

「21世紀気候変動予測革新プログラム」における、 CMIP5実験仕様に基づいた温暖化予測実験

河 宮 未知生*¹・石 井 正 好*²・鬼 頭 昭 雄*²・木 本 昌 秀*³

要 旨

文部科学省による委託事業「21世紀気候変動予測革新プログラム」(以下革新プロ)において得られた成果を、特に第5期結合モデル相互比較計画(CMIP5)に提出された予測シミュレーション実験結果に焦点を置いて報告する。国内からCMIP5に提出されたデータの多くが革新プロのもと作成された。革新プロにおけるCMIP5実験は、100年以上の時間スケールにわたる長期的な気候変化予測を担当するチーム(以下長期予測チーム)、数年～数十年規模の気候変動を担当するチーム(以下近未来予測チーム)、超高解像度のモデルを用いて極端な気象現象の変化を予測するチーム(以下極端現象チーム)に分かれて実施した。長期予測チームでは、20世紀気候変動再現実験の再現性向上や将来の植生分布移動の予測、近未来予測チームでは、温暖化予測モデル初期値化手法の確立や、それを通じた数年規模の気候変動予測可能性の向上、極端現象チームでは、日本に接近する台風の強度変化予測や日本の将来の確率降水量マップの作成といった成果が得られている。また、革新プロを通して、温暖化の予測分野と影響評価分野との連携が密に行われるようになったことは、今後の両分野にとって好ましい遺産と言える。革新プロのこうした成果は、文部科学省による新規事業「気候変動リスク情報創生プログラム」に引き継がれ、さらに発展して温暖化対策立案へ活用されることが期待されている。

1. はじめに

2007年に気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書(AR4)が発刊され、その中で20世紀後半の全球平均気温の上昇を人為起源の温室効果気体の排出によるものとほぼ断定したことが話題になった(IPCC 2007)。それに続き、2013年にはIPCC第5次報告書(AR5)の発刊が開始される。IPCCに3つある作業部会のうち、自然科学的な基礎の概観を担当する第1作業部会の報告書には、温暖化予測に関する主たる情報源として、世界気候研究計画(WCRP)の第5期結合モデル相互比較計画

(CMIP5)に提出された予測シミュレーション実験結果の活発な利用が想定される。

国内でも、海洋研究開発機構や東京大学大気海洋研究所、国立環境研究所、気象庁気象研究所などの研究者らが予測用シミュレーションモデルの開発と、CMIP5で定められた実験仕様に基づいた予測実験の実施にあたったが、そうした活動の多くの部分は文部科学省による「21世紀気候変動予測革新プログラム」(革新プロ)のもと行われた。革新プロは平成23年度をもって終了したが、CMIP5からの予測データ配信や、研究者間の連携などによってその成果は今後も広く利用されることになるであろう。

革新プロにおけるCMIP5実験は、海洋研究開発機構が主導し、生物・化学過程を含む地球システムモデルMIROC-ESM(Watanabe *et al.* 2011b)を用い100年以上の時間スケールにわたる長期的な気候変化予測を担当するチーム(以下長期予測チーム)、東大

*1 (連絡責任著者) (独) 海洋研究開発機構地球環境変動領域, kawamiya@jamstec.go.jp

*2 気象研究所気候研究部。

*3 東京大学大気海洋研究所。

—2012年9月18日受領—

—2012年12月20日受理—

値を用いて数十年規模の気候変動を担当するチーム（以下近未来予測チーム）、気象研究所が主導し、超高解像度の領域および全球大気モデルを用いて台風や集中豪雨あるいは渇水といった極端な気象現象の変化を予測するチーム（以下極端現象チーム）の計3チームが実施した。本稿では、この3チームによる成果を概観し、今後の予測シミュレーションモデル開発の課題を検討することを目的としている。

次節で革新プロにおいて得られた主な成果について、それぞれのチームごとに紹介する。続く第3節では、それぞれのチームが担当する分野におけるモデル開発の現状を、国際的な動向も踏まえ概観する。第4節では、革新プロで得られた「遺産」について、主に研究コミュニティへの影響の観点から述べる。第5節で今後の改善が期待される点について記述する。第6節では革新プロの後継としての新規プログラムの内容について触れる。

なお、革新プロでは温暖化予測実験そのもののみならず、予測データを利用した影響評価研究や先端的モ

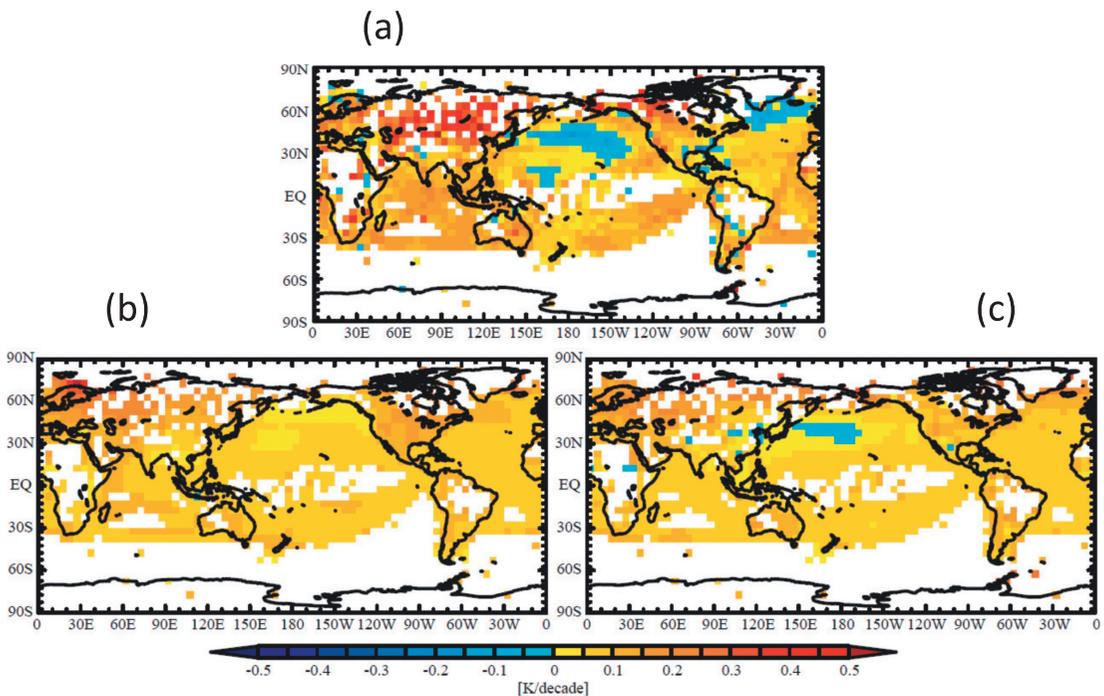
デルの開発も要素として入っていたが、本稿ではCMIP5にデータを提出した実験内容に焦点を絞ることとする。革新プロ全般の成果について関心のある読者には、革新プロのホームページ (<http://www.jamstec.go.jp/kakushin21/jp/> 2012.8.18閲覧) などが参考になろう。なお、本稿では略語が多用されるため、稿末に略語一覧を付してある。適宜ご参照いただきたい。

2. 革新プロの主な成果

2.1 長期予測チームの成果

2.1.1 20世紀再現実験の結果

MIROC-ESM を用いた過去（1850～2005年）の長期気候変化再現実験の結果、全球年平均した地上気温は観測された経年変化を従来よりもよく再現することが分かった（野沢ほか 2012）。20世紀後半以降（1951～2005年）における年平均地上気温の変化傾向の分布を解析した結果、MIROC-ESM を用いた20世紀再現実験では、特に北太平洋域における変化傾向の



第1図 20世紀後半以降（1951～2005年）の年平均地上気温の変化傾向の地理分布。単位は $^{\circ}\text{C}/10\text{年}$ 。(a) 観測、(b) 大気中微粒子を簡単に取り扱った実験結果（24実験例の平均）、(c) 大気中微粒子を詳細に取り扱った実験結果（10実験例の平均）（MIROC-ESM を用いた20世紀再現実験はすべて(c)に含まれる）。

