first baroclinic Rossby radius based on the CMIP3 multi-model dataset. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 821-827.
- 4) Ose, T. and O. Arakawa (2011): Uncertainty of future precipitation change due to global warming associated with sea surface temperature change in the tropical Pacific. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 539-552.
- 5) Seiki, A, Y. N. Takayabu, T. Yasuda, N. Sato, C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka (2011): Westerly wind bursts and their relationship with ENSO in CMIP3 models. J. Geophys. Res., 116, D03303, doi:10.1029/2010JD015039.
- 6) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. J. Applied Meteorology and Climatology, 50, 1666-1675.
- 7) Kusunoki, S. and O. Arakawa (2011): Change in the precipitation intensity of the East Asian summer monsoon projected by CMIP3 models. Climate Dynamics, doi 10.1007/s00382-011-1234-7 (accepted).
- 8) Endo, H. (2012): Future changes of Yamase bringing unusually cold summers over northeastern Japan in CMIP3 multi-models. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 123-136.
- 9) Nisii, K., T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y. N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012): Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 87-100.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Yasuda, T., Y. Takaya, T. Nakaegawa, Y. Fujii, S. Matsumoto, G. Yamanaka, M. Kamachi and T. Ose : The new ENSO forecast system at Japan Meteorological Agency. WCRP Seasonal Prediction Workshop, Barcelona, Spain, June 2007.
- 2) 尾瀬智昭, 安田珠幾, 高谷祐平 : 夏季東アジアにおけるエルニーニョの影響の結合モデルによる再現性. 日本気象学会2007年度秋季大会, 札幌, 2007年10月.
- 3) 安田珠幾, 長谷川拓也 : 大気海洋結合モデル20世紀再現実験における熱帯太平洋表層貯熱量

- の変動特性. 日本気象学会2007年度秋季大会, 札幌, 2007年10月.
- 4) Yasuda, T. and T. Hasegawa: Interannual variability of upper ocean heat content in the tropical Pacific in 20th century simulations. 2nd Workshop on Climate Risk Assessment, Yokohama, Japan, February 2008.
  - 5) Yasuda, T. and T. Hasegawa: Interannual variability of upper ocean heat content in the tropical Pacific in 20th century simulations. 2008 Ocean Sciences Meeting, Orlando, USA, February 2008.
  - 6) Kusunoki, S., O. Arakawa, and A. Kitoh: Precipitation intensity of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 models. European Geosciences Union (EGU) General Assembly, Vienna, Austria, April 2008.
  - 7) 向野智彦, 鬼頭昭雄: WCRP CMIP3マルチモデルデータによる地上気温の年々変動と日々変動の将来変化. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 8) 楠昌司, 荒川理, 鬼頭昭雄: CMIP3大気海洋結合モデルによる梅雨期の降水強度の再現性. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 9) 尾瀬智昭, 末吉雅和: エルニーニョに伴う西太平洋降水変動のCMIP3モデルによる再現性. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 10) 安田珠幾, 長谷川拓也: WCRP CMIP3マルチモデルデータにおける熱帯太平洋表層貯蓄量変動とENSOの関係. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 11) 行本誠史, 柴田清孝: CMIP3モデルにおける北半球環状モード (NAM) の再現性. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 12) 遠藤洋和: ヤマセに関連した大規模循環場の将来変化について. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 13) 足立恭将, 水田亮, 行本誠史, 楠昌司: CMIP3マルチモデルサンサンプル平均を利用した将来の海面水温・海氷分布の推定. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
  - 14) Ose, T., T. Yasuda, and Y. Takaya: Coupled-model simulations of the tropical northwest Pacific precipitation related to ENSO and Asian Monsoon prediction. Fourth WMO International Workshop on Monsoons (IWM-IV), Beijing, China, October 2008.
  - 15) 安田珠幾, 長谷川拓也: WCRP CMIP3マルチモデルデータにおける21世紀後半の熱帯太平洋表層貯熱量変動. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 16) 末吉雅和, 安田珠幾: WCRP CMIP3マルチモデルデータによる温暖化時の海洋における変形半径. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 17) 足立恭将, 行本誠史, 末吉雅和: CMIP3結合モデルの20世紀後半の北極点付近の海氷厚. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 18) Yasuda, T. and T. Hasegawa: CMIP3 multi-model comparison on the interannual variability of the upper ocean heat content in the tropical Pacific. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2008.
  - 19) Shibata, K. and M. Deushi: ENSO signals in the middle atmosphere of a multi-model ensemble for twentieth-century simulation to year 2000. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2008.

- 20) Sueyoshi, M., T. Yasuda, and T. Ose : First baroclinic Rossby radius in CMIP3 models. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Yokohama, Japan, February 2009.
- 21) Yasuda, T. : Basin-scale interdecadal variability in the North Pacific and its future change. International workshop on the North Pacific Ocean observation strategy for carbon cycle and climate change, Tokyo, Japan, March 2009.
- 22) Kusunoki, S. and O. Arakawa: Future change in precipitation intensity of Baiu rain band simulated by CMIP3 models. 11th Pacific Science Inter-Congress, Tahiti, French Polynesia, March 2009.
- 23) 遠藤洋和: CMIP3マルチモデルにおける熱帯対流圏上層の定在波とウォーカー循環の強さの関係. 日本気象学会2009年度春季大会, つくば, 2009年5月.
- 24) Yasuda, T. and T. Hasegawa: CMIP3 multi-model comparison on the interannual variability of the upper ocean heat content in the tropical Pacific. IAMAS-IAPSO-IACS 2009 Joint Assembly (MOCA-09), Montreal, Canada, July 2009.
- 25) 末吉雅和, 安田珠幾: CMIP3 マルチモデルデータによる第一傾圧変形半径とRossby波位相速度. 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月.
- 26) 遠藤洋和: CMIP3マルチモデルにおけるヤマセの季節性の再現性と将来変化. 第7回「異常気象と長期変動」研究集会, 宇治, 2009年10月.
- 27) 尾瀬智昭, 荒川理: 赤道東太平洋域の海面水温の変動に対して現実的な熱帯西太平洋の降水応答を示すCMIP3モデルの特徴. 第7回「異常気象と長期変動」研究集会, 宇治, 2009年10月.
- 28) 石原幸司: CMIP3マルチ気候モデルにおける全球平均および帯状平均気温の再現性評価. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 29) 遠藤洋和: CMIP3マルチモデルにおけるヤマセの季節性の再現性と将来変化. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 30) 尾瀬智昭, 荒川理: CMIP3モデルの西太平洋降水変動再現性と温暖化予測. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 31) 柴田清孝: CMIP3モデルによる20世紀ランにおける成層圏ENSOシグナル. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 32) 末吉雅和, 安田珠幾: CMIP3 マルチモデルデータによる海洋Rossby波位相速度の将来変化. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 33) 安田珠幾: 熱帯太平洋における海洋平均構造とENSO特性の将来変化. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 34) Shibata, K. : Relation between middle atmosphere response and troposphere response to ENSO for a multi-model ensemble for twentieth-century simulation to year 2000. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2009.
- 35) Kusunoki, S. : Future change in precipitation intensity of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 models. WCRP CLIVAR meeting on predicting the climate of the coming decades. Miami, USA, January 2010.
- 36) Endo, H. : Future changes of cool northeasterly winds bringing unusual Northwest Pacific

- summer in CMIP3 multi-model experiments. 22th Conference on Climate Variability and Change, Atlanta, USA, January 2010.
- 37) Sueyoshi, M. and T. Yasuda: Rossby wave phase speed based on the CMIP3 multi-model dataset. 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, February 2010.
  - 38) Yasuda, T. and M. Sueyoshi: Assessment of the upper ocean climatology in CMIP3 climate models. 2010 Ocean Sciences Meeting, Portland, USA, February 2010.
  - 39) 末吉雅和, 安田珠幾: CMIP3 マルチモデルデータによるアリューシャン低気圧の再現性と将来変化. 2010年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月.
  - 40) 安田珠幾, 末吉雅和: WCRP CMIP3マルチモデルにおける海洋表層平均構造の再現性評価. 2010年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2010年3月.
  - 41) 尾瀬智昭, 荒川理: 夏季におけるENSO-降水量相関とCMIP3モデルの温暖化予測: 日本気象学会2010年度春季大会, 東京, 2010年5月.
  - 42) Yasuda, T.: Interdecadal variability and rising trend of sea level along the Japanese coast. IPCC Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities, Kuala Lumpur, Malaysia, June 2010.
  - 43) 遠藤洋和: CMIP3マルチモデルにおけるヤマセに関連した大規模循環場の再現性と将来変化. 第1回ヤマセ研究集会, 仙台, 2010年9月
  - 44) 末吉雅和, 安田珠幾: 地球温暖化に伴う日本付近の海面高度の将来変化. 日本海洋学会2010年度秋季大会, 網走, 2010年9月.
  - 45) 安田珠幾, 末吉雅和, 辻野博之, 平原幹俊, 中野英之, 山中吾郎: MRI-ESM1用海洋単体モデルによる現在気候再現実験(2): 日本沿岸水位の数十年規模変動. 日本海洋学会2010年度秋季大会, 網走, 2010年9月.
  - 46) 遠藤洋和: CMIP3マルチモデルにおけるヤマセに関連した大規模循環場の再現性と将来変化(その2). 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 47) 尾瀬智昭, 荒川理: 温暖化時降水量変化予測の不確定性と海面水温変化分布. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 48) 小林ちあき, 柴田清孝: マルチ気候モデル実験における北半球夏のジェットと成層圏オゾンとの関係. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 49) 清木亜矢子, 高藪縁, 安田珠幾, 佐藤尚毅, 高橋千陽, 米山邦夫, 城岡竜一: CMIP3マルチモデルにおける西風バーストとENSOの再現性とその将来変化. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 50) 末吉雅和, 安田珠幾: マルチモデルデータによる日本付近の海面高度の将来変化. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 51) 安田珠幾, 末吉雅和: 日本沿岸平均水位変動と上昇トレンドーCMIP3マルチモデルデータの再現性と将来予測一. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 52) Shibata, K.: Middle atmosphere responses in the southern hemisphere to ENSO for a multi-model ensemble for twentieth-century simulation to year 2000. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
  - 53) Yasuda, T. and M. Sueyoshi: Interdecadal variability and rising trend of sea level along

- the Japanese coast. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2010.
- 54) Ose, T. and O. Arakawa: Characteristics of the CMIP3 models simulating realistic response of tropical western Pacific precipitation to Nino3 SST variability. 23rd AMS Conference on Climate Variability and Change, Seattle, USA, January 2011. “
- 55) Kusunoki, S. : Future changes in the East Asian summer monsoon projected by CMIP3 models, MRI-AM20km and MRI-AM60km. 3rd International Workshop on Global Change Projection: Modeling and Impact Assessment, Tsukuba, Japan, March 2011.
- 56) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: CMIP3 マルチモデルデータにおける北太平洋指数. 日本海洋学会2011年度春季大会, 柏, 2011年3月.
- 57) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: CMIP3 マルチモデルデータによるアリューシャン低気圧の再現性と将来変化の関係. 日本気象学会2011年度春季大会, 東京, 2011年5月.
- 58) 末吉雅和, 安田珠幾: 気候モデルにおけるRossby 波の伝播速度. 2011年度日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011年9月.
- 59) Ose, T. and O. Arakawa: Uncertainty of future precipitation change associated with model climatology and future sea surface temperature change. World Delta Summit, Jakarta, Indonesia, October 2011.
- 60) 末吉雅和, 安田珠幾: 地球温暖化に伴う日本付近の海面高度と海面気圧の将来変化. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 61) Ose, T. and O. Arakawa: Uncertainty of future precipitation change associated with model climatology and future sea surface temperature change. American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, San Francisco, USA, December 2011.
- 62) Sueyoshi, M. and T. Yasuda : Sea surface height changes east of Japan in 21st century climate projections -- Sea level changes in the western North Pacific --. 2012 Ocean Sciences Meeting, Salt Lake City, USA, February 2012.
- 63) Ose, T., and O. Arakawa: Uncertainty of future precipitation change associated with model climatology and future sea surface temperature change. WCRP Workshop on CMIP5 Climate Model Analysis, Honolulu, USA, March 2012.
- 64) Yasuda, T., and M. Sueyoshi: Inter-model uncertainty of regional pattern of sea level rise in the western North Pacific. WCRP Workshop on CMIP5 Climate Model Analysis, Honolulu, USA, March 2012.
- 65) Ose, T. : Some topics from the CMIP3 A1B-Scenario Projection Analysis by the MRI team. International Workshop on Climate Change Projection and High Performance Computing, Maui, USA, March 2012.
- 66) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: 地球温暖化に伴う日本付近の海面高度と海面気圧の将来変化. 2012年度日本海洋学会春季大会, つくば, 2012年3月.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

**(4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）**

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) Taylor, K.E. (2001): J. Geophys. Res., 106, 7183-7192.

## S-5 地球温暖化に関わる政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (4) 中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化に関する研究

北海道大学大学院

地球環境科学研究院 地球圏科学部門大気海洋物理学分野

谷本陽一

<研究協力者>

大学共同利用機関法人人間文化研究機構 総合地球環境学研究所

大島和裕

北海道大学大学院 環境科学院地球圏科学専攻

岡田靖子

平成19～23年度累計予算額：48,112千円

(うち、平成23年度予算額：9,408千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 北太平洋における中緯度大気海洋系10年スケール変動の再現性とその将来変化を明らかにするため、第3次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP3) マルチ気候モデルによる20世紀再現実験と中程度の温室効果ガス排出シナリオ (A1B) に基づく温暖化実験を用いて解析を行った。北太平洋において主要な海面水温 (SST) の長期自然変動である太平洋10年スケール変動 (PDO) について、PDOの空間構造に基づくメトリックを算出して再現性を評価した。24のCMIP3モデルのうちPDOメトリックの高いモデルは、中部北太平洋域と中東部熱帯太平洋域でのSST10年スケール変動に見られる熱帯-中高緯度結合の特徴をよく再現し、熱帯太平洋域のSSTの10年スケール変動 (decadal-ENSO) に伴う大気応答は熱帯太平洋域、北太平洋域共に観測される特徴と一致していた。一方、PDOメトリックの低いモデルはこれらの特徴と一致しなかった。これらの結果から、気候モデルにおける現実的なPDOパターンの再現には、熱帯-中高緯度間結合の再現が1つの鍵であると言える。温暖化した21世紀のPDOは、現在観測されている時空間特性から大きく変化せず、温暖化に伴うSST上昇トレンドに重なった長期変動として現れることが示唆された。北太平洋域の21世紀100年間の海面気圧 (SLP) トレンドは、いくつかのモデルがアリューシャン低気圧 (AL) の強化を予測し、他のいくつかのモデルがALの北上を予測する。このようにALの応答がモデル間で大きく異なるため、SLPトレンドの予測は北太平洋域で高い不確実性を持つ。この21世紀100年間のSLPトレンドの不確実性には、温室効果ガス増加に対する応答がモデル毎に異なることに起因するモデル不確実性と、モデル内部で自立的に生じる大気海洋系の内部変動の両者が寄与し、21世紀前半50年間のSLPトレンドの不確実性には内部変動が大きく寄与することがわかった。さらに、モデル毎のALの応答の違いと関連した海面熱フラックスと北太平洋亜熱帯循環系の変化は、SSTトレンドの地域分布に影響を与えることが明らかになった。

**【キーワード】** 北太平洋、長期自然変動、大気・海洋平均場、不確実性、CMIP3マルチ気候モデル



## 1. はじめに

気候モデルにおける長期自然変動の再現性の評価と将来変化の解析は、人為起源変化と自然変動を識別し、地球温暖化に伴う気候変化を検出するために重要である。北太平洋の海面水温（SST）場にみられる主要な長期自然変動である太平洋10年スケール変動（Pacific Decadal Oscillation, PDO）は、東アジアの気候変動にとって重要な役割を担う自然変動現象の1つであり、環太平洋域の気温や降水量、海洋生態系の変動と関係していることが報告されている（Mantua and Hare, 2002<sup>4</sup>）など）。CMIP3マルチ気候モデルによる20世紀再現実験（20C3Mシミュレーション）を用いてPDOの再現性を議論したOverland and Wang(2007)<sup>5</sup>は、PDOに伴うSST偏差の空間構造と振幅に基づいて再現性を調べたが、再現性の違いの要因については述べていない。PDOのメカニズムの全貌は未解明であるものの、これまでいくつかの仮説が挙げられている。その有力な1つとして、エルニーニョ・南方振動（El Niño Southern Oscillation, ENSO）の長期変動（decadal-ENSO）に励起される大気の大規模作用による影響が指摘されている（Alexander et al. 2002<sup>1</sup>）など）。このテレコネクションを介して、中部北太平洋域と中東部熱帯太平洋域のSST変動は負相関の関係を示す（図(4)-1a、以下では、このSST変動の関係を熱帯-中高緯度間結合とする）。

21世紀の将来気候を解明する上で、PDOのような長期自然変動だけでなく、地球温暖化に伴う大気・海洋の平均場の変化が地域・海域的にどのように異なるかを明らかにすることも重要である。これらの地域的变化は、PDOの場合と同様に、東アジアを含む環太平洋域の気候変化のみならず、同海域の海洋生態系の将来変化にも影響すると考えられる。北太平洋域の海面気圧（SLP）の将来変化を調べた先行研究（Hori and Ueda, 2006<sup>3</sup>）などはマルチモデルアンサンブル平均場でアリューシャン低気圧（AL）が北上する結果を示したが、Yamaguchi and Noda(2006)<sup>8</sup>は北太平洋域のSLP変化の地域分布はモデル毎に様々であると指摘している。この結果は、北太平洋域のSLPの将来予測にある程度の不確実性があることを示唆する。これらのSLP変化の不確実性の要因として、温室効果ガス増加に対する応答がモデル毎に異なることに起因するモデル不確実性と、モデル内部で自発的に生じる大気海洋系の内部変動による不確実性の2つの要因が挙げられる（Deser et al. 2011<sup>2</sup>）など）。

観測データに基づく先行研究から、SLP変化の地域分布の違いは大気海洋相互作用を通してSST変化の地域分布と密接に関わっていると考えられる。上述のように、温暖化した21世紀の北太平洋域のSSTの長期自然変動に関しては、最近のいくつかの先行研究（Overland and Wang, 2007<sup>5</sup>）など）があるが、SSTの平均場の将来変化に関しては、熱帯太平洋域を対象とした研究が多く（Xie et al. 2010<sup>7</sup>）など）、北太平洋を対象とした研究はあまり行われていない。

## 2. 研究開発目的

本サブテーマでは、CMIP3マルチ気候モデルにおける（1）PDOの再現性とその将来変化について、（2）北太平洋域における大気・海洋の平均場の地域・海域的な将来変化とその不確実性の要因について、明らかにすることを目的とする。

（1）20C3MシミュレーションにおけるPDOの再現性をメトリックとして定量化して評価し、CMIP3マルチ気候モデルでの熱帯-中高緯度間結合およびdecadal-ENSOに伴う大気応答を調べることで、モデル間の再現性の違いについて検討した。20C3Mシミュレーションと同じ解析手法を用いて、中程度の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）温室効果ガス排出シナリオ（A1B）に基づく温暖化実

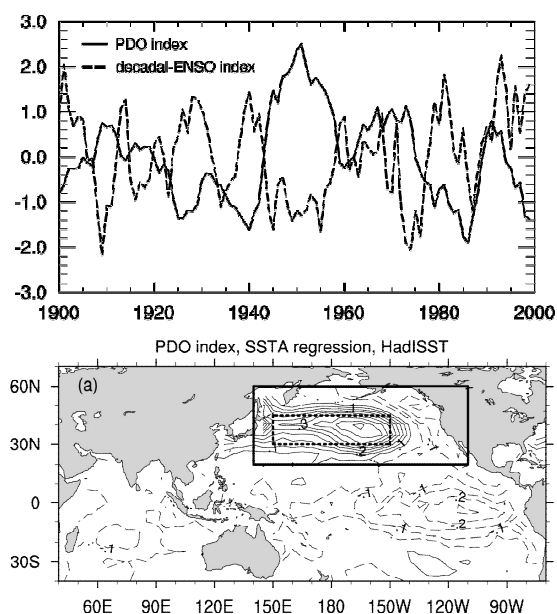
験（A1Bシミュレーション）の結果を解析することで、温暖化した21世紀のPDOの振る舞いを調べた。

（2）A1Bシミュレーションを用いて北太平洋域における21世紀100年間のSLPトレンドの地域分布を調べ、その不確実性について検討した。この不確実性の要因を評価するため、24のCMIP3モデルのうち3つ以上のアンサンブルメンバーを持つ10のモデルによるA1Bシミュレーションと産業革命前の条件で行われたコントロール実験（PICTLシミュレーション）を解析した。さらに、北太平洋のSLPトレンドとSSTトレンドとの地域分布の関係を大気海洋相互作用の視点から調べた。

### 3. 研究開発方法

本研究の解析は、24のCMIP3気候モデルによる20C3MシミュレーションとA1Bシミュレーションの月平均データから北半球冬季（12-1月）平均を計算したデータを用いて行った。各シナリオ実験の解析期間は20世紀（1900～1999）と21世紀（2000～2099）の各100年間とした。また、簡略化のために、以下では24のCMIP3気候モデルをA-Xと示した。

PDOの解析では、20C3Mシミュレーションを用いて、モデルの各格子点における冬季平均SST偏差から線形トレンドを除去し、さらに10年スケールの変動を取り出すために5年の移動平均を施した。またPDO indexとdecadal-ENSO indexは中部北太平洋域と熱帯太平洋域の各領域で平均したSST偏差の時系列として定義した（図(4)-1a）。PDOの再現性の評価はTaylor (2001)<sup>6)</sup>に基づき、PDOに伴うSST偏差の空間構造が観測（図(4)-1b）とモデルとの間でどの程度一致するかを評価指標として、PDOパターンの空間相関とその標準偏差から計算されるPDOメトリックを算出した（Taylor 2001)<sup>6)</sup>。



図(4)-1 (a) PDO index (実線)、decadal-ENSO index (破線) の20世紀100年間（1900～1999）の時系列。2つのindexはそれぞれ中部北太平洋域と熱帯太平洋域のSSTの10年スケール変動を示す。2つのindexの相関係数は-0.53で99%の信頼限界で有意である。(b) PDO indexに対するSST偏差の回帰係数分布（PDOパターン）。実線と破線は、正と負の値を示す。点線の四角（北緯30-45度、東経150度-西経150度）は、PDO indexを計算した海域、実線の四角（北緯20-60度、東経140度-西経110度）はPDOメトリックを計算した領域。

トレンドの解析では、A1Bシミュレーションの冬季平均データから21世紀100年間の線形トレンドを計算した。24のCMIP3モデルを用いてSLPトレンドの全モデル平均とその分散を求め、マルチモデルアンサンブル平均とモデル間のばらつき度とした。トレンドの不確実性をもたらす要因を評価するため、3つ以上アンサンブルメンバーをもつ10のCMIP3モデルによるA1Bシミュレーションを用いた次の2つのグループ、(I) 単一のアンサンブルメンバーを取り出したグループ、(II) 3

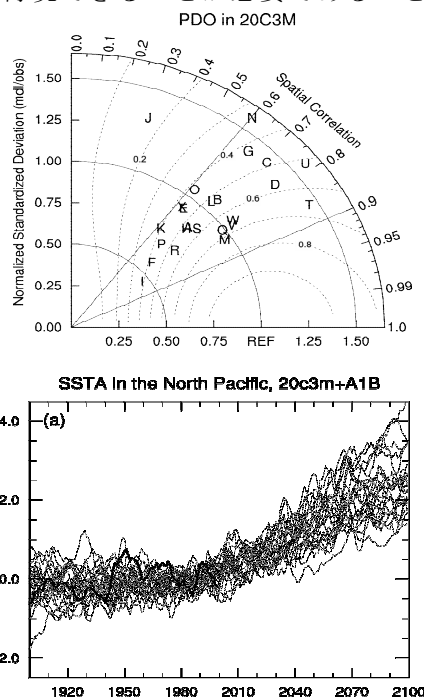
つのアンサンブルメンバーの平均を求めたグループを定め、これらのグループのモデル間のばらつき度を比較した。さらに、各モデルのバックグラウンドとして見られる内部変動を評価するため、PICTLシミュレーションのモデル間のばらつき度についても調べた。また、AL強化を予測する4つのモデルとAL北上を予測する4つのモデルを選びコンポジット解析を行い、AL変化に伴う海洋の将来変化を調べた。

## 4. 結果及び考察

### (1) 太平洋10年スケール変動 (PDO) の再現性とその将来変化

#### 1) PDOの現在気候再現性

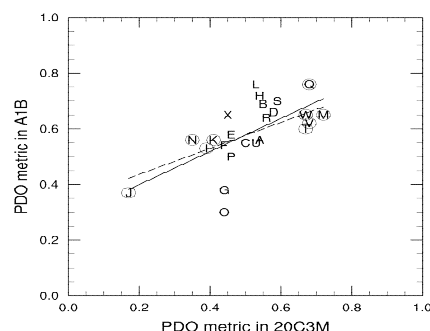
PDOの再現性を評価するため、PDO index に対する SST 偏差の回帰係数分布 (PDO パターン) の特徴を各モデルと観測 (図(4)-2) とで比較した。観測とモデルの PDO パターンに対する空間相関係数は多くのモデルで有意な高い相関係数となる。一方、標準偏差の比はモデルによるばらつきが大きい。PDO メトリックの高いモデルと低いモデルを選び比較すると、PDO メトリックの高いモデルは、中部北太平洋域と中東部熱帯太平洋域での SST10 年スケール変動に見られる熱帯- 中高緯度間結合の特徴 (図(4)-1a, b) を良く再現し、また decadal-ENSO に伴う SST、外向き長波放射 (OLR)、SLP 偏差に関しても観測と同じ特徴をもっていた。それに対して、PDO メトリックが低いモデルは、これらの特徴をうまく再現できていなかった。したがって、CMIP3 気候モデルにおける PDO の現実的な再現には、decadal-ENSO に伴う SST 変動とそれによって励起される大気のテレコネクションパターンが現実的に再現され、その結果として観測と同様の熱帯- 中高緯度間結合が再現できることが必要であることがわかった。



図(4)-3 中部北太平洋域 (図(4)-1a)の点線四角)で平均したSST偏差の時系列。太線は観測の20世紀100年間の時系列、細線は24のCMIP3モデルの20C3MシミュレーションとA1Bシミュレーションをつなげた時系列を示す。

図(4)-2 PDOの再現性に関する

Taylor diagram。角度方向にモデルと観測のPDOパターンの空間相関係数、半径方向にその標準偏差の比を示す。点線の等値線はPDOメトリックの値を示す。REFは観測と一致する点である。24のCMIP3モデルはA-Xと示した。



図(4)-4 20C3MシミュレーションのPDOメトリックとA1BシミュレーションのPDOメトリックとの散布図。実線は24のCMIP3モデル (相関係数は0.64)、破線は9つのモデル (丸付、相関係数は0.87)による回帰直線を示す。

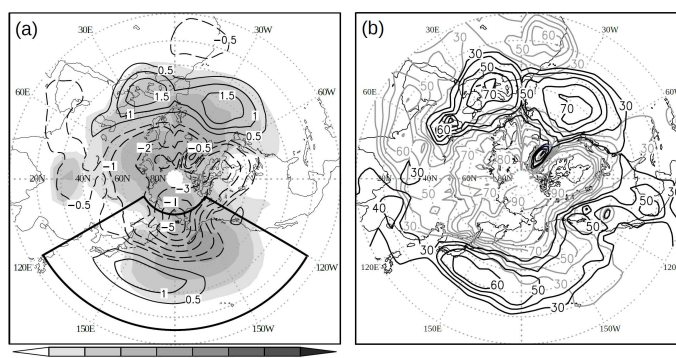
## 2) PDOの将来変化

24のCMIP気候モデルによる21世紀の中部北太平洋域のSST変動には、顕著な温暖化トレンドが現れ、これ加えて10年スケールの変動が20C3Mシミュレーションと同程度の振幅で見られた（図(4)-3）。この21世紀のSST10年スケール変動がもつ特徴を調べると、20C3MシミュレーションにおいてPDOメトリックの高いモデルは、21世紀のA1Bシミュレーションにおいても同じPDOパターンを示す傾向にあった（図(4)-4）。またこれらのモデルは、20C3Mシミュレーションと同様にA1Bシミュレーションにおいても観測と同じdecadal-ENSOに伴うSST、SLP、OLR偏差の特徴を示すのに対し、PDOメトリックの低いモデルでは観測で見られる特徴と一致しなかった。したがって、温暖化した21世紀のPDOの時空間特性は、現在観測されるPDOの特徴と変わらず、温暖化に伴うSST上昇トレンドに重なった長期変動として現れることが示唆される。

## (2) 冬季北太平洋における大気循環変化の不確実性と海洋の将来変化

### 1) 北太平洋域のSLPトレンドの地域分布とその不確実性

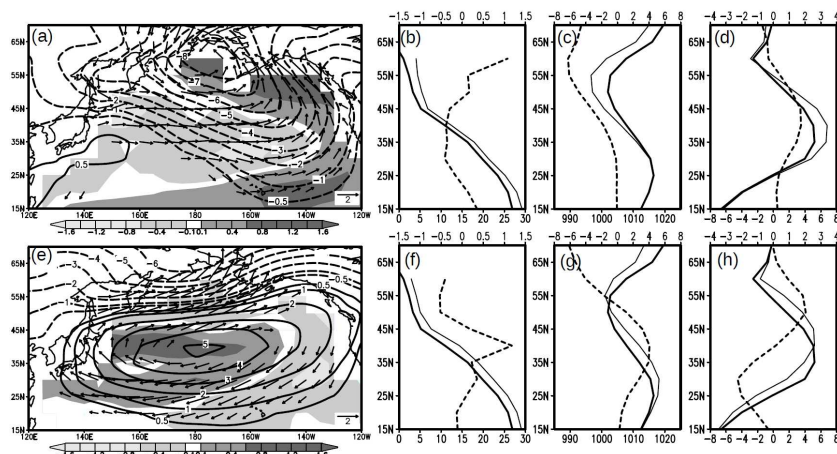
24のCMIP3モデルによる21世紀100年間のA1Bシミュレーションから算出したSLPトレンドのマルチモデルアンサンブル平均はベーリング海で負の極小、日本の東側から中部北太平洋にかけて正の値を示し、先行研究と同様にALの北上を示す（図(4)-5aの等値線）。北太平洋域のモデル間のばらつき度は、北東部で最大値を示し、その大きさはマルチモデルアンサンブル平均と同程度の大きさであり（図(4)-5aの陰影）、モデル毎の地域分布の違いは無視できない。同領域では30-40%のモデルが正のトレンド、他の30-40%のモデルが負のトレンドを予測する（図(4)-5b）。すなわち、北太平洋の北東部における大きなモデル間のばらつき度はSLPトレンドの符号の違いに起因する。よって、マルチモデルアンサンブル平均でみられたALの北上は必ずしも全てのモデルでの予測とは一致しない。それぞれのモデルのSLPトレンドの地域分布は様々であり、いくつかのモデルではALの強化を予測し、他のいくつかのモデルではALの北上を予測する。このようにALの応答はモデル間で大きく異なり、北太平洋域のSLPトレンドのモデル間のばらつき度は北半球で最大となる。



図(4)-5 (a) 24のCMIP3気候モデルによる21世紀100年間のSLPトレンドのマルチモデルアンサンブル平均（等値線；hPa/100yr）とモデル間のばらつき度（陰影；(hPa/100yr)<sup>2</sup>）。(b) SLPトレンドの符号一致率（%）。黒（灰色）の等値線は、各グリッドで正のトレンドを示すモデル数の24モデルに対する割合を示す。

3つのアンサンブルメンバーをもつ10モデルのA1Bシミュレーションに対する解析では、北太平

洋域の21世紀100年間のSLPトレンドの不確実性に、モデル内部で生じる自然変動より、むしろモデル不確実性が大きく寄与していることが示唆された（図表は省略）。しかし、PICTLシミュレーションによって各モデルのバックグラウンドの内部変動を再評価した結果、A1Bシミュレーションによる内部変動の見積もりはアンサンブル数が十分でないために過小評価であることがわかった。この結果、北太平洋域の21世紀100年間のSLPトレンドの不確実性には内部変動とモデル不確実性の両者が寄与し、21世紀前半50年間の不確実性には内部変動が大きく寄与することがわかった。



図(4)-6 A1Bシミュレーションで (a-d) 強い負のNPIトレンドの4つのモデルと (e-h) 強い正のNPIトレンドの4つのモデルのコンポジット。(a, e) SST (陰影;  $^{\circ}\text{C}/100\text{yr}$ )、SLP (等値線;  $\text{hPa}/100\text{yr}$ ) および海上風 (ベクトル;  $\text{m s}^{-1}/100\text{yr}$ ) トレンドの水平分布、および北太平洋域(東経140度-西経160度)で東西平均した (b, f) SST、(c, g) SLP、(d, h) 西風 ( $\text{ms}^{-1}/100\text{yr}$ ) トレンドの緯度分布。SSTトレンドは北太平洋域の領域平均を除去し、相対的な昇温の大きさを示す。(b-d, f-h) 緯度分布の破線(上の目盛)は各変数のトレンド、太い(細い)実線(下の目盛)は現在気候(将来気候)の気候値を示す。

## 2) アリューシャン低気圧 (AL) の変化に伴う海洋変化

ALの将来変化に伴う海洋表層の変化について調査した。AL強化を予測するモデルでは、偏西風の強化に伴って上向き海面熱フラックスが増加し、日本東岸から北太平洋中央部にかけての北太平洋中緯度において水温上昇が相対的に小さく予測される(図(4)-7a-d)。一方、AL北上を予測するモデルでは、偏西風の緯度帯の北上に伴い、北太平洋の亜熱帯循環系が北上し、海洋の循環境界付近の緯度帯で表層水温が上昇するため、北太平洋中緯度における水温上昇は周辺海域と比べて相対的に大きくなる(図(4)-7a-d)。したがって、モデル毎のアリューシャン低気圧の応答の違いと関連した海面熱フラックスと北太平洋亜熱帯循環系の変化は、海面水温トレンドの海域分布に影響を与えることが明らかになった。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本サブテーマでは、人為起源変化と長期自然変動の識別および近未来予測にとって重要な大気海洋系10年スケール変動について北太平洋域を対象として、CMIP3マルチ気候モデルにおける太平洋10年スケール変動(PDO)の再現性を評価し、PDOの現実的な再現にとって熱帯-中高緯度間結

合の再現が1つの鍵であることを明らかにした。また、温暖化しても21世紀のPDOの時空間特性は変わらないことが示唆された。さらに21世紀の将来気候を解明するためには、温暖化に伴う大気・海洋の平均場の将来変化についての地域・海域分布の違いを調べるのが重要であるが、これまで北太平洋域を対象とした詳細な解析はほとんど行われてこなかった。そこで、CMIP3マルチ気候モデルによるA1BシミュレーションとPICTLシミュレーションの結果を解析し、SLPトレンドの地域差を調べた結果、北太平洋ではアリューシャン低気圧の将来予測がモデル間で大きく異なり、SLPトレンドの不確実性が高いことが明らかになった。さらに21世紀100年間のSLPトレンドの不確実性にはモデル不確実性と内部変動の両者が寄与している結果を得た。これらの解析結果は、北太平洋域の将来変化に関する温暖化予測実験の結果を解釈する上で重要な情報である。

## (2) 環境政策への貢献

本サブテーマでは、マルチモデルの立場からPDOの再現性を調べることで長期自然変動予測に不可欠なモデル特性を提示してきた。PDOは北太平洋域における主要な大気海洋相互作用現象であり、大気と海洋の総合的な再現性評価の情報である。また、北太平洋におけるSLPトレンドの不確実性評価に関する結果は、内部変動が関わる近未来予測にとって有益な情報提供となる。IPCC 第5次評価報告書(AR5)作業部会(working group) Iでは、30年程度の近未来予測を1つのターゲットにしている。今回我々が解析した北太平洋10年スケール変動のメカニズム解明は、30年程度の近未来予測の精度向上に貢献することが期待される。このような大気海洋結合系の長期変動は、様々な種類の魚の漁場の変化などにも大きく影響し、産業環境への政策的連携のために重要な情報となる。

## 6. 国際共同研究等の状況

IPCC AR5の本報告の4. (2)に関する研究は、温暖化研究の第一人者でありAR5の責任著者をつとめておられるXie教授(アメリカ合衆国ハワイ大学国際太平洋研究センター)と共同で実施した。本研究成果を、Xie教授との共著論文(査読あり; リストの8)として公表し、さらに、同論文をIPCC第5次報告書(AR5)第14章(Climatic Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change)への成果論文として提案した。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

<論文(査読あり)>

- 1) Oshima, K. and Y. Tanimoto (2009): An evaluation of reproducibility of the Pacific Decadal Oscillation in the CMIP3 simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 4, 755-770. doi:10.2151/jmsj.87.755.
- 2) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕 (2009) : 温暖化に伴う海面水温上昇が日本近海の蔵相サンゴの分布と健全とに及ぼす影響評価. *日本サンゴ礁学会誌*, 11, 131 - 140.
- 3) Tanimoto, Y., T. Kajitani, H. Okajima, and S.-P. Xie (2010): A peculiar feature of the seasonal migration of the South American rain band. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79-90.

doi:10.2151/jmsj.2010-106.