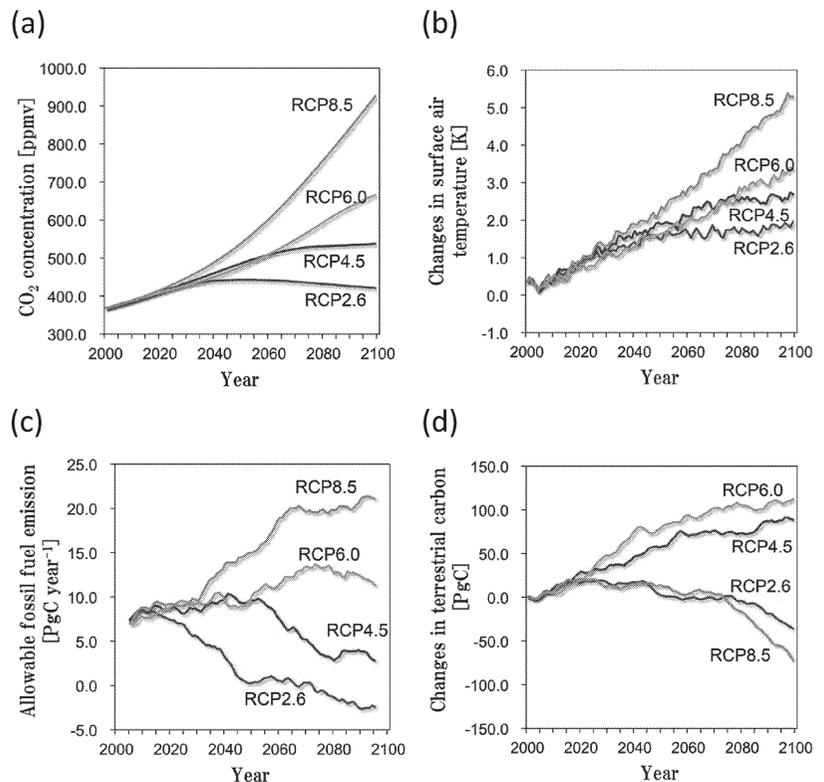
再現性が改善されていることが分かった（第1図）。この原因を解明するため、従来の大気海洋結合大循環モデルMIROCのさまざまなバージョンのモデルでこれまでに実施されている20世紀再現実験の結果を総合的に解析した。気候変動要因の変更のみに伴う影響を調べるため、2007年出版のIPCC第4次報告書（AR4）に貢献したMIROCの旧バージョンに、今回の温暖化予測実験と同じ入力データ（太陽活動やエアロゾル量の変化）を与え、20世紀再現実験を行った。その結果、20世紀後半以降における年平均地上気温変化トレンドの地理分布は、入力データの変更によってほとんど影響を受けていないことが分かった。一方で、大気中のエアロゾル輸送を記述するサブモデルSPRINTARS (Takemura *et al.* 2000) を簡略化して取り込んだバージョンと、詳細なプロセスまで組み入れたバージョンとを比較した結果、両者の間で北太平洋域におけるトレンドの再現性に大きな違いが見られた（第1図）。北太平洋北西部の海水温の低下傾向はIPCC AR4 (IPCC 2007) の図からも読み取ることができるが、こうしたトレンドパターンの形成に関してエアロゾル過程が深く関わっていることが示唆された。

2.1.2 将来予測実験の結果（炭素循環）

CO₂濃度や土地利用変化の将来シナリオに基づき、MIROC-ESMを用いた将来予測実験を行った。将来シナリオには第2図aに示すRCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5とよばれる4つを用いた (Moss *et al.* 2010)。これらのシナリオは、CMIP3で用いられたSRESシナリオに代わり、CMIP5における温暖化予測のために提示されたものである。RCP2.6が、しばしば言及される「温暖化を産業革命以前比

で2°C以内に抑制する」という目標に対応しており、他のRCP4.5, 6.0, 8.5はSRESで言えばそれぞれB1, B2, A1FIに近いシナリオになっている。RCPがSRESと最も違うところは、空間分布付きの土地利用変化シナリオと対になった形で配布されたということであろう。下で述べるとおり、土地利用変化が地球環境に与える影響は無視できないものがある。

RCPを用いた実験の結果、2100年時点での全球平均地上気温の上昇はRCP2.6とRCP8.5とでそれぞれ2°C, 5.5°C程度、他の2つはこの範囲内に入るといった結果となった（第2図b）。MIROC-ESMは炭素循環過程を内蔵しており、その出力解析からRCP濃度シナリオを将来実現させようとしたとき、将来の化石燃料起源のCO₂排出量をどのように制御しなければならないかを求めることができる。その結果を第2図cに示す (Kawamiya *et al.* 2011; Hajima *et al.* 2012)。RCP2.6 (CO₂濃度410 ppm, メタン等を加え



第2図 (a) CO₂濃度シナリオ, (b) 1980-1999年平均比で見た全球平均の昇温, (c) 左上図aのCO₂濃度を実現するためのCO₂排出量の経路, (d) 陸域生態系における炭素蓄積量の変化。左上のシナリオ以外は、すべてMIROC-ESMによるシミュレーションの結果。

450 ppm 相当で安定化) を実現させようとする、2040年代には化石燃料起源のCO₂排出量をほぼゼロにしなければならないことが分かる。RCP4.5 (2100年のCO₂濃度が約550 ppm) の場合でも21世紀後半におけるCO₂排出量は現在の35%程度でなければならない。

前述の通り、今回のRCPシナリオでは土地利用の変化も考慮している。RCP2.6では、トウモロコシなどから作るエタノールの生産を増やし、化石燃料の使用を減らすことを想定し、温暖化を抑えようとしている。このために必要な、樹林から耕作地への転換を織り込んでいる。今回のMIROC-ESMによる実験から、このような土地利用変化は炭素循環に無視できない影響を与えることが明確になった。第2図dは陸域に蓄積される炭素量の変化を示している。温暖化の進展が一番小さいRCP2.6のケースで、このような土地利用変化の結果としてRCP8.5の場合に近い陸域炭素蓄積の減少が生じていることが分かる。これは、第2図cのRCP2.6で、21世紀後半に要求される負の二酸化炭素排出(人為的な炭素の吸収が必要)を説明する一部になっている。

ただし、ここで示した結果はMIROC-ESM単独の実験結果であり、海外の研究機関などで開発されたモデルでは(特に量的に)異なる結果が得られることも十分あり得る。今後、海外研究機関と協力しながら複数モデルの結果を含めた解析を進め、モデル間の差異を把握したうえで予測結果を解釈していく必要がある。

2.1.3 地球システムモデルで予測された植生移動

気候は植生の構造や機能を強く制約するが、植生の構造や機能もまた、物質循環・水循環・太陽光エネルギー収支の変化などを通じて、気候にフィードバックを与える。本課題では、このような過程を気候変動予測に含めるために、陸上生態系の機能や構造における短期的・長期的変化を予測する陸域生態系モデル、特に炭素循環をベースとした動的全球植生モデル(SEIB-DGVM)や全球物質循環モデル(Sim-CYCELE / VISIT)の開発/高度化/検証を行うとともに、これらのモデルを用いた数値実験により気候と陸域生態系間の相互作用の解明や陸域生態系への人為影響の評価を進めてきた(Miyama and Kawamiya 2009; Okajima and Kawamiya 2011)。そして物理的な気候モデル開発者らと協業しながら陸域生態系モデルを地球システム統合モデルへと結合し

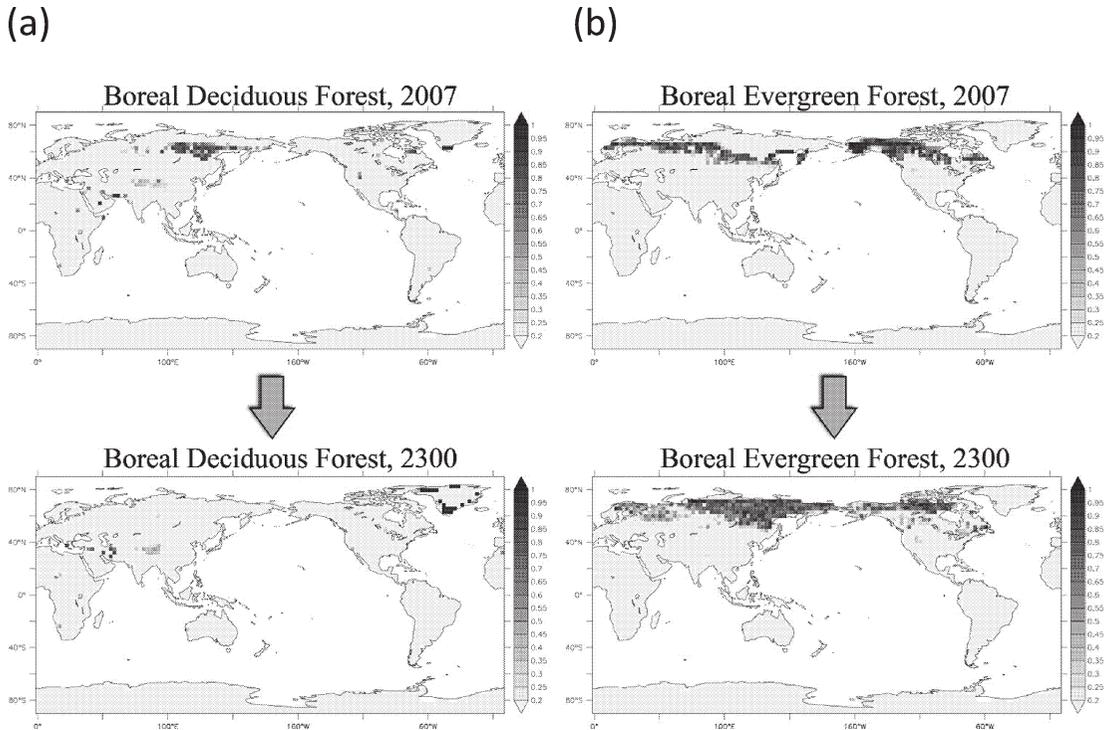
温暖化予測実験を行い、植生-気候間の相互作用が未来の地球環境に何をもたらすのかを調べた。