- 4) Tanimoto, Y., T. Kanenari, H. Tokinaga, and S.-P. Xie (2011): Sea level pressure minimum along the Kuroshio and its extension. *J. Climate*, 24, 4419-4434.  
doi:10.1175/2011JCLI4062.1.
- 5) Yokoi, S., Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1666-1675.
- 6) Nishii, K., T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y. N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012): Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 87-100.
- 7) Oshima, K., Y. Tanimoto and S.-P. Xie (2012): Regional patterns of wintertime SLP change over the North Pacific and their uncertainty in CMIP3 multi-model projections. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 385-396.
- 8) Yara, Y., K. Oshima, M. Fujii, H. Yamano, Y. Yamanaka, and N. Okada (2012): Projection and uncertainty of the poleward range expansion of coral habitats in response to sea surface temperature warming: A multiple climate model study. *Galaxea*, in press.
- 9)

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) Oshima, K. and Y. Tanimoto: Pacific Decadal Oscillation in IPCC AR4 20th century climate simulations. EGU General Assembly 2008, Vienna, Austria, April 2008.
- 2) 大島和裕, 谷本陽一: CMIP3における北太平洋10年規模変動の再現性. 日本気象学会2008年春季大会, 横浜, 2008年5月.
- 3) 大島和裕, 谷本陽一: CMIP3気候モデルにおける北太平洋10年規模変動の再現性と将来予測. CMIP3マルチ気候モデル比較に関する研究会, 仙台, 2008年11月.
- 4) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕: 地球温暖化に伴う水温上昇が南西諸島近海のサンゴに及ぼす影響評価. 日本サンゴ礁学会第11回大会, 静岡, 2008年11月.
- 5) 大島和裕, 谷本陽一: CMIP3気候モデルにおける北太平洋10年規模変動の再現性と将来予測. 日本気象学会2008年秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 6) Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, and K. Oshima: Projected effects

- of global warming on coral reefs in seas close to Japan. Japan-France Workshop on Responses of Marine Ecosystems to Ocean Acidification and Changes in Environmental Conditions, Tokyo, December 2008.
- 7) Oshima, K. and Y. Tanimoto: An Evaluation in Reproducibility of Pacific Decadal Oscillation on the Simulations of CMIP3 Model. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, 横浜, 2009年2月.
  - 8) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕: 地球温暖化に伴う水温上昇がサンゴ分布に及ぼす影響評価. 2009年度日本海洋学会春季大会, 東京, 2009年4月.
  - 9) 大島和裕, 谷本陽一: CMIP3気候モデルにおける北太平洋10年規模変動の将来予測. 日本気象学会2009年春季大会, つくば, 2009年5月.
  - 10) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕: 地球温暖化に伴う水温上昇がサンゴ分布に及ぼす影響評価. 日本地球惑星科学連合2009年大会, 千葉, 2009年5月.
  - 11) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕: 地球温暖化に伴う水温上昇がサンゴ分布の北限に及ぼす影響評価とその不確実性. 2009年度日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月.
  - 12) Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, and K. Oshima: Projected effects of global warming on coral reefs in seas close to Japan, PICES 18th Annual Meeting, Korea, October 2009.
  - 13) 谷本陽一, 梶谷卓志, 岡島秀樹, 大島和裕, 謝尚平: 大西洋赤道冷水舌が南アメリカ降水帯に与える影響: 気候モデルにおける再現性. 日本気象学会2009年度秋季大会, 福岡, 2009年11月.
  - 14) 屋良由美子, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉, 大島和裕: 地球温暖化に伴う水温上昇がサンゴ分布の北限に及ぼす影響評価とその不確実性. 日本サンゴ礁学会第12回大会, 沖縄, 2009年11月.
  - 15) Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, and K. Oshima: Projected effects of global warming on corals in seas close to Japan. 2010 Ocean Science Meeting, Oregon, February 2010.
  - 16) Oshima, K. and Y. Tanimoto: Coherent spatial patterns of the decadal variation and warming trend in the North Pacific SST field in the CMIP3 simulations. 2nd International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 3rd International Workshop on KAKUSHIN Program, つくば, 2010年2月.
  - 17) Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, and K. Oshima: Projected effects of global warming on corals in seas close to Japan. International Symposium on Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses and Evaluating Management Strategies, 仙台, 2010年4月.
  - 18) 大島和裕, 谷本陽一: 北太平洋の水温場に見られる10年規模変動と温暖化トレンド: CMIP3マルチ気候モデルによる結果の解析. 日本気象学会2010年春季大会, 東京, 2010年5月.
  - 19) 屋良由美子, 大島和裕, 藤井賢彦, 山中康裕, 岡田直資, 山野博哉: 地球温暖化に伴う海水



- 温上昇がサンゴ分布の北限に及ぼす影響評価とその不確実性. 日本地球惑星科学連合2010年大会, つくば, 2010年5月.
- 20) Yara, Y., K. Oshima, M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, and H. Yamano: Evaluating uncertainties in projected effects of global warming on corals in seas close to Japan. The Second Asia Pacific Coral Reef Symposium 2010, Thailand, June 2010.
- 21) 大島和裕, 谷本陽一: CMIP3マルチ気候モデルにおける環太平洋域の内部変動と温暖化トレンドの比較. 日本気象学会2010年秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 22) Oshima, K., Y. Tanimoto, and S.-P. Xie: Regional differences of SLP and SST trend in the North Pacific based on CMIP3 multi-model projections. 2010 AGU fall meeting, San Francisco, December 2010.
- 23) Yara, Y., M. Fujii, Y. Yamanaka, N. Okada, H. Yamano, and K. Oshima: Projected effects of global warming on corals in seas close to Japan (日本近海におけるサンゴへの地球温暖化の影響評価). 海洋酸性化に関するIPCC会合サイドイベント, 沖縄, 2011年1月.
- 24) 大島和裕, 谷本陽一, 謝尚平: CMIP3マルチ気候モデルにおける冬季北太平洋の海面気圧トレンドにみられる地域差とその不確実性. 日本気象学会2011年春季大会, 東京, 2011年5月.
- 25) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: CMIP3マルチモデルデータによるアリューシャン低気圧の再現性と将来変化の関係. 日本気象学会2011年春季大会, 東京, 2011年5月.
- 26) 大島和裕, 末吉雅和, 安田珠幾, 岡田 靖子, 谷本陽一, 謝尚平: CMIP3マルチ気候モデルを用いた北太平洋における大気・海洋の将来変化. 日本気象学会2011年秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 27) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: 地球温暖化に伴う日本付近の海面高度と海面気圧の将来変化. 日本気象学会2011年秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 28) 末吉雅和, 安田珠幾, 大島和裕: 地球温暖化に伴う日本付近の海面水位と海面気圧の将来変化. 日本海洋学会2012年度春季大会, つくば, 2012年3月.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) Alexander, M.A., I. Bladé, M. Newman, J.R. Lanzante, N.C. Lau, and J.D. Scott (2002):

- The Atmospheric Bridge: The Influence of ENSO Teleconnections on Air-Sea Interaction over the Global Oceans. *J. Climate*, 15, 2205-2231.
- 2) Deser, C., A. S. Phillips, V. Bourdette, and H. Teng (2012): Uncertainty in climate change projections: The role of internal variability. *Climate Dyn.*, 38, 527-546. doi: 10.1007/s00382-010-0977-x.
  - 3) Hori, M. E. and H. Ueda (2006): Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03713. doi:10.1029/2005GL024961.
  - 4) Mantua, N. J. and S.R. Hare (2002): The Pacific Decadal Oscillation. *J. Oceanography*, 58, 35-44.
  - 5) Overland, J. E. and M. Wang (2007): Future climate of the North Pacific Ocean, *Eos Trans. AGU*, 88, 178, 182.
  - 6) Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.
  - 7) Xie, S.-P., C. Deser, G. A. Vecchi, J. Ma, H. Teng, and A. T. Wittenberg (2010): Global Warming Pattern Formation: Sea Surface Temperature and Rainfall. *J. Climate*, 23, 966-986.
  - 8) Yamaguchi, K. and A. Noda (2006): Global Warming Patterns over the North Pacific: ENSO versus AO. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 221-241.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (5) アジアモンスーンのモデル再現性と温暖化時の変化予測に関する研究

筑波大学 生命環境系

植田宏昭

〈研究協力者〉

筑波大学 生命環境系

井上知栄

平成19～23年度累計予算額：48,395千円

(うち、平成23年度予算額：10,054千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 第3期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP3)マルチ気候モデルにおける、夏季アジアモンスーンの季節進行の再現性について、観測データと照合することにより検証を行った。アジアモンスーンの広域的な特徴は、多くのモデルで概ね良く再現されているが、東アジアや西部北太平洋における対流圏下層風や北太平洋高気圧の位置などについては、モデル間で再現性の差異が確認された。この他、アジアモンスーンの気候場や季節進行などについて、各モデルの再現性に関する指標(メトリック)を作成し、定量的に明らかにした。このメトリックに基づく加重マルチモデル平均より、アジアモンスーン地域における対流圏下層西風の開始時期の将来変化を調べた結果、排出に関する特別報告書(SRES)-A1Bシナリオでは21世紀末において、南シナ海周辺における西風の開始が20世紀末に比べ5～10日前後遅くなると予測された。温暖化時において、インド付近上空の対流圏上層における南北気温勾配の季節的反転の時期が遅れることが、南シナ海周辺における下層の西風開始の遅れと関係している。また、西部北太平洋における7月中・下旬の急激な対流活発化(対流ジャンプ)と、日本の梅雨明けとの関係に着目し、温暖化時の梅雨明けの遅れに関する物理過程を調べた。現在気候と将来気候の比較の結果、温暖化時の西部北太平洋における対流活発化域は現在より南東に位置し、対流ジャンプの発生が遅れることが確認された。また大気大循環モデルを用いた感度実験により、温暖化時における海面水温の昇温パターンの特徴が、対流ジャンプの位置の変化や発生時期の遅れをもたらし、日本の梅雨明けの遅れにとって重要な要因であることが示唆された。この他、エルニーニョ-南方振動(ENSO)の気候場とその遷移過程との関係について解析を行い、中西部赤道太平洋の降水量の空間分布やその季節変化の再現性の向上が、ENSOの遷移プロセスにおいて重要であることを示唆する結果が得られた。

**【キーワード】** CMIP3マルチ気候モデル、アジアモンスーン、季節進行、梅雨明け、ENSO

#### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次報告書において、気候の将来予測には世界気候研究計画(World Climate Research Programme, WCRP)の第3期結合モデル国際比較プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project phase 3, CMIP3)に参加した20以上のマルチ気候モデルの計算

結果が用いられ、21世紀以降の気候の将来像が描出された。夏季アジアモンスーンに関しては、温暖化に伴いインド洋北部において夏季に卓越する対流圏下層の西風が弱化する一方で、降水量は増加することが、CMIP3マルチ気候モデルのアンサンブル平均において予測されており、その理由として、大気中の水蒸気量の増加に伴う降水量増加の影響が、モンスーン循環の弱化的影響を上回るためであることが示されている (Ueda et al. 2006<sup>5)</sup>)。しかしこれらの気候モデルにおいて、アジアモンスーンに関する大気海洋諸現象の再現性の程度は個々のモデルにより異なっており、全モデルを単純に平均した予測では、信頼性に問題が残る。より信頼性の高い温暖化予測情報を提示するためには、着目する現象ごとに個々のモデルの再現性を評価した上で予測を行うことが重要である。アジアモンスーン地域は人口が集中し、また災害に対して脆弱であることから、降水量などの水資源に関して精度の高い将来予測が望まれている地域である。アジアモンスーンの季節進行の将来変化についてはKitoh and Uchiyama (2006)<sup>1)</sup>などで示されているが、その物理過程については十分解明されておらず、その詳細な解析が期待されている。

本研究では、夏季アジア・西部北太平洋の気候平均場や季節進行について、CMIP3マルチ気候モデルにおける現在気候再現性を評価し、再現性の違いをもたらす要因についての考察を行った。また、現在気候再現性を評価した結果を基にして、加重マルチモデルアンサンブル平均による温暖化後のアジアモンスーン季節進行の将来変化について調べ、変化をもたらす物理過程について調べた。

## 2. 研究開発目的

観測に基づく現実データと、マルチ気候モデルとの比較解析から、アジアモンスーンの水・エネルギー循環について、気候モデル診断・相互比較プログラム (PCMDI) に集約された複数の結合モデル実験 (CMIP3マルチ気候モデル) の再現性を評価する指標 (メトリック) を作成するための切り口を開拓する。夏季アジアモンスーンの段階的な季節進行など、アジアモンスーンにとって重要と思われる諸現象が、モデルの中でどのように再現されているかという観点からメトリックを求め、再現性の違いをもたらす原因を解析する。これにより、アジアモンスーンに関係した諸現象の理解を深め、さらにそれら諸現象の発生メカニズムを踏まえた上で、アジアモンスーン地域における、より信頼性の高い温暖化予測情報を提示する。

## 3. 研究開発方法

25個のCMIP3マルチ気候モデルの20世紀再現実験 (20C3M) の出力結果のうち、月平均値および日平均値を用いて、1981～99年の19年平均を対象として現在気候再現性比較を行った。ただし、いくつかのモデルにおいては、風の日データの出力値が提供されていないため、利用可能なモデルの数は解析対象などにより異なる。現在気候再現性の検証に用いるための観測データとして、CPC (Climate Prediction Centers) Merged Analysis of Precipitation (CMAP) の降水量データ、40 year ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) Reanalysis (ERA-40) 再解析データの大気場データ、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) Extended Reconstructed SST version 3の海面水温 (SST) データを用いた。空間分布再現性のメトリックとしては、Taylor (2001)<sup>4)</sup>により提示されたスキルスコアを用いた。各モデルの出力結果は格子点間隔が統一されていないため、S-5-2内のデータ共有ワーキンググループにより整備された、緯度2.5° × 経度2.5° に格子

点間隔を統一したデータセットを用いて比較を行った。この他、日本における梅雨明けの将来変化に対する SST の昇温分布の影響を調べるため、気象研究所の大気海洋結合モデル (MRI-CGCM2.3.2) の大気大循環モデル (AGCM) 部分を用い感度実験を行った。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 夏季アジア・西部北太平洋モンスーンの気候平均場と季節進行の現在気候再現性比較

###### 1) 夏季アジア・西部北太平洋モンスーンの気候平均場の再現性

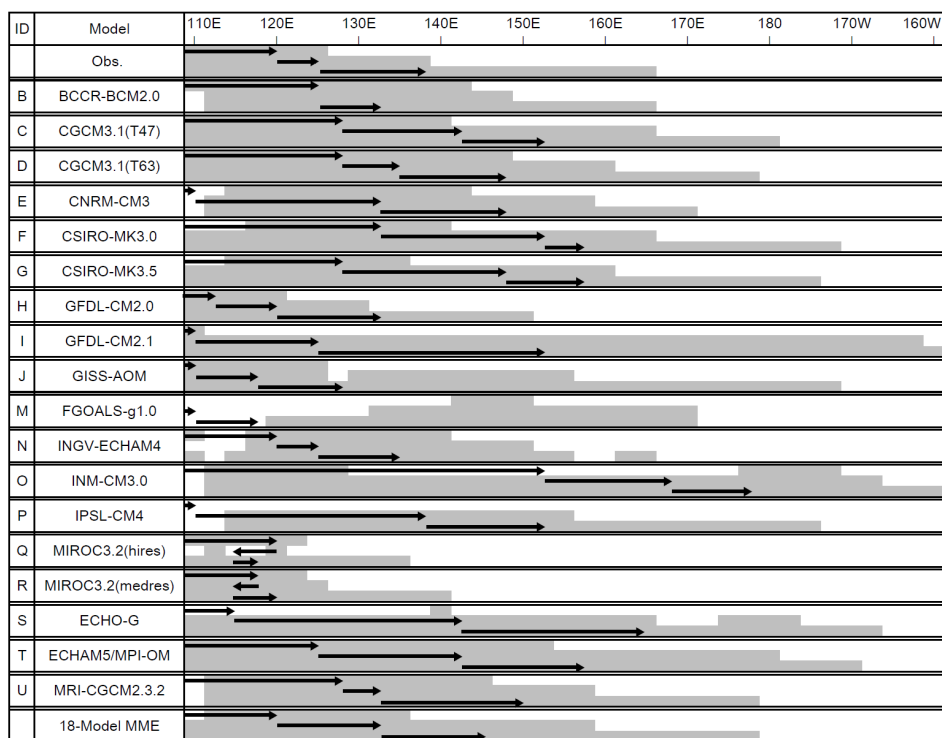
アジアモンスーン地域における夏季の降水量・対流圏下層風・対流圏上層風の現在気候における空間分布再現性について、Taylorのスキルスコアを計算した。モデルごとの降水量のスコアと下層風のスコアには高い正の相関がみられ、下層風の空間分布再現性が高いモデルは降水量の再現性も高い傾向があることが確認された。また上層風と下層風および降水量の空間分布再現性にも高い正相関がみられ、夏季アジアモンスーンの降水量の空間分布再現性の良いモデルはモンスーン循環の空間パターンの再現性も概ね良い傾向にある。夏季 (6~8月) 平均における850 hPa東西風の境界を比較すると、再現性指標の低いモデルにおいては、観測に比べて西部北太平洋における西風の領域が日付変更線を越えて東まで広がり過ぎるものや、逆にベンガル湾付近までしか到達しないものが存在し、夏季に下層風が西風となる領域はモデルにより、大きく異なる。太平洋高気圧のリッジに相当する日本の南方海上の南東風と南西風の境界は、観測より北に位置するモデルが多い。

###### 2) 南シナ海および西部北太平洋における対流活動の段階的な東進の現在気候再現性

フィリピンおよびその周辺にあたる西部北太平洋モンスーン地域においては、5月半ばから7月半ばにかけて、ほぼ1カ月の間隔で段階的に対流活動が東進することが知られている (Ueda et al. 2009<sup>9)</sup>など)。この段階的な対流活動の東進のタイミングが再現されているかどうかを調べるため、南シナ海および西部北太平洋における対流活動と対流圏下層の西風域の東進の様子を比較した結果を図(5)-1に示す。降水域と下層西風域がそれぞれ東進する傾向は、ほぼすべてのモデルで再現されているが、その速度はモデルにより大きく異なる。降水域や西風領域が観測よりも東に拡大するモデルが多く存在し、いくつかのモデルでは日付変更線を越えたところまで降水域が広がる。このようなモデルでは、降水域の東進する傾向よりも、赤道付近の熱帯収束帯が徐々に北進する傾向がある。南シナ海および西部北太平洋における夏季モンスーンの段階的な東進は、1つの段階における対流活動の活発化が大気海洋相互作用を通して、次の段階の対流活発化に影響を与えることで生じるが、このような段階的な対流活発化を再現できていないモデルは、この領域における海洋性モンスーンの諸過程が十分に再現できていない可能性がある。

##### (2) 夏季アジアモンスーンの開始の再現性と下層西風開始日の将来変化

現在気候では、インド洋北部からチベット高原にかけての領域において、5月中旬頃に対流圏上層の気温の南北傾度が逆転し、夏季アジアモンスーンの広域的な開始に相当する季節変化が生じる (Li and Yanai, 1996<sup>2)</sup>)。アジア大陸上空 ( $0^{\circ} \sim 50^{\circ} \text{ N}$ ,  $30^{\circ} \sim 140^{\circ} \text{ E}$ の領域) の5月中旬における300 hPa気温の季節変化量 (20C3Mの1981~99年の19年平均値) について、19個のCMIP3マルチ気候モデルにおけるTaylorのスキルスコアを計算した結果、再現性にある程度の差異が確認された。このスキルスコアに比例する値を重み付けの係数に用い、20C3M(1981~99年)と、SRES-A1B

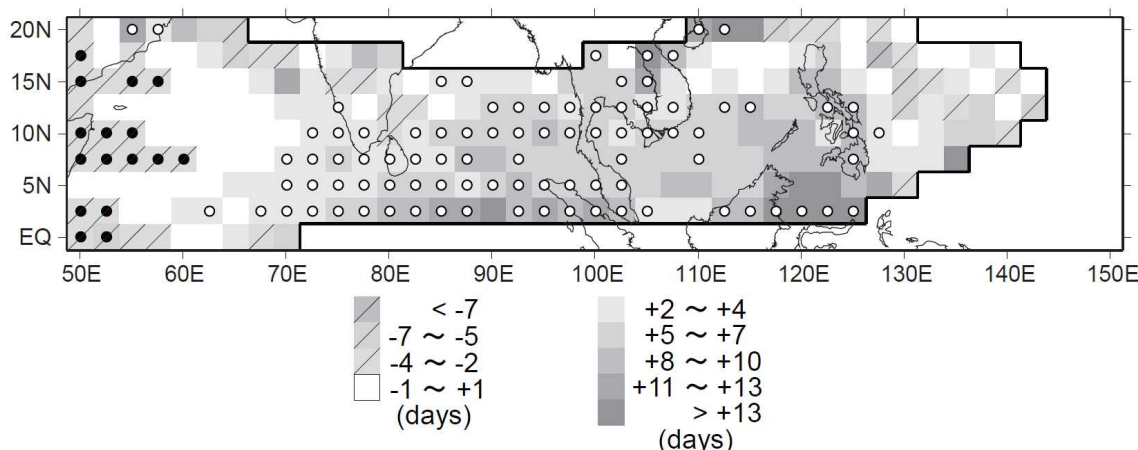


図(5)-1 南シナ海および西部北太平洋における降水量（陰影）と対流圏下層（850 hPa）のモンスーン西風（矢印）の経度時間断面の比較。上から観測（Obs.）、個々の各モデル、18モデルのアンサンブル平均の結果で、個々のモデルにおいて、上段が5月16日～6月14日平均、中段が6月15日～7月14日平均、下段が7月15日～8月13日平均であり、陰影は15°～20° N平均において降水量5mm day<sup>-1</sup>となる領域、矢印は10°～15° N平均の850 hPaの東風領域と西風領域の境界の移動を表す。

シナリオの将来変化（2081～99年）の夏季モンスーン循環場の比較を行った。図(5)-2に850 hPaにおける西風開始日の変化分布を示す。特に4月後半や5月に西風が開始する、ベンガル湾南部から南シナ海の地域にかけて、5～10日以上遅くなる。これは降水量に基づく雨季開始日の将来変化に関する研究（Kitoh and Uchiyama, 2006<sup>11</sup>）とも整合的である。地球温暖化に伴う対流圏上層の気温変化量は、チベット高原上空より赤道付近の上昇の方が大きい（Ueda et al. 2006<sup>5</sup>）ことから、温暖化により熱帯収束帯でより降水が集中し、そこでの積雲対流による凝結熱加熱に伴って、対流圏上層では赤道付近の昇温がアジア大陸上空より大きくなるため、夏季アジアモンスーンの広域的な循環の成立が遅くなった可能性が考えられる。

### （3）温暖化時の梅雨明けと広域SST昇温パターンとの関係

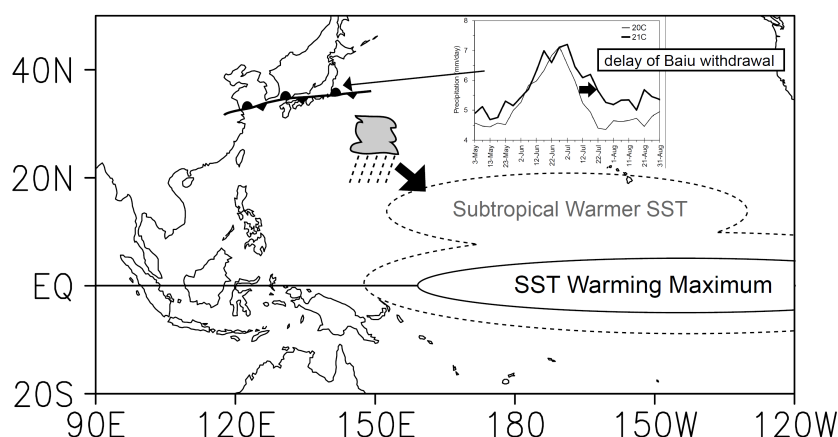
CMIP3マルチモデルにおける20C3M（1981～99年の19年平均値）における日本中西部の降水量の季節進行を観測データと比較し、その再現性を調べた。観測データでは日本中西部（30°～37.5° N、125°～145° Eで平均した領域、以下BAIU領域とする）において、7月中旬頃に梅雨明けに伴う降水量の減少が生じるが、CMIP3モデル群の中には、この時期に必ずしも降水量が減少しないモ



図(5)-2 19個のCMIP3モデルの加重平均に基づく、850 hPaの西風開始日の、20C3M（1981～99年）を基準としたSRES-A1Bシナリオ（2081～99年）の将来変化量。20C3Mにおいて、3～8月に西風が開始する（領域実線で囲んだ範囲）を比較対象とし、濃い陰影ほど変化量が大きく、斜線が入った（入っていない）グリッドは開始が早く（遅く）なる。黒（白）丸は3分の2以上のモデルで一致して西風開始日が早まる（遅れる）と予測しているグリッドを表す。

デルも存在する。BAIU領域で平均した、第25～49半月（5～8月にほぼ相当）における、半月降水量の季節変化パターンについて、CMAPの降水量を基準としてTaylorのスキルスコアを計算した。18個のうち5つのモデルは、梅雨季の6～7月に降水量のピークが現れず負相関となるなど、現在気候の再現性に大きなばらつきが存在することが確認された。

このスキルスコアに比例する値を重み付けの係数に用い、現在気候と将来変化の比較を行った。ただしCMAPとの相関係数が負となる5つのモデルについては、梅雨明け半月を決定できなかったため除外し、13個のモデルの重みづけ平均を用いた。その結果、SRES-A1Bシナリオの21世紀末（2081～99年の平均）において、20C3Mにおける1981～99年の平均に比べ、BAIU領域の梅雨明けが10日程度遅れる。個々のモデルにおける同様の比較でも、全体の4分の3のモデルでBAIU領域の梅雨明け時における降水量の減少が遅れると予測された。2つの年代における梅雨明け時の大気循環場を比較した結果、西部北太平洋における対流活発化域は現在より南東方向へシフトし、対流ジャンプの発生が遅れる。温暖化時には赤道太平洋および北太平洋亜熱帯域において、海面水温が周囲の海域より上昇すると予測されている。このような温暖化時の海面水温の昇温パターンを与えた大気大循環モデルによる感度実験を行った結果、CMIP3モデルの加重マルチモデル平均と同様に、対流活発化域が南東へシフトし、BAIU領域の梅雨明けに伴う降水量減少が遅れる傾向が確認された。また、赤道太平洋に正偏差のピークが存在するエルニーニョ型のSST偏差を与えたAGCM実験においても同様の傾向が明瞭に現れ、北太平洋亜熱帯域のみにSST正偏差を与えた実験でも、弱いながら日本の梅雨明けが遅れる傾向が認められた。これらの結果を総合すると、図(5)-3の模式図に示すように、温暖化時の海面水温昇温パターンの空間的差異に伴う対流ジャンプの位置の変化や発生の遅れが、亜熱帯起源のテレコネクション（遠隔応答）を通して、温暖化時における日本の梅雨明けの遅れにとって重要な要因であると考えられる。



図(5)-3 温暖化時のSST昇温パターンと西部北太平洋の対流活動および日本の梅雨明けの変化を表す模式図。温暖化時には赤道中東部太平洋において昇温のピークが存在し、また北太平洋亜熱帯域中部においても比較的昇温量が多い。このパターンが西部北太平洋の対流活発化の南東偏および対流ジャンプの遅れをもたらし、亜熱帯起源のテレコネクションを通して日本の梅雨明けが遅れると考えられる。

#### (4) CMIP3マルチ気候モデルにおけるENSOの遷移の非対称性の再現性比較

現在気候の観測データに基づく研究では、エルニーニョは北半球冬季にピークを迎えた後すぐに衰退する傾向があるのに対し、ラニーニャは次の北半球冬季まで持続しやすい傾向があることが近年指摘されている(Ohba and Ueda, 2009<sup>3)</sup>)。そこで、CMIP3マルチ気候モデルの20C3M実験(1900~99年)における、Niño 3.4指数(5° S~5° N, 120° ~170° Wの領域で平均した海面水温の平年力の偏差)の、北半球冬季(12~2月)と次の年の冬季とのラグ自己相関係数を、Niño 3.4指数の正負年で分けて計算した。その結果、上記のエルニーニョ年・ラニーニャ年の両方で観測と類似の傾向を示すモデルはあまり多くないことが確認された。

エルニーニョの遷移性を比較的良く再現する4つのモデルと、遷移性の再現が低い5つのモデルのそれぞれについてコンポジット解析を行った。その結果赤道上の冷舌(低海面水温域)が強く、西太平洋の降水が弱いモデルでは、エルニーニョ発生時に降水量偏差が観測に比べて西にシフトしている傾向が確認された。これらのモデルではエルニーニョの遷移プロセス(赤道風の減速と西太平洋振動子)が発動できないため、観測に比べてエルニーニョの遷移性が弱くなってしまうと考えられる。一方、ラニーニャの持続性を良く再現するモデルは、エルニーニョの遷移性の再現の良さと必ずしも一致していない。再現性の高い4モデルと低い4モデルについて、エルニーニョの遷移性と同様にコンポジット解析を行った。その結果、ラニーニャの持続性の再現には、赤道中西部太平洋上の降水量の季節変化の再現性が重要であることが分かった。降水量の気候値が北半球の冬から春にかけて減少するモデルでは、暖水ケルビン波の発生を介してラニーニャからエルニーニョへ遷移してしまう傾向が強いことが確認された。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

国内外20以上の気候モデルで計算された温暖化予測データに基づき、アジア・西部北太平洋地



域に生起する大気海洋結合現象、特に日本の天候に密接に関連する春から夏にかけての季節進行に着目して研究を行った。夏季モンスーンの季節平均場の再現性に関するメトリックを作成し、領域気候モデルを用いた梅雨前線の温暖化予測など、日本周辺域での高精度の温暖化予測に貢献しうる情報を提示した。その上で、温暖化時に見られる広域モンスーンの開始の遅延を、熱帯対流圏の中上層での凝結熱加熱の増加に起因する、北高南低の気温勾配の出現の遅延と関連付けて論じた。また、既存研究で指摘されていた梅雨開けの遅延については、西部北太平洋域で発現する7月中・下旬の対流ジャンプ現象が、現在に比べて10日前後遅れること、また対流活発域が南東方向にシフトすることが原因であることを明らかにし、その背景として温暖化時の海面水温がエルニーニョ型の昇温パターンを呈することを、実験的に示した。以上指摘したような研究成果は、従来のマルチ気候モデルによる温暖化研究に新たな知見を加えるものである。さらに、赤道太平洋の降水量の空間分布やその季節変化の再現性の向上が、ENSOの遷移プロセスにおいて重要であることを示すなど、気候モデルの今後の改良に役立つ情報を提供した。