第3図a, bはRCP4.5シナリオのもと、MIROC-ESM (SEIB-DGVMが導入されている)を用い2300年まで行った予測実験での植生分布の変化を、もっとも変化の激しい北方林について示してある。北方常緑樹林が大きく北上し、現在はツンドラに覆われているシベリア北部にまで達している。一方で北方落葉樹林はほとんど消滅している。これは、温暖化した気候のもとでは落葉樹林の生存戦略が有利に働きづらいためと考えられる。北方常緑樹林がこのような分布域を拡大すれば、地表面での日射の反射率や粗度の変化を通じて、この地域の熱や水の循環にも大きな影響を与えることになろう。例えば、地表面が雪に覆われ、かつ日射も十分にある晩秋や初春には、北方常緑樹林の拡大で地表面がより「黒っぽく」なり、熱をより多く吸収するようになる。

ただしここでも、示された結果が単独のモデルからのものであることには注意しておかねばならない。ことに、植生移動は100年といった長い時間スケールの問題であり、そこに関わるプロセスが正しいものであるかどうかの検証は、観測期間が十分でないことから非常に難しい。とは言え、温暖化がこのまま進めば数百年のうちに地球上の植生分布が相当程度変わってしまう可能性がある、ということだけは言えるであろう。現世代の我々による決断が、数世紀といった遠い将来であるものの、地球規模での生態系分布にとって決定的な要因になるとすれば、温暖化緩和策を検討する際に考慮に入れるべきであろう。

2.1.4 MIROC-ESMによるその他の結果(海面水位上昇, オゾンホール, 紫外線量, 海洋酸性化)

MIROC-ESMによる実験に基づき、熱膨張による全球平均海面水位変化の解析も行われた。産業革命開始から現在までの過去の再現実験では、特に近年100年ほどの間に水位が約4 cm上昇しており、概ね妥当な結果となっている。その後、2100年までの約100年間にRCP2.6シナリオでは約18 cm, RCP4.5シナリオでは約24 cm, RCP6.0シナリオでは約26 cm, RCP8.5シナリオでは約38 cm, それぞれ水位が熱膨張により上昇する。さらにRCP4.5の延長では2300年までの約300年間に66 cm水位が上昇する。RCP4.5では2070年以降大気中のCO₂濃度などはほぼ一定となることを想定しており、それに対応して全球平均地上



第3図 (a) 北方落葉樹林と (b) 北方常緑樹林の、2007年と2300年時点における分布。シェードが濃くなっていくほど、その植生がモデル格子内で占める割合が大きいことを示す。いずれも MIROC-ESM によりシミュレートされたものであり、予測には RCP4.5シナリオを用いている。

気温や全球平均海面水温の上昇は急速に緩やかとなり、2100年から2300年までの間の上昇は約0.4°Cとなる。しかし水位の上昇はスピードを殆ど変えずに継続する。これは海洋内部の循環により熱が深層まで時間をかけて運ばれ続けるために、表層での変動が落ち着いた後も深層での水温上昇が続くためである。

MIROC-ESM ではオゾンホール形成に関わるプロセスも組み込まれており、フロン排出規制の効果を評価することも可能である。MIROC-ESM による実験結果によれば、南極上空のオゾン量は2000年頃に最低値を取り、以後は回復過程に入る。どの将来予測シナリオを用いても、今世紀後半には1970年代と同程度のレベルにまで回復するという結果になっており、国際プロジェクトなどでとりまとめた各国研究機関のモデルによる既存の予測と整合的である。

オゾンホールと関連の深い、将来の紫外線量の増減に関する解析も行っている。紫外線量については、高緯度ではオゾンホールの解消により減少するが、中低緯度では、人為的な微粒子排出規制にともなう大気中

微粒子の減少のため、地表に達する紫外線は増加するという予測になっている (Watanabe *et al.* 2011c, 2012)。また海洋酸性化についての解析からは、特に北極海において、海水の動態のモデル化の仕方が酸性化の進行速度に大きく影響するという示唆が得られている (Yamamoto *et al.* 2012)。さらに北極海の海洋生態系については、海氷の融解により光環境が改善され植物プランクトンによる一次生産が増大するという結果も得られている (Ito and Kawamiya 2010)。近年の海氷減少がモデルによる予測を越える速度で進行していることと考え合わせると、海氷減少と海洋の酸性化、生態系変化を注意深くモニターする必要がある。

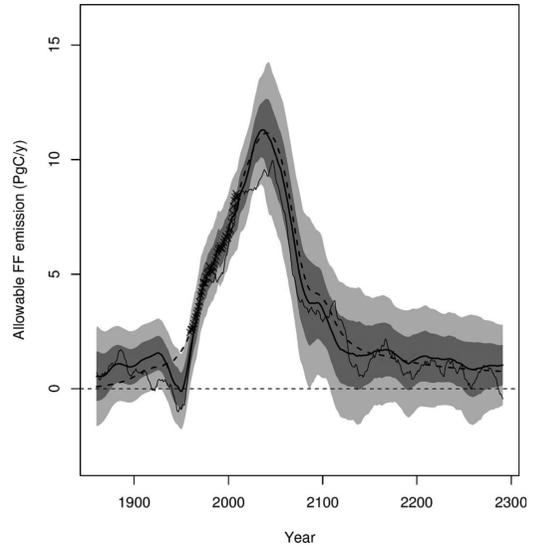
2.1.5 階層的モデル実験による長期気候変化予測の不確実性定量化

前節までで紹介してきた MIROC-ESM の土台となっているのは、大気や海洋の大循環モデル (GCM) である。大気や海洋の動態を詳細に記述できることから信頼性も高いと考えられ、温暖化を予測す

る際に主に用いられるのはGCMであるが、この種のモデルは計算量が多く、計算資源の面で制約が大きいたことが欠点である。温暖化予測には不可避免的に不確実性を伴うが、その幅を評価する際には100以上といった多数のアンサンブル実験の実施が望ましい。例えば、GCMで過去100年間の気候変動を再現する実験を行う場合、アンサンブルメンバー数は多くて10程度であることを考えると、不確実性評価の観点からはGCMには大きな制約が課されていると言える。

そこで、GCM（やそれに基づいた地球システム統合モデル）の欠点を補うよう、EMICs (Earth system Models of Intermediate Complexity) と呼ばれるモデルが最近盛んに開発されている (Tachiiri *et al.* 2010; 住ほか 2012)。これは、大気、海洋の運動方程式や放射過程の取り扱いを大幅に簡略化しつつ、気温や深層循環といった基本的な気候変数の地理分布は出力されるよう工夫したモデル群のことで、最新鋭の大型計算機を用いなくとも長期間の積分が可能である。本課題でもJUMP-LCMの開発が進められている。現在気候における気温など基本的な変数の大陸スケールでの再現性や、CO₂漸増に対する反応などは、MIROC-ESMとJUMP-LCMとで大きくは変わらない。

第4図は、不確実性の幅を評価するためにJUMP-LCMを用いた一例である (Tachiiri *et al.* 2013)。図の太破線は、第2図でMIROC-ESMにより計算されたRCP4.5濃度シナリオを実現するためのCO₂排出経路である。RCPでは、各濃度シナリオに対応して、簡単な炭素循環モデルを含む社会経済モデルにより計算された排出シナリオも標準データとして配布されており、それが破線で示されている。灰色のシェードで示されているのは、詳細な炭素循環過程を結合したJUMP-LCMによる実験結果である。JUMP-LCMでは、国際的なモデル比較プロジェクト (C4MIP) に参加したモデル群と同様の結果の広がりを見せるようにパラメータを変更しながら多数の実験を行っている。第4図から、RCP4.5の標準データにおける排出シナリオ (破線) と、MIROC-ESMによって計算された排出シナリオ (細実線) との違いは、現在の予測結果のばらつきを考えればおおよそ誤差の範囲内にあることが分かる。ただし、第4図の破線と細実線の差は温暖化抑制策の経済負担を考える上では有意な差であり、今後、こうした不確実性をもたらす要因についての検討を行うことが重要である。