## (2) 環境政策への貢献

アジアモンスーンの現在気候再現性について求めたメトリックは、個々のモデルにおけるアジアモンスーンの将来変動に関する信頼度情報として利用でき、温暖化予測情報の不確実性を低減させるための資料として活用できる。今後、投稿論文や学会発表など国内外での情報交換などにより、アジアモンスーン地域における、より不確実性の小さい地球温暖化予測情報や、アジア地域の水資源変動などの影響評価に利用されるよう、成果の広報・普及に努める。

## 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) Inoue, T. and H. Ueda (2009): Evaluation for the seasonal evolution of the summer monsoon over the Asian and western North Pacific sector in the WCRP CMIP3 multi-model experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 539-560.
- 2) 植田宏昭 (2009): 気候研究におけるデータ解析の意義と今後の課題. *天気*, 56, 434-440.
- 3) Ohba, M. and H. Ueda (2009): Seasonally different response of the Indian Ocean to the remote forcing of El Niño: Linking the dynamics and thermodynamics. *SOLA*, 5, 176-179.
- 4) Kamae, Y. and H. Ueda (2009): Suppressant effect of instantaneous CO<sub>2</sub> doubling on global precipitation. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 5, 11-16.
- 5) Kawase, H., T. Yoshikane, M. Hara, F. Kimura, T. Yasunari, B. Ailikun, H. Ueda, and T. Inoue (2009): Intermodel variability of future changes in the Baiu rainband estimated by the pseudo global warming downscaling method. *J. Geophys. Res.*, 114, D24110. doi:10.1029/2009JD011803.
- 6) Ohba, M., D. Nohara, and H. Ueda (2010): Simulation of asymmetric ENSO transition in

- WCRP CMIP3 multimodel experiments. *J. Climate*, 23, 6051-6067.
- 7) Ohba, M. and H. Ueda (2010): A GCM study on effects of continental drift on tropical climate at the early and late Cretaceous. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88, 869-881.
  - 8) Inoue, T. and H. Ueda (2011): Delay of the first transition of Asian summer monsoon under global warming condition. *SOLA*, 7, 81-84.
  - 9) Yokoi, S., Y.N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 50, 1666-1675.
  - 10) Kamae, Y., H. Ueda and A. Kitoh (2011): Hadley and Walker circulations in the mid-Pliocene warm period simulated by an atmospheric general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 89, 475-493.
  - 11) Ueda, H., H. Kuroki, M. Ohba, and Y. Kamae (2011): Seasonally asymmetric transition of the Asian monsoon in response to ice age boundary conditions. *Clim. Dyn.*, 37, 2167-2179.
  - 12) Nishii, K., T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y.N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012): Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, in press.
  - 13) Adachi, S.A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue, and H. Ueda (2012): Comparison of the impact of global climate changes and urbanization on summertime future climate in the Tokyo metropolitan area. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, in press.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

**(2) 口頭発表（学会等）**

- 1) 釜江陽一, 植田宏昭: 夏季アジアモンスーン域における降水効率の変動予測. 日本気象学会2007年度秋季大会, 札幌, 2007年10月.
- 2) 井上知栄, 植田宏昭: アジアモンスーン地域における気候変動とその将来予測. 気候影響・利用研究会, つくば, 2007年11月.
- 3) 井上知栄, 植田宏昭: CMIP3マルチ気候モデルにおけるアジアモンスーンの再現性比較. 日本気象学会2008年度春季大会, 横浜, 2008年5月.
- 4) 井上知栄, 植田宏昭: CMIP3マルチ気候モデルにおける夏季アジアモンスーン季節進行の再現性比較, 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 5) 釜江陽一, 植田宏昭: CO<sub>2</sub>倍増による全球降水抑制効果. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙

- 台, 2008年11月.
- 6) 富永晶子, 植田宏昭: 地球温暖化に伴う西部北太平洋モンスーンと梅雨明けの変化. 日本気象学会2008年度秋季大会, 仙台, 2008年11月.
  - 7) Inoue, T. and H. Ueda: Comparison of the seasonal evolution of the summer monsoon over the Asian and western north Pacific sector in the WCRP CMIP3 multi-model experiments. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, Japan, February 2009.
  - 8) 井上知栄, 植田宏昭: IPCC-AR4マルチモデルにおけるアジア・西部北太平洋域の夏季モンスーン季節進行の再現性比較. 2009年日本地理学会秋季学術大会, 沖縄県中頭郡西原町, 2009年10月.
  - 9) 井上知栄, 植田宏昭: CMIP3マルチ気候モデルにおける夏季アジアモンスーン循環の季節変化再現性とその将来変化. 日本気象学会2009年度秋季大会, 福岡, 2009年11月.
  - 10) 植田宏昭: モンスーンの形成と変動における山岳と陸面の役割. 日本気象学会2010年度春季大会, 東京, 2010年5月.
  - 11) 足立幸穂, 木村富士男, 日下博幸, 植田宏昭, 井上知栄: 2070年代における首都圏夏季の将来都市気候予測. 日本気象学会2010年度春季大会, 東京, 2010年5月.
  - 12) Adachi, S.A., F. Kimura, H. Kusaka, T. Inoue, and H. Ueda: Comparison of impacts between global climate change and urbanization on future urban climate in Tokyo metropolitan area. International Workshop on Urban Climate Projection for better Adaptation Plan, Tsukuba, Japan, June 2010.
  - 13) Adachi, S.A., F. Kimura, H. Kusaka, H. Ueda, and T. Inoue: Comparison of impacts between global climate change and urbanization on future urban climate in Tokyo metropolitan area. The Ninth Symposium on the Urban Environment, Keystone, USA, August 2010.
  - 14) 井上知栄, 植田宏昭: 温暖化時の梅雨明けと広域SST昇温パターンとの関係. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
  - 15) 植田宏昭: アジアモンスーンの成立と変動における熱帯の役割. 日本気象学会2011年度春季大会, 東京, 2011年5月.
  - 16) Ueda, H.: Similarities and differences in driving force of the monsoon with a 'past and future' lens. The 25th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne, Australia, June 2011.
  - 17) Inoue, T. and H. Ueda: Changes of the seasonal evolution of the Asian summer monsoon under global warming condition in the CMIP3 multi-model experiments. The 25th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne, Australia, June 2011.
  - 18) 植田宏昭: モンスーンの将来予測と古気候モデリングの接点. 日本地理学会2011年秋季学術大会, 大分, 2011年9月.
  - 19) Ueda, H.: A comparison look at driving forces of the Asian monsoon between colder and warmer climate. The fifth Korea-Japan-China joint conference on meteorology, Busan,

Korea, October 2011.

- 20) 井上知栄, 植田宏昭: 温暖化時の梅雨明けとSST昇温パターンに関するAGCM実験. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 21) 風間沙都美, 植田宏昭, 釜江陽一: 温暖化に伴う南アジア域における冬季降水量の減少要因. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 22) 植田宏昭: 寒冷・温暖な気候条件下におけるモンスーン循環の駆動力. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) Kitoh, A. and T. Uchiyama (2006): Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 247-258.
- 2) Li, C. and M. Yanai (1996): The onset and interannual variability of the Asian summer monsoon in relation to land-sea thermal contrast. *J. Climate*, 9, 358-375.
- 3) Ohba, M. and H. Ueda (2009): Role of nonlinear atmospheric response to SST on the asymmetric transition process of ENSO. *J. Climate*, 22, 177-192.
- 4) Taylor, K.E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.
- 5) Ueda, H., A. Iwai, K. Kuwako, and M.E. Hori (2006): Impact of anthropogenic forcing on Asian summer monsoon as simulated by eight GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06703. doi:10.1029/2005GL025336.
- 6) Ueda, H., M. Ohba, and S.-P. Xie (2009): Important factors for the development of the Asian-Northwest Pacific summer monsoon. *J. Climate*, 22, 649-669.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (6) 熱帯大気海洋相互作用現象の再現性とその将来変化に関する研究

(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域

熱帯気候変動研究プログラム

城岡竜一・米山邦夫・佐藤尚毅・清木亜矢子

<研究協力者>

(独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域

熱帯気候変動研究プログラム

高橋千陽

平成19～23年度累計予算額：53,358千円

(うち、平成23年度予算額：9,200千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 気候モデルにおける、熱帯域の大気海洋相互作用現象の再現性を定量的に評価することを目的とし、熱帯域の大気海洋結合系の現象として特徴的な、エルニーニョに密接な関係がある西風バースト (WWB) や季節内振動 (MJO) に着目し、観測データとの比較及び現在気候モデル間、温暖化シナリオ実験間の比較を行った。WWBに関しては、現在気候実験において西太平洋のWWBがエルニーニョ前に適切に発生しているモデルで、背景風の経年変動やエルニーニョの再現性が高いことがわかった。また、温暖化実験では、東部太平洋でのWWBが増えるモデルでは温暖化の傾向が強いことが示された。MJOに関しては、気候平均の海面水温 (SST) の再現性の良し悪しが、MJOの再現性に有意に相関することが示され、MJOの再現における基本場や大気海洋結合の重要性が示唆された。熱帯域と東アジア域の対流活動との関連は、MJOが比較的良く再現されているモデルで顕著であり、温暖化時にも遠隔効果がみられたが、MJOそのものの再現において、全体的に見れば十分な精度を持っているとは言えなかった。これらは、東アジア域の気候変動予測にとっては、MJO等、熱帯域現象の将来変化が適切に予測されることの重要性を意味していた。

**【キーワード】** 温暖化、マルチモデル比較、熱帯大気海洋相互作用、季節内振動、西風バースト

#### 1. はじめに

地球温暖化に伴う環境変化が具体的にどのような現象として発現し得るかをすることは重要な課題である。そのため、数多くの気候モデルを用いたシミュレーションが行われ、政府間気候変動パネル (IPCC) の第4次報告書 (AR4) にも新しい知見が集約された。しかし、気候モデルには、物理プロセスの表現などに、観測できないために未知である要素や原理的に表現しきれない要素が含まれるため、必ずしも十分なシミュレーションができていないだけでなく、モデル間のばらつきが存在する。

この課題では、熱帯域の大気海洋相互作用に着目し、これまでに実践してきた集中観測等のデータに加え、衛星観測や全球気象データの解析から、熱帯域の大気海洋相互作用に本質的な季節内振動 (MJO) の再現性を評価する際のメトリック (スキルスコア) の作成法を考案し、MJOに関連する諸現象の再現性と将来変化予測の検討を行った。また、日本を含む東アジア域への影響にも着目し、アジアメトリックの作成に貢献すると共に、熱帯域から東アジア域への遠隔影響 (テレコネクション) についても調査した。

## 2. 研究開発目的

熱帯域における主要な大気海洋相互作用現象として、エルニーニョ・南方振動 (ENSO) があげられるが、このエルニーニョに影響を与える大気擾乱のひとつとして、西風バースト (WWB) と呼ばれる現象がある。WWBは赤道上に強い西風が数日～数週間にわたって吹く総観規模の現象であるが、その風応力が海洋波を励起することから、長周期現象であるエルニーニョの開始・維持に影響を与えることが指摘されている。本研究では、まず現在気候におけるWWBの再現性とENSO・MJOとの関係について解析し、WWB発生の将来変化について調査する。

一方、MJO自体も熱帯海洋上での数10日スケールでの対流活動の変動であり、熱帯域の気象場の主要な変動モードであるが、中緯度域で卓越する温帯低気圧に比べると、そのメカニズムの解明は十分ではなく、多くの気候モデルにおいてMJOの再現性が不十分であることが報告されている (Lin et al. 2006)<sup>3)</sup>。よって、気候予測モデルにおけるMJOの再現性を定量的に検証し、温暖化の強さとの相関を調べる。

また、北半球冬季にはMJOの東進に伴って日本を含む東アジア域の対流活動も変化することが知られている (Kim et al. 2006<sup>2)</sup> など)。MJOが熱帯インド洋に存在するとき、東アジア域の対流活動は活発化し、海大陸～西太平洋に存在するときは不活発になる。このような熱帯域と東アジア域のテレコネクションについても再現性と将来変化を調査する。

これら、熱帯域の大気海洋相互作用現象の解析により、気候モデルによる現在気候再現性の評価と検証を行い、温暖化予測の信頼性向上につなげることを目的とする。

## 3. 研究開発方法

WWBの現在気候における再現性と将来変化を調査するために、IPCC AR4において各国が大気海洋結合モデルを用いて計算したデータを用いた。その中でも、日別地上風データと月別海面水温データのある18個のモデルを調査した。現在気候のデータとして20世紀再現実験データを、将来気候のデータとして温暖化実験 (A1B) データを用いた。解析期間は、現在気候については1979年～2000年、将来気候は2081年～2100年までとした。また、比較するデータとして、気象庁の客観解析データ (JRA-25, 1.25度グリッド) と米国海洋大気庁 (NOAA) の最適内挿海面水温 (OI SST, 1.0度グリッド)、外向き長波放射 (OLR, 2.5度グリッド: 対流活動の指標) を用いた。

先行研究 (Seiki and Takayabu, 2007)<sup>4)</sup> におけるWWBは、組織的に広がる強い西風域を捕らえるために、季節変動気候値からの西風偏差が  $5\text{ms}^{-1}$  以上の領域が経度10度以上、2日以上持続するものとして定義された。しかし、各モデルの東西風偏差の標準偏差は、多くのモデルにおいて客観解析よりも値が小さいため、各モデルにおけるWWBの閾値は、JRA-25から算出された標準偏差を元に標準化された値を用いた。温暖化実験データにおいても、将来気候における季節変動気候値

からの偏差を用いた各モデルにおける標準偏差を基に WWB を定義した。また、MJ0 対流との関係を見るために、OLR には季節内規模 (20-100 日) を対象としたバンドパスフィルターを施した。

MJ0の再現性に関しては、日別の降水量の観測データを用いて、赤道上における東西-時間スペクトルを解析し、東西波数1-3、周期32-64日付近に赤道ケルビン波とは分離された東進成分の極大が現れることを確かめた。そのうえで、数値モデルにおいて再現された、MJ0に対応する降水の変動を、観測との比較、MJ0再現性の高いモデルと低いモデルの比較という観点で解析した。はじめに、Lin et al. (2006)<sup>3)</sup>に従って、各モデルに関して、赤道域における降水の東西-時間スペクトルを解析した。Wheeler and Weickmann (2001)<sup>6)</sup>などを参考に、東西波数1-6、周期30-70日の成分をMJ0成分と定義した。このように定義した、降水のMJ0成分の東経85°における値に対して、降水、地上風、気温、湿度場の回帰を計算した。ここでは、MJ0に伴う偏差場の空間構造に注目し、観測と整合的な結果が得られているか検証した。まず、日降水量データにおいて、MJ0成分の水平分布を調べた。こうして得られたMJ0成分の強さと分布形に関して、Taylor (2001)<sup>5)</sup>の方法でスキルスコアを計算した。次に、MJ0に伴う地上風や、その収束・発散の水平分布、非断熱加熱の鉛直分布を調べた。さらに、MJ0の再現性と、海面水温 (SST) などの基本場の再現性との関係を調査した。

また、MJ0の再現性とA1Bシナリオにおける温暖化の強さとの相関も調べ、MJ0に関係するインド洋および西太平洋域の対流活動の変動と冬季東アジアモンスーンの変動との関連も解析した。冬季東アジアモンスーンの変動として、温度場、寒気の吹き出し、降水などに注目したが、冬季の降水はおもに低気圧活動によってもたらされることを考慮し、短周期じょう乱に伴う熱輸送や気圧場の変動も解析し、低気圧活動の強さの変動にも注目した。

MJ0と東アジア域との関係については、MJ0の卓越周期・東西波数でフィルターした日別OLR値をMJ0対流シグナルとし、Taylor (2001)<sup>5)</sup>に基づいて、北半球冬期における熱帯域(南緯10°～北緯10°，東経50～200°)でのMJ0対流シグナルのスキルスコアを求めた。MJ0対流シグナルを、熱帯インド洋(南緯10°～北緯10°，東経50～100°)で平均した値をMJ0 indexと定義した。MJ0 indexに対する大気日別データのラグ回帰解析を行った。中緯度帯の波活動フラックスを抽出するために、周期10～80日でフィルターをかけた300hPa流線関数を用いた。MJ0とENSO将来変化の関係を調べる為に、エルニーニョ発生のひとつの指標であるNiño 3領域(南緯10°～北緯10°，西経150～90°)で平均したSST偏差の5ヶ月移動平均値で定義したENSO index (ENSO振幅)を用いた。

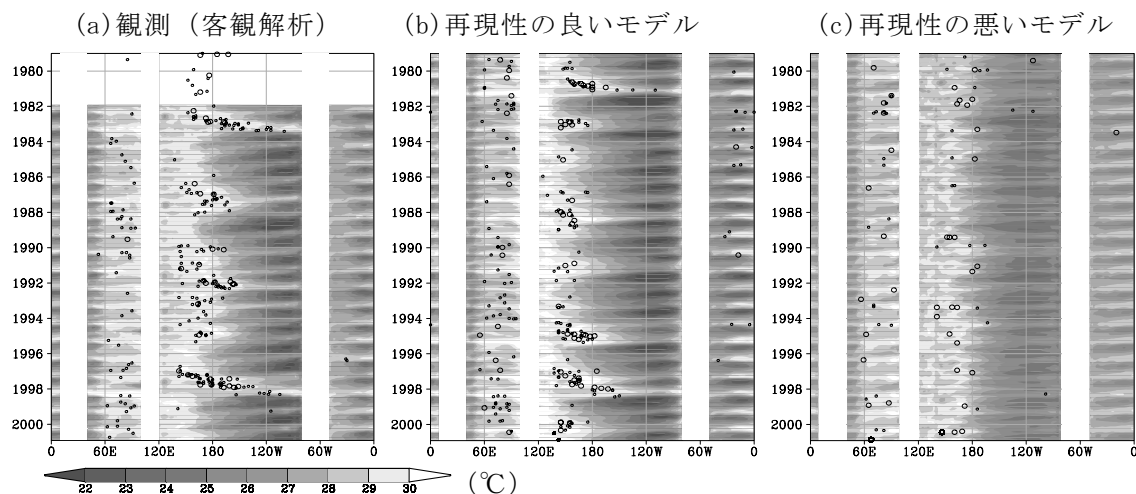
## 4. 結果及び考察

### (1) WWBの再現性と将来変化について

AR4で報告された各モデルにおけるENSOの振幅はばらついており、全てにおいて忠実に再現できているモデルはみられないことが報告されている。そのENSOへ影響を与えるWWBの分布については、大まかにはどのモデルでも1年を通して暖水の存在するインド洋から太平洋の間で検出され、客観解析と整合的な結果が得られた。しかし、海面水温の空間分布や、WWBが頻発するENSO位相に関して、各モデル間で大きな差がみられた (図(6)-1)。

客観解析において、西太平洋でのWWB頻度はエルニーニョの数ヶ月前の位相において上昇し、このWWBがエルニーニョのきっかけとなる可能性があることが知られている。そのため、WWB発生頻度はENSOと有意なラグ相関があり、西太平洋WWBはエルニーニョに数ヶ月先行して、東部太平洋WWB

はエルニーニョと同時期に高い値を持つことが報告されている。このようなラグ相関の地域差は、WWB発生域がエルニーニョの発達に伴って西から東へ移動していく特徴を示している（図(6)-1a参照）。モデルの中には客観解析と似た特徴を表すものもあったが、ほとんどのモデルでは全く相関がないか、相関が出ても西太平洋WWBのみで、しかもENSO位相との有意なラグ（時間差）のみられないものが多かった。



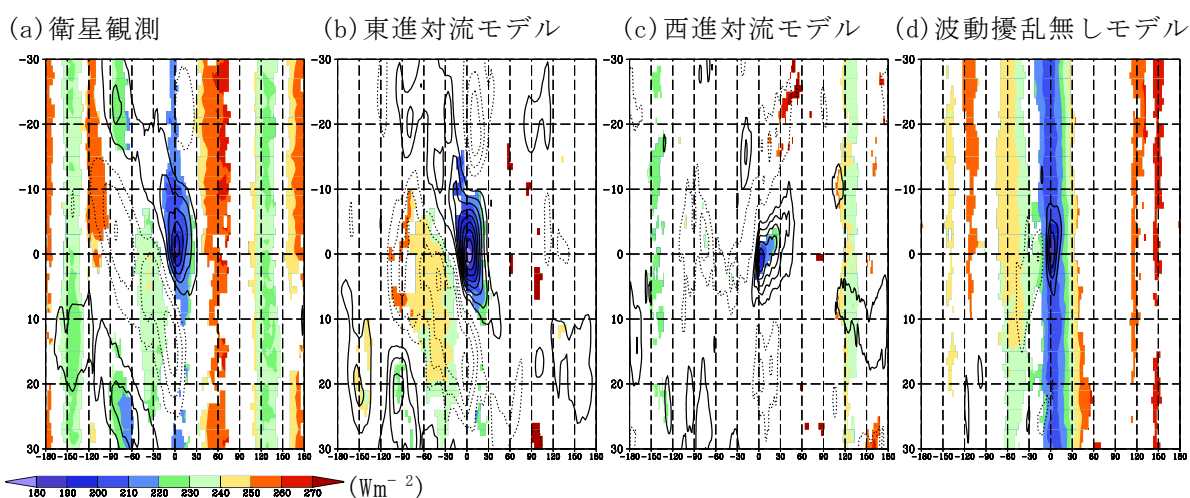
図(6)-1 観測とモデルにおける海面水温の年々変動。○はWWBが発生した日時と経度を示す。

この結果は、モデル内でのENSOの再現性とも一部関係している。全く相関の出ないモデルでは、ENSOに伴うSSTの振幅が観測に比べて著しく小さいものがみられ、また、西太平洋での同時相関のみ（エルニーニョに先行しない）というモデルでは、観測のようにエルニーニョ時の暖水域が日付変更線まで伸張していないものがみられた。一方で、WWBの再現性の良いモデルでも、ENSOの振幅が大きすぎたり周期が短かったりと一様ではなかった。このラグ相関係数を基に作成したWWB指標とENSO再現性指標との間の相関係数は0.80であり、99%の有意水準を超えている。つまり、西太平洋におけるWWBがエルニーニョ前の位相で適切に発生しているモデルは、ENSOの再現性が良いということである。このように、WWBの再現性はENSOの再現性に大きく影響を与えていることがわかる。一方で、WWB発生には背景風の変動が影響しており、西風背景場において頻発することが知られている。先に述べたWWB指標と、西太平洋における背景東西風の変動とNiño3領域のSST偏差との間のラグ相関係数から導き出した背景風指数との相関係数は0.54であり、95%の有意水準を大きく超える。つまり、西太平洋における背景風がNiño3領域のSSTに伴って現実的に変動しているモデルでは、WWBが適切な時間・場所で発生し、エルニーニョに対して効果的に影響を与えていることを示唆している。

また、客観解析においてWWBはMJOのような東進する大規模対流から発生することが多い。モデルにおける対流活動とWWBとの関係を調べるため、WWBが発生した経度・時間を基準としたコンポジット解析を行った。その結果、各モデルにおけるWWBは活発な対流活動とともに発生していた。しかし一方で、その対流をもたらす季節内規模擾乱は様々であった。図(6)-2は季節内周期のバンドパスフィルターをかけたOLRの時間-経度断面図を示す。横軸はWWB発生経度からの相対経度を、



縦軸はWWB発生日からの相対日を示す。衛星観測(図(6)-2a)からわかるように、WWBの発生日(縦軸の0)前には、WWB発生域(横軸の0)に向かって東進する活発な対流域が、その後には対流抑制域が東進している様子がみられる。一部のモデルでは観測データと似た特徴を表すものもあるが(図(6)-2b)、東進速度が速すぎるもの、西進擾乱と関連しているもの(図(6)-2c)、そもそも波動擾乱がみられないもの(図(6)-2d)など様々であった。このようなモデル間のばらつきは、WWB発生頻度とENSOとの関係でもみられたが、その際再現性のよかったモデルとは必ずしも一致しない。そのひとつの要因として、MJO-WWB関係において再現性のよかった一部のモデルは一方でSSTの絶対値が明らかに低くENSOがよく再現できていないなど、再現性の良し悪しには大気海洋の様々な要因が混在していることが示唆された。



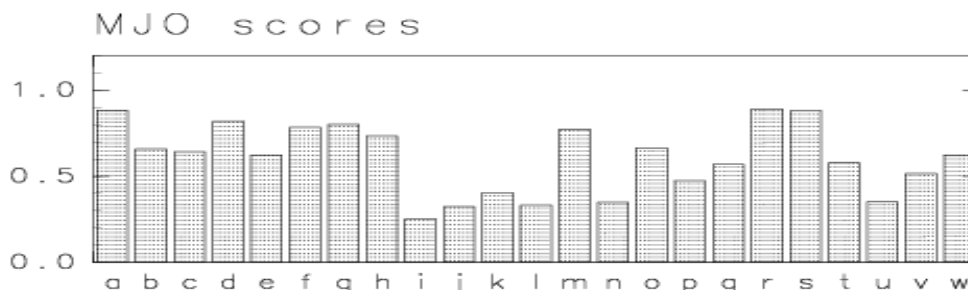
図(6)-2 OLR(カラー)と季節内規模のフィルターをかけたOLR(コンター)のコンポジット図。実線(破線)は負(正)の値を示し、対流活動が活発である(抑制されている)ことを示す。カラーは95%以上の有意水準を満たすもののみ表示している。横軸はWWB発生経度からの相対経度を、縦軸はWWB発生日からの相対日を示す。

これまで行ってきた20世紀再現実験を用いた研究では、西太平洋におけるWWBがエルニーニョ前の位相において適切に発生しているモデルでは、背景風の経年変動の再現性が良く、またエルニーニョの再現性も高いことがわかった。その一方で、WWB擾乱の源となる積雲群をもたらすMJOの再現性とエルニーニョ前に発生するWWBの再現性との間に有意な関係はみられなかった。

WWBとENSOとの関係の将来変化を調べるため、次に温暖化実験データの解析を行った。その結果、多くのモデルで東部太平洋上のWWBが増えることがわかった。これには、温暖化によりエルニーニョ時のような東部太平洋の海面水温上昇がおり、現在気候よりも活発な対流活動が促進されたためであると考察される。また、現在気候においてWWBの再現性が良かった7モデルにおける、温暖化後の東部太平洋WWBの増減とエルニーニョ振幅の増減との間には関連性がみられた。つまり、東部太平洋WWBの頻度が増加(減少)するモデルではエルニーニョの振幅も増大(減少)する傾向がある。これにより、温暖化時に東部太平洋で増加するWWBがエルニーニョの発達を促進している可能性が示唆された。

## (2) MJ0の再現性と将来変化について

図(6)-3に各モデル(aからwの23個)のMJ0の再現性スコアを示す。モデルによってかなりの差があることが分かる。全体的には気候モデルにおけるMJ0の再現性はよいとはいえないが、いくつかのモデルにおいては一定の再現性があることが分かる。モデルの設定とMJ0再現性を比較した結果、水蒸気収束型の対流スキームを用いたモデルで降水のMJ0成分の再現性がよいことが分かった。

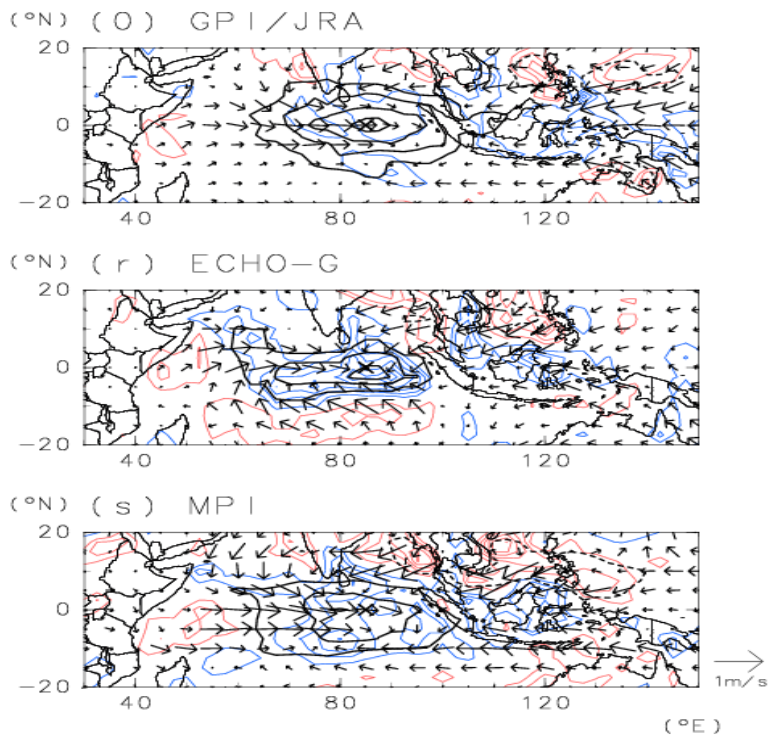


図(6)-3 各モデルにおけるMJ0の再現性スコア。

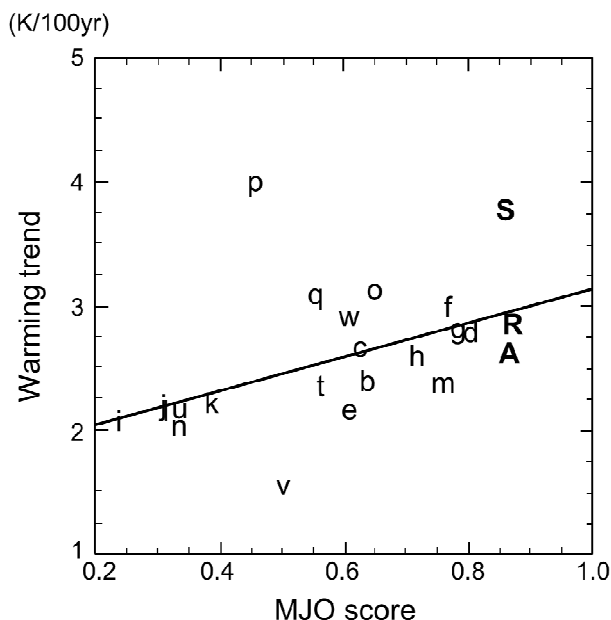
次に、赤道、東経85°における降水変動のMJ0成分に対する、降水、地上風の回帰場を、モデルごとに計算した。図(6)-4に観測(上)とモデル(s:マックス・プランク研究所のECHAM5)(下)における回帰場を示す。このモデルは、赤道域の日降水量の時間、東西スペクトルにおいて、MJ0成分が特によく再現されていたモデルである。降水域やその西側で西風偏差が見られ、WWBなどのMJ0に伴う構造を示していると考えられる。地上風の収束は、降水の極大よりも東側に見られる。これらの結果は、過去のいくつかの研究の結果と整合的であり、観測結果とも類似しているといえる。MJ0成分が再現されているモデルにおいては、これらの傾向はある程度共通して見られる。全体に見れば、水蒸気収束型の対流スキームを用いたモデルは降水のMJ0成分をよく再現している。しかし、再現されたMJ0の構造を解析した結果、モデルでは地上風の収束が大きすぎることも分かった。

さらに、モデルにおいては、インド洋におけるMJ0成分の極大が、海洋大陸や西太平洋における極大よりも相対的に小さく、また西にずれていた。これらの不整合はSSTのバイアスに対応している。MJ0再現性の良し悪しが、気候平均SSTの再現性の良し悪しに有意に相関することも示された。最近の研究例においては、MJ0のゆっくりとした東進に大気海洋結合がなんらかの形で関係していることが提案されている(たとえば、Flatau et al. 1997)<sup>1)</sup>。本研究のマルチモデル解析においても、MJ0の再現における基本場や大気海洋結合の重要性が示唆された。なお、大気海洋結合の、ゆっくりとした東進への寄与に関する理論的なメカニズムについては、これまで研究例がなかったが、本研究では浅水波方程式に大気海洋結合を線形化して組み込むことによって理論的な説明を試みている。

また、20世紀再現実験におけるMJ0再現性と温暖化実験における昇温トレンドとの間には統計的に有意な正の相関が見られた(図(6)-5)。このことは、MJ0再現性のよかったモデルだけを選択的に採用して温暖化予測を行なうと、すべてのモデルを用いた場合よりも、温暖化がより強くなることを意味している。しかし、MJ0再現性と昇温トレンドとの間に相関が生じる原因については明らかになっていない。非断熱加熱の鉛直分布や大気海洋結合が関係している可能性が考えられるので、今後検証を進めていく必要がある。



図(6)-4 赤道、東経85度における降水変動のMJ0成分に対する、降水量(太線)と海上風(矢印)の回帰。上は観測(Global Precipitation Index (GPI)と気象庁JRA25客観解析)、中と下はMJ0再現性が比較的良好なモデル (r:ドイツECHO-Gとs:マックス・プランク研究所のECMH5)。等値線間隔は1mm/day、ゼロの等値線は省略。赤(青)線は発散(収束)を表し、等値線間隔は $0.2 \times 10^{-7}/s$ 。