第4図 「代表的濃度経路」(RCP) 4.5濃度シナリオ (IPCC第5次報告書へ向けて作成された将来シナリオの一つ) を実現するための化石燃料起源排出予測。MIROC-ESMによる計算 (細実線)、RCP4.5標準データセットに含まれる排出経路 (破線)、JUMP-LCMによる多数の計算結果の範囲 (灰色のシェードは、濃いシェードが1標準偏差を、薄いシェードが2標準偏差を表す)、JUMP-LCMによる結果の平均 (太実線)。

このように、地球システムの動態を理解する上でEMICsは大きな役割を果たしうる。ただしEMICsでは、簡略化のため扱う過程の抽象化の度合いが高くなり、方程式中の各項が自然界のどの過程に対応するのか具体的にはっきりしない場合が多い。またそれ故パラメータの正確な値を見積もることも困難である。地球環境の将来予測やプロセス研究は、計算資源が許す範囲でEMICsとGCMベースの地球システム統合モデルとを相補的に併用しながら行うことが望ましい。

2.2 近未来予測チームの成果

2.2.1 近未来予測実験とその成果

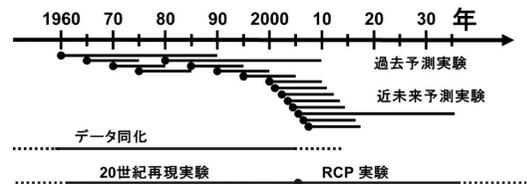
気候モデルの精度が向上するにつれ、今後数十年のより定量的な予測情報が求められるようになってきた。国際コミュニティでもこれに呼応して、温室効果気体増加や人為起源エアロゾルの排出といった外的要因に対する応答に加えて、現在の自然気候変動の様子

がどのように将来数十年にわたって変動してゆくのか、観測データによって気候モデルを初期値化する新しい予測計算の国際比較を行い、AR5でも扱うこととなった (Meehl *et al.* 2013). チーム近未来では、十年規模気候変動予測とも呼ばれるこのような初めての試みを行い、よりよい適応策策定に貢献することを目指して研究を行った。

IPCC 第5次評価報告書に向けた結合モデル国際比較実験 (CMIP5) での十年規模予測実験の概要を第5図に示す。観測データの同化により初期値をこしらえて、過去数十年にわたり5年毎の初期値から10例の事後予測実験を行って精度を検証する。もっとも顕著な気候変動であるエルニーニョ現象ですら、1年以上先の予測は困難な状況である。さらに先の十年規模予測では、予測に伴う大きな不確実性が予想される。また、大気海洋結合気候モデルを観測情報で上手く初期値化できるものかも研究開始当初は不明であった。研究チームでは、まず、これまで用いてきた比較的低解像度のモデル MIROC3 (大気約300 km, 海洋約150 km; Nozawa *et al.* 2005) を用いて、第5図の実験手順に従って過去事例の事後予測実験を繰り返すことによってデータ同化、アンサンブル生成を含めた予測の方法論の確立を図り、その上で、改良・高解像度化された新モデルによる本番実験を行うこととした。

十年規模の予測では、海洋表層に存する自然変動のシグナルをモデルに与えることが重要である。今回は、海洋表層下の水温、塩分の観測データのみをモデルに同化することとした。データ同化実験から適当な初期値を選んで、同化を停止して予測実験を行う。各事後予測にあたっては、初期値の不確実性を考慮するため、複数初期値からの積分を行うアンサンブル手法を用いる。精度が向上したとはいえ、気候モデルはまだ完璧にはほど遠く、データ同化を停止すると、モデルはモデル固有の気候値に徐々に移行し観測からずれていく (気候ドリフト)。これを避けるため、数々の試行を経て、今回は観測気候値からの偏差の情報をみをモデルに与える、アノマリ同化という方法を採用することとした (Tatebe *et al.* 2012)。

CMIP5本番実験は、MIROC3を高解像度化 (大気約60 km, 海洋20-30 km) した MIROC4 (Sakamoto *et al.* 2012), および物理過程を一新した新モデル MIROC5 (大気, 海洋共約150 km; 中解像度; Watanabe *et al.* 2010) を用いて行った。高解像度モデルではアンサンブル数が稼げないので低解像度モデ

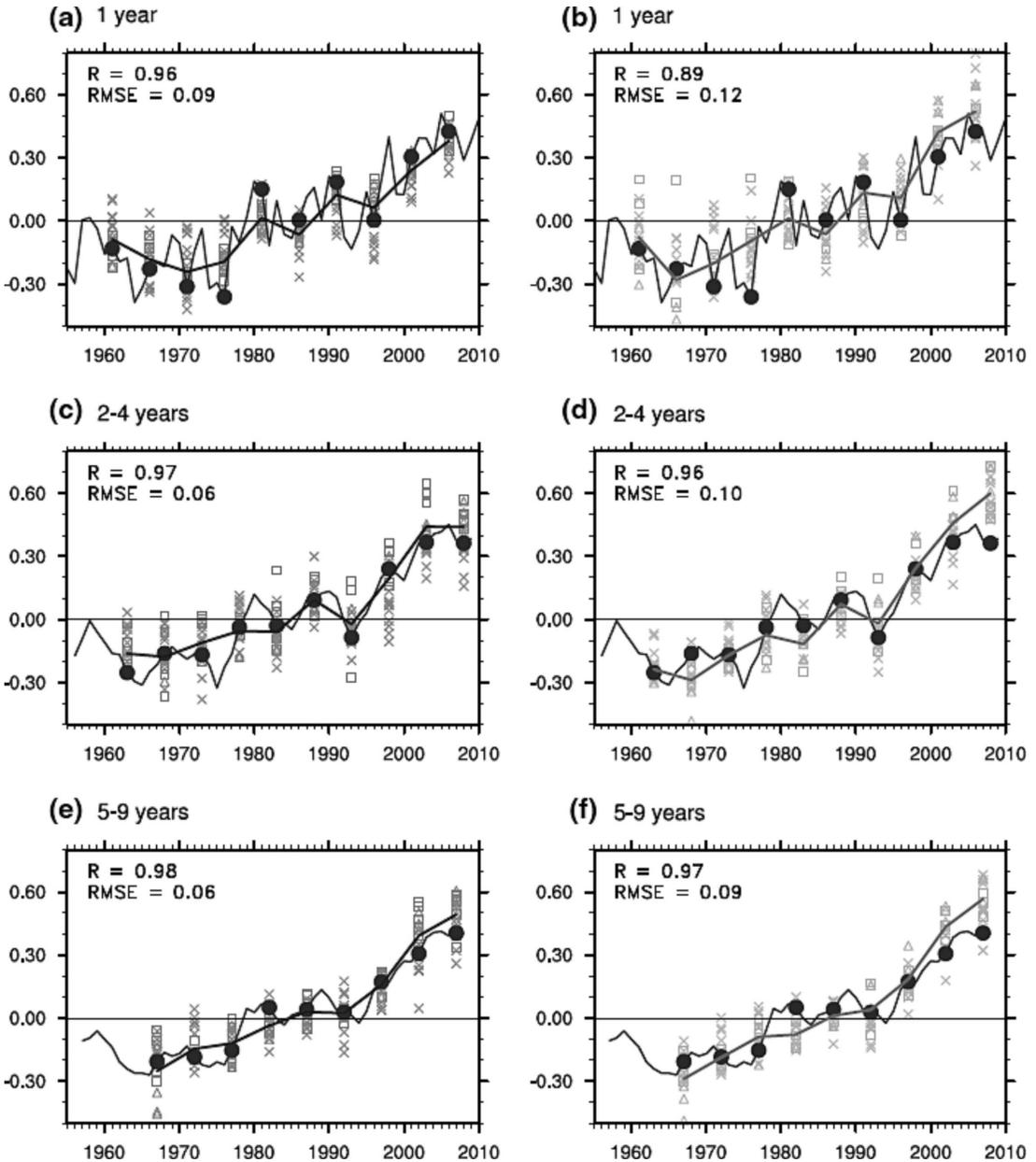


第5図 近未来予測実験の概要。●は初期値、そこから延びる実線は予測計算を示す。初期値を作るためのデータ同化実験、初期値化のインパクトを評価するための外部強制 (20世紀再現, 将来シナリオ) 実験を下段に示す。