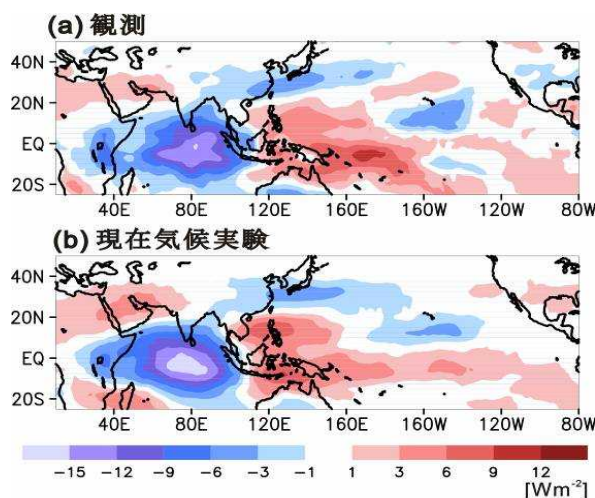


図(6)-5 20世紀再現実験における各気候モデル (aからw) のMJ0の再現性スコア(横軸)と温暖化実験における低緯度域での昇温トレンド(縦軸)との関係。スコアのよい3モデルを大文字で示した。

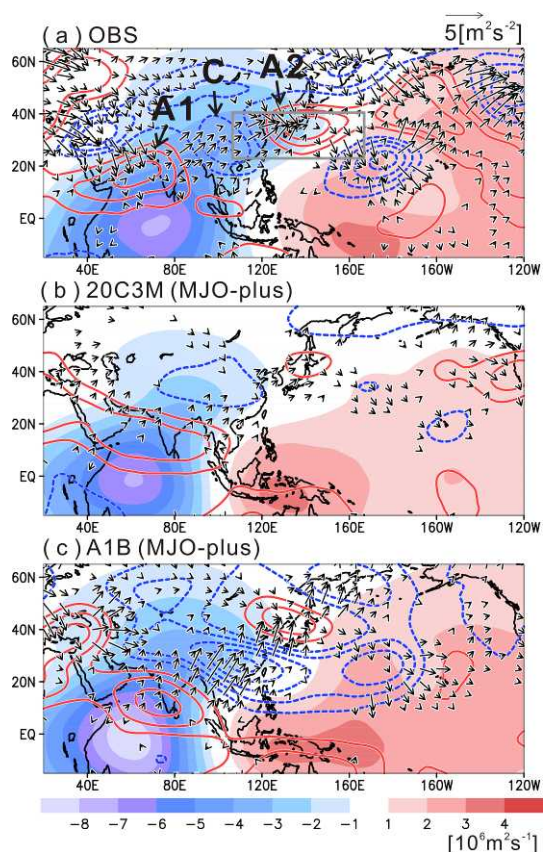
### (3) 熱帯対流と東アジア域との関係について

16個のマルチ気候モデルの20世紀再現実験データセットを用いて、北半球冬季の東アジアにおけるMJ0のテレコネクション再現性を評価した。5モデル(BESTモデル)が、MJ0による東アジア域の対流活動のテレコネクションを高スキルで再現しており、他モデルよりMJ0対流シグナルの強さを良く再現していることが分かった(図(6)-6)。波活動フラックスとロスビー波ソースの解析から、MJ0対流によって励起された中緯度上層波列は、増幅しながらアジアジェットに沿って北東へ伝播し、東アジアの対流活動の変動に影響を与えることが示された。全てのモデルは、アジアジェット上の気候学的絶対渦度を良く再現しているが、中緯度波列とロスビー波ソースは、BESTモデルでのみ再現性が良かった。さらにBESTモデルのみが、熱帯から東アジア域への下層の水蒸気輸送を良く再現していた。これは特に、熱帯太平洋上のMJ0対流抑制域において、冷却偏差に対するロスビー応答として形成される北太平洋高気圧性循環偏差が、BESTモデルでのみ良く再現されていることに起因する。

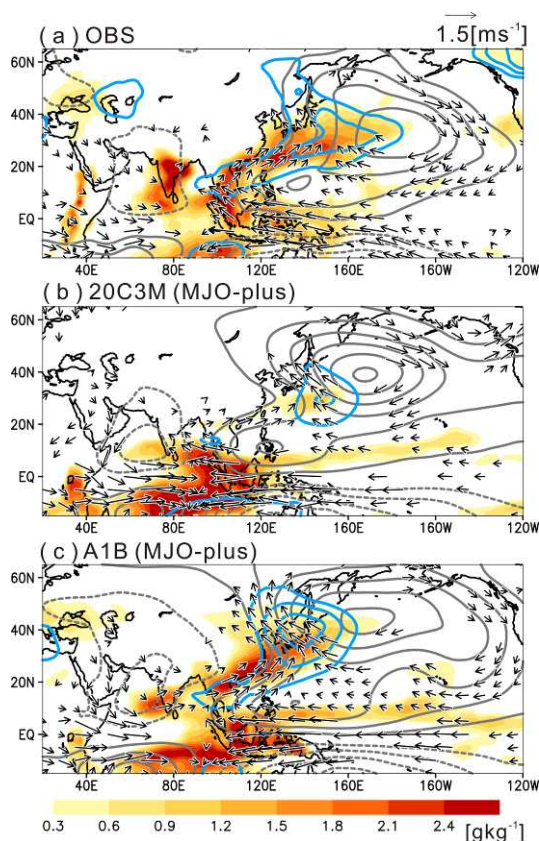
将来変化に関しては、MJ0対流シグナルのスコアが比較的高い12モデルの温暖化実験データセットを用いて、北半球冬期におけるMJ0及び、東アジアと北西太平洋域におけるMJ0テレコネクションを調べた。インド洋域で平均したMJ0対流シグナル振幅は、7モデル(MJ0-plusモデル)で増加し、他の5モデル(MJ0-minusモデル)で減少を示した。現在気候ではMJ0対流シグナルと熱帯域のSSTパターン相関には有意な正の相関があることから、将来気候においてSST変化との関係を調べた。MJ0-plusモデルは、ENSO振幅の増加を示した。MJ0-plusモデルにおける冬期SST変化は、MJ0-minusモデルよりもよりEl Nino的な変化を示しており、かつ正のインド洋ダイポールモードに似た増加パターンを示した。MJ0-plusモデルでは、熱帯インド洋西部～中部のMJ0対流シグナルの増加により、東アジアの対流活動も増加すると予測される。さらにMJ0-plusモデルでは、中緯度域の亜熱帯ジェットに沿って波列をなす上層循環偏差が、熱帯インド洋西部～中部域のMJ0対流と上層発散風強化に伴って、より増幅する(図(6)-7)。MJ0-plusモデルでは、さらに熱帯から日本の南域へかけての下層の熱・水蒸気輸送の増加を示す(図(6)-8)。これらの増加は、結果として東アジア域の対流活動強化に繋がることを示された。上記のような変化は、MJ0-minusモデルでは見られなかった。



図(6)-6 熱帯インド洋MJ0-東アジア域の対流テレコネクションの再現性。(a) 観測、(b) 5つのBESTモデル合成図を示す。



図(6)-7 MJO-plusモデルにおける、200hPa発散偏差(カラー)、300hPa流線関数偏差(コンター)と波活動フラックス(ベクトル)のMJO indexに対する回帰。(a)観測、(b)現在気候、(c)将来気候。



図(6)-8 図(6)-7と同様。ただし、850hPa比湿偏差(カラー)、流線関数偏差(コンター)、水平風偏差(ベクトル)。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

気候予測モデルにおける熱帯域の大気海洋相互作用現象再現性を定量的に評価し、再現性の高いモデルに共通する特徴や、再現された現象が持つ系統的な誤差を明らかにした。この誤差の中には、SST分布や下層風の収束等、熱帯域の対流活動にとって本質的に重要な要素も含まれており、MJO等の将来変化を知るためにはMJO再現性の高いモデルを用いる必要がある一方で、見掛け上、MJOの再現性が高くても、完全な信頼性を持っているとは言えないことが示された。また、中緯度東アジア域の気候変動予測にとって、熱帯域の現象の再現性と将来予測の重要性が確認された。

### (2) 環境政策への貢献

熱帯域の大気海洋相互作用現象の再現性を評価することにより、マルチモデルの相互比較を客観的に行い、東アジア域においても、より信頼性の高い将来予測を提示することが可能とな

る。今後、他のテーマと共同して、より一層の成果の広報・普及に努める。

## 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) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, N. Sato, and M. Yoshizaki (2009): The oceanic response to the Madden-Julian Oscillation and ENSO. SOLA, 5, 93-96.
- 2) Sato, N., C. Takahashi, A. Seiki, K. Yoneyama, R. Shiroyaka, and Y.N. Takayabu (2009): An evaluation of the reproducibility of the Madden-Julian oscillation in the CMIP3 multi-models. J. Meteor. Soc. Japan, 87(4), 791-805.
- 3) Sato, N., K. Yoneyama, Y.N. Takayabu, R. Shiroyaka, and M. Yoshizaki (2010): Variability of oceanic surface and subsurface layers associated with the northward-propagating intraseasonal variability. Deep-Sea Res. II, 57, 1201-1211.
- 4) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, and R. Shiroyaka (2010): The impact of trade surges on the Madden-Julian Oscillation under different ENSO conditions. SOLA, 6, 49-52.
- 5) Seiki, A., Y.N. Takayabu, T. Yasuda, N. Sato, C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shiroyaka (2011): Westerly wind bursts and their relationship with ENSO in CMIP3 models. J. Geophys. Res., 116, D03303.
- 6) Yokoi, S., Y.N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Y. Kosaka, T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, and M. Watanabe (2011): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. J. Appl. Meteor. and Clim., 50, 1666-1675.
- 7) Takahashi, C., N. Sato, A. Seiki, K. Yoneyama, and R. Shiroyaka (2011): Projected future change of MJO and its extratropical teleconnection in East Asia during the northern winter simulated in IPCC AR4 models. SOLA, 7, 201-204.
- 8) Takahashi, C., K. Yoneyama, N. Sato, A. Seiki, R. Shiroyaka, and Y.N. Takayabu (2012): The Madden-Julian Oscillation and extratropical teleconnection over East Asia during the Northern winter in IPCC AR4 climate models, J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 361-371.
- 9) Nishii, K., T. Miyakawa, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y.N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, K. Oshima, N. Sato, and Y. Tsushima (2012): Relationship of the reproducibility of multiple variables among global climate models. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 87-100.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない。

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 佐藤尚毅, 清木亜矢子, 米山邦夫, 城岡竜一, 高藪縁, 吉崎正憲: IPCC AR4気候モデルにおける、MJ0に伴う下層の力学、熱力学場の再現性. 2007年度日本気象学会秋季大会, 札幌, 2007年10月.
- 2) Seiki, A., Y.N. Takayabu, H. Kubota, H. Yamada, K. Yoneyama, R. Shirooka, and M. Yoshizaki: Synoptic-scale disturbances embedded in the Madden-Julian Oscillation computed under the different ENSO phases. 28th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Orlando. USA, April 2008.
- 3) 清木亜矢子, 高藪縁, 佐藤尚毅, 高橋千陽, 米山邦夫, 城岡竜一, 吉崎正憲: IPCC AR4モデルにおける西風バースト発生状況とENSOとの関係. 2008年度日本気象学会春季大会, 横浜, 2008年5月.
- 4) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一, 高藪縁, 吉崎正憲: IPCC AR4気候モデルで再現されたMJ0の構造. 2008年度日本気象学会春季大会, 横浜, 2008年5月.
- 5) 佐藤尚毅, 城岡竜一, 高藪縁, 吉崎正憲: MJ0に伴う海洋上層の変動. 2008年度日本海洋学会秋季大会, 呉, 2008年9月.
- 6) 佐藤尚毅, 城岡竜一, 吉崎正憲, 高藪縁: 北半球夏季の北進する季節内変動の定量的解析. 2008年度日本地理学会, 盛岡, 2008年10月.
- 7) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一, 吉崎正憲: IPCC AR4気候モデルで再現されたMJ0に伴う大気海洋結合. 2008年度日本気象学会秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 8) 清木亜矢子, 高藪縁, 佐藤尚毅, 米山邦夫, 吉崎正憲: 熱帯季節内変動に対する海洋応答とENSO位相. 2008年度日本気象学会秋季大会, 仙台, 2008年11月.
- 9) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一, 高藪縁, 吉崎正憲: IPCC AR4気候モデルで再現されたMJ0の構造. 2009年度日本気象学会春季大会, つくば, 2009年5月.
- 10) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, N. Sato, and M. Yoshizaki: The oceanic response to the Madden-Julian Oscillation and ENSO. MOCA-09 (IAMAS), Montreal, Canada, July 2009.
- 11) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一, 吉崎正憲, 高藪縁: 暖水域を北進する季節内変動に伴う海洋上層の変動. 2009年日本海洋学会秋季大会, 京都, 2009年9月.
- 12) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一, 吉崎正憲, 高藪縁: 季節内変動に伴う海洋上層の変動. 平成21年度防災研究所研究集会「異常気象と長期変動」, 場所, 2009年10月.
- 13) 佐藤尚毅: 大気海洋結合のある浅水波方程式系において導出された位相速度の遅い東進モード. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 14) 佐藤尚毅, 高橋千陽, 清木亜矢子, 米山邦夫, 城岡竜一, 高藪縁: CMIP3マルチ気候モデルにおけるMJ0再現性評価. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.

- 15) 清木亜矢子, 高藪縁, 米山邦夫, 城岡竜一: 異なるENSO位相における熱帯季節内振動と偏東風サージとの関係. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 16) 高橋千陽, 清木亜矢子, 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一: インド洋SSTの北半球夏期における亜熱帯アジアへの影響-CMIP3マルチ気候モデル再現性評価. 2009年度日本気象学会秋季大会, 福岡, 2009年11月.
- 17) Seiki, A., Y.N. Takayabu, K. Yoneyama, and R. Shirooka: The impact of trade surges on the Madden-Julian Oscillation under different ENSO conditions. 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, U.S.A., May 2010.
- 18) Takahashi, C., N. Sato, A. Seiki, K. Yoneyama, R. Shirooka, and Y.N. Takayabu: Impact of the Madden-Julian Oscillation on convection and circulation in the subtropics to midlatitudes in the IPCC AR4 simulations. 29th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, U.S.A., May 2010.
- 19) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一: 暖水域を北進する季節内変動における大気海洋結合の役割. 2010年度日本気象学会春季大会, 東京, 2010年5月.
- 20) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一: 暖水域を北進する季節内変動における大気海洋結合の役割. 第2回熱帯気象研究会, 高松, 2010年9月.
- 21) 清木亜矢子, 高藪縁, 安田珠幾, 佐藤尚毅, 高橋千陽, 米山邦夫, 城岡竜一: CMIP3マルチモデルにおける西風バーストとENSOの再現性とその将来変化. 2010年度日本気象学会秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 22) 高橋千陽, 佐藤尚毅, 清木亜矢子, 米山邦夫, 城岡竜一: CMIP3マルチ気候モデルにおける冬季MJOと亜熱帯・中緯度アジア域への影響の再現性および将来変化. 2010年度日本気象学会秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 23) 佐藤尚毅, 高橋千陽, 清木亜矢子, 米山邦夫, 城岡竜一: CMIP3マルチ気候モデルにおける季節変動の再現性. 2010年度日本気象学会秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 24) 佐藤尚毅, 米山邦夫, 城岡竜一: 暖水域を北進する季節内変動における大気海洋結合の役割. 東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「地球流体における流れの変動性と持続性の力学」, 柏, 2010年12月.
- 25) Takahashi, C., K. Yoneyama, and R. Shirooka: MJO-ENSO teleconnection during the boreal winter in projections of future climate in the IPCC AR4 simulations. 91th AMS Annual Meeting, Michio Yanai Symposium, Seattle, Washington, U.S.A., January 2011.
- 26) 佐藤尚毅, 高橋千陽, 清木亜矢子, 米山邦夫, 城岡竜一: CMIP3マルチ気候モデルにおける、MJOの冬季アジアモンスーンへの影響の再現性評価. 2011年度日本気象学会春季大会, 東京, 2011年5月.
- 27) Seiki, A., Y. N. Takayabu, T. Yasuda, N. Sato, C. Takahashi, K. Yoneyama, and R. Shirooka: Westerly wind bursts and their relationship with ENSO in CMIP3 models. IUGG2011, Melbourne, Australia, June 2011.
- 28) 佐藤尚毅, 齊藤崇裕, 城岡竜一: 黒潮/黒潮続流域周辺における冬季の降水量の経年変化. 東京大学大気海洋研究所国際沿岸海洋研究センター研究集会「北日本を中心とした降水・降雪特性に関わる海洋大気陸面過程」, 大槌, 2011年11月.



- 29) 佐藤尚毅, 齊藤崇裕, 城岡竜一: 関東地方南部における冬季の降水量の経年変化. 2011年度日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011年11月.
- 30) 佐藤尚毅, 齊藤崇裕, 城岡竜一: 黒潮/黒潮統流域周辺における冬季の降水量の経年変化. 第13回地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」, 福岡, 2011年12月.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) Flatau, M., P. Flatau, P. Phoebus, and P. P. Nuler (1997): The feedback between equatorial convection and local radiative and evaporative processes: The implications for intraseasonal oscillations. *J. Atmos. Sci.*, 54, 2373-2386.
- 2) Kim, B. -M., G. -H. Lim, and K. -Y. Kim (2006): A new look at the mid latitude-MJO teleconnection in the northern hemisphere winter. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132, 485-503.
- 3) Lin, J. -L., G. N. Kiladis, B. E. Mapes, K. M. Weickmann, K. R. Sperber, W. Y. Lin, M. C. Wheeler, S. D. Schubert, A. D. Genio, L. J. Donner, S. Emori, J. -F. Gueremy, F. Hourdin, Rasch, P. J., E. Roeckner, and J. F. Scinocca (2006): Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I: Convective signals. *J. Climate*, 19, 2665-2690.
- 4) Seiki, A., and Y. N. Takayabu, 2007: Westerly wind bursts and their relationship with Intraseasonal variations and ENSO. Part I: Statistics. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3325-3345.
- 5) Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183-7192.
- 6) Wheeler, M., and K. M. Weickmann (2001): Real-time monitoring and prediction of modes of coherent synoptic to intraseasonal tropical variability. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2677-2694.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (7) 季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性とその将来変化に関する研究

(独) 海洋研究開発機構

地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム

河谷芳雄・二宮洸三

<研究協力者>

(独) 海洋研究開発機構 地球環境変動領域 地球温暖化予測研究プログラム 野田彰

Understanding Climate Change group, Hadley Centre, Met Office (英国) 對馬洋子

(独) 国立環境研究所 地球環境研究センター 温暖化リスク評価研究室 横島徳太

平成 19 度～平成 23 年度累計予算額 45,819 千円

(うち、平成 23 年度予算額 : 5,510 千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 第3期結合モデル国際比較プロジェクト (CMIP3) モデルによる20世紀再現実験の結果と観測データを比較して、メイユ・梅雨前線降水帯の出現緯度・降水量の20年平均場における再現性、年々変動の様相の再現性、梅雨期強雨の空間的・時間的集中性の再現を解析した。20世紀再現実験で降雨帯が適切に再現されるのは6月のみである。21世紀における降水帯の年々変動、強雨の集中性の変化予測は不確実であり、モデルの高分解能化と適切な積雲スキムの採用が必要である。次に20世紀再現実験で再現された8月の太平洋高気圧に関する再現性を調べた。モデルのタイプは太平洋高気圧が西へ張り出す西方伸張型と、東へ後退する東方後退型のモデルに分けられる。西方伸張型モデルは東方後退型モデルに比べ、弱いインドモンスーンの西風、フィリピン東方の少ない降水量、太平洋高気圧西部での小さい年々及び月内変動という特徴が見られた。

季節変化における雲の放射フィードバックは殆どのモデルで太陽放射では正のフィードバックを示すが、太陽放射のフィードバックではモデルによって様々であった。また、モデルのカレンダー設定の違いにより大気上端での入射太陽光がモデル間で異なっていた。モデルによるアンサンブル (マルチモデルアンサンブル) と、1つのモデルにおいて不確実パラメータを変化させて作成したアンサンブル (物理アンサンブル) を用いて現在気候再現性を行った。

地球温暖化時の赤道準2年振動 (QBO) の変化に関する研究を行った。重力波パラメタリゼーションを用いずともQBOが再現可能な気候モデルを長期積分し、将来の海面水温はCMIP3のマルチモデル平均結果を利用した。温暖化に伴ってQBOの周期は伸び、振幅は弱まり、位相が下部成層圏まで下り難くなることが判明した。更に二酸化炭素濃度と海面水温の効果を切り分けた理想実験を行ったところ、QBO変化に及ぼす海面水温と二酸化炭素濃度の比は約3:1であることが分かった。また、波動と平均場の相互作用のデータ解析で有用な3次元波フラックスを導いた。

**【キーワード】** 地球温暖化、CMIP3マルチ気候モデル、放射フィードバック、季節性現象、対流圏—成層圏大規模循環場

## 1. はじめに

本サブテーマでは、CMIP3マルチモデルの20世紀再現実験と将来予測実験のデータを用いて、季節性気象現象とその放射フィードバックの再現性、及びそれらの将来変化に関する研究を行っている。温暖化時に季節性現象がどのように変化するか明らかにすることは実社会と深く関連する為、科学的にも社会的にも重要である。本サブテーマでは、(1) 夏季東アジア域の気候に影響を与える梅雨前線と太平洋高気圧の再現性及び将来変化、(2) 気候感度・降水に影響を与える雲および放射場およびそのフィードバックのメトリックの開発・評価及びアンサンブル評価、(3) 力学場・放射場の変化と対応した地球温暖化時の対流圏一成層圏大規模循環場の特徴及びそれらを記述可能な方程式系に着目し研究を遂行した。

### (1) 夏季東アジア域の気候に影響を与える梅雨前線と太平洋高気圧の再現性及び将来変化

メイユ・梅雨前線は日本の気候に重要であるが、気候モデルでの再現性が難しい現象として知られている。CMIP3マルチモデルデータを用いて、20世紀再現実験における20年平均場における5, 6, 7月のメイユ・梅雨前線降水帯及び太平洋亜熱帯高気圧南縁の降水量極大ゾーンの出現緯度と降水量の再現精度を評価し、降雨帯・降水量のモデル間の差異について調べる。更に降水帯の年々変動、および強雨の空間的・時間的集中性の再現性を調べることで、21世紀における変化を実態的に議論可能かどうか判断する。続いて東アジアの気候と密接に関連している太平洋高気圧の変動を調べる。太平洋高気圧の勢力は春先から次第に勢力を強めながら日本付近まで張り出し、6月には太平洋高気圧北西縁に沿って日本南岸に梅雨前線が形成される。7-8月に掛けて高気圧の勢力は更に拡大し、梅雨前線を北方に押し上げ、高気圧に覆われた地域は高温となり盛夏をもたらす。また太平洋高気圧の西への張り出し方の違いは、猛暑・冷夏とも深く関連し、更に日本周辺の台風の進路とも関係する。太平洋高気圧西部は複合的な影響を受けながら時空間変動を起こす為、気候モデルでの適切な再現が難しい現象の1つである。また梅雨前線の再現性も太平洋高気圧の分布に強く影響を受けている。現実大気データの解析から、太平洋高気圧の時空間変動は6, 7, 8月で大きく異なる様相を示す事が分かっており (Kawatani et al. 2008)<sup>2)</sup>、モデルでの再現性が季節によりどう異なるかを調べる必要がある。

### (2) 気候感度・降水に影響を与える雲および放射場およびそのフィードバックのメトリックの開発・評価及びアンサンブル評価

季節変化は観測データが得られる最大の気候変動であることから、季節変化における日射の緯度分布の変化および地球大気および雲の応答について、観測、客観解析データを用い、理解のための解析を行うこと、またモデルにおける再現性を検証した。放射フィードバックを観測、モデルについて求め、季節変化という気候変化におけるモデルの放射応答を評価することが必要である。特にそれらを簡便に評価できるような指標(メトリック)の開発は、モデル開発を行っている研究グループにとって有益である。気候予測の不確実性を推定するために、気候モデルによる数値実験のアンサンブルを作成する。1つのモデルによるアンサンブルの解析では、用いるモデルによって結果が変わる可能性がある為、マルチモデルアンサンブルの比較を行う。

### (3) 力学場・放射場の変化と対応した地球温暖化時の対流圏－成層圏大規模循環場の特徴及びそれらを記述可能な方程式系

赤道域の成層圏には東風と西風が約2年周期で交代している、赤道準2年振動(QB0)と呼ばれる現象がある。QB0は対流圏の積雲対流活動によって生成された大気波動が成層圏まで伝わることによって引き起こされている。QB0は赤道域の成層圏で見られる現象だが、その影響は南北方向には北極－赤道－南極へ、高度方向には対流圏から成層圏、更に上空の中間圏(高度約50km～85km)へと、非常に広い範囲まで及んでおり、大気－海洋を含めた気候変動を考えるうえで重要な気象現象の1つである。ところで気候変動に関する政府間パネル(IPC)C第4次成果報告書には、温暖化に伴ってQB0がどのように変化するかを示した研究は無い。CMIP3モデルデータで再確認したところ、QB0を表現しているモデルは無く、また波動－平均流相互作用や、放射場・残差子午面循環の変化を調べるにはデータ出力間隔が粗い。温暖化時のQB0に関する知見は殆ど無い。さらに温暖化時のQB0変化に対して、海面水温の変化と二酸化炭素濃度の変化がそれぞれどの程度寄与しているのかも明らかにする必要がある。またQB0等波動－平均流相互作用や残差循環を調べる上で、基本場の東西方向の変化を考慮した3次元的な定式化が必要である。

## 2. 研究開発目的

### (1) 梅雨前線と太平洋高気圧の再現性及びそれらの将来変化

CMIP3の予測実験データによるメイユ・梅雨前線降水帯(MFZ, BFZ)の21世紀予測可能性を評価する為に、まずCMIP3の20世紀再現実験におけるMFZ・BFZの再現に関する各モデルの性能評価を確認する。降水帯の緯度と降水量を評価対象として20年平均値についての多モデルアンサンブル平均(MEA)とそれからの標準偏差(STD)に基づいて評価する。次いで、これらの要素に関する年々変動と強雨の時間的・空間的集中性の再現精度を評価して、21世紀予測が実態的意味を持つか否かを検討する。また、CMIP3モデルにおける夏季太平洋高気圧の気候場の特徴(各々のモデルは現実大気における西方伸長年・東方後退年のどちらを再現しやすい傾向にあるのか)、およびそれらと月内変動との関連性を調べる。

### (2) 気候感度・降水に影響を与える雲および放射場およびそのフィードバックのメトリックの開発・評価及びアンサンブル評価

テーマ2諸研究者が開発を行っているメトリックの雲・放射場リファレンスデータとして必要不可欠な衛星データを整備する。季節変化は観測データが得られる最大の気候変動であることから、季節変化における日射の緯度分布の変化および地球大気および雲の応答について、観測、客観解析データを用い、理解のための解析を行う。放射応答を議論するにあたり、諸モデルにおけるカレンダーの取り扱いの違いは太陽入射という放射強制の分布に影響を与える可能性がある。モデルカレンダーの取り扱いについて調査、それが太陽放射の季節変化に与える影響についても検証する。モデルにおける地球大気および雲の応答の再現性を検証する。放射フィードバックを観測、モデルについて求め、季節変化という気候変化におけるモデルの放射応答を評価する。さらに季節変動における雲放射場を解析、再現性を評価するメトリックを提案する。

気候予測の不確実性を推定するためには、気候モデルによる数値実験のアンサンブルを作成する必要がある。1つのアプローチがマルチモデルアンサンブル(MME)であり、これは異なるモデ

ル実験によって構成される。もう1つのアプローチが物理摂動アンサンブル（PPE）であり、これは1つのモデルにおける不確実パラメータを幅広く振って実験を行うことにより得られる。本研究ではアンサンブルによる不確実性について調べる。

### （3）力学場・放射場の変化と対応した地球温暖化時の対流圏－成層圏大規模循環場の特徴及びそれらを記述可能な方程式系

非定常重力波パラメタリゼーションを組み込まない気候モデルでQB0の再現に成功している研究グループは我々のグループを含め世界に数例しかない。今回、地球シミュレータを用いて我々の気候モデルを長期間計算し、地球温暖化時のQB0の変化を世界に先駆けて明らかにすることを目的とする。更に3次元の波動-基本場の相互作用を一般的に取り扱える変換オイラー平均法を定式化し、QB0等の数値実験や観測などで得られた実際のデータへ適用する。

## 3. 研究開発方法

### （1）梅雨前線と太平洋高気圧の再現性及びそれらの将来変化

CMIP3の22モデル出力データと観測値（GPCP、CMAP）との比較によるモデル再現能力の評価をおこない、それに基づいて予測精度の検討を行う。再現性の評価は、メイユ・梅雨前線降水帯（MFZ、BFZ）の出現緯度と降水帯内降水量を対象とする。全モデルを比較するため水平解像度は全て2.5度×2.5度に統一した。20年平均場における評価に加え、年々変動及び強雨の空間的・時間的集中性についても評価する。同様な解析を21世紀予測実験についても行い、21世紀予測の可能性について論じた。多モデルアンサンブル平均（MEA）と、それからの標準偏差（STD）によって評価する。太平洋高気圧の月内変動を調べる為に、20世紀再現実験（20c3m）及び将来気候（SRES-A1Bシナリオ）共に東西風・南北風の日平均データや他の必要な物理量が全て整備されている16個のモデルデータを用いる。検証には同期間のヨーロッパ中期気象予報センターが提供している再解析データ（ERA-40）データを用いた。水平解像度は全て2.5度×2.5度に統一した。

### （2）季節変化における放射フィードバック及び不確実性を推定するためのアンサンブル解析、雲放射場およびそのフィードバックのメトリックの開発・評価

雲放射データ及び放射場について解析可能な観測データを入手、晴天放射の補正を行った後に気候値を作成、S5-2メトリック用リファレンスデータの仕様に基づいた解像度に変更した。CMIP3モデルデータ整備と共にモデルのカレンダー情報を収集した。月平均入射太陽光データについて、衛星観測とモデルデータについて各月気候値の比較を行った。

太陽放射の季節変化に関しては、大気上端での入射太陽光の各月気候値について、各モデルの軌道要素について調査を実施した。

次に現実大気およびモデルに於ける全球での放射フィードバックを求めた。現実大気については高解像度客観解析データERA40及び最新の衛星観測データCERESを用いた。方法はTsushima and Manabe (2001)<sup>4)</sup>に従い、各年の地表気温および大気上端での太陽放射及び地球放射の入射および反射、射出光について、全天および晴天でのフラックスデータから各月の気候値を作成した。これらの放射フラックスから太陽放射および地球放射における雲の放射強制力を求めた。

アンサンブル解析については、MMEではモデルパラメータの不確実性を考慮することができない

という欠点がある。一方これまでのPPEによる研究では、1つのモデルによるPPEの解析がなされてきたが、これは用いるモデルによって結果が変わる可能性がある。このため、異なるモデル（マルチモデル）によるPPEの比較を行った。

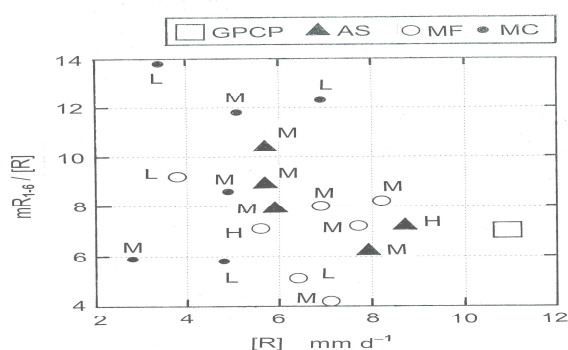
### （3）力学場・放射場の変化と対応した地球温暖化時の対流圏—成層圏大規模循環場の特徴及びそれらを記述可能な方程式系

非地形成重力波パラメタリゼーションを用いなくてもQBOをシミュレート可能で、且つ長期積分も可能である解像度の気候モデルを用いて90年間積分を行った。現在気候実験では、英国ハドレーセンターの海面水温と海氷の気候値分布を境界条件として使用した。将来気候実験の海面水温はCMIP3モデルデータを活用した。また大気などの密度成層流体について良い近似で成り立つ Boussinesq 流体について、波動の時間・空間スケールよりも緩やかに変化する基本場を仮定（WKB 近似）して、一般的な波動と基本場の相互作用を記述する運動方程式を導く。

## 4. 結果及び考察

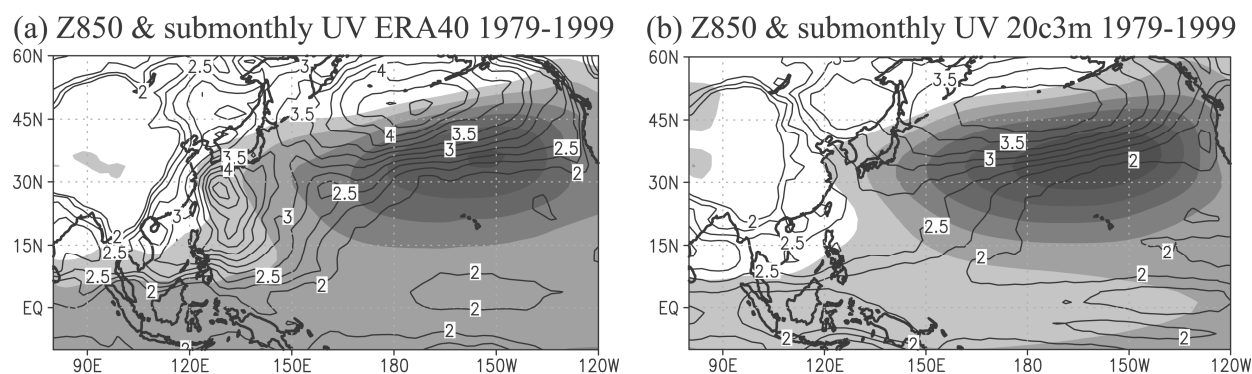
### （1）梅雨前線と太平洋高気圧の再現性及びそれらの将来変化

現在及び将来気候におけるメイユ・梅雨前線降水帯に関するモデル相互比較を行った。20世紀再現実験については20年平均場における降水帯のアンサンブル平均により6月の状態は妥当に再現されるが、季節遷移期の5および7月には妥当に再現されない。さらに降水帯の年々変動は多くのモデルで適切に再現されない。特に強雨の時間的空間的集中性を北緯30-35度、東経130-135度の領域について解析した。その再現性は極めて貧弱である。図(7)-1の縦軸は集中性のインデックスであり横軸は領域平均降水量である。記号は積雲スキムを示し、L、M、Hは低、中、高分解能モデルを示す。GPCPは観測データである。このように領域平均降水量、集中性の再現性はモデル間差異が非常に大きい。これはそもそも、日降水量の再現性がよくないからであり、遑れば、狭い降水帯に集中する今日の再現性が不十分なためである。なお、Arakawa-Shubert型（AS）スキムを用いた中・高分解能モデルの再現性は比較的に良好である。20年平均場の6月においてのみ再現性がみられているが、長期間平均場では短期間の再現性の不足が打ち消されているからである。信頼できる21世紀予測のためには、短期間についての再現性の向上が不可欠である。

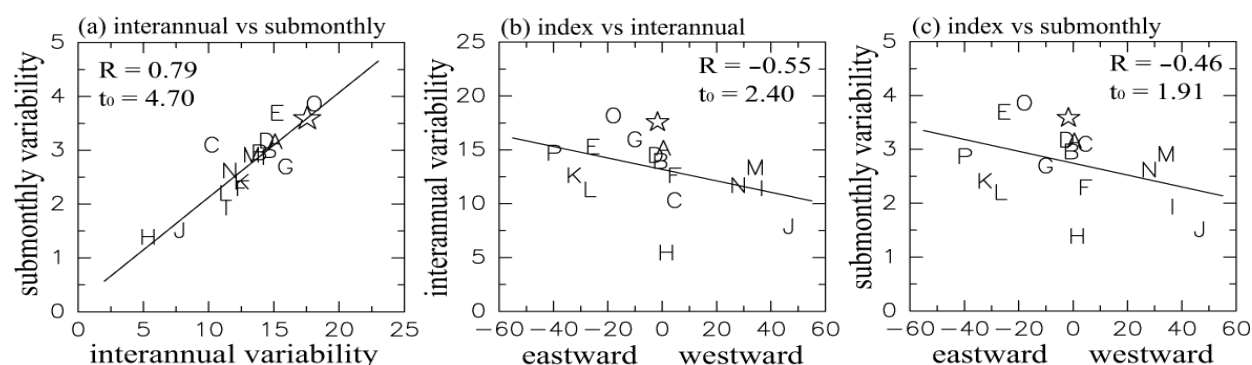


図(7)-1 集中性のインデックス。横軸は領域な平均降水量、縦軸が集中性を表す。記号は積雲スキムを示し、Arakawa-Shubert型（AS）、Mass-Flux型（MF）、対流調整型（MC）に対応する。L、M、Hは低、中、高分解能モデルを示す。GPCPは観測データである

次にCMIP3モデルにおける夏季太平洋高気圧の気候場の特徴及びそれらと月内変動（周期31日以下の変動）との関連性を調べた。図(7)-2にERA-40とCMIP3マルチモデル平均した、8月の850hPaにおける月平均高度場（影）および月内変動の気候値分布（コンター）を示す。マルチモデル平均でみた太平洋高気圧の気候値分布は、観測と類似した構造を示す。一方CMIP3マルチモデル平均で表現される月内変動擾乱は現実大気と比べ、西部太平洋上で明らかに小さい。モデル間の相違は特に北太平洋南西部で非常に大きく、太平洋高気圧が西へ張り出す西方伸張型と、東へ後退する東方後退型のモデルが存在していた。太平洋高気圧の東西変動を表す指標として、太平洋高気圧西部領域（東経123.75-151.25度、北緯16.25-31.25度）で平均した850hPa高度場について、各モデルのマルチモデル平均からの偏差を計算した。この指標が正の場合は西方伸張型、負の場合は東方後退型のモデルに相当し、それぞれ4つのモデルを選んでコンポジット解析を行った。その結果、西方伸張型モデルは東方後退型モデルに比べ、インドモンスーンの西風が弱い、フィリピン東方の降水量が弱い領域の西側で海面水温が高いという特徴が見られた。またwarm pool付近での海面水温の東西勾配の再現性は、気候値太平洋高気圧の再現性と関連があることが分かった。図(7)-3に太平洋高気圧西部における年々変動と月内変動、東西変異と年々変動及び東西変異と月内変動の散布図を示す。月内変動が大きいほど、大きな年々変動を再現する傾向、大きな年々変動を再現するほど、気候値太平洋高気圧は東方後退型、大きな月内変動を再現するほど、気候値太平洋高気圧は東方後退型という関係が見られることが分かった。



図(7)-2 850hPaにおける高度場(影)と水平風の月内変動(コンター)の気候値分布。(a) ERA-40、(b) CMIP3マルチモデル平均。高度場1480m以上の領域に20m間隔で影。



図(7)-3 太平洋高気圧西部における(a)年々変動と月内変動、(b)東西変異と年々変動、(c)東西変異と月内変動の散布図。アルファベットは各モデル、☆は客観解析データの値を示す。

## (2) 季節変化における放射フィードバック及び不確実性を推定するためのアンサンブル解析、雲放射場およびそのフィードバックのメトリックの開発・評価

雲放射データを整備し、Yokoi et al. (2011)<sup>5)</sup>によるメトリックのクラスター解析による独立性の評価の研究に用いられた。Nishii et al. (2011)<sup>3)</sup>の多変量解析による諸物理量の再現性能の関連の研究にも使われた。更にIchikawa et al. (2011)<sup>1)</sup>の低緯度帯の雲放射解析研究にも用いられた。

各国モデルの太陽定数計算の現状を把握するために、12のモデルについて、太陽軌道要素、具体的には離心率、黄道傾斜、近日点値についての調査を行い、表(7)-1にまとめた。またデータより1年の日数を調べた。軌道要素の値、1年の日数ともにモデル間でばらついていることが分かった。気候モデルで軌道要素、カレンダーを変化させ、影響を見積もった。軌道要素及びカレンダーの違いは、全球平均日射にはほとんど影響を与えないが、60度以上極域に領域を特定した場合、太陽放射には $10\text{Wm}^{-2}$ 程度までカレンダーの影響によるみかけの値の違いが見られる可能性が考えられる。

表(7)-1 IPCC-AR4 モデルで用いられている基本太陽軌道要素と1年の日数

IPCC-AR4 モデルで用いられている基本太陽軌道要素と1年の日数					
モデル	離心率 1980年から 1999年	黄道傾斜 1980年から 1999年	近日点 1980年から 1999年	1年の日数	太陽定数 ( $\text{Wm}^{-2}$ )
CCCMA		No reply yet		365	
GFDL	0.01671	23°.439	102°.931	365	~1366
GISS-E	0.0167	23°.44	102°.9	365	1366.3
GISS-OM	0.0167	23°.44	102°.92656	Gregorian	1367
IAP	0.016715	23°.441	102°.7	365	1367
INMCM	0.016715	23°.441	102°.7	365	1368.9
IPSL	0.016715	23°.441	102°.7	360	1365
MIROC	0.016724	23°.446	102°.04	Gregorian	1367
MPI ECHAM-5	0.016717	23°.43945	102°.593437	Gregorian	1367
MRI	Complex equation for declination			365	
NCAR_CCSM	0.0167772	23°.44107	102°.7242	365	1367
NCAR_PCM		As NCAR		365	1367
UKMO	0.01671022	23°.4392911	102°.94719	360	1365
CSIRO	0.016724	23°.446	102°.04	365	1367.4
ECHO-G	0.016715	23°.441	102°.7	360	1365
Meteo. Fr, ARPEGE	0.016704	23°.4393°	102°.9382	Gregorian	1370
A. Berger 1978	0.01671308	23°.4394674	102°.647	Gregorian	1367
ISCCP FD	0.016710	23°.442	103°.628 (1980)	Gregorian	1367

衛星観測およびモデルから季節変化に伴うフィードバックについて調査した。観測によると、雲の放射フィードバックは太陽放射、地球放射どちらに対しても値が小さく、符号としては太陽放射については正、地球放射については負である。一方モデルの放射フィードバックは正味の放射については、全天放射、晴天放射、雲放射強制力の全てにおいて、おおむね観測と一致する。しかし日射の反射、地球放射に分けてみると、雲放射強制力フィードバックでモデルと観測のバイアス及びばらつきが顕著である。日射の反射について数は多くないが一部のモデルで非常に大



きな雲の反射の強まりが見られる。地球放射に関しては、ほとんどのモデルで雲の温室効果の強まりが見られる。

マルチモデルと観測データとの比較によると、太陽放射においてはモデルの雲の放射フィードバックは正のフィードバックを示すモデル、負のフィードバックを示すモデルがあり、大きくばらついていることが分かった。地球放射においては、モデルの雲の放射フィードバックはほとんどのモデルにおいて正の値を持つ傾向があることが分かった。またモデルにおける観測の放射フィードバックの再現性と空間分布再現性の関連を調べたところ、季節変化における雲のフィードバックが地球放射でほとんどのモデルで正のバイアスを示す点について、モデルの再現性が熱帯降水帯（亜熱帯高気圧）の分布の再現性と関連する傾向が見られた。

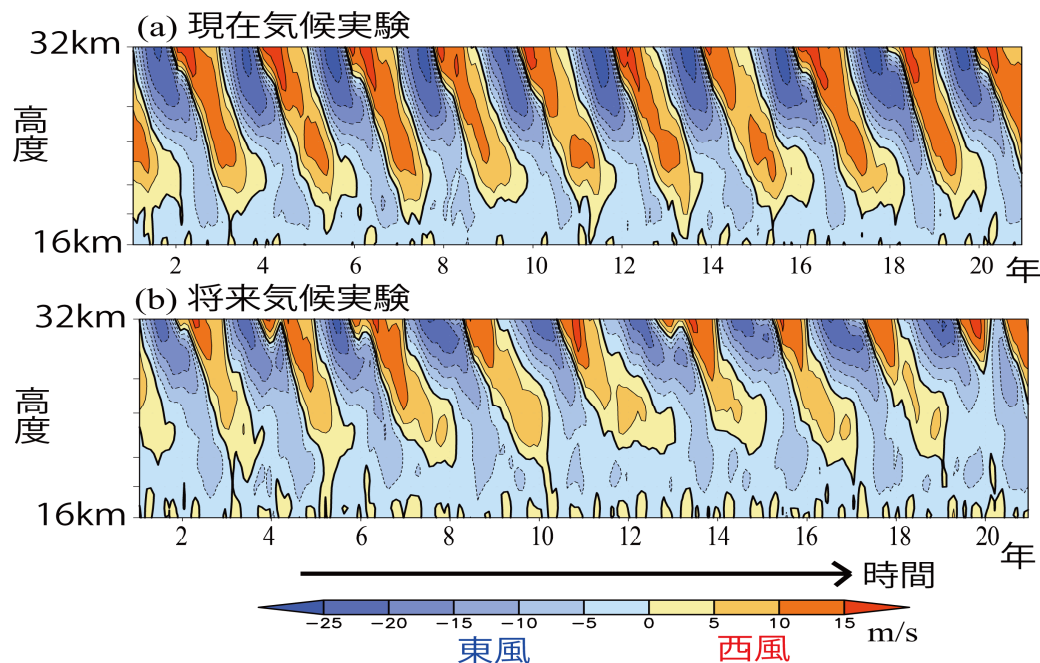
次にアンサンブルを用いた現在気候再現性の評価について述べる。気候予測の不確実性を推定するためには、気候モデルによる数値実験のアンサンブルを作成する必要がある。1つのアプローチがマルチモデルアンサンブル（MME）であり、これは異なるモデル実験によって構成される。もう1つのアプローチが物理摂動アンサンブル（PPE）であり、これは1つのモデルにおける不確実パラメータを幅広く振って実験を行うことにより得られる。MMEではモデルパラメータの不確実性を考慮することができないという欠点がある。一方これまでのPPEによる研究では、1つのモデルによるPPEの解析がなされてきたが、これは用いるモデルによって結果が変わる可能性がある。このため、異なるモデル（マルチモデル）によるPPEの比較を行うことが重要である。

本研究では、日本（MIROC3.2）と英国（HadSM3）のモデルによるPPEの結果を比較した。その結果、1）モデルアンサンブル平均の気候感度（二酸化炭素倍増時の気温変化）の違いは、低層雲フィードバック強度の違いによって生じること（図(7)-2）、2）両モデルの低層雲フィードバックの違いは初期（二酸化炭素倍増前）の雲量の違いによって決まっていること、3）アンサンブル内の気候感度のばらつきを決めるメカニズムは両モデルで大きく異なることが分かった。これらの結果は、単一モデルによるPPEはモデル予測の不確実性を完全にはカバーできないことを示唆する。更にマルチモデルおよび物理摂動アンサンブルの信頼性について調べたところ、PPEよりもMMEのほうが、より信頼性におけるアンサンブルであることが分かった。

### （3）力学場・放射場の変化と対応した地球温暖化時の対流圏—成層圏大規模循環場の特徴及びそれらを記述可能な方程式系

帯状平均した赤道上の東西風の時間—高度断面図を図(7)-4に示す。(a)が現在気候、(b)が二酸化炭素である。現在気候に比べ将来気候では、西風と東風が交互に入れ替わる周期が長くなっている。また西風・東風の強度も弱くなっている。更にQB0の高度が、下まで伸びにくくなっている様子も分かる。このように、地球温暖化に伴ってQB0が顕著に変化することが明らかになった。帯状平均東西風の緯度—高度分布を見ると、温暖化に伴う帯状平均温度場の変化と対応して、上部対流圏から成層圏に掛けて中緯度西風ジェットが強化され、且つ風速 $0 \text{ ms}^{-1}$ ラインが赤道寄りになる。この背景東西風の変化が、中緯度ロスビー波および山岳起源重力波による東風加速領域の位置を変え、結果として赤道から中緯度へ向かう残差子午面循環を強化させる。CMIP3マルチモデル平均にも見られるように、本実験でも温暖化時に赤道上の平均降水量は増加した。対流加熱の時間変動成分も大きくなり、重力波がより多く励起され、上部対流圏から下部成層圏では、重力波に伴う運動量フラックスは10-15%増加していた。しかしながら下部成層圏での波動に伴う運動量

フラックスの変化を調べると、QBO加速に効く領域では殆ど増加していなかった。温暖化に伴って波動励起と赤道上昇流は共に増えるが、QBOが存在する高度では赤道上昇流の効果が上回っていた。また循環場と残差循環の研究に関して、Boussinesq流体、WKB近似の下で、一般的な3次元変換Euler (transformed Eulerian mean; TEMと略記) 運動方程式系を導いた。



図(7)-4 赤道上における帯状平均東西風の時間-高度断面図。赤色が西風、青色が東風。(a) 現在気候、(b) 二酸化炭素倍増時

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

狭いゾーンに集中するメイユ・梅雨前線降水帯の気候モデルによる再現と予測は現在でも不十分である。これまで主として、長期間平均場における再現性が検討されてきたが、本研究では降水帯の実態に踏み込んだ検討をおこなった。梅雨最盛期(安定期)の6月の長期間平均場における降水帯は比較的妥当に再現されるが、季節遷移期の5および7月の再現性は低い。またその年々変動、強雨の集中性の再現性は貧弱である。信頼性の高い再現性、予測可能性を得るためには、平均場における評価に加え、短期間変動、集中性に踏み込んだ評価が必要であることを示した点において科学的意義がある。

夏季太平洋高気圧西部の時空間変動の成因は多岐に渡り、モデルでの再現性が一般的に悪く、夏季日本域の天候予測が現状で難しいこととも関連している。マルチモデルにおける太平洋高気圧の再現性を示して議論した点は、今後の気候モデルの開発に役に立ち、科学的意義がある。メイユ・梅雨前線降水帯の将来予測は社会的にも科学的にも重要なテーマであるが、CMIP3データによる再現性は不十分であった。この問題についての現時点における不確実性と、更なる改良の必要性の指摘も重要であろう。また個々の研究者の科学的興味に基づいたメトリックについて、独

立性について理解が進んだことは、今後、個々の研究者が温暖化研究における自身の研究意義をより客観的に把握する上で意義がある。温暖化時のQB0の変化を詳細に記述したことは、世界に先駆けて行われたことで、科学的な意義が大きい。また一般的な3次元変換Euler運動方程式系を導かれたことは、理論的な意義も大きい。

各モデルにおけるカレンダー、日射の取り扱いについての情報は、気候モデルコミュニティにとって有用な情報である。またモデルは気候値レベルではある程度のチューニングが可能であるが、モデル大気の応答についてはチューニングされていない。季節変化という自然変動における地球大気および雲の応答について、観測、客観解析データを用い、モデルにおける再現性を検証したことは、モデルデータの信頼性を検証する上での新たな情報として、意義が大きい。雲放射強制力フィードバックは、観測から値が得られること、モデルの月平均の放射フラックスデータがあれば求められるという点で、簡便な雲放射応答のメトリックである。各モデルコミュニティにおいてモデル開発時などに利用されることが期待される。またモデル結果の解釈について、アンサンブルを用いた不確実性を議論した点は意義がある。

## (2) 環境政策への貢献

テーマ2の他のプロジェクトと共同して、成果の広報・普及に努めた。

## 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) Ninomiya, K., T. Suzuki, and T. Nishimura (2008): Differences between the intense precipitation associated with subsynoptic-scale Baiu frontal depression simulated by an AGCM and described in observational studies. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 563-573.
- 2) Tsushima, Y., E. Raschke, S. Kinne, A. Abe-ouchi, S. Bakan, S. Emori, M. Giorgetta, G. Kopp, F. Saito, O. Timm, and M. Wild (2008): Key parameters for the inconsistencies of the incoming solar radiation boundary condition in global modeling. *International Radiation Symposium*, 585-588.
- 3) Kawatani, Y., K. Ninomiya, and T. Tokioka (2008): The North Pacific subtropical high characterized separately for June, July, and August: zonal displacement associated with submonthly variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 4, 505-530.
- 4) Ninomiya, K. (2009): Characteristics of precipitation in the Meiyu-Baiu season in the CMIP3 20th Century climate simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 829-843.
- 5) Noda, A. (2010): A general three-dimensional transformed Eulerian mean formulation. *SOLA*, 6, 85-88. doi:10.2151/sola.2010-022.
- 6) Ninomiya, K. (2011): Characteristics of the Meiyu and Baiu frontal precipitation zone

- in the CMIP3 20<sup>th</sup> century simulation and 21st century projection. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 151-159.
- 7) Kawatani, Y. and K. Ninomiya (2011): The North Pacific subtropical high in August in twentieth-century CMIP3 multimodel dataset. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 375-386.
  - 8) Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe (2011): The Quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate. J. Atmos. Sci., 68, 265-283.
  - 9) Ninomiya, K. (2012): Year-to-year variations in the Meiyu and Baiu frontal precipitation zone in the CMIP3 20th century simulation. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 317-325.
  - 10) Ninomiya, K. (2012): Characteristics of intense rainfalls over southwestern Japan in the CMIP3 20th century simulation and 21st century projection. J. Meteor. Soc. Japan, 90A, 327-338.
  - 11) Kawatani, Y., K. Hamilton, and A. Noda (2012): The effects of changes in sea surface temperature and CO2 concentration on the quasi-biennial oscillation. J. Atmos. Sci., in press.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

特に記載すべき事項はない

## (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 二宮 洸三：梅雨前線帯および北太平洋亜熱帯高気圧周辺の6月降水分布に関するモデル相互比較。日本気象学会2008年度春季大会，横浜，2008年5月。
- 2) 對馬 洋子，真鍋 淑郎：季節変化における雲の放射フィードバックに関するモデル相互比較。日本気象学会2008年度春季大会，横浜，2008年5月。
- 3) Tsushima, Y. E. Raschke, S. Kinne, A. Abe-ouchi, S. Bakan, S. Emori, M. Giorgetta, G. Kopp, F. Saito, O. Timm, M. Wild: Key parameters for the inconsistencies of the incoming solar radiation boundary condition in global modeling. International Radiation Symposium, Foz du Iguazu, Brazil, August 2008.
- 4) 二宮 洸三：AGCMにおける梅雨前線小低気圧に伴う強雨分布：観測との差違。日本気象学会2008年度秋季大会，仙台，2008年11月。
- 5) 二宮 洸三：5～7月のメイユ・梅雨前線降水帯の再現性についてのモデル相互比較。日本気象学会2009年度春季大会，つくば，2009年5月。
- 6) 二宮 洸三：21世紀における5～7月のメイユ・梅雨前線降水帯に関するモデル相互比較。日本気象学会2009年度秋季大会，福岡，2009年11月。
- 7) 河谷 芳雄，二宮 洸三：CMIP3モデルにおける夏季太平洋高気圧の気候場および月内変動の再現性。日本気象学会2009年度秋季大会，福岡，2009年11月。
- 8) 二宮 洸三：梅雨期日降水量強雨の再現性についての20CCCMモデル相互比較。日本気象学会2010

- 年度春季大会，東京，2010年5月。
- 9) 二宮洗三：気候温暖化に伴う梅雨期日降水量強雨特性の変化についての20CCMモデル相互比較。日本気象学会2010年度秋季大会，京都，2010年10月。
  - 10) 河谷芳雄，Kevin Hamilton，渡辺真吾：地球温暖化時の赤道準2年振動。日本気象学会2010年度秋季大会，京都，2010年10月。
  - 11) Noda, A. and Y. Kawatani: A Generalized Transformed Eulerian Mean (TEM) Based on Non-neutral Waves in a Boussinesq Stratified Fluid. AGU Fall meeting, San Francisco, USA, December 2011.
  - 12) Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe: The Quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate. AGU Chapman conference on atmospheric gravity waves and their effects on general circulation and Climate, Honolulu, USA, March 2011.
  - 13) 二宮洗三：メイユ・梅雨前線降水帯の年々変動に関するCMIP3-20世紀実験モデル相互比較。日本気象学会2011年春季大会，東京，2011年5月。
  - 14) 河谷芳雄，Kevin Hamilton，渡辺真吾：地球温暖化時の赤道準2年振動。地球惑星科学連合2011年度連合大会，幕張，2011年5月。
  - 15) Kawatani, Y., K. Hamilton and S. Watanabe: The Quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate. IUGG2011, Melbourne, Australia, July 2011.
  - 16) 河谷芳雄，Kevin Hamilton，野田彰：赤道準2年振動の将来変化に対する二酸化炭素濃度と海面水温の役割。第3回熱帯気象研究集会，京都，2011年9月。
  - 17) 二宮洗三：メイユ・梅雨前線降水帯の年々変動の相関に関するCMIP3-20世紀実験モデル相互比較。日本気象学会2011年秋季大会，名古屋，2011年11月。
  - 18) 野田彰：非中立波動に基づいた一般的TEM --3次元渦拡散テンソルの全成分の導出--。日本気象学会2011年秋季大会，名古屋，2011年11月。
  - 19) 河谷芳雄，Kevin Hamilton，野田彰：赤道準2年振動の将来変化に対する二酸化炭素濃度と海面水温の役割。日本気象学会2011年秋季大会，名古屋，2011年11月。
  - 20) Noda, A. and Y. Kawatani : A Generalized Transformed Eulerian Mean (TEM) Based on Non-neutral Waves in a Boussinesq Stratified Fluid. American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, December 2011.
  - 21) 河谷芳雄，Kevin Hamilton，野田彰：赤道準2年振動の将来変化に対する二酸化炭素濃度と海面水温の役割，第12回地球流体力学研究集会，春日，2011年12月。

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, H. Kanzawa (2012): Reproducibility by Climate Models of Cloud Radiative Forcing Associated with Tropical Convection. *J. Climate*, 25, 1247- 1262.
- 2) Kawatani, Y., K. Ninomiya and T. Tokioka (2008): The North Pacific subtropical high characterized separately for June, July, and August: zonal displacement associated with submonthly variability. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86, 4, 505-530.
- 3) Nishii, Y., T. Miyasaka, H. Nakamura, Y. Kosaka, S. Yokoi, Y. N. Takayabu, H. Endo, H. Ichikawa, T. INOUE, K. OSHIMA, N. SATO, Y. Tsushima (2012): Relationship of the Reproducibility of Multiple Variables among Global Climate Models. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90A, 87-100.
- 4) Tsushima, Y., and S. Manabe (2001): Influence of cloud feedback on the annual variation of the global mean surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 106, 22635-22646.
- 5) Yokoi S, Y. N. Takayabu, K. Nishii, H. Nakamura, H. Endo, H. Ichikawa, T. Inoue, M. Kimoto, Kosaka, Y., T. Miyasaka, K. Oshima, N. Sato, Y. Tsushima, M. Watanabe (2012): Application of cluster analysis to climate model performance metrics. *J. App. Meteor. Clim* 1558-8432 10.1175/2011JAMC2643.1 JAMC2643.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (8) 衛星等による全球雲放射と降水観測に基づく気候モデル再現性とその将来変化

名古屋大学大学院

環境学研究科地球環境科学専攻

神沢 博

<研究協力者>

名古屋大学地球水循環研究センター

増永 浩彦

名古屋大学大学院環境学研究科地球環境科学専攻

市川 裕樹

平成 19～23 年度累計予算額：48,592 千円

(うち、平成 23 年度予算額：9,405 千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】**本研究の目的は、主として衛星観測をもとにした観測データセットを用い、雲・降水・放射フラックスに関する気候モデルの再現性評価を行い、またその将来変化を議論することである。本研究では、モデルにより予測される雲・降水・放射フラックスに関する将来変化の不確実性が大きいと思われる熱帯・亜熱帯域を対象として解析を行い、以下のような結果を得た。(1) 力学場を介してのアンビル（鉄床雲）や巻雲を含めた上層雲の水平的広がりについて、複数の気候モデルの再現性を評価した結果、モデルは、全体として、対流圏上層の発散の中心位置付近での上層雲の分布の水平的広がりを、観測に比べて過小評価していることがわかった。(2) 大気の熱力学的指標により同定された、対流活動が著しく活発であり、強い下降流が生じづらいと考えられる海洋域を対象とし、雲の短波放射への影響（SWCRF）に対する長波放射への影響（LWCRF）の割合（R）と大規模大気循環場の指標としての大気中層の上昇流強度との関係について、複数の気候モデルの再現性を評価した結果、モデルは、全体として、上昇流が強い地域において R を上手く再現する一方で、上昇流・下降流が弱い地域において R を過小評価することが分かった。上昇流が強い地域における結果は、モデルが光学的に厚い上層雲の雲量を過大評価することに伴う LWCRF と SWCRF の誤差の相殺効果によりもたらされ、一方、上昇流・下降流が弱い地域における結果は、モデルが光学的に薄い上層雲の雲量を過小評価し、光学的に厚い下層雲の雲量を過大評価することに伴う LWCRF と SWCRF の誤差の相乗効果によりもたされることも分かった。(3) R の二酸化炭素増加時の変化を調べた結果、複数のモデルで予測される R の二酸化炭素増加時の変化は、上昇流が強い地域に比べ、上昇流・下降流が弱い地域において、ばらつきが大きく、それは、モデル間における中層雲量の変化の大小によりもたらされることがわかった。

**【キーワード】**気候モデル、衛星観測、熱帯・亜熱帯、大規模大気循環、雲の放射影響

### 1. はじめに

地球の水循環および放射エネルギー収支を重要な過程として含む気候システムを理解し、その

将来を予測するうえで、雲量・降水量および放射フラックスの分布の時空間変動の実態や物理機構を探り、その観点から気候モデルの再現性を議論することは、不可欠である。とりわけ熱帯・亜熱帯域においては、多量の降水をもたらす深い積雲対流に伴い広がる雲が、地球放射収支と密接に関連することが指摘されている（例えば、Ramanathan and Collis, 1991<sup>8)</sup>; Lindzen et al. 2001<sup>7)</sup>）。そのため、雲量・降水量および放射フラックスの時空間的変動をあわせて研究していく必要がある。また、地球の各地域で発生する雲の形態・降水特性および放射フラックスの特性は、力学的・熱力学的に規定される大規模な大気環境場に応じて大きく変化する。そのため、大規模な大気循環場とあわせた雲量・降水量および放射フラックスの変動機構の理解とそれの気候モデル再現性評価が、地球の気候システムの変動を理解し、さらに予測する上で重要である。

気候モデルによる雲と雲の放射影響（CRF）の将来変化予測には、大きな不確実性が存在する。世界の研究機関で開発された気候モデルのうち、24個の気候モデルが第3次結合モデル相互比較プロジェクト（WCRP/CMIP3 大気海洋結合大循環モデル（AOGCM）相互比較プロジェクト）に参加し、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）第4次報告書（AR4）に活用された。それらのモデルの比較解析の結果、気候モデルで予測される雲とCRFの変動の仕方は、モデル間で大きくばらつくことが報告されている（Bony et al. 2006<sup>1)</sup>）。特に、熱帯・亜熱帯域において、そのばらつきが大きいことも報告されている（Bony et al. 2006<sup>1)</sup>）。より信頼性の高い将来予測を行うためにも、雲量・放射フラックスの時間的・空間的特徴について、詳細なモデルの再現性評価を行うとともに、モデル間で将来予測がばらつく理由を明らかにする必要がある。

## 2. 研究開発目的

本研究では、GPCP 降水量、ISCCP 雲量および ERBE 放射フラックスといった主として衛星観測をもとにしたデータセットを用い、気候モデルによる現在気候の再現実験について、熱帯・亜熱帯域（30°S-30°N）の雲および放射フラックス分布の再現性を検証する。モデルの物理を検証するという観点から、とくに大気の大気循環場と雲・降水および放射場の関連を、観測・モデルのそれぞれで解析し、比較する。また、その検証結果を念頭に置いた上で、その将来変化を議論する。

本研究では、熱帯・亜熱帯域の中でも積雲対流活動が活発な地域に着目する。積雲対流活動が活発な地域では、雲の長波放射への影響（LWCRF）と短波放射への影響（SWCRF）が共に絶対値が大きく、ほぼ打ち消しあうように働くことが知られている（例えば Kiehl, 1994<sup>5)</sup>など）。近年、Yuan et al. (2008)<sup>12)</sup> は、海面水温（SST）が高い地域では、LWCRF と SWCRF の打ち消しあいが、大規模の大気循環場の違いにかかわらず観測されることを明らかにした。本研究では、Yuan et al. (2008)<sup>12)</sup> の結果に基づき、大規模大気循環場と積雲対流活動に伴う雲およびCRFの関係性についてのモデルの再現性評価とその将来変化を主に議論する。

## 3. 研究開発方法

### (1) 使用データ

本研究では、以下の3つのモデルデータセットを解析に用いる。

- ・ WCRP/CMIP3 の成果物として PCMDI (Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison) に登録された複数の AOGCM 計算結果データ。
- ・ 雲のフィードバックに関するモデル相互比較プロジェクト (WCRP/CFMIP) の成果物として PCMDI



に登録された複数の大気海洋混合層結合モデル計算結果データ。

- WCRP/CMIP5 に参加している気候モデル (IPCC 第 5 次報告書 (AR5) に貢献予定) の 1 つである MIROC5 (Watanabe et al. 2010<sup>9)</sup>) による物理過程複合モデルアンサンブル (Multi-Physics Ensemble; 以下 MPE と記す) データ。本データは、東京大学大気海洋研究所の渡部雅浩准教授より提供されたものであり、その詳細は Watanabe et al. (2011)<sup>10)</sup> に記載されている。MPE の各メンバーは、MIROC5 のうちの大気大循環モデル (AGCM) をベースとして、物理過程の部分のみを入れ替えた各モデルにより構成されている。より具体的には、各モデルにおいて、MIROC5 に導入されている雲 (大規模凝結過程および雲微物理過程の両方を含む) のパラメタリゼーション、積雲パラメタリゼーション、乱流パラメタリゼーションのうちどれか 1 つ、もしくは 2 つが、MIROC3.2 (K-1 Model Developers, 2004<sup>6)</sup>) に導入されていたパラメタリゼーションにより置き換えられている。

モデルと比較する観測データとして、ERBE の放射フラックス・ISCCP の雲量・GPCP の降水量・ERA40 再解析気象データの 500 hPa での鉛直流気圧速度 ( $\omega$  500) および水平風・HadISST の SST の各データを使用する。

モデル・観測のデータは、ともに、各要素の月平均値を解析に使用する。また、すべてのデータは、ERA40 再解析気象データと同規格の  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$  の水平解像度に変換した後に解析を行う。

## (2) 解析手法

雲の放射への影響 (CRF) という量、すなわち、大気の頂上での下向きの放射フラックスが、雲がある場合は雲のない場合に比べてどのくらい大きいのか、ということを示す量に着目する。雲は、CRF が正であれば地球・大気系を暖める働きを、CRF が負であれば地球・大気系を冷却する働きを、持つことになる。この量を、地球・大気系が射出する主に赤外域の長波放射への影響 (LWCRF) と太陽から地球へやってくる主に可視域の短波放射への影響 (SWCRF) の 2 つの波長帯に分ける。雲は、長波放射をよく吸収するので LWCRF は正であり、一方、短波放射をよく反射するので SWCRF は負である。各種 CRF の定義は、Coakley and Baldwin (1984)<sup>2)</sup> にならい、以下とする。

$$\text{LWCRF} [\text{W/m}^2] = \text{LW}(\text{clr}) - \text{LW}(\text{all})$$

$$\text{SWCRF} [\text{W/m}^2] = \text{SW}(\text{clr}) - \text{SW}(\text{all})$$

ここで、LW および SW は、それぞれ、大気上端での、地球から射出される長波放射フラックス、および、地球で反射された短波放射フラックスを示す。また、all および clr は、それぞれ、全天および晴天の状態を示す。