ル MIROC3も併用して結果を解析した (Mochizuki *et al.* 2012; Chikamoto *et al.* 2012a)。

第6図aは、第5図で示した過去予測実験の予測1年目の全球平均地表気温データを集めて作成した時系列であり、第6図c, eは同様に、2-4年目平均、5-9年平均について見たものである。低解像度、中解像度、高解像度の3種のMIROCモデルで行った実験をまとめて示している。左の列は初期値化した予測で、右の列にデータ同化しない従来手法のものを比較のため示している。観測データを●を繋いだ線で、予測を灰色の線および×, △, □のシンボルで示している。予測1年目を見ると、観測は自然変動を反映した揺らぎが大きいものの、予測アンサンブルはそのばらつきの中に観測を捉えることができている。初期値化予測の相関係数は0.96という高い値を示す。初期値化しない予測でも近年の温暖化傾向はよく捉えられており、相関係数は0.89となっている。予測2-4年、5-9年目でも初期値化の有無にかかわらず相関係数は0.95を超える値を示しており、全球平均気温で見ると、初期値化しない予測でも十分な精度を持つことがわかる。ただし、2-4年、5-9年予測で2000以降について初期値化有りとなしの実験を比べると、わずかながら初期値化有りの方が、温暖化の停滞傾向によく追隨しているように見える。

初期値化のインパクトは、偏差の地理分布によりよく現れる。予測された空間パターンの例として第7図にCMIP5実験の最新初期値である2006年1月からの予測例を掲げる。全球的な温暖化傾向を除いて空間パターンを見やすくするため、全球地表気温の2001-2005年平均からの偏差を示している。日本を含むユーラシア大陸東部や北大西洋の正偏差、赤道太平洋や南大洋の負偏差等、大陸規模の偏差パターンがよく予測



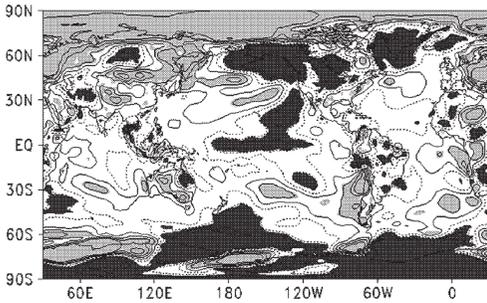
第6図 全球平均地表気温の時系列。●を繋ぐ実線は観測、実線のみは、(a, c, e) 初期値化あり、(b, d, f) 無し3モデルアンサンブル平均予測を示す。×, △, □のシンボルは、個々のアンサンブルメンバーの予測。上段から、(a, b) 予測1年目、(c, d) 2-4年目、(e, f) 5-9年目。各パネル左上のRは観測とアンサンブル予測の相関係数、RMSEは予測の根二乗平均誤差を示す。

できている。

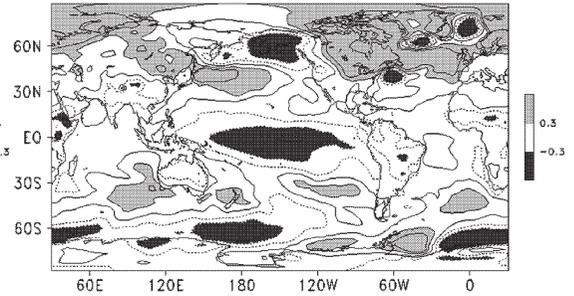
第8図は、10年間の事後予測実験（初期値化あり）10例の全球地表気温の予測スキルを示している。左列は、地点毎のアノマリ相関係数、右列は根二乗平均誤

差で見たものである。統計的に有意な部分のみ色付けしている。右列のハッチは、初期値化しない従来手法に比べてスキルが10%以上向上した領域を示している。

(a)

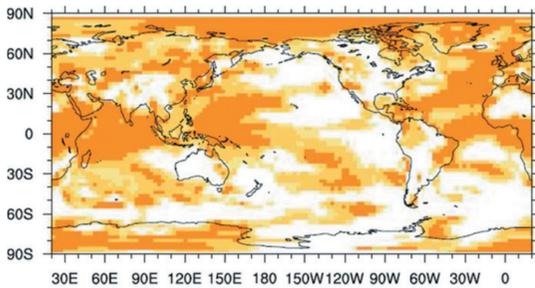


(b)

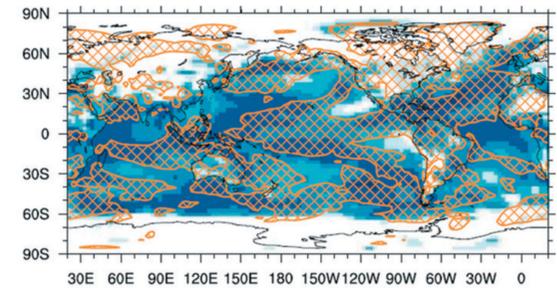


第7図 2006年1月を初期値とする予測の(a) 2-4年目の平均と(b) 対応する観測、それぞれ、2001-2005年平均からの偏差として表示。濃いおよび薄い陰影はそれぞれ -0.3°C 以下、 $+0.3^{\circ}\text{C}$ 以上の領域を表す。等値線間隔は 0.2°C で零線は表示していない。観測はJRA-25を使用した。

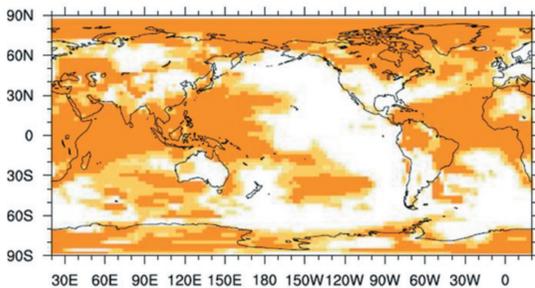
(a)



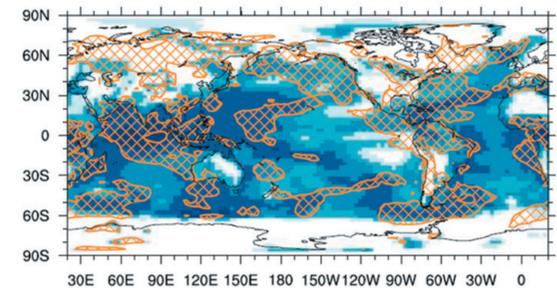
(b)



(c)



(d)

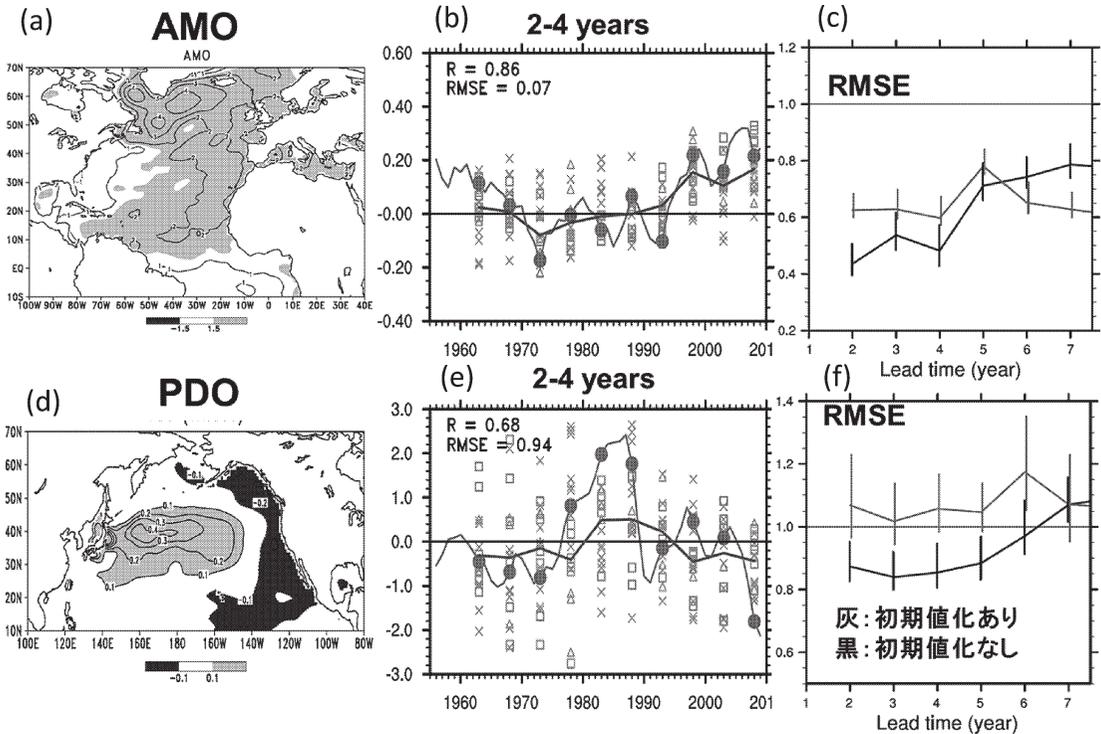


第8図 全球地表気温の予測スキル。(a, c) アノマリ相関係数, (b, d) RMSE (単位 $^{\circ}\text{C}$)。統計的に有意な領域のみ示す。右列のハッチは、初期値化無しとの予測と比べてRMSEスキルが10%以上向上した領域を示す。上から、(a, b) 2-4年目, (c, d) 5-9年目。