本研究では、LWCRF と SWCRF の強さを比較するための相対的な尺度として、SWCRF に対する LWCRF の比 (R) を、Kiehl (1994)<sup>5)</sup> にならい、以下のように定義する。

$$R = -(\text{LWCRF} / \text{SWCRF})$$

LWCRF、SWCRF とともに R のモデル再現性評価を行う。

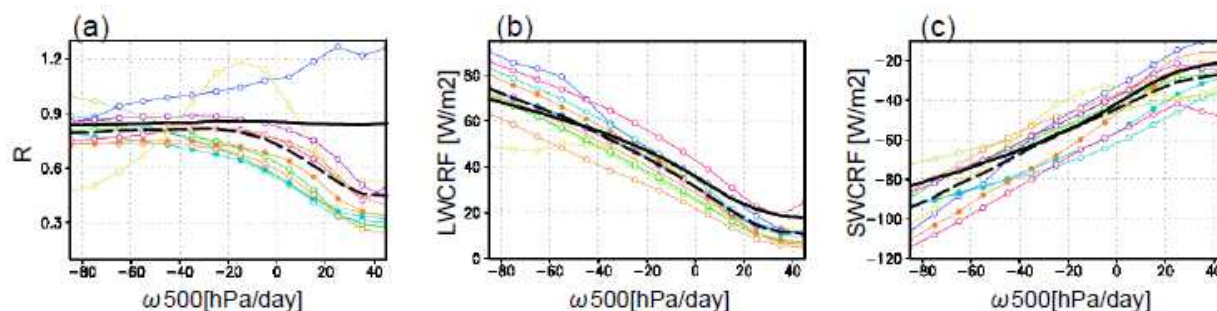
#### 4. 結果及び考察

##### (1) 大気の上層発散中心周辺における降水・上層雲の広がりに関する気候モデル再現性

WCRP/CMIP3に参加したうちの18個の気候モデルによる20世紀再現実験データを用いて、熱帯・亜熱帯域における力学場を介しての降水およびアンビル（鉄床雲）や巻雲を含めた上層雲の水平的広がりについて、気候モデルの再現性を評価した結果、モデルは、全体として、対流圏上層の発散（大規模大気循環による上昇流の指標）の中心位置付近での上層雲の分布の水平的広がりを、観測に比べて過小評価していることなどがわかった（Ichikawa et al. 2009<sup>3)</sup>）。

##### (2) CRF(雲の放射影響)と $\omega$ 500(対流圏中層の鉛直速度)の関係性に関する気候モデル再現性

WCRP/CFMIPに参加した11個の気候モデルによる平衡気候実験データを用いて、積雲対流活動が活発であると考えられる、SSTが27°Cを越える熱帯・亜熱帯の海洋域におけるCRFと $\omega$ 500の関係性に関する気候モデル再現性を調べた。まず初めに、SSTが27°Cを越える地域において、各 $\omega$ 500の値が出現する頻度の割合を観測とモデルのそれぞれで調べた結果、ともに、出現頻度は、弱い下降流域（ $\omega$ 500  $\approx$  +10 hPa/day）で最大であり、そこから、上昇流が強い地域に向けて徐々に減少することがわかった。



図(8)-1 熱帯域海洋でSSTが27°Cを越える地域において算出した、各 $\omega$ 500の値における(a) R、(b) LWCRF、(c) SWCRFの平均値（黒実線：観測、黒破線：モデル平均、各色実線：各モデル）。 $\omega$ 500の値10 hPa/dayごとに示している。

図(8)-1に示すのは、各 $\omega$ 500の値に対して算出したCRFに関わる各要素の平均値である（a: R、b: LWCRF、c: SWCRF）。モデル全体としての傾向を調べるため、以下の記述では11モデルの平均値（以下、モデル平均と記す）を議論する。また、以下の記述では、LWCRFおよびSWCRFの大小については、すべて絶対値の大小を指すこととする。モデル平均は、観測に見られるLWCRFおよびSWCRFの $\omega$ 500との関係をうまく再現している。すなわち、上昇流が弱まり下降流域が強まるにつれ、LWCRFおよびSWCRFは小さくなる。しかしながら、モデル平均は、観測にみられるRが $\omega$ 500の値に関わらずほぼ一定であるという特徴を必ずしも再現できていない。観測のRは、 $\omega$ 500によらず約0.8である。強い上昇流域（ $\omega$ 500 < -40 hPa/day）において、モデル平均のRは、観測とほぼ同程度である。これは、LWCRFおよびSWCRFの過大評価の打ち消しあいによりもたらされる。過大評価の度合いはLWCRFよりもSWCRFのほうが大きいため、モデル平均のRは観測をやや下回る。上昇流が弱まり、さらに下降流が強まるにつれて、モデル平均のRは小さくなり、モデル平

均は R を大きく過小評価する。この R の過小評価は、LWCRF の過小評価と関連している。下降流域では、R の過小評価は SWCRF の過大評価とも関連している。WCRP/CMIP3 に参加した 18 個の気候モデルによる 20 世紀再現実験データに関して、同様の解析を行った結果、上記とほぼ同様の結果を得た (Ichikawa et al. 2012<sup>4)</sup>)。

モデルに見られる CRF に関する再現性エラーが、どのような雲型の再現性エラーに起因しているのかを調べた結果、以下のことがわかった。強い上昇流域における LWCRF および SWCRF の過大評価は、光学的に厚い上層雲の雲量の過大評価に起因する。上昇流・下降流が弱い地域における LWCRF の過小評価および SWCRF の過大評価は、光学的に薄い上層雲の雲量の過小評価および光学的に厚い下層雲の雲量の過大評価に、それぞれ起因する。

### (3) CRF(雲の放射影響)と $\omega$ 500 (対流圏中層の鉛直速度) との関係性の将来変化

MIROC5 による MPE を用いて、二酸化炭素 4 倍増 ( $4\times\text{CO}_2$ ) 時における CRF と  $\omega$  500 との関係性の現在気候からの変化を調べた。MIROC5 の MPE は、AGCM によるコントロール実験 ( $1\times\text{CO}_2$  実験) および SST 実験 ( $4\times\text{CO}_2$  実験) の結果を含んでいる。SST 実験は、MIROC5 の AOGCM において、 $4\times\text{CO}_2$  実験を実施し、気候が平衡状態に達した時に得られる SST の各月の気候値を与えて計算されている。 $4\times\text{CO}_2$  時における各要素の現在気候値からの変化量は、SST 実験とコントロール実験の差をとることで計算される。図(8)-2 における  $4\times\text{CO}_2$  時の CRF は、この変化量をもとに、以下のような操作の下にプロットされている。すなわち、観測データに基づく CRF の現在気候値に、SST 実験とコントロール実験の差を足し合わせている。これにより、モデルに元来内在するバイアスを取り除いた議論を行うことができる。

解析対象領域は、以下のようにして同定される熱帯・亜熱帯域の中でも積雲対流活動が活発な海洋域である。すなわち、Williams et al. (2009)<sup>11)</sup> により提案されたエントロピー超過 (Entropy Excess; 以下 EE と記す) を熱力学場の指標として用いる。EE の定義は以下のとおりである。

$$EE = \ln(\theta_{eb}) - \ln(\theta_{es})$$

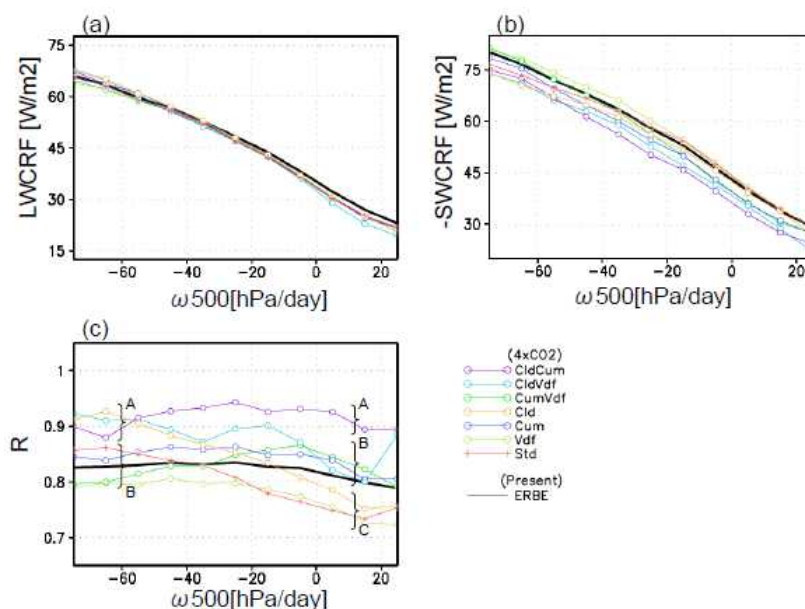
ここで、 $\theta_{eb}$  および  $\theta_{es}$  は、それぞれ、1000–925 hPa における相当温位の平均値、および、925–500 hPa における飽和相当温位の平均値を示す。観測データを用いて、EE と SST の関係性を調べると、EE が  $-0.01$  の時、SST は約  $27^\circ\text{C}$  となる。本研究では、EE が  $-0.01$  よりも大きい地域を積雲対流活動が活発な地域として同定する。積雲対流が活発な地域の同定において、SST ではなく EE を用いた理由は、現在気候と将来気候とでは、積雲対流が活発化すると考えられる SST の閾値が異なる可能性が高い (Williams et al. 2009<sup>11)</sup>) からである。

#### 1) $\omega$ 500 の変化

まず初めに、積雲対流活発域における  $\omega$  500 の出現頻度の変化を調べた。以下の記述では、 $\omega$  500  $< -40$  [hPa/day] の領域を強上昇流域、 $-20 < \omega$  500  $< 20$  [hPa/day] の領域を弱鉛直流域、 $\omega$  500  $> 20$  [hPa/day] の領域を強下降流域と呼ぶ。現在気候では、弱鉛直流域に相当する  $\omega$  500 の値の出現頻度の割合が多い。 $4\times\text{CO}_2$  時には、弱鉛直流域に相当する  $\omega$  500 の値の出現頻度の割合が、現在気候よりも増加する。 $4\times\text{CO}_2$  時には、強下降流域に相当する  $\omega$  500 の値の出現頻度が現在気候よりも減少する。強上昇流域では、現在気候と  $4\times\text{CO}_2$  時との間で顕著な違いがみられない。

## 2) CRF の変化

図(8)-2に示すのは、各 $\omega 500$ の値に対して算出したCRFに関わる各要素の平均値を、現在気候と $4\times\text{CO}_2$ 時のそれぞれについてプロットしたものである(a: LWCRF、b: SWCRF、c: R)。以下の記述では、CRFの大小については、すべて絶対値の大小を指すこととする。 $4\times\text{CO}_2$ 時におけるLWCRFに関して、モデル間のばらつきは非常に小さい。各モデルによるLWCRFは、 $\omega 500$ の値に関わらず現在気候値とほぼ同程度であるが、上昇流が弱まり下降流が強まると、現在気候値よりもやや小さくなる傾向にある。一方、 $4\times\text{CO}_2$ 時におけるSWCRFに関して、現在気候値と同程度か、それよりも小さくなる。また、モデル間のばらつきがLWCRFに比べて大きく、ばらつきの大きさは、 $\sim 10\text{ W/m}^2$ に及ぶ。 $4\times\text{CO}_2$ 時におけるRは、主にSWCRFがモデル間で大きくばらつくことに関連して、モデル間で大きくばらつく。強上昇流域では、Rは現在気候値と同程度か、それよりも大きい。弱鉛直流域では、現在気候値よりも大きいモデル、小さいモデル、また現在気候値と同程度のモデルがそれぞれ存在する。



図(8)-2 積雲対流活発域において算出した、各 $\omega 500$ の値における (a) LWCRF、(b) SWCRF、(c) Rの平均値 (黒実線: ERBE 観測に基づく現在気候値、各色線: MPE の各モデルによる $4\times\text{CO}_2$ 時の状態)。SWCRFは、値に $-1$ をかけて、その絶対値を示している。各パラメータとも、 $\omega 500$ の値 $10\text{ hPa/day}$ ごとに示している。モデルのラベルは、取り替えたパラメタリゼーションの種類を示す(Cld: 雲、Cum: 積雲、Vdf: 乱流)。StdはMIROC5の標準モデルを示す。

## 3) 雲量の変化とそのCRFの変化との関連

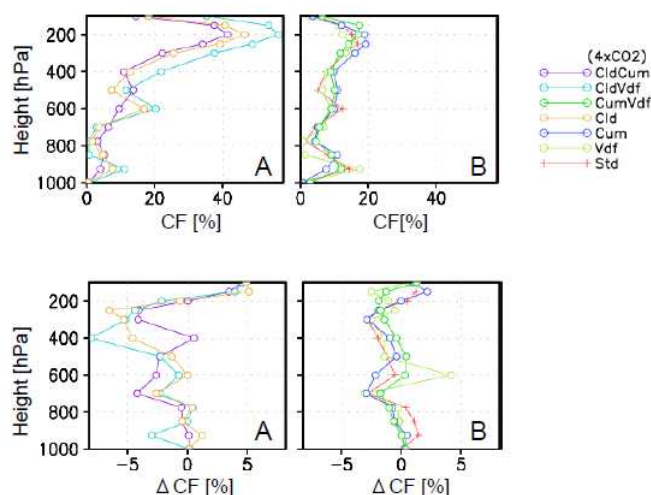
$4\times\text{CO}_2$ 時におけるRがモデル間でばらつく要因を、雲量の変化のモデル間のばらつきから議論する。

## a. 強上昇流域

強上昇流域では、 $4\times\text{CO}_2$ 時のRが、現在気候値よりも大きいモデル群(A)と、現在気候値と同

程度のモデル群 (B) が存在する。モデル群 A と B において R が異なる要因を調べるために、それぞれのモデル群における各高度の雲量の変化量 (SST 実験の値からコントロール実験の値を差し引いた値:以下  $\Delta CF$  と記す) を、コントロール実験における雲量 (以下 CF と記す) と併せて図 (8)-3 に示す。 $\Delta CF$  に関して、モデル群 A および B にはほぼ共通した特徴が見られる。すなわち、それぞれのモデル群は、対流圏界面付近 (気圧 < 200 hPa) において正、対流圏上層 (200 hPa < 気圧 < 400 hPa) において負、対流圏中層下部 (700 hPa 付近) において負の値をとる。その一方で、 $|\Delta CF|$  に関して、モデル群 A と B では、対流圏界面付近および対流圏上層において、違いが見られる。すなわち、モデル群 A の  $|\Delta CF|$  は、モデル群 B の  $|\Delta CF|$  よりも大きい。対流圏中層下部 (700Pa 付近) における  $|\Delta CF|$  は、モデル群 A および B において、ほぼ同程度である。これらの結果は、モデル群 A と B における R の違いが、対流圏界面付近および対流圏上層における  $|\Delta CF|$  の違いと対応していることを示唆している。モデル群 A は B に比べ、対流圏界面付近および対流圏上層において、CF が大きいという特徴を持つ。

対流圏界面付近および対流圏上層におけるモデル群 A と B における  $\Delta CF$  の違いは、以下のようにして、CRF および R の違いをもたらすと考えられる。対流圏界面付近および対流圏上層の雲は、共に、大きな LWCRF を持つ。それ故、対流圏界面付近において雲量が増加し、対流圏上層の雲量が減少すると、それぞれの雲量変化に伴う LWCRF の変化が打ち消し合い、モデル群 A においても B においても、 $4 \times CO_2$  時の LWCRF は現在気候値とほぼ同程度になる。その一方で、対流圏界面付近の雲は、対流圏上層の雲よりも、SWCRF が小さい。これは、対流圏界面付近において、光学的に薄い巻雲が多く存在する一方で、対流圏上層において、深い対流にともなう光学的に厚い雲が多く存在する (e.g., Zhang et al. 2010)<sup>13)</sup> ことにより生じる。モデル群 A と B において、対流圏上層の雲がともに減るため、 $4 \times CO_2$  時における SWCRF は現在気候値よりも小さくなる傾向にある。この傾向は、特に雲量の減少量が大きいモデル群 A において顕著である。結果として、モデル群 A では、モデル群 B および現在気候に比べて、R が大きくなる。

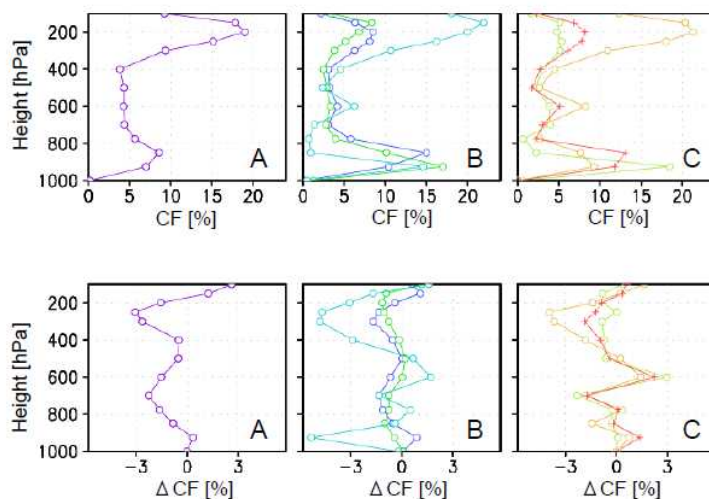


図(8)-3 積雲対流活発域のうち、強上昇流域 ( $\omega 500 < -40$  hPa/day) における (a) コントロール実験における雲量 (CF) および、(b) SST 実験とコントロール実験における雲量の差 ( $\Delta CF$ )。各図右下部の A および B は、図(8)-2(c) により分類されたモデル群を示す。

## b. 弱鉛直流域

弱鉛直流域では、 $4\times\text{CO}_2$  時の R が、現在気候値よりも大きいモデル群 (A)、現在気候値と同程度のモデル群 (B)、および現在気候値よりも小さいモデル群 (C) が存在する。それぞれのモデル群における各高度の  $\Delta\text{CF}$  を、コントロール実験における CF と併せて図(8)-4 に示す。 $\Delta\text{CF}$  に関して、各モデル群には、ほぼ共通した特徴が見られる。すなわち、対流圏界面付近から近対流圏上層にかけて、また、対流圏中層下部 (700 hPa 付近) において、値が負となる。対流圏中層下部 (700 hPa 付近) における  $|\Delta\text{CF}|$  は、各モデル群において、ほぼ同程度である。対流圏界面付近から対流圏上層にかけての  $|\Delta\text{CF}|$  は、モデル間で異なるが、モデル群に依存した違いは見られない。このように R で分類したモデル群による違いはなく、CF が大きいモデルにおいて、 $|\Delta\text{CF}|$  が大きい傾向にある。図(8)-4 における非常に興味深い特徴は、モデル群 C の  $\Delta\text{CF}$  が、対流圏中層 (600 hPa) において、正となることである。この特徴は、モデル群 B のうちの 1 つのモデルにも見られる。

上述した  $\Delta\text{CF}$  の特徴は、以下のようにして、各モデル群での CRF および R の違いをもたらすと考えられる。各モデル群において、対流圏界面付近から対流圏上層では雲量が減るため、 $4\times\text{CO}_2$  時における LWCRF は、現在気候値よりも小さくなる。また、この対流圏界面付近から対流圏上層にかけての雲量の減少は、 $4\times\text{CO}_2$  時における SWCRF を、現在気候値よりも小さくする方向に働く。しかしながら、モデル群 C では、中層雲の増加に伴い、この SWCRF の減少が打ち消される。そのため、モデル群 C の SWCRF は現在気候値に近い。一方、モデル群 A および B では、 $4\times\text{CO}_2$  時において、LWCRF と SWCRF の両方が現在気候値よりも小さい。その小ささの違いは、R が現在気候値と同程度 (モデル群 B) か現在気候値よりも大きくなる (モデル群 A) 程度のものである。



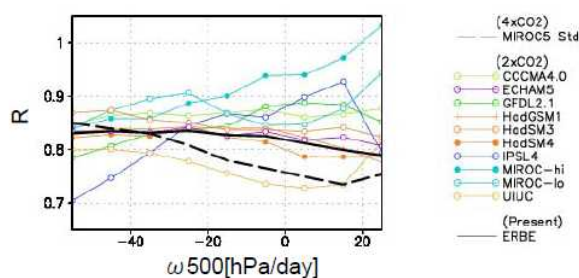
図(8)-4 積雲対流活発域のうち、弱鉛直流域 ( $-20 < \omega < 20$  hPa/day) における (a) CF および (b)  $\Delta\text{CF}$ 。各図右下部の A、B、および C は、図(8)-2(c) により分類されたモデル群を示す。各モデルの線の色は、図(8)-3 と同じである。

## 4) WCRP/CFMIP モデル群による解析結果との比較

MIROC5 による MPE の解析により得られた興味深い結果の 1 つは、各モデルにおいて、弱鉛直流

域では、コントロール実験で中層雲が再現されているか否かで、現在気候値と比べたときの  $4\times\text{CO}_2$  時の  $R$  の大小が異なることである。すなわち、中層にピークを持つ雲量の鉛直分布が再現されているモデルでは、 $4\times\text{CO}_2$  時の  $R$  が現在気候よりも小さくなる傾向にある。一方、中層にピークを持つ雲量の鉛直分布が再現されていないモデルでは、 $4\times\text{CO}_2$  時の  $R$  が現在気候よりも大きくなる傾向にある。

過去に開発されてきたモデル（例えば WCRP/CMIP3 や WCRP/CFMIP に参加したモデル群）では、中層雲が再現されていなかった。そのため、MIROC5 による MPE の結果に基づく、中層雲が再現されていないそれらのモデル群と、中層雲が再現される MIROC5 の標準モデル (Std) とでは、モデルに与えられる気候摂動に対する CRF の応答が異なる可能性が考えられる。そこで、WCRP/CFMIP に参加する複数の気候モデルによる計算結果データのうち、解析に必要な物理量のすべてが利用可能な 10 個のモデルによるコントロール実験および二酸化炭素倍増 ( $2\times\text{CO}_2$ ) 実験のデータに対して、MIROC5 による MPE に対して行った解析と同様の解析を行った結果 (図(8)-5)、想定された通り、弱鉛直流域において、MIROC5 の Std では  $R$  が現在気候値よりも小さくなる一方で、CFMIP の多くのモデルでは、 $R$  が現在気候値よりも大きくなることがわかった。



図(8)-5 積雲対流活発域において算出した、各  $\omega_{500}$  の値における  $R$  の平均値(黒実線: ERBE 観測に基づく現在気候値、黒点線: MIROC5 Std による  $4\times\text{CO}_2$  時の状態、各色線: CFMIP の各モデルによる  $2\times\text{CO}_2$  時の状態)。CFMIP のモデルにおける  $2\times\text{CO}_2$  時の  $R$  の算出方法は図(8)-2 と同様である。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究では、気候モデルにおいて再現が難しいといわれている熱帯・亜熱帯域の雲とその放射影響について、積雲対流活動に伴い発生する雲に着目して、その再現性評価を行った。モデル全体の欠点として明らかになったことは、上昇流・下降流が弱い地域、すなわち、大規模な大気循環による助長を受けにくく、主に局所的な熱力学過程により積雲対流活動が生じる地域において、モデルは雲とそれに伴う雲の放射影響の再現に関して、系統的な誤差を持つということである。大規模力学場の影響が少ない状況においてモデルで再現される雲は、主に、積雲スキームにおいて表現される積雲対流活動に起因して生じると考えられる。そのため、本研究で明らかとなった積雲対流活動とその雲・放射特性に関するエラーは、積雲スキームの物理に内在するエラーと密接に関連している可能性があり、本研究結果は、今後の積雲スキームの改良・開発に有益な情報をもたらすと考えられる。

また、積雲対流活動に伴う雲の放射影響の将来変化に見られるモデル間のばらつきが、どのよ

うな雲型の雲量の変動に起因するものかを調べた。その結果、上昇流・下降流が弱い地域では、モデル間における中層雲の変動の仕方の違いが、大きく影響していることがわかった。世界の各国で開発されてきたこれまでの気候モデルでは、中層雲を再現することができていなかった。そのため、中層雲が将来どのように変化する可能性があり、そのことが、雲の放射影響力の将来変化にどのように影響するかということは、これまで明らかにされてこなかった。本研究では、新たなパラメタリゼーションの導入により、中層雲を再現することができるようになった MIROC5 モデルによる実験結果を解析することで、中層雲の将来変化とその放射フラックスの将来変化への影響を議論することができた。

## (2) 環境政策への貢献

性能のより高い気候モデルによる、信頼性のより高い気候変動予測は、環境政策決定において重要である。本研究により得られた気候モデルの性能に関する情報および気候の将来予測が気候モデル間でばらつく要因に関する情報は、今後の気候モデルの改良・開発および気候の将来予測における不確実性の低減に役立つものである。したがって、本研究結果は、IPCC への貢献なども含めて、将来、究極的には、環境政策決定判断の一部に貢献できると考えられる。

## 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) Ichikawa, H. H. Masunaga, and H. Kanzawa (2009): Evaluation of precipitation and high-level cloud areas associated with large-scale circulation over the tropical Pacific in the CMIP3 models. *J. Meteorol. Soc. Japan*, Vol. 87, NO.4, 771-789. doi: 10.2151/jmsj.87.771.
- 2) Ichikawa, H. H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa (2012): Reproducibility by climate models of cloud radiative forcing associated with tropical convection. *J. Climate*, Vol. 25, NO.4, 1247-1262. doi: 10.1175/JCLL-D-11-00114.1.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 神沢博(2012): 地球温暖化の仕組み。「二つの温暖化—地球温暖化とヒートアイランド—」(甲斐憲次, 編著)の第II部, 第2章, 成山堂書店, 2012年3月28日刊, 50-73.

### (2) 口頭発表（学会）

- 1) Kanzawa, H. K. Hina, and S. Emori: Future changes in dry days associated with global



- warming. IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2-13 July 2007.
- 2) Masunaga, H.: Satellite data analysis of the Madden-Julian Oscillation, Kelvin wave, and the equatorial Rossby wave. IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) XXIV General Assembly, Perugia, Italy, 2-13 July 2007.
  - 3) 新村周平, 神沢博: 降水観測データによる気候モデル降水量の再現性の評価. 日本気象学会 2007 年度秋季大会, 札幌, 2007 年 10 月 14-16 日. 講演番号 A204, 講演予稿集 No. 92, p. 61.
  - 4) 増永浩彦: 大規模赤道波に伴う対流システム発達過程の観測的研究日本気象学会 2007 年度秋季大会, 札幌, 2007 年 10 月 14-16 日. 講演番号 B115, 講演予稿集 No. 92, p. 128.
  - 5) 新村周平・神沢博: 降水観測データによる気候モデル降水量の再現性の評価 (その 2). 日本気象学会 2008 年度春季大会, 横浜, 2008 年 5 月 18-21 日. 講演番号 B461, 講演予稿集 No. 93, p. 181.
  - 6) 市川裕樹・増永浩彦・神沢博: CMIP3 マルチモデルにおける熱帯大規模上昇流域での降水・上層雲の再現性. 日本気象学会 2008 年度春季大会, 横浜, 2008 年 5 月 18-21 日. 講演番号 B460, 講演予稿集 No. 93, p. 180.
  - 7) 市川裕樹, 増永浩彦, 神沢博: 北半球夏季インド洋における巻雲増加について. 日本気象学会 2008 年度秋季大会, 仙台, 2008 年 11 月 19-21 日. 講演番号 P124, 講演予稿集 No. 94, p. 371.
  - 8) 市川裕樹, 増永浩彦, 神沢博: 北半球夏季インド洋における巻雲増加について. 平成 20 年度日本気象学会中部支部研究会, 金沢, 2008 年 12 月 1-2 日. 講演番号 20, 講演要旨集, p. 85-86.
  - 9) Ichikawa, H., H. Masunaga and H. Kanzawa: Evaluation of precipitation and upper-1 level clouds associated with large-scale circulation over the tropical Pacific Ocean in the coupled AOGCMs. International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 2nd International Workshop on KAKUSHIN Program, Yokohama, 18-20 February 2009.
  - 10) 市川裕樹, 増永浩彦, 神沢博: CMIP3 マルチモデルにおける熱帯対流活動に伴う雲の放射影響力の再現性. 日本気象学会 2009 年度春季大会, つくば, 2009 年 5 月 28-31. 講演番号 A304, 講演予稿集 No. 95, p. 68.
  - 11) Ichikawa, H., H. Masunaga, and H. Kanzawa: Temporal and spatial variability of cirrus clouds over the Indian Ocean during boreal summer. IAMAS - IAPSO - IACS 2009 Joint Assembly "Our Warming Planet", M10.24/27403 (oral), Montreal, Canada, 19-29 July 2009. (Abstract in CD)
  - 12) 市川裕樹, 増永浩彦, 對馬洋子, 神沢博: 熱帯大気大循環と雲の放射影響力の関係性に関する気候モデル再現性. 日本気象学会 2009 年度秋季大会, 福岡, 2009 年 11 月 25-27 日. 講演番号 A353, 講演予稿集 No. 96, p. 87.
  - 13) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa: Climate model reproducibility of cloud radiative forcing associated with tropical convective variability. 2nd International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment jointly with 3rd International Workshop on KAKUSHIN Program, Tsukuba,

25-27 February 2010.

- 14) 市川裕樹, 増永浩彦, 對馬洋子, 神沢博: 熱帯海洋上空の弱下降流域における雲の放射影響力の気候モデル再現性. 日本気象学会 2010 年度秋季大会, 京都, 2010 年 10 月 27-29. 講演番号 A366, 講演予稿集 No. 98, p. 107.
- 15) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa: Reproducibility by climate models of cloud radiative forcing associated with tropical convection. AGU Fall Meeting, American Geophysical Union, GC41B-0900 (poster), San Francisco, U. S. A., 13-17 December 2010.
- 16) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa: Analysis of cloud property and radiative effects associated with tropical convection in climate model. AGU Fall Meeting, American Geophysical Union, GC41A-0784 (poster), San Francisco, U. S. A., 5-9 December 2011.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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

- 1) 神沢博: コーヒー片手に温暖化を語ろうー長野で「気象サイエンスカフェ」. 話題提供者としての紹介およびインタビュー, 信濃毎日新聞, 2010 年 10 月 24 日朝刊.

### (6) その他

特に記載すべき事項はない。

## 8. 引用文献（\*は、本環境研究総合推進費 S-5 の援助を受けた成果）

- 1) Bony, S. and Coauthors (2006): How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Climate*, 19, 3445-3482.
- 2) Coakley, J. A. and D. G. Baldwin (1984): Towards the objective analysis of clouds from imagery data. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 23, 1065-1099.
- \*3) Ichikawa, H., H. Masunaga, and H. Kanzawa (2009): Evaluation of precipitation and high-level cloud areas associated with large-scale circulation over the tropical Pacific in the CMIP3 models. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 87, 771-789. doi:10.2151/jmsj.87.771.
- \*4) Ichikawa, H., H. Masunaga, Y. Tsushima, and H. Kanzawa (2012): Reproducibility by climate models of cloud radiative forcing associated with tropical convection. *J. Climate*, 25, 1247-1262. doi:10.1175/JCLL-D-11-00114.1.
- 5) Kiehl, J. T. (1994): On the observed near cancellation between longwave and shortwave cloud forcing in tropical regions. *J. Climate*, 7, 559-565.

- 6) K-1 Model Developers (2004): K-1 coupled model (MIROC) description. H. Hasumi and S. Emori (eds.), K-1 Technical Report. 23pp.
- 7) Lindzen, R. S., M.-D. Chou, and A. Y. Hou (2001): Does the Earth have an adaptive infrared iris? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 82, 417-432.
- 8) Ramanathan, V. and W. Collins (1991): Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Nino. *Nature*, 351, 27-32.
- 9) Watanabe, M. and Coauthors (2010): Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, 23, 6312-6335.
- 10) Watanabe, M. and Coauthors (2011): Using a multi-physics ensemble for exploring diversity in cloud-shortwave feedback in GCMs. *J. Climate*, submitted.
- 11) Williams, I. N., R. T. Pierrehumbert, and M. Huber (2009): Global warming, convective threshold and false thermostats. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21805.  
doi:10.1029/2009GL039849.
- 12) Yuan, J., D. L. Hartmann, and R. Wood (2008): Dynamic effects on the tropical cloud radiative forcing and radiation budget. *J. Climate*, 21, 2337-2351,  
doi:10.1175/2007JCLI1857.1.
- 13) Zhang, Y., S. A. Klein, J. Boyle, and G. G. Mace (2009): Evaluation of tropical cloud and precipitation statistics of Community Atmosphere Model version 3 using CloudSat and CALIPSO data. *J. Geophys. Res.*, 115, D12205. doi:10.1029/2009JD012006.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (9) CMIP3マルチモデルを用いた将来気候における季節進行の変化予測

国土交通省気象庁

地球環境・海洋部気候情報課

前田修平・及川義教・村井博一・平原翔二・萩谷聡

平成22年度～23年度累計予算額：5,197千円

(うち、平成23年度予算額：2,526千円)

予算額は、間接経費を含む。

**[要旨]** 地球温暖化の緩和・適応策を検討する際には、季節平均がどう変わるかだけでなく、季節進行がどう変わるかも重要な情報である。本研究は、日本の季節進行の将来変化という観点から、第3次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP3)に参加した複数の気候モデル実験の結果を用いた調査を行った。

はじめに、夏の季節進行の変化に注目するにあたり、CMIP3モデル群における日本付近のジェット気流(偏西風)の再現性を評価した。日本の夏の季節進行は、上空のジェット気流の南北変位と関係が深いためである。これに向けて、ジェット気流の季節変化の再現性能を評価するための指標(メトリック)を考案し、再現性能の高いモデルの客観的な選別を行った。選択された5つのモデルを用いて将来変化を調査したところ、これら再現性能の高いモデル群に共通して、梅雨明けの遅れ、すなわち夏の不順な天候が増える将来変化が示唆された。

続いて、冬の気温の将来変化について調査を行った。気候変動に関する政府間パネル第4次評価報告書(IPCC AR4)では、CMIP3マルチモデル平均にみられる東アジア域の気温は、相対的に夏よりも冬の昇温量が大きいことが述べられている。本調査は、これと関連して日本付近の冬型の気圧配置を弱化させるような大気循環場のパターンを多くのモデルが予測していることを確かめた。こうした、気温として、また降水量としての季節進行の弱化の一因として、温暖化による熱帯の大気成層安定化による鉛直循環の弱化が、定在プラネタリ波の変調やテレコネクションといった大規模な場の変調を介して日本付近の循環場の変化に一部寄与している可能性を指摘した。本研究で得た知見は、気象庁が作成する温暖化予測情報第8巻の執筆に役立てられる予定である。

**[キーワード]** 気候変化予測、マルチモデル、季節進行

#### 1. はじめに

我が国の気候は季節変化が明瞭で、春夏秋冬といった季節の存在やその進行は我々の生活だけでなく、経済活動のあり方にも大きく関わっている。特に夏は農業やエネルギー需要を考える上では重要な季節である。夏の季節進行は、6～7月にかけての梅雨期、その後の盛夏期、晩夏から初秋にかけての台風や秋雨シーズンで特徴づけられるが、年によっては梅雨明け後も天候がぐずつくなどすると、社会経済に大きな影響を及ぼすことは周知のとおりである。

2007年に公表された気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書<sup>1)</sup>(AR4)によれば、

気候システムが温暖化していることに疑う余地はなく、20世紀後半の温暖化は人間活動の影響である可能性が非常に高いと結論づけた。さらに、各国で開発された全球大気海洋結合モデルによれば、地球温暖化に伴い、全球的に気温の上昇や大雨などの極端現象の頻度の増加などが予測されている。我が国の気候はアジアモンスーンシステムと密接な関わりがあるため、その将来変化は、日本の季節進行の変化にも大きく影響すると考えられる。

このような調査を行うには、気候モデルによる温暖化予測シミュレーションの結果を解析するのが望ましい。しかし、例えば梅雨前線をモデルで表現するには、細かい空間分解能が必要となる。一例として、Kusunoki et al. (2006)<sup>10)</sup>では、空間解像度20kmという高解像度の全球大気モデルを用いて梅雨前線をよく再現することに成功し、将来気候では梅雨明け時期が遅れることを指摘している。

一方、気候モデルを用いた地球温暖化に伴う将来の気候変化予測には必ず不確実性が伴うため、複数のモデルの結果を用いた評価を行うことが望ましい。複数の気候モデルの結果を評価する取り組みとして、世界気候研究計画(WCRP)のもと行われた結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP)がある。IPCC AR4の評価対象にもなった第3期(Phase3, CMIP3)では20以上の全球大気海洋結合モデルが参加し、そのデータは誰でもアクセスすることが可能である。しかし、これらのモデルは解像度が粗く、梅雨前線などの構造を直接再現することは難しい。したがって、複数のモデルを利用するメリットを生かしつつ、夏季の降水の季節進行を調査するための手段として、対象となる現象と深い関係がある別の指標を使って間接的にその評価することが考えられる。

このような指標が有用であると判断されれば、それは逆に気候モデルの再現性能、特に夏季の気候の再現性を評価するための基準(メトリック)としても活用されることが想定される。

## 2. 研究開発目的

本研究ではCMIP3に参加した複数の大気海洋結合モデルのデータを用いて、将来の日本の季節進行の変化について、特に農業や水資源分野にも関わりのある夏季の降水量に着目し、その不確実性も含めた調査を行うことを目的とする。

調査にあたっては、上空の強い偏西風帯(亜熱帯ジェット)の位置や強さに特に注目する。亜熱帯ジェットの位置は、冬から夏にかけて亜熱帯域から中緯度帯へ北上し、それにもなって降水帯も北上することが知られており、我が国では沖縄を皮切りに南から順に梅雨入りしていくことと関係している。気象庁における予報の現場でも亜熱帯ジェットの位置は考慮すべき重要な要素のひとつである。本研究では、この亜熱帯ジェットの再現性を、気候モデルを評価するためのメトリックとして活用できるか検討を行い、これを用いて将来の夏の降水量の変化についても評価を行うこととする。

気温に関しては、IPCC AR4で触れられた、東アジア域は夏よりも冬の昇温量が大きいという特徴を日本付近で確認するとともに、特にその冬の大きな昇温の要因の解釈を試みる。

## 3. 研究開発方法

本研究では、IPCC AR4の評価対象になったCMIP3のマルチモデルデータによる20世紀気候再現実験(20C3M)、および排出に関する特別報告書(SRES) A1Bシナリオによる将来気候予測実験の結果を使用した。それぞれ、20世紀末の1979-1996年の18年平均から現在気候値を、および21世紀末の

2081-2098年の18年平均値から将来気候値を定義した。

夏の季節進行を評価するにあたっては、この期間の日別データが利用可能なモデルをすべてのモデルを利用した（計18モデル）。dailyデータはすべて半旬値に変換して使用し、前後2半旬の二項分布フィルタを施した。アンサンブル実験を実施しているモデルにおいては、1ランのみ採用した。モデル群はそれぞれの解像度が異なるため、等緯度経度 $2.5^\circ$ 格子に統一した上で解析に用いた。現在気候の再現性能の検証データとして、気象庁長期再解析JRA-25、降水量には米国大気海洋庁解析降水量(Climatology prediction center Merged Analysis of Precipitation, CMAP)データを用いた。

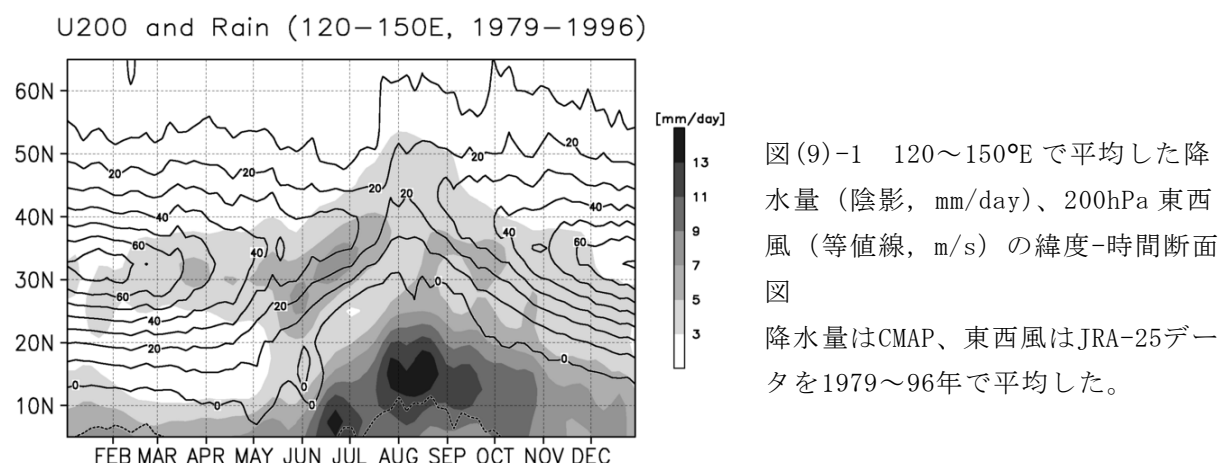
冬の気候の変化を評価するにあたっては、それぞれの気候値の定義期間に月平均値が利用可能な23モデルを使用した。

## 4. 結果及び考察

### (1) 長期再解析データ等でみる夏季の季節進行

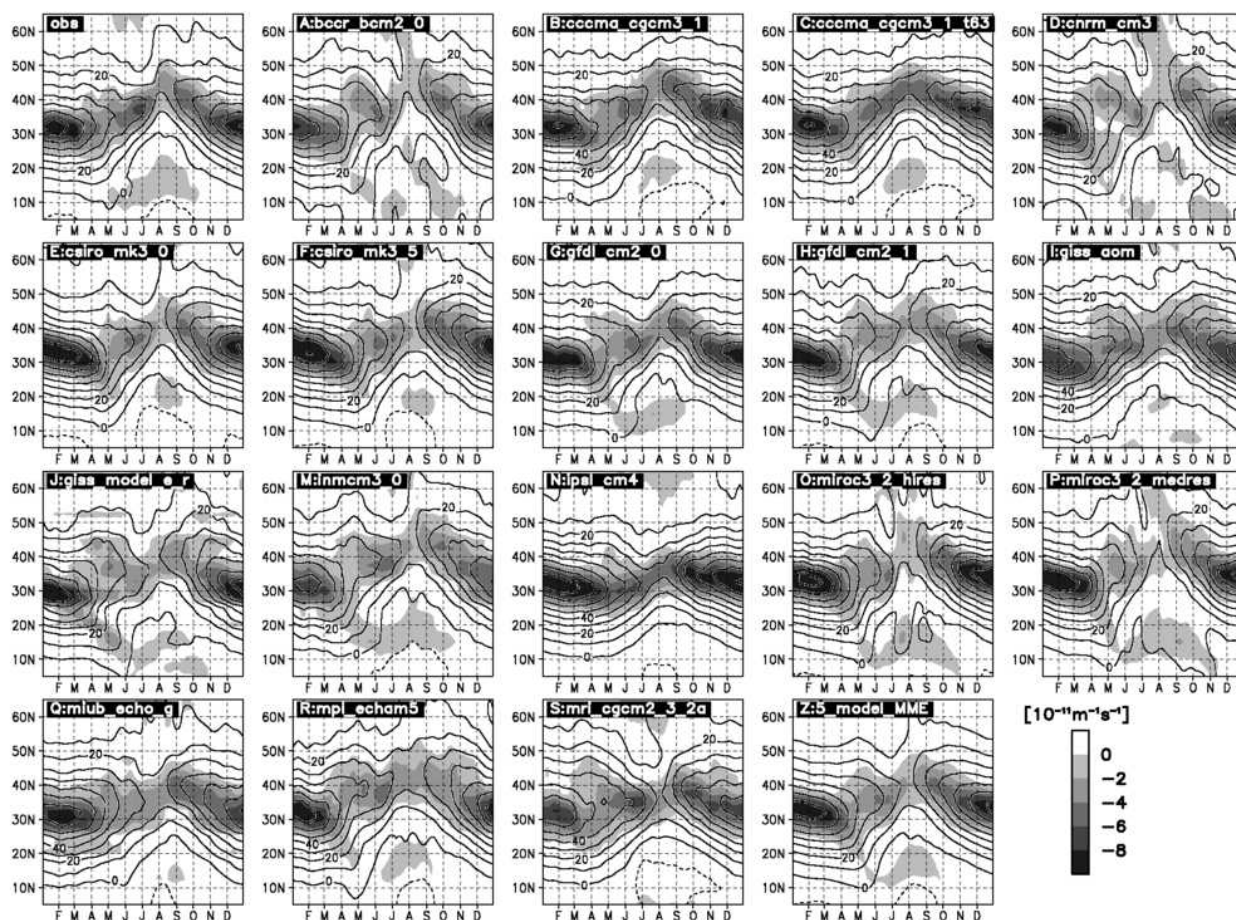
はじめに長期再解析データ等を用いて、夏季の季節進行の様子について概観する。図(9)-1は $120\sim 150^\circ\text{E}$ で平均したJRA-25の200hPa東西風(U200)および、CMAPの降水量の季節進行を示している。東西風を見ると、冬は $30^\circ\text{N}$ にある西風ジェットが、5月の沖縄の梅雨入りとともに、やや北上している。さらに夏にかけて西風は弱化しながらも緩やかに北上を続け、7月には $40^\circ\text{N}$ 付近まで到達する。その後、北へ大きく不連続にジャンプし、この時期に西日本以北は梅雨明けの時期を迎える。8月をすぎると、ジェットは徐々に振幅を増しながら南下し、日本は秋雨シーズンに入る。

降水量を見ると、年を通じると、降水量ピークの南北変位は、西風ジェットの季節進行と良く対応している。5月に入ると、上層ジェットのコアのおよそ $5^\circ$ ほど南に梅雨前線に相当する降雨帯が形成され、ジェットと足並みを揃えて北上を始める。また、7月後半のジェットのジャンプと共に降水量の極大が解消する。一方、熱帯域に目を向けると、Inoue and Ueda(2009)<sup>6)</sup>で指摘されているような雨域のステップワイズな季節推移が見られる。



### (2) CMIP3モデル群にみる夏の季節進行の再現性能

図(9)-2はJRA-25およびCMIP3モデル群に関して、 $120\sim 150^\circ\text{E}$ で平均したU200とU200の2階y微分( $U_{yy}200$ )の緯度-時間断面図を示す。ここで $U_{yy}200$ を示したのは、西風ジェットは梅雨前線へ擾



図(9)-2 日本付近で東西平均した上層東西風とその南北2階微分。実線は、120-150°Eで平均した200hPa東西風[m/s]、陰影は200hPa東西風の南北2階微分[ $10^{-11} \text{m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ]。各パネルには、図の作成に利用したモデル名が記載されている。ただし、一行目一列はJRA-25。4行目4列は、夏の季節進行の再現性能が良いと判断された5モデルの平均(5MME)。

乱を運ぶ導波管の役割を果たす<sup>12)</sup>が、 $U_{yy200}$ が導波管の構造を決める量(実効ベータ)に関連した物理量であること、また空間的なハイパスフィルタとして作用するため、ジェットのコアの強度や緯度構造をより明瞭に捉えられるようになるためである。

観測(図(9)-2の1行目1列)によると、 $U_{200}$ に見られたように、5月から盛夏期へ向かって、梅雨前線帯の降水は強まる一方、西風の振幅は弱化する。しかし $U_{yy200}$ は特徴が異なり、降水量のピークと同期して7月の梅雨最盛期に強化され、偏西風の中心を明瞭に示す。理由として、対流活動に伴う傾圧応答がコアを明瞭化している<sup>13)</sup>ことが考えられる。このことから、前線活動の監視という点では $U_{200}$ に比べ、 $U_{yy200}$ の方が適していると考えられる。

各CMIP3モデルでシミュレーションされたジェット気流に着目すると、ジェット気流の北進のをよく再現できていないモデルが見られることが分かる。たとえば、モデルA(BCCR-BCM2.0)や、モデルD(CNRM-CM3.0)などでは、夏季のジェット気流の軸は、北進ではなく南進しており、モデル

N(IPSL CM4)は、北進が不明瞭で、夏を通じてほぼ同じ緯度帯にとどまる。ここで得た結果は、将来予測へ進む前に、現実的な気候を再現できるモデルをあらかじめ選択する必要を示唆する。

本研究ではここまで見てきたUyyの季節進行をもとに、モデルの再現性を評価するメトリックを定義する。具体的には、120~150°Eで平均した4~10月、20~55°NのUyyの緯度-時間断面図の観測(JRA-25)と各モデルのパターン相関および分散をTaylor(2001)<sup>14)</sup>の定義式(1)に代入することでスコアを算出する。

$$S = \frac{4(1+R)^4}{\left( SDR + \frac{1}{SDR} \right)^2 (1+R_0)^4} \quad (1)$$

ここで、 $R$ はモデルと観測のパターン相関係数、 $SDR$ はモデルと観測とのパターン標準偏差の比である。 $R_0$ は、モデル内部の不確実性を表現する量であるが、本研究ではこれを考慮しないため、1と置く。本研究で採用したメトリックのもとで高い得点を得るモデルは、Inoue and Ueda(2009)<sup>6)</sup>の東南アジアモンスーンの再現性メトリックでも高い得点を示す傾向がみられ(図略)、日本付近の夏のジェットの再現性が熱帯の再現性とも関連していることが示唆される。

### (3) 夏の将来変化

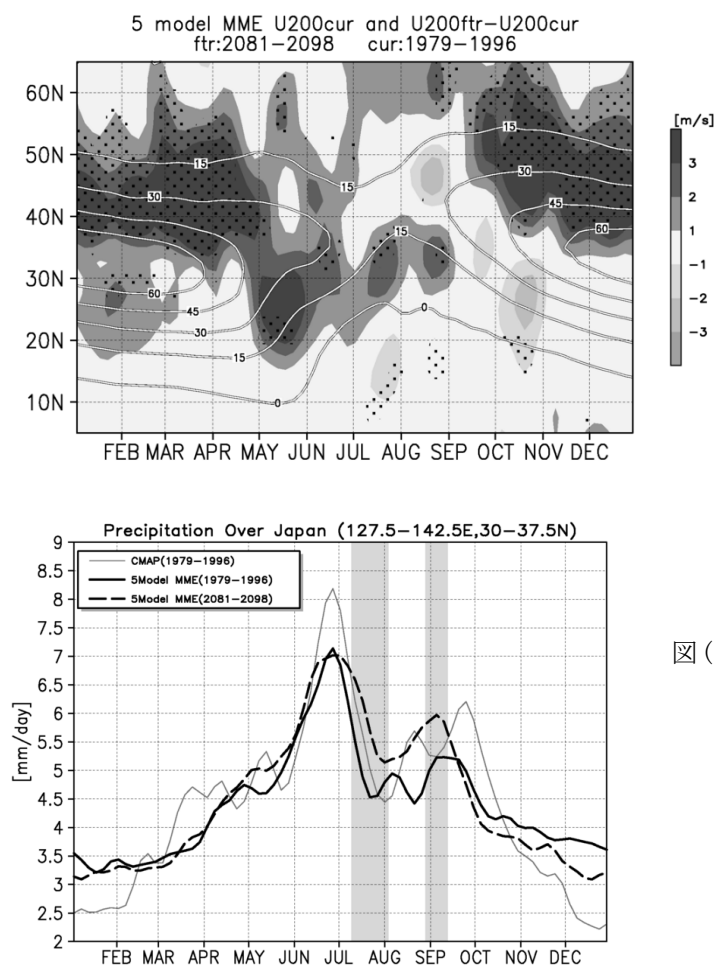
将来の気候の変化を評価するにあたっては、(2)で採用したメトリックのスコアが全モデルの平均スコアより1標準偏差以上高かった上位5つのモデルをもとに、マルチモデルアンサンブル(5MME)を構成して行う。5MMEにより再現されたジェット気流は、まだ盛夏期に西風が弱いというバイアスが残るものの、観測に見られるような季節変化の特徴をよく表現できている(図(9)-2)。また、ジェット気流の再現性を再度同じメトリックで評価すると、そのスコアはどのモデルよりも高くなった。上位からいくつのモデルを用いるかという点に任意性は残るが、採用するモデルの数を増やした場合、傾向は不明瞭になるものの、以下で示す結果の傾向は変わらないことを確認している。

図(9)-3に5MMEによるジェットの季節進行の将来変化を示す。冬季は現在気候の北側で西風が強化されており、Lu et al. (2008)<sup>11)</sup>等で指摘されているハドレー循環の極側への拡大とも整合的である。一方、興味深いことに夏に関しては逆にジェットが南で強まる傾向が見られ、夏季のジェットの北進の弱化が示唆される。年を通じてみると、ジェット気流が南に位置する冬季に北側で強まり、ジェット気流が北に位置する夏季に南側で強まることから、ジェット気流の年変化が弱めるような将来変化となる。夏に着目すると、日本付近では、ジェットの軸が40Nを越えて北進する梅雨明けの時期に、その南で西風が強まっているため、日本付近はジェットの影響をうけやすい時期がのびることを示唆する。Sampe and Xie(2010)<sup>13)</sup>では、ジェット気流に沿って前線帯に流れ込む大陸からの暖気移流が、梅雨前線帯の緯度を定める要因のひとつになっていることが示されている。この暖気移流の純粋な強制効果に着目する際には、梅雨前線帯そのものによる大気応答のシグナルを極力含まない、対流圏中層の変化を調べることが重要である。本調査で選択した5モデルでは、ここまで見た上層の西風が現在より南で強いことと整合して、この中層暖気移流の中心もまた梅雨明けの時期に現在より南で、日本付近で強まるよう変化していることがわかつ



た(図略)。

図(9)-4には、日本付近(135~142.5°E, 32.5~40°N)で領域平均した降水量の時系列図を示す。上位5モデルによる現在気候再現実験は、降水量の年変化を良く再現できており、夏に関しても、6月下旬のピーク時の雨量は1~2割ほど少ないものの、ピークがおとずれる時期は再現されている。特に夏に着目すると、現在気候では、梅雨明け後に梅雨入り前と同程度にまで降水量が減るのに対し、将来気候では梅雨明けに対応する降水量の減少が弱く、梅雨が明けた後も9月ごろまで現在より降水量の多い状態が続いている。すなわち、温暖化すると、日本付近では梅雨が長引き、梅雨明け後も不順な天候になりやすいと予想される。こうした梅雨明けの遅れは、ジェット気流の季節進行の弱まりと整合的である。なお、ジェットが南で強い傾向は夏の間続くので、8月末から9月はじめごろにも多雨傾向、すなわち日本特有の“秋雨”の早まりが有意に予測されている。ただし、CMIP3の現在気候には秋雨に対応するピークが観測よりもだいぶ早く訪れるバイアスがあるため、結果の解釈は慎重に行う必要がある。

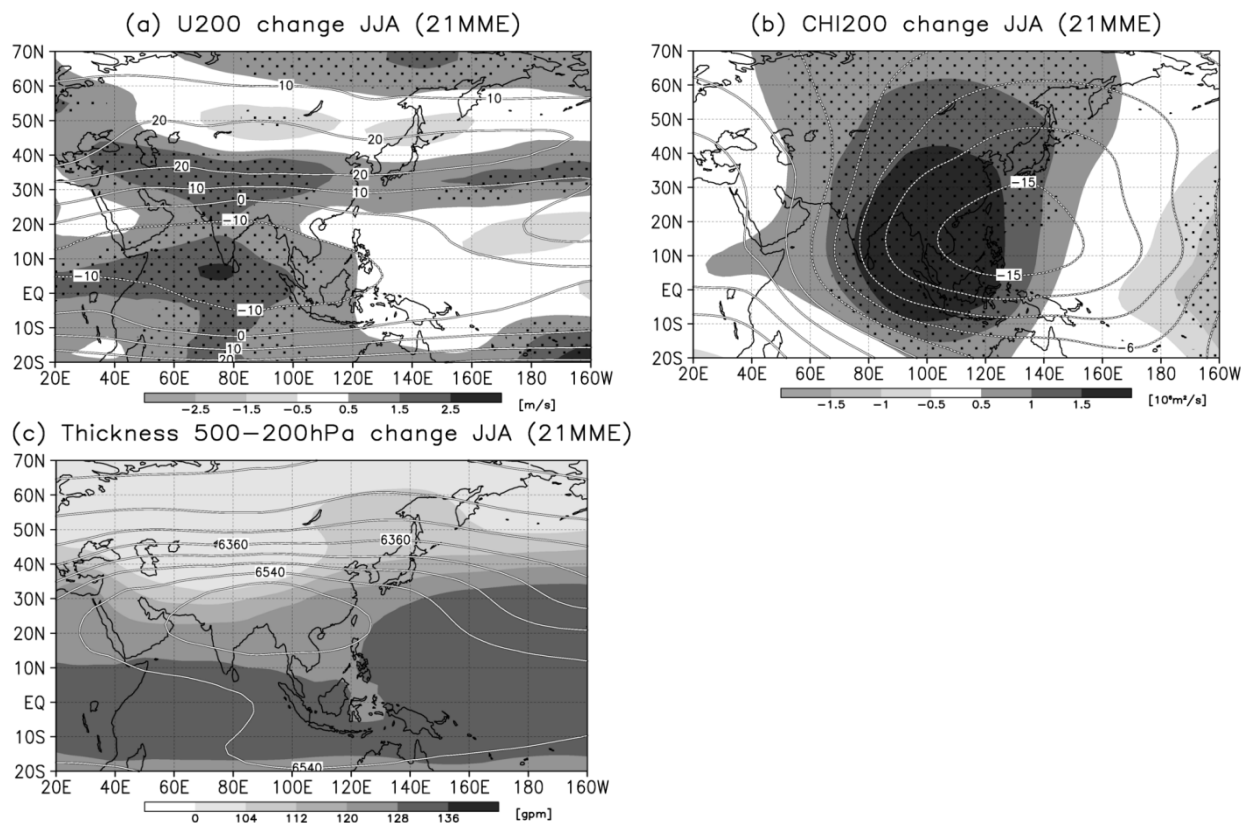


図(9)-3 ジェット気流の季節進行の再現性の良い5つのモデルのアンサンブル平均によるMMEによる200hPa東西風の季節進行の将来変化。実線は120~150°Eで平均した200hPa東西風[m/s]、陰影は200hPa東西風の将来変化[m/s]。将来変化の符号が全5モデルで一致する領域にはドットを重ねて表示。

図(9)-4 西日本~東日本付近で平均した降水量の季節変化。灰色実線はCMAP、黒色実線は上位5モデルによるMME現在気候、黒色点線は5モデルMMEの将来気候。陰影は、将来変化の符号が、全モデルで一致した期間を示す。

#### (4) 夏の季節進行の将来変化に関する考察

ここでは、これまで述べてきた将来の夏季の季節進行の遅れの原因について考察する。図(9)-5(a)にU200、図(9)-5(b)に200hPa速度ポテンシャルのMMEによる8月の将来変化の分布を示す。図(9)-3で日本付近ではジェットが夏を通じて現在の軸の南で強化される傾向があることを述べ



図(9)-5 21モデル平均による夏季(6,7,8月平均)の、(a)200hPa東西風(m/s)、(b)200hPa速度ポテンシャル( $10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )、(c)500-200hPa層厚(gpm)。等値線は、現在気候値。陰影は将来変化。(a)および(b)図中のドットは、21モデル中16モデルが同じ符号の将来変化を予測していることを示す。こうした領域では、両側符号検定において危険率5%で有意な差があると判断される。(c)図では、全域で有意なので、ドットは表示していない。ここでは、層厚データを利用できるモデルの数が21個であったことから、他の要素も21モデルの平均とした。

たが、図(9)-5(a)からは、その傾向がアジアジェット全体にも当てはまることを示している。速度ポテンシャルの将来変化からは、現在気候では対流活動が活発な西太平洋における鉛直循環が有意に弱くなっており、アジアモンスーンシステム全体の循環が弱まることが示唆される。これまでUeda(2006)ら<sup>15)</sup>によって指摘されてきた将来気候におけるウォーカー循環の弱化、モンスーン循環の弱化といったこととも整合的である。図(9)-5(c)では、チベット高気圧が弱まる将来変化が示されており、その北縁を流れているアジアジェット全体の南偏との関係が示唆される。Rodwell and Hoskins(1996)<sup>12)</sup>に示されたように、チベット高気圧の形成には西太平洋の上層発散が関与していることが示されていることから、西太平洋の鉛直循環の弱体化が、上層のチベット高気圧形成に向けた発散風強制を減らし、チベット高気圧の弱化と北への張り出しが弱まることが、アジアジェットの南偏へ影響しているのではないかと考えられる。

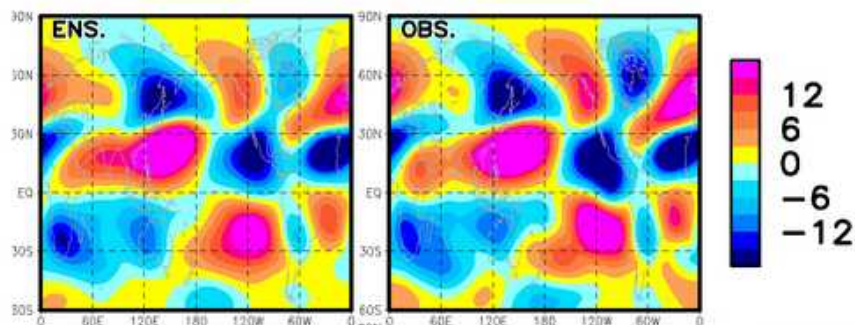
先行研究では、エルニーニョ現象に似た熱帯の大気応答に対する、太平洋高気圧の西への張り出しおよび日本への水蒸気フラックス流入の増加が、梅雨末期の雨量の増加に寄与していることが指摘されており<sup>6)7)</sup>、本調査は、こうした効果に加わるものとして、アジアジェットの南下が前

線帯を南で強めている可能性を示した。

今後、さらに調査を続け、より詳細な梅雨変化のメカニズムを解明していくとともに、わが国の気候を特徴づける他の現象についても、本研究のような手法が有効であるのか検討を進めてゆく必要がある。

### (5) 冬の将来変化

図(9)-6(右)には、観測に見られる1月の200hPa流線関数の東西非対称成分を示す。東アジア域に長波の深いトラフが位置しており、日本の冬の気候の形成にもおおきな役割を果たしていることが分かる。図(9)-6(左)に示したように、CMIP3マルチモデル

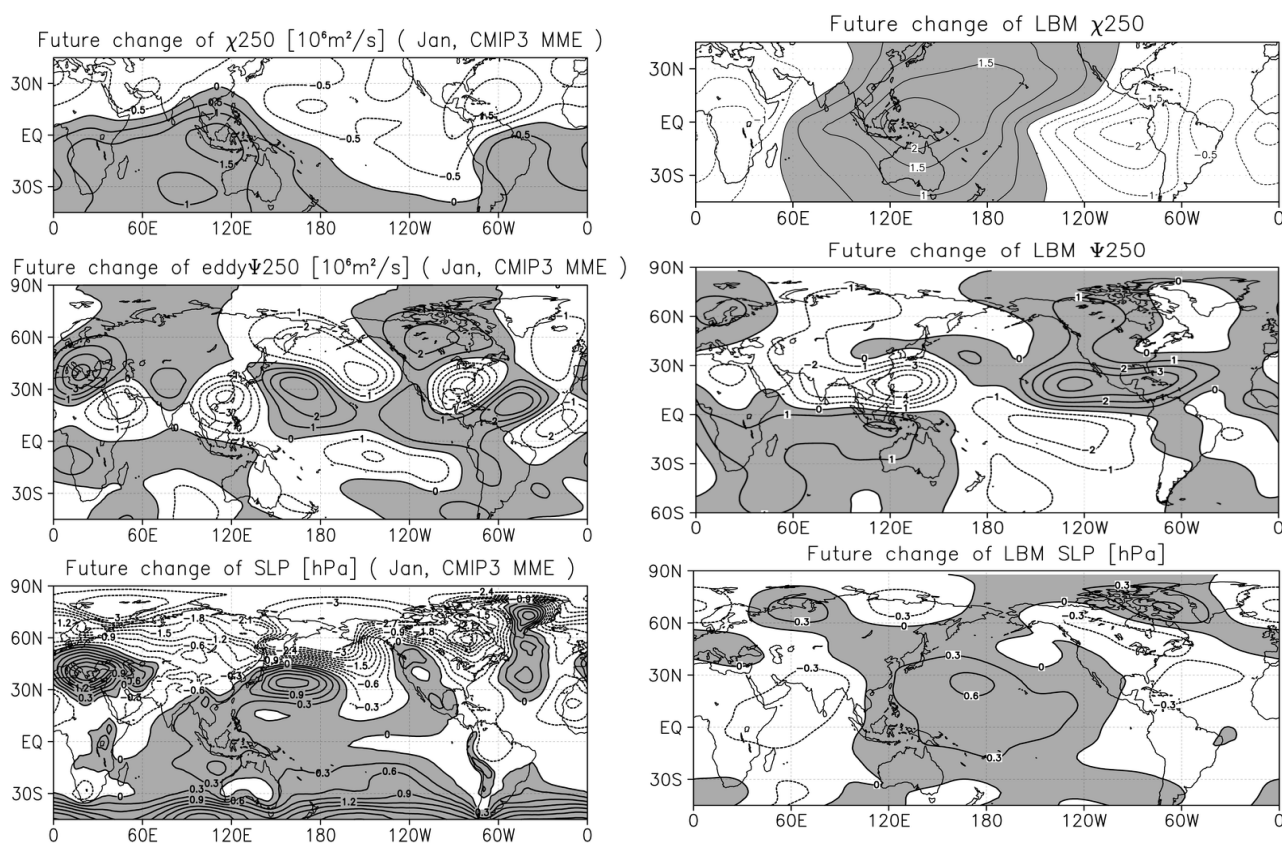


図(9)-6 23モデルによるMME、およびJRA-25による200hPaの流線関数。縦軸は緯度、横軸は経度。帯状平均を差し引いた残差を東西非対称成分と定義し、図示されている。単位は、 $10^6 \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ 。

平均では、このトラフをはじめ、北半球冬季のプラネタリ規模の高気圧・低気圧性循環の構造は非常によく再現されていたため、この節では、メトリックによるモデルの選抜は行わないこととする。こうした北半球冬季の東西非対称な気候場の形成には、熱帯・中高緯度の非断熱過熱強制、地形からの強制、中高緯度の高周波擾乱からのフィードバックなどが関与していると考えられている。Held et al. (2002)<sup>4)</sup>では、北半球冬季の東西非対称な循環の成り立ちに関して、これらの効果が与える影響が個別に検討されており、そのうち、熱帯域の非断熱加熱に強制された波が中高緯度へも影響を与えることが示されている。その一部は、日本付近に定在する長波のトラフの形成にも寄与していると考えられる。

図(9)-7(左列)にCMIP3モデル群の全モデル平均による1月の大気循環場の将来変化を示す。対流圏上層(250hPa)の速度ポテンシャルの将来変化(図(9)-7上段左)によると、インドネシア付近を中心に収束偏差が見られる。この領域は現在気候の大規模発散域と重なるため、その発散の弱化に対応する。先行研究で指摘されているように(たとえばKnutson and Manabe 1995<sup>9)</sup>)、成層安定化とともに対流圏中層の上昇流が弱まるモデルが多く、非発散の関係と整合するように上層の発散の弱化が現れていると考えられる。一方、太平洋熱帯域東部においては、逆に大規模収束が弱化するような変化が見られる。