気候メモリの存する海洋域、ことに、北半球高緯度、熱帯西太平洋、インド洋、大西洋等でスキルがよい。また、予測5-9年目でも広い範囲で初期値化のインパクトが確認できる。ここには示さないが、海洋

表層の熱容量でみるとより高いスキルが得られる。

十年規模の自然気候変動として、大西洋数十年規模振動 (AMO) と太平洋十年規模振動 (PDO) が代表的なモードとしてよく知られ、研究されている。われ



第9図 観測された (a) 大西洋数十年規模振動 (AMO) と (d) 太平洋十年規模振動 (PDO) に伴う海水温の偏差パターン (左列), (b), (e) 3モデルアンサンブル平均予測 (2-4年目) の時系列 (中列; 線とシンボルの指すものは第6図に同じ), (c), (f) リードタイム毎の3年平均予測の根二乗平均誤差 (右列; 灰, 黒はそれぞれ, 初期値化あり, 無し) の予測)。

われは本研究の中で、低解像度モデルを用いた予備実験によって、世界で初めて PDO の5年に渡る初期値化予測可能性を示すことができた (Mochizuki *et al.* 2010)。CMIP5実験の結果では、AMO および PDO に初期値化の有効性を示すことができた。第9図には、観測された AMO と PDO の海面水温パターンと3年平均予測の時系列および予測時間の関数として示した根二乗平均誤差を示す。初期値化予測は、初期値化無しの従来手法の予測や、持続予報と比べても成績はよく、AMO では5年以上、PDO でも5年程度までの有効な予測ができることがわかる。AMO の予測後半に初期値化無しの予測スキルが勝っているのは、予測例数が10例と少ないためのサンプリング誤差も含まれるものと思われる。例数の増加は近未来予測の大きな課題の一つで、初期値を1年毎に取った追加実験も行い、確認中である。

まとめると、近未来予測では、近年の気温の温暖化傾向については、初期値化の有無に関わらずよい成績

で予測できており、初期値化により、約5年程度の自然変動の有効な予測が可能であることがわかった。自然変動の予測可能性がなくなった10年以上先は、初期値化を行わない従来手法が有効である。ここには示さないが、降水量の地理的パターンは局地性が強く、数年先の予測も難しい。既存の変動モードと連動するパターンをあらかじめ取り出しておいて検証するなどの工夫が必要であろう。

いずれにせよ、気候モデルの初期値化は利点こそあれ、従来手法のスキルを損うことはないので、今後季節予報と温暖化予測をシームレスにつなぐものとして、近未来~十年規模予測の手法は広く普及してゆくことが予想される。

2.2.2 予測システム、予測可能性に対する新たな知見

締め切りに追われた CMIP5、IPCC 報告書用の実験では採用することができなかったが、大気海洋結合モデルを初期値化するというわれわれにとっては初め

での試みを通じて、次期以降の予測システムの基礎となるシステム構築が進み、また、数年以上先の気候変動の予測可能性についても数多くの知見を得ることができた。

まず、今回同化した海洋表層データはわれわれがこれまで作成してきたものを用いたが、データの品質管理過程で、XBT 測器の沈降速度見積りに基づく系統的なバイアスがあることがわかり、これを補正する手法を提案し (Ishii and Kimoto 2009)、また、その補正が十年規模予測にも有意なインパクトを持つことを示すことができた (Yasunaka *et al.* 2011)。また、海水データ同化の試行 (Toyoda *et al.* 2011) により、北極域における海水の総量に数年規模の予測可能性が存することがわかったが、CMIP5用実験では、海水の有無の取り扱いの困難さにより導入を断念した。しかし、海水、陸面、大気など今回取り入れることのできなかった観測データについては、より高度なアンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化手法を開発し、アノマリでなく観測の絶対値も同化できるシステムを開発し、季節予測等で試行を開始した。アンサンブル手法によるデータ同化手法導入が成功すれば、過去の気候場の再解析・再予報や、気候リスク評価にも有用であろう。

予測可能性の面では、近未来実験の解析により、北西太平洋における台風活動度や熱帯大西洋の海面水温南北双極子モード、黒潮流域の海洋渦活動等の年々変動の予測可能性が示唆され、また、今回の事後予測実験の中で、東アジアの台風や夏季気候等に影響が大きいとして近年話題になりつつある1990年代後半の熱帯西太平洋での階段状の海水温昇温現象が初期値化した予測によって上手く予測できており (Chikamoto *et al.* 2012b)、同じく欧米で話題になっている北大西洋の海水温昇温とも大気テレコネクションを通じて連動していた可能性を示唆することができた (Chikamoto *et al.* 2012c)。

近未来予測については、国際的に結果を持ち寄る準リアルタイムの相互比較が始まっている (Smith *et al.* 2012)。これまで、1~2年先のエルニーニョ予測と100年先の地球温暖化予測の間には大きなギャップがあったが、近未来~十年規模気候変動予測の成功は、ESMを用いた気候環境予測も含めて、よりシームレスな気候予測実現に向けた着実な一歩と考えている。

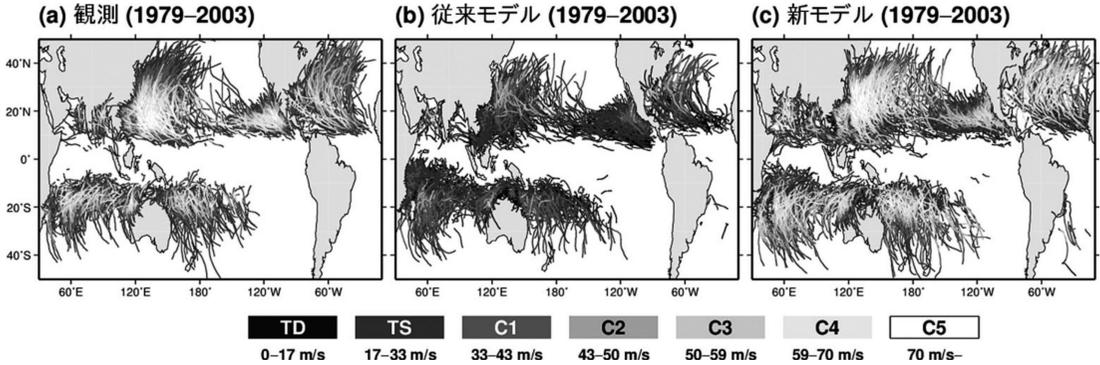
2.3 極端現象チームの成果

極端現象チームでは、温暖化による台風や大雨などの極端現象の変化について高精度かつ定量的に見積もるため、地球温暖化研究では従来用いられていなかった水平方向に非常に細かい格子を持った大気モデルを使用し、予測実験を行った (Kitoh *et al.* 2009)。20 km 格子間隔で地球全体を覆う大気モデルでは、世界各地における台風など熱帯低気圧の発生数や強度の変化 (Murakami *et al.* 2011a)・梅雨などの降水強度の変化 (Kusunoki and Mizuta 2008) などの予測を、日本付近に領域を限定した5 km および2 km 格子間隔の大気モデルでは、日本における集中豪雨などの予測 (Kanada *et al.* 2012) を行った。また、60 km 格子間隔で地球全体を覆う大気モデルで複数の実験を行うことにより、台風 (Murakami *et al.* 2011b, 2012)、梅雨 (Kusunoki *et al.* 2011) やモンスーン (Endo *et al.* 2012) の予測の不確実性を見積った。全球20 km 及び60 km 格子大気モデルの結果の一部はCMIP5のAMIP 実験及び近未来タイムスライス実験として公開されている。

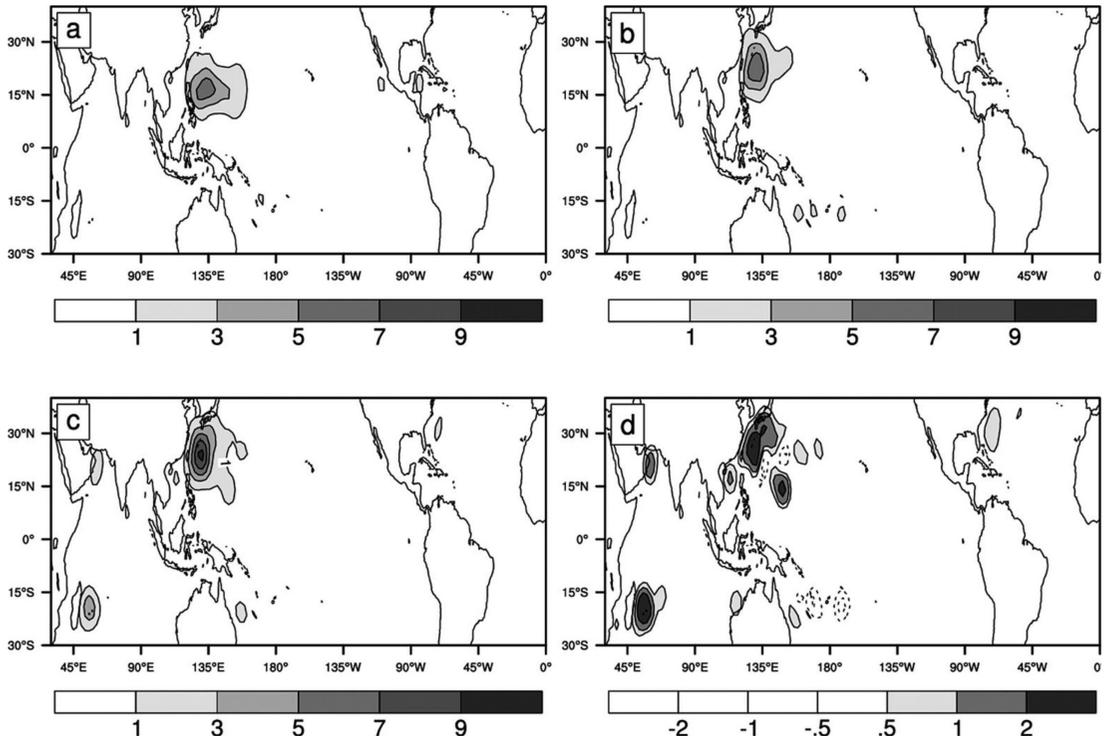
2.3.1 熱帯低気圧活動の将来変化予測

地球温暖化が熱帯低気圧活動に及ぼす影響を調べるには水平方向に細かい格子をもつモデルが必要である。我々は20 km 格子の超高解像度全球大気モデルを開発・改良することに成功した。改良されたモデル (MRI-AGCM3.2S, Mizuta *et al.* 2012) では従来の全球気候モデルでは不可能であった観測の熱帯低気圧の全球分布やカテゴリ4や5といった極端に強い熱帯低気圧の表現が可能となった (第10図, 第11図 a, b)。これにより、全球気候モデルを使った研究では世界で初めて非常に強い熱帯低気圧が再現され、確度の高い将来変化予測が可能となったといえる。

MRI-AGCM3.2Sを用いた将来温暖化予測実験の結果、熱帯低気圧の発生数は、全球・南北両半球で統計的に有意に減少していることが分かった。また地域別では、北西太平洋、南太平洋で発生頻度が統計的に有意で顕著に減少し、熱帯中部太平洋で増加するという結果が得られた。一方、強い強度の熱帯低気圧の発生頻度は増加する。これらの結果は従来の研究結果と一致しているが、MRI-AGCM3.2Sでは発生頻度の増加はカテゴリ5と呼ばれる最大風速70 ms⁻¹以上の非常に強い熱帯低気圧に限られている。カテゴリ5の熱帯低気圧存在頻度分布の将来変化については、台湾から日本列島南岸にかけて増えている (第11図



第10図 熱帯低気圧経路分布。色がカテゴリー強度を意味する。(a) 観測, (b) MRI-AGCM3.1Sによる現在気候実験, (c) MRI-AGCM3.2Sによる現在気候実験を示す。(Murakami *et al.* 2012)



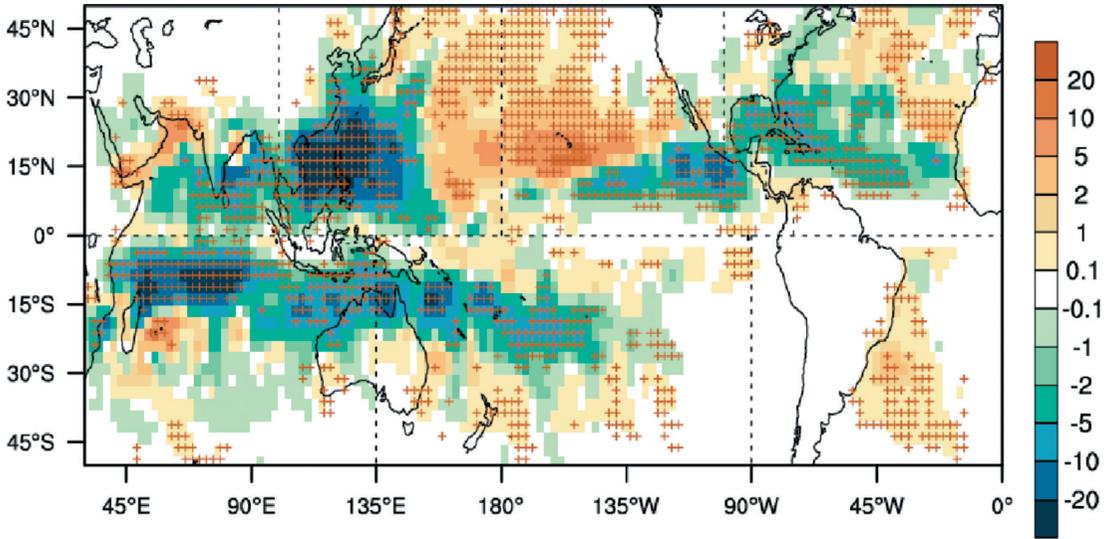
第11図 カテゴリー5熱帯低気圧の存在頻度。(a) 観測 (1979-2003), (b) MRI-AGCM3.2Sによる現在気候実験 (1979-2003), (c) MRI-AGCM3.2Sによる将来温暖化予測実験 (2075-2099), (d) 将来変化をそれぞれ示す。単位は25年間の個数。(Murakami *et al.* 2012)

c). このことは将来、非常に強い強度の熱帯低気圧の日本に接近する頻度が増加する可能性を示唆するが、モデルの北西太平洋域における熱帯低気圧存在頻度分布の北偏バイアスのため、将来の日本付近の非常に強い台風の頻度が過剰になっている可能性があり、この

バイアス解消が課題である。

2.3.2 熱帯低気圧活動の将来変化予測における不確実性の評価

気候モデルを用いた将来予測結果には不確実性が高い。それは、気候モデルを構成している物理過程



第12図 熱帯低気圧存在頻度将来変化のアンサンブル平均。単位は25年間の個数。+印は12実験中10個以上の実験でアンサンブル平均と同じ符号であることを意味する。(Murakami *et al.* 2011b)

のパラメータの値や予測された将来の海面水温パターンが異なれば予測結果が大きく変わってしまうことがあるからである。重要なのは実験設定が異なっても変わることはない一貫した将来変化を抽出することであり、また、将来予測の不確実性が実験設定のどの要因に起因するかを理解することも重要である。熱帯低気圧は個々の積雲対流が集合した対流システムであることから、物理過程の中でも深い対流を取り扱う積雲対流スキームに不確実性の要因がある。また、熱帯低気圧は高い海面水温の海上で発生するため、海面水温の将来変化の違いは熱帯低気圧活動の将来変化に影響を及ぼす。そこで、本研究では熱帯低気圧将来予測の不確実性を評価するため、全球60 km 大気モデル(MRI-AGCM3.2H)を用いて3つの異なる積雲対流スキームと4つの異なる海面水温将来変化パターンを用いた計12種類のマルチ物理・マルチ海面水温アンサンブル実験を行った。

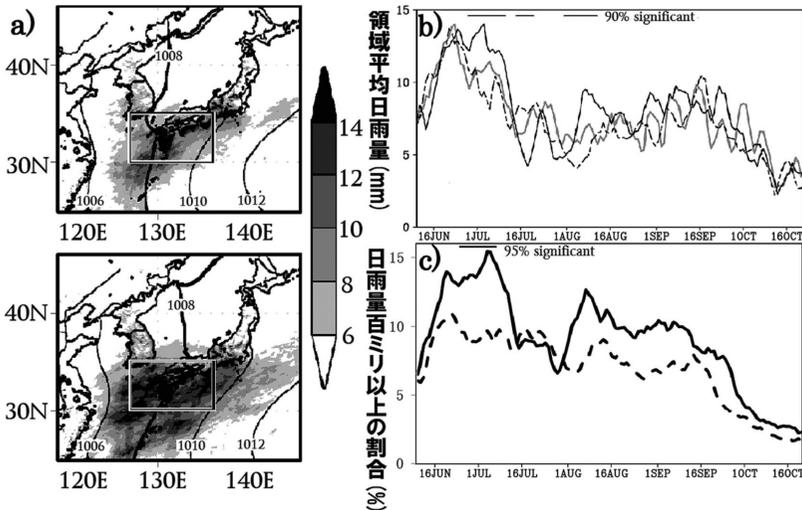
第12図に熱帯低気圧存在頻度の将来変化の12種類のアンサンブル平均を示す。図の+印は10種類以上の実験がアンサンブル平均の変化符号と同じで一貫した将来変化を意味している。熱帯低気圧の存在頻度は実験設定に関係なく西太平洋、南太平洋、南インド洋で減少し、ハワイ周辺の中中部太平洋で増加することが分かった。同様な将来変化が熱帯低気圧の発生頻度についてもあてはまり、熱帯低気圧活動の地域的な将来変