対流圏上層の東西非対称流線関数(帯状平均からの残差の流線関数)の将来変化(図(9)-7中段左)では、亜熱帯域を見ると、おおむね30°Nに沿った格好で、正と負の将来変化が連なるcircumglobal teleconnection (CGT; Branstator, 2002<sup>2)</sup>)に似た波列状のパターンが目立つが、熱帯域に注目すると、海洋大陸をはさんで南北に低気圧性循環偏差が見られる。気候場に形成されている南北両半球の高気圧性循環を、おのおの弱める方向の変化となる。太平洋熱帯域東部では、高気圧性応答の対が見られる。これら流線関数の偏差の中心は、太平洋熱帯域西部および東部に見られた速度ポテンシャル偏差の北西/南西側に位置するため、それぞれの位置での鉛直循環弱化に対



図(9)-7 CMIP3の23モデル平均による1月の将来変化(左列)および、別途線形大気モデル(LBM)でシミュレートされた熱帯の成層安定化の効果による将来変化(右列)、上から、250hPaの速度ポテンシャル(上段)、250hPaエディ(帯状平均からの残差)の流線関数(中段)、海面気圧(下段)。単位は、それぞれ $10^6\text{m}^2\text{s}^{-1}$ 、 $10^6\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{hPa}$ 。将来変化が正の領域に陰影。等値線は現在気候値を示す。

するMatsuno-Gill応答(Gill, 1980<sup>3)</sup>)が関与していると考えられる。中高緯度に注目すると、海洋大陸の北側を起源に、日本の南東海上、アリューシャン列島付近、北米、と大円に沿った波列状の将来変化が見られる。日本の南東の高気圧性偏差は、等価順圧な構造を持ち、後述するように海面気圧(SLP)の場にも現れている。

SLPの将来変化(図(9)-7下段左)では、海洋大陸を挟んで南北に高気圧性の変化が見られ、鉛直循環弱化にともなうMatsuno-Gillパターンと整合的である。日本の南東海上には高気圧性の変化が見られ、東アジアモンスーンの弱化<sup>6)</sup>が示唆される。日本にとっては、西高東低の冬型の気圧勾配が緩む、暖冬側への変化となる。

上述したような北半球冬季の将来変化に関して、熱帯の鉛直循環弱化による寄与を調査する。調査には、Watanabe and Kimoto(2000)<sup>16)</sup>で用いられた線形大気モデル(LBM)を利用する。LBMには、東西対称な基本場を設定し、それに対し、JRA-25から算出した現実的な非断熱加熱分布からどのような東西非対称循環が生じるのかに着目する。CMIP3の将来気候を基本場としたLBMのレスポンスから、現在気候を基本場としたレスポンスを差し引いたものを、東西非対称循環の将来変化とした。CMIP3将来気候では、現在気候より熱帯の成層の鉛直安定度が大きくなっている。与えた加熱は共通で、違いは基本場のみにあるため、得られた差は主に熱帯の成層安定化に起因する将来

変化への寄与と考えられる。図(9)-7右列は、線形大気モデルのシミュレーション結果をCMIP3の将来変化の図(図(9)-7左列)と同じ体裁で示す。これによると、熱帯の鉛直循環の弱化や、中高緯度のプラネタリ規模の波列のパターンなどが、CMIP3で予測される将来変化のパターンとよく整合していることが分かる。こうしたことから、熱帯の成層安定化がCMIP3の冬季北半球の東西非対称な将来変化の形成に寄与していることが分かる。一方で、日本の東海上の高気圧性変化、すなわち日本付近の西高東低の気圧配置の弱化のみに着目する場合、その振幅は十分には再現されていない。実験の設定をより詳細化し、中高緯度の循環場の変化や地表面の温度コントラストの変化など、他の要因を含めて、より理解を深めていく必要があると考える。

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

本研究ではマルチモデルによる予測データを用いて日本の季節進行の将来変化について調査を行った。はじめに、地球温暖化に伴って将来の日本の梅雨がなかなか明けず、不順な天候になる可能性があることを示した。このひとつの要因として、現在気候の再現性能の良いモデルに共通して亜熱帯ジェットの南側での強化を予測していることから、ジェット気流の南側への強化により、日本付近がジェット気流の影響を受ける時期が長くなることが、影響している可能性を指摘した。また、この調査にあたり、日本の夏季の季節進行の再現性を評価するためのメトリックとして、亜熱帯ジェット的位置の季節進行を表す指標を導入し、十分に有用であることを示した。このメトリックは今後、別の結合モデルの日本の夏の季節進行の再現性を評価する上でも役に立つものであると考えられる。また、本調査では温暖化にともなう熱帯の成層安定化の効果が、夏季および冬季ともに日本の気候へ影響を及ぼしうることを示した。これまで先行研究で蓄積されてきた知見に加えて、さらに温暖化の理解を進める上で有効な観点を得ることが出来たと考える。

### (2) 環境政策への貢献

気象庁では、地球環境業務の一環として、地球温暖化にともなう将来の気候変化予測の結果を温暖化適応策に関係する行政機関や研究機関等に提供している。本研究から得られる知見は、今後気象庁が提供する地球温暖化、気候変化予測に係る情報としても活用し、地球温暖化に関する国民の認知や理解の促進に役立てるとともに、適応策の立案・推進に関わる機関に提供してゆく計画である。

## 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。

＜査読付論文に準ずる成果発表＞

特に記載すべき事項はない。

＜その他誌上発表（査読なし）＞

- 1) 平原翔二，萩谷聡，村井博一，及川義教，前田修平（2011）：温暖化による日本の冬の変化．熱帯との関連．平成23年度「異常気象と長期変動」研究集会報告．

**（2）口頭発表（学会等）**

- 1) 平原翔二，大野浩史，及川義教，前田修平：CMIP3にみられる温暖化時の日本の夏の季節進行の変化．日本気象学会2010年度秋季大会，京都，2010年10月．
- 2) 平原翔二，萩谷聡，村井博一，及川義教，前田修平：温暖化による日本の冬の変化 熱帯との関連 ～CMIP3を用いて～．日本気象学会2011年度秋季大会，京都，2010年10月．

**（3）出願特許**

特に記載すべき事項はない。

**（4）シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）**

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) 気候変動に関する政府間パネル(2007)：第4次評価報告書．
- 2) Branstator, G. (2002): Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation. *J. Climate*, 15, 1893-1910.
- 3) Gill, A. E. (1980): Some simple solutions for heat induced tropical circulation, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 106, 447-462.
- 4) Held, Isaac M., M. Ting and H. Wang, 2002 : Norther winter stationary waves: thory and modeling. *J. Climate*, 15, 2125-2144.
- 5) Hori, M. E., and H. Ueda(2006) : Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03713.
- 6) Inoue, T. and H. Ueda(2009) : Evaluation for the Seasonal Evolution of the Summer Monsoon over the Asian and Western North Pacific Sector in the WCRP CMIP3 Multi-model Experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 539-560.
- 7) Kimoto, M. (2005) : Simulated change of the east Asian circulation under global warming

- scenario, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L16701. doi:10.1029/2005GL023383.
- 8) Kitoh and Uchiyama (2006): Changes in Onset and Withdrawal of the East Asian Summer Rainy Season by Multi-Model Global Warming Experiments. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 247-258.
  - 9) Knutson, T. R., S. Manabe (1995): Time-mean response over the tropical Pacific to increased CO<sub>2</sub> in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Climate*, 8, 2181- 2199.
  - 10) Kusunoki, S., J. Yoshimura, H. Yoshimura, A. Noda, K. Oouchi, and R. Mizuta (2006): Change of Baiu rain band in global warming projection by an atmospheric general circulation model with a 20-km grid size. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 581-611.
  - 11) Lu, J., G. Chen, and D. M. W. Frierson (2008): Response of the Zonal Mean Atmospheric Circulation to El Niño versus Global Warming. *J. Climate*, 21, 5835-5851.
  - 12) Rodwell, M. J., and B. J. Hoskins (1996): Monsoons and dynamics of deserts. *Q. J. Meteorol. Soc.*, 122, 1385-1404.
  - 13) Sampe, T. and S.-P. Xie (2010): Large-Scale Dynamics of the Meiyu-Baiu Rainband: Environmental Forcing by the Westerly Jet. *J. Climate*, 23, 113- 134.
  - 14) Taylor, K. E. (2001): Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183- 7192.
  - 15) Ueda, H., A. Iwai, K. Kuwako and M.E. Hori (2006): Impact of anthropogenic forcing on the Asian summer monsoon as simulated by 8 GCMs. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L06703, doi:10.1029/2005GL025336.
  - 16) Watanabe, M. and M. Kimoto (2000): Atmosphere-ocean thermal coupling in the North Atlantic: A positive feedback. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 126, 3343-3369.

## S-5 地球温暖化に係る政策支援と普及啓発のための気候変動シナリオに関する総合的研究

### 2. マルチ気候モデルにおける諸現象の再現性比較とその将来変化に関する研究

#### (10) 河川流域の水文循環の再現性とその将来変化に関する研究

京都大学防災研究所

水資源環境研究センター 水文環境システム研究領域

鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理

平成22～23年度累計予算額：6,736千円

(うち、平成23年度予算額：3,250千円)

予算額は、間接経費を含む。

**【要旨】** 第3期結合モデル国際比較プロジェクト(CMIP3)の実験結果について約80km四方である地域1次メッシュ単位に整理し、観測値や再解析値などの情報も統合した汎用的な気候変動情報データベースを構築した。このデータベースを用いることにより、国内の任意の地域において将来の気候変化を複数の気候モデルについて比較検証することが可能となった。将来の気候変化を現況の観測値に加味することで将来データを作成し、分布型流出モデルおよび地表面熱収支モデルを用いて我が国の代表的な9つの河川流域を対象に流出解析を行った。その結果、日本国内で評価した場合、気候モデルの出力値から算出した将来変化は、モデル間のばらつきの方が排出シナリオによる違いよりも大きかった。降水量の再現性については、総観規模の現象（アジアモンスーンや梅雨など）に応じて気候モデルを評価した現象メトリックとの間に関連性が認められ、降水現象について気候場の精確な予測が必要であることが示唆された。流域別にみると、気温の上昇幅は北に行くほど大きくなるため、蒸発散量の将来変化も北日本の流域で相対的に大きく増加する。量的に水収支に大きく影響するのは、将来の気温上昇により降雪から降雨に変化することと、融雪時期が早期化することであり、どの排出シナリオについても、積雪地域では春先の融雪量が大きく低下することが明らかとなった。河川流量については、北日本の流域で降雪量の減少により融雪量が低下することから、河川流量の季節変化が現在よりも平滑化されることが示唆された。南西日本の流域については、流量変化の絶対値は小さいものの夏季以外において流量が低下傾向にあり、渇水リスクが若干増加することがわかった。

**【キーワード】** CMIP3マルチ気候モデル、気候変化、流出解析、水文循環、気候変動情報データベース

#### 1. はじめに

テーマ2の研究グループでは、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次報告書において気候の将来予測に用いられたCMIP3マルチ気候モデルの20世紀再現実験結果を観測データに照らしながら比較解析することにより、様々な現象の再現性について、特にアジア域を対象とした指標（アジアメトリック）を作成している。本サブテーマでは、CMIP3マルチモデルの再現性評価結果およびアジアメトリックを用いて、河川流出過程における降水量増加と気温上昇の複合影響を明らかにした。



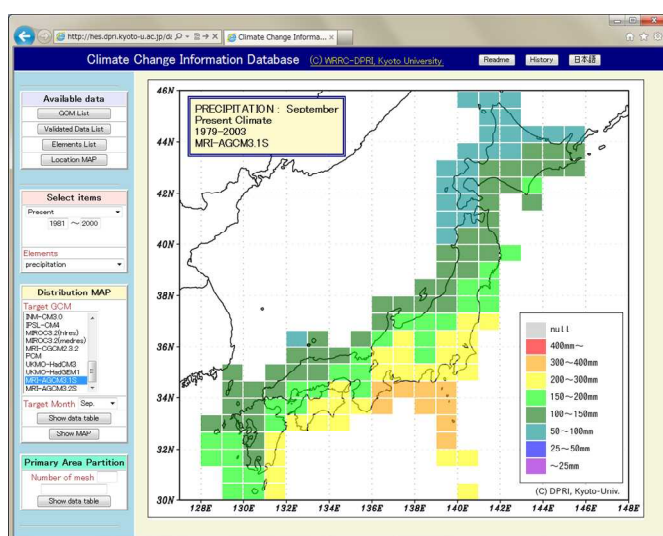
## 2. 研究開発目的

地球温暖化により我が国の気温は上昇し、それに伴い降水量も変化することが予測されている。河川流域の降水量の増加は河川流出量を増加させる方向に寄与する。一方、気温の上昇は森林植生等からの蒸発散量を増加させるため、河川流出量を減少させる方向に寄与する。さらに温暖化に伴う降雪量の減少は、特に積雪地域において河川流量の季節変化に大きな影響を与える。これらの複合影響を加味した河川流出量の将来変化を調べることは、将来の日本の水資源量予測にかかわる重要な問題である。そこで本研究では、CMIP3マルチ気候モデルによる将来変化予測の成果を活用し、河川流出過程における降水量増加と気温上昇の複合影響を明らかにし、水文循環の複雑性をふまえた将来変化を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究開発方法

### (1) CMIP3マルチ気候モデルデータを用いたデータベース開発

CMIP3マルチ気候モデルの実験結果について、降水量、気温、日射量、潜熱・顕熱フラックスなど、地上気象要素データを収集した。解像度の異なる気候モデルを統一的に扱うことと、全国任意の地域についての解析を可能とするため、実験結果を日本国内の地域1次メッシュ（緯度差40分、経度差1度、約80km四方）ごとに直近の4格子点の値を平均することで整理した。対象とした気候モデルはCMIP3の25モデルと気象研究所の高解像度全球大気モデルMRI-AGCMである。さらにアメダス観測値および再解析値JRA-25<sup>1)</sup>についても現在気候再現性の検証データとして用意し、汎用的な気候変動情報データベースとして構築した（図(10)-1）。一般に、流域スケールの解析において解像度の粗い全球気候モデルの出力値を直接用いることは不適切であるが、本研究では1次メッシュごとに求めた月別の気候変化値（例えば降水量なら将来変化比率、気温なら将来変化量）を現状の観測値に加味することで、将来推定値として解析を行うことを提案した。



図(10)-1 WEBサイトにて一般公開している気候変動情報データベース。

<http://hes.dpri.kyoto-u.ac.jp/database/> (2012年3月現在)

## (2) 日本の主要流域を対象とした分布型流出モデルによる解析

我が国の代表的な9流域（北から石狩川、最上川、阿賀野川、利根川、木曾川、長良川、淀川、吉野川および筑後川）における河川流出量の将来変化を、分布型流出モデル（Hydro-BEAM: Hydrological river Basin Environment Assessment Model）<sup>2)</sup>を用いて解析した。国土数値情報をもとにした1kmメッシュのデータから作成した河道網と土地利用データを境界条件として与える。河川流出モデル内では、地表面熱収支モデルSVAT<sup>3)</sup>によって融雪量と蒸発散量が計算され、キネマティックウェーブモデルにより河川流出量が計算される。将来気候については、以下の手法によって気候変化分を観測値に加味することで推定した。

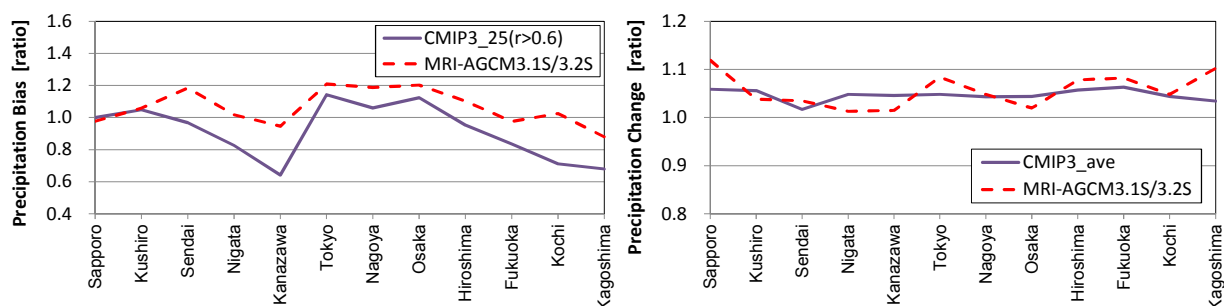
- ✓ データベースから月別、モデル別の気候変化量（降水量の倍率、気温の差分）を抽出
- ✓ アメダスと比較して現在気候の再現性の高いモデルを抽出
- ✓ 気候変化量を現在の観測値に補正して入力データとし、将来の河川流出量を計算

本手法は、全球気候モデル(GCM)の計算結果を直接用いずにその気候変化量を解析して観測値を補正するため、GCMの計算結果にバイアス補正やダウンスケーリングを施す必要がなく、これらの補正手法の違いによる不確実を取り除くことができること、入力データ準備のための計算量が少なく、数多くの気候モデルの予測結果を活用することが可能であること、が大きな長である。気候モデルの再現性検証においては、アジアメトリック開発の基礎データである現象メトリックとの関連性についても調べた。気候変動予測の不確実性を検証するため、3種類（A1B、A2およびB1）の温室効果ガス排出量シナリオに対するCMIP3の出力値を入力データとして用いた。さらに高解像度な気候モデルとしてMRI-AGCMの出力値も利用して河川の流況解析を行った。

## 4. 結果及び考察

### (1) データベースの開発とその応用

CMIP3の現在気候再現実験結果をアメダスや再解析値JRA-25<sup>1)</sup>と比較すると、気象要素によっては季節変動を再現できていない気候モデルがみられた。そもそもCMIP3の25のモデルは水平解像度が約100～450kmであり、日本列島の表現すら不十分なものも少なくない。量的なずれの大小も各気候モデルでばらつきがあるが、季節変動が表現できていないものは日本国内を対象とした解析には不適切と考え、アメダスもしくは再解析値JRA-25と月平均値の相関係数が低い気候モデルを除外した。1次メッシュ単位でCMIP3のモデルをアンサンブル平均すると再現性の向上が認められた一方で、全球20kmの超高解像度モデルであるMRI-AGCM3.1S/3.2Sの再現性は相対的に良好であることが確認できた。降水量や気温の将来変化を求めたところ、CMIP3とMRI-AGCM3.1S/3.2Sは解像度の違いが大きいものの、アンサンブル平均すると類似した結果となることがわかった（図(10)-2）。なお、日本陸域における将来変化を再現性のよいCMIP3の気候モデルを用いて見積もった場合、降水量、降雪量、気温などに変化が見られる一方で、風速や海面気圧の変化はほとんどなかった。

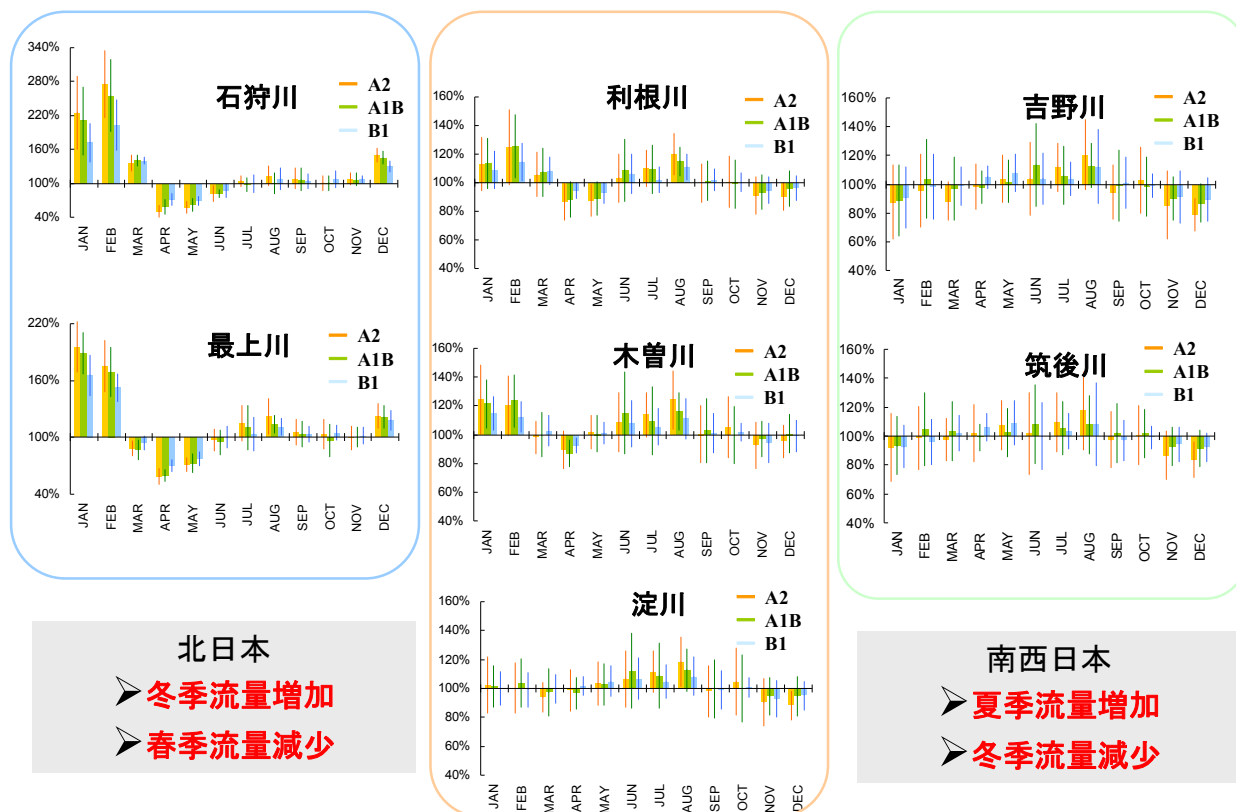


図(10)-2 主要都市に該当する一次メッシュにおける現在、将来の各20年間を対象としたCMIP3（相関係数>0.6）およびMRI-AGCM3.1S/3.2Sのマルチモデルアンサンブル。左は年平均降水量のバイアス（現在気候／アメダス）、右は年平均降水量の100年後の将来変化（将来気候／現在気候）。

## (2) 分布型流出モデルによる解析

日本国内で評価した場合、気候モデルの出力値から算出した将来変化は、モデル間のばらつきの方が排出シナリオによる違いよりも大きかった。気温は排出量に応じて上昇幅が異なるが、降水量については排出シナリオによる違いは小さく、総じて若干増加する傾向にあった。CMIP3とMRI-AGCMを比較した結果、モデルの高解像度化は日本国内の再現性向上に大きく寄与している一方で、両者のモデル群を平均して比較すると、気候値的な将来変化は概ね同程度であることが明らかとなった。降水量の再現性については、総観規模の現象（アジアモンスーンや梅雨など）に応じて気候モデルを評価した現象メトリックとの間に関連性が認められ、降水現象について気候場の精緻な予測が必要であることが示唆された。ただし、現象メトリックによる重み付けアンサンブルによる降水量の再現性の向上はわずかであった。一方、他の地上気象要素と現象メトリックの間に相関関係はみられなかった。

流域別の水収支では、排出シナリオに応じた気温上昇に伴う蒸発散量の増加が明らかとなった。気温の上昇幅は北に行くほど大きくなるため、蒸発散量の将来変化も北日本の流域で相対的に大きく増加する。流況変化によると、全国的に最大流量が増加し洪水リスクが高まると予測しているモデルが多い。北日本の流域においては、気温上昇により降雪から降雨に変化することが大きく影響し、図(10)-3に示すように、どの排出シナリオについても積雪地域では春先の融雪量が大きく低下することが明らかとなった。それに加えて、温暖化に伴って降雪が雨となって降雪量が減ること、および冬季の気温上昇により融雪量が増加することにより冬季（12～3月）の流量が将来著しく増加することから、河川流量の季節変化が現在よりも平滑化されることが示唆された。南西日本の流域については、月別の流量変化の絶対値は小さいものの夏季以外において流量が低下傾向にあり、将来の最小流量は現在よりも1～2割程度小さくなるため渇水リスクが若干増加することがわかった。



図(10)-3 CMIP3の複数の排出シナリオによる月別流量変化の将来予測。エラーバーはモデル間のばらつき（標準偏差）を示す。

## 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、CMIP3のように比較的解像度の粗い全球気候モデルにおいても、マルチモデルアンサンブルを行うことで高解像度大気モデル（MRI-AGCM）と概ね類似した将来変化を得られることが示された。これらの情報は日本国内任意の地域の情報を格納したデータベースとして構築し、WEBサイトにおいて一般に公開しており、様々な分野における温暖化影響評価研究において有効に活用されることが期待される。データベースの結果を具体的な河川流域に適用し、複数の気候モデルや排出シナリオにおける出力値を用いて詳細な流出解析を行うことで気候モデルによる結果のばらつきを予測の不確実性として定量化し、河川流況を議論することが可能となった。

### (2) 環境政策への貢献

本研究において構築したデータベースは、流出解析に限らず様々な分野で利用可能なものであり、WEBサイトを通じて一般公開することで利便性も高まっている。また、適応策を検討している省庁に対して本研究の内容を紹介しており、政策立案にむけた基礎資料としてデータベースが利用されることが期待される。

## 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) Sato, Y., T. Kojiri, Y. Michihiro, Y. Suzuki, and E. Nakakita (2011): Analysis of extreme hydrological events in major river basins in Japan under climate change. Proc. 34th IAHR Congress, 710-717.
- 2) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖 (2011): CMIP3マルチ気候モデルにおける日本陸域を対象とした地上気象要素の再現性・不確実性評価. 水文・水資源学会誌, 24, 5, 280-291.
- 3) 道広有理, 鈴木靖, 佐藤嘉展 (2011): 気候変動情報データベースの開発とその利用. 土木学会論文集B2 (海岸工学), 67, 2, I\_1211-I\_1215.

<査読付論文に準ずる成果発表>

特に記載すべき事項はない。

<その他誌上発表（査読なし）>

- 1) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖 (2010): CMIP3マルチ気候モデルにおける日本の気候の再現性比較. 京都大学防災研究所年報, 第53号B, 699-706.
- 2) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖 (2011): 気候変動情報データベースの構築とその活用手法. 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 747-755.
- 3) 佐藤嘉展, 小尻利治, 道広有理, 鈴木靖 (2011): マルチ気候モデルと貯水池操作を考慮した分布型水文モデルの木曾三川流域への適用. 京都大学防災研究所年報, 第54号B, 757-769.
- 4) Suzuki, Y., Y. Sato, and Y. Michihiro (2011): Global warming impact on hydrologic environment from climate change projections. Proc. Int. Seminar on Water Related Risk Management, Jakarta, Indonesia.

### (2) 口頭発表（学会等）

- 1) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: 日本陸域を対象としたCMIP3 マルチ気候モデルの評価. 水文・水資源学会2010年度研究発表会, 東京, 2010年9月.
- 2) Sato, Y., Y. Michihiro, Y. Suzuki, and T. Kojiri: Changes in long-term water balance of major river basin in Japan due to climate change. International Interdisciplinary Conference on Predictions for hydrology, Ecology and Water Resources Management, Czech Republic, Sep. 2010.
- 3) 佐藤嘉展, 道広有理, 鈴木靖, 小尻利治, 中北英一: AGCM20 とCMIP3 マルチ気候モデルを用いた日本の主要河川における流域災害予測. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.
- 4) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: 流域スケールの解析に向けたCMIP3 マルチ気候モデルのデータ活用法について. 日本気象学会2010年度秋季大会, 京都, 2010年10月.

- 5) 佐藤嘉展, 小尻利治, 道広有理, 鈴木靖: マルチ気候モデルと貯水池操作を考慮した分布型流出モデルの木曾三川流域への適用. 京都大学防災研究所研究発表講演会, 宇治, 2011年2月.
- 6) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: 気候変動情報データベースの構築とその活用手法. 京都大学防災研究所研究発表講演会, 宇治, 2011年2月.
- 7) Sato, Y., T. Kojiri, Y. Michihiro, and Y. Suzuki: Impact assessment of climate change on major river basins in Japan. 3rd International Workshop on Global Change Projection: Modeling, Intercomparison, and Impact Assessment, Tsukuba, March 2011.
- 8) 鈴木靖, 道広有理, 佐藤嘉展: CMIP3気候変動情報の活用ー大気海洋間CO2フラックス評価ー. 日本気象学会2011年度春季大会, 東京, 2011年5月.
- 9) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: GCMおよび排出シナリオの違いによるCMIP3マルチ気候モデルの予測不確実性について. 日本気象学会2011年度春季大会, 2011年5月.
- 10) Sato, Y., T. Kojiri, Y. Michihiro, Y. Suzuki, and E. Nakakita: Analysis of extreme hydrological events analysis of major river basins in Japan under climate variability, 34th-IAHR World Congress, Brisbane, Australia, June 2011.
- 11) Suzuki, Y. Suzuki, Y. Sato, and Y. Michihiro: Global warming impact on hydrologic environment from climate change projections. International Seminar on Water Related Risk Management, Jakarta, Indonesia, July 2011.
- 12) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: GCMによる月降水量変動幅および日降水量強度の将来変化. 水文・水資源学会2011年度研究発表会, 宇治, 2011年8月.
- 13) Suzuki, Y., Y. Sato, and Y. Michihiro: Providing a quick way to get climate change information at a Japanese regional level. 5th Korea-Japan-China Joint Conference on Meteorology, Busan, Korea, Oct. 2011.
- 14) 道広有理, 鈴木靖, 佐藤嘉展: 気候変動情報データベースの開発とその利用. 第58回海岸工学講演会, 盛岡, 2011年11月.
- 15) 道広有理, 佐藤嘉展, 鈴木靖: CMIP3マルチ気候モデルを用いた現在気候再現性指標の関係性について. 日本気象学会2011年度秋季大会, 名古屋, 2011年11月.

### (3) 出願特許

特に記載すべき事項はない。

### (4) シンポジウム、セミナーの開催（主催のもの）

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) Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, Yamazaki, N., H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, . Mannoji, N. and R. Taira (2007): The JRA-25 reanalysis. J. Meteor. Soc. Japan, 85, 369-432.
- 2) Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin assessment model (Hydro-BEAM). Watershed models eds. by V. P. Singh and D. K. Frevent, Taylor & Francis, CRC Press, Florida, 613-626.
- 3) Sato, Y., X. Y. Ma, J. Q. Xu, M. Matsuoka, H. X. Zheng, C. M. Liu and Y. Fukushima (2008): Analysis of long-term water balance in the source area of the Yellow River basin. Hydrological Processes, 22, 1618-1629.

## **Evaluations of CMIP3 Model Performances for Various Phenomena in the Atmosphere and Oceans in the Present-Day Climate and in Future Projections**

Principal Investigator: Yukari N. TAKAYABU

Institution: Atmosphere and Ocean Research Institute (AORI), the  
University of Tokyo  
Tel: +81-4-7136-4402 / Fax: +81-4-7136-4375  
E-mail: yukari@aori.u-tokyo.ac.jp

Cooperated by: Research Center for Advanced Science and Technology/ The University of Tokyo, Meteorological Research Institute, Graduate School of Environmental Science/ Hokkaido University, Graduate School of Life and Environmental Sciences/ University of Tsukuba, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Graduate School of Environmental Studies/ Nagoya University, Hydrospheric Atmospheric Research Center/ Nagoya University, Japan Meteorological Agency, and Disaster Prevention Research Institute/ Kyoto University

[Abstract]

**Key Words:** CMIP3, 20th-century reproducibility, Short-term phenomena, Global warming scenario run, Asian metric

In order to extract more reliable information about future changes in various atmospheric and oceanic short-term phenomena intimate to our everyday life, climate model performances are evaluated in terms of the reproducibility of various phenomena. Multi-climate model simulation data of the Coupled Model Intercomparison Project, phase 3 (CMIP3) collected for the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report (AR4) are analyzed in ten subgroups.

During the first half of this project (FY2007-2009), researches were performed in the following steps: 1) Phenomena-based reproducibility metrics were defined from observational data analyses. 2) Reproducibility metrics of various phenomena in the 20th Century Climate in Coupled Model (20C3M) runs were calculated for individual climate models and evaluated. 3) Reproducibility metrics of phenomena for 24 climate models were gathered and synthesized. 4) A strategy for producing the 'Asian Model Performance Metrics' which represents the reproducibility of various phenomena in the Asian region was designed. In the second half (FY2010-2011), emphases were placed on 1) future climate projections in terms of phenomena change, utilizing output data from various global warming scenario runs, based on phenomena performance metrics in the current climate, and 2) producing a prototype of the 'East Asian Metric' which represents multiple phenomena that affect the summer climate in the east Asia. In



addition, 3) an educational leaflet in high school students level, introducing this study, was published and widely distributed.

Primary results are obtained in following topics: (1) typhoon generation and tracks, (2) tropical rainfall distribution and its relation to convective parameterizations, (3) a prototype of the East Asian Metric, (4) characteristics of the Pacific-Japan (PJ) pattern and the Bonin High, (5) energetics of the Silkroad pattern, another factor controlling the Bonin High, (6) early-spring strong wind called 'Haruichiban', (7) daily temperature variations, (8) summertime northeasterly winds in Tohoku area called 'Yamase', (9) relationship between tropical rainfall and ENSO, (10) global ocean metric, (11) decadal variation of the sea surface temperature of the Pacific Ocean, (12) seasonal shift of Asian monsoon, (13) role of the tropical convective systems (Madden-Julian Oscillation and Westerly Wind Bursts) in proper reproduction of ENSO and teleconnection, (14) characteristics of Baiu and Meiyu front, (15) Pacific subtropical high, (16) Quasi-Biennial Oscillation of the equatorial stratospheric winds, (17) upper level clouds associated with atmospheric circulation, (18) role of the Asian Jet stream on variations of Baiu seasons, and (19) statistical downscaling on the river flow in the future climate.