化のコントラストが明瞭となった。ただし、熱帯低気圧発生頻度の将来変化は符号こそは実験間で概ね一致しているが、将来変化の程度は実験間で異なっている。

2.3.3 雲システム解像領域気候モデルを用いた梅雨の将来変化

積乱雲群の対流現象を陽に表現しうる水平解像度5 kmの雲システム解像領域気候モデルは、20 km格子全球大気モデルと比較して、降水の極端指標の再現性能が高く、より現実的な降水極値の議論が可能となる。20 km格子全球大気モデルの温暖化予測実験の結果に、雲システム解像領域気候モデルをネストして、日本付近における降水現象の変質を、特に大雨・強雨に着目して調査した。

モデルで得られた7月上旬の現在気候実験および将来気候実験それぞれの日雨量を第13図aに示す。九州を中心とした梅雨域での降水量増加が顕著である。127°E-137°E、30°N-35°Nの領域(第13図aの四角枠内)で平均した日雨量の季節変化を第13図bに示す。現在気候(破線)を解析雨量(灰実線)と比較すると、6月中旬から7月中旬までの梅雨期のピーク、8月の少雨、および9月から10月にかけての秋雨と台風によるピーク等、領域における降水の季節変化をよくとらえていることが分かる。一方、将来気候(黒実線)においては、7月上旬と8月上旬に現在気候と比



第13図 雲システム解像領域気候モデルによる (a) 7月1～10日の平均日雨量 (mm)。コンタは海面気圧 (hPa)。現在気候実験 (上図：1979-2003)、将来気候実験 (下図：2075-2099)。各図内の南西日本の枠は (b)、(c) の領域。(b) (a) で示した領域における25年平均日雨量 (mm) の季節変化 (5日平均)、および (c) 日雨量100 mm以上の大雨によってもたらされる雨量の総量に対する割合 (%：5日平均)。(b)、(c) については現在気候 (破線)、解析雨量 (灰実線) および将来気候 (黒実線) についての値をプロットした。(Kanada *et al.* 2012)

較して有意な増加傾向がみられた。この期間、降水が量的に増加するだけでなく日雨量100 mm以上の大雨がもたらす降水の総量に対する割合も10%前後から15%前後と増加していた (第13図c)。つまり、梅雨後期に同領域にもたらされる降水量が増えるとともに強雨頻度が増加する可能性を示唆している。

2.3.4 日本の将来の確率降水量マップ

50年から100年に一度発生するような、非常に強い日降水量の情報は、都市計画や防災計画策定のために非常に重要である。革新プログラムでは、高解像度全球大気モデルによる温暖化予測結果を用いて、21世紀末における日本の大雨リスク評価に取り組んできた。特に限られた年数のモデルデータから、頻度の極めて低い大雨の発生確率の推定誤差を低減する統計手法の開発を行った。降水量は地形の影響を強く受けるため空間的に細かい分布をしており、確率日降水量のマップを作成するためには空間解像度の高いデータが必要である。そこで、最初に5 kmの解像度の観測データ (APHRO_JP) を用いて現在 (1980-2009年) の100年確率降水量 (「100年に一度の大雨」の雨量の目安) マップを作成した (第14図左上)。次に、将来の確率降水量を推定するために、高解像度全球大気モデルの

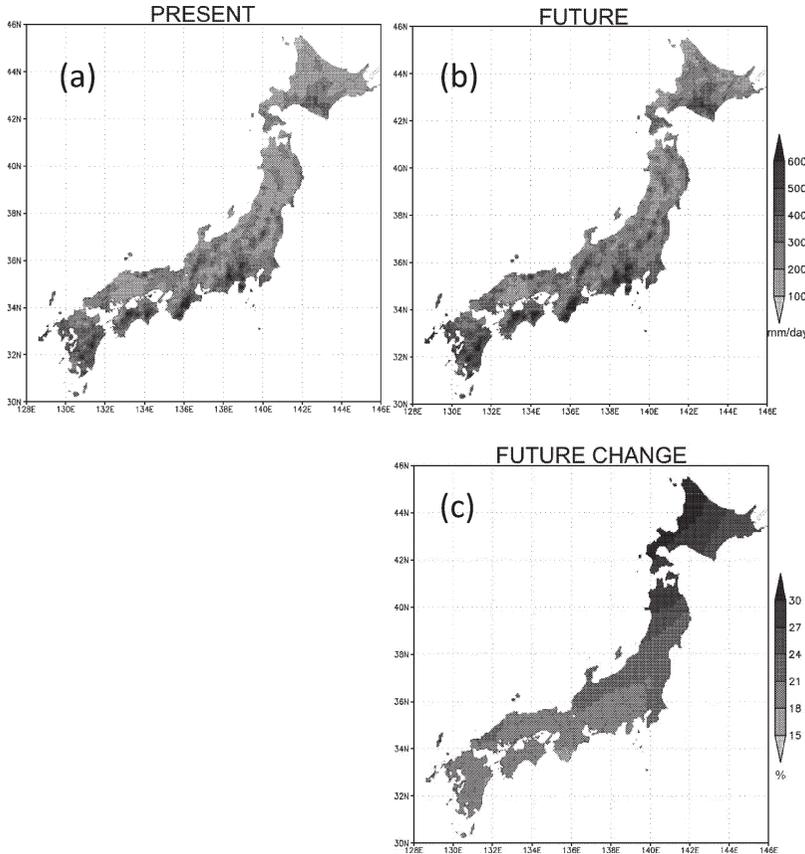
予測結果を用いて確率降水量の変化率を計算した (第14図右下)。確率降水量の変化率 (温暖化シグナル) は、確率降水量よりは空間的になめらかな分布をしていると考えられるので、サンプリングに起因するノイズをできるだけ小さくするために、モデルのデータを解像度60 kmに変換して解析した。また、確率降水量の推定に用いる L-moments の2次および3次モーメントは、半径600 kmの領域で空間平均を行った。更に、20 kmモデル2つと60 kmモデル3つの合わせて5つのランの結果から得られた将来変化率をアンサンブル平均した。

こうして求めた将来変化率

(第14図右下) を現在の確率降水量 (第14図左上) に掛けて、将来の100年確率降水量 (第14図右上) を求めた。将来の確率降水量は、地形の影響を反映した細かい分布をしているが、このような細かい分布の信頼度は、現在の確率降水量の分布の信頼度と変化率の分布の信頼度を前提としている。これらの前提条件の妥当性について今後検討していくことが重要である。

2.3.5 その他の成果

2010年夏季にヨーロッパ東部からロシア西部を襲った熱波はブロッキング現象 (偏西風の蛇行) によって引き起こされた。また、2008年夏季に日本付近で多発した集中豪雨は、極東域で長期間持続したブロッキング現象が日本付近に湿った空気を送り込んだことが要因の一つである。このように、ブロッキング現象は、中高緯度の天候や気候において重要な天候レジームの一つであり、ひとたび発生し持続することで周辺領域に極端な高低温や極端な降水をもたらすため、数値モデルで正確に再現することが非常に重要となる。数値モデルがブロッキング現象を過小評価することは古くから知られてきたが、高解像度全球大気循環モデルではブロッキングの出現頻度を非常に良く再現することができる (Matsueda *et al.* 2009)。21世紀末には、



第14図 (左上) 観測データ (APHRO_JP) から推定した現在 (1980-2009) の100年確率降水量 (mm/day). (右下) 全球モデルの5アンサンブルで得られた将来 (2075-2099) の100年確率降水量の変化率 (現在比%). (右上) 現在の100年確率降水量に変化率を掛けて得られた将来の100年確率降水量.

大西洋-ヨーロッパ域 (30°W-50°E) では出現頻度の減少が、太平洋域 (100°E-120°W) では現在と同程度の出現頻度が予測されている。ブロッキングの減少により異常気象の出現頻度は減少が横ばいが予想されるものの、温暖化による気温上昇や大気中の水蒸気量の増加を考慮すると、いったん起こった時の熱波や集中豪雨の激しさは大きくなる可能性がある。

また、日本を含む中緯度域の秋から春においては、温帯低気圧、特に強い低気圧の活動や、急速に発達する低気圧によって、強雨や強風による災害もたらされる。上述のようなブロッキングも十分に再現される高解像度の全球大気モデルにおいて、冬季の北半球における強い低気圧の存在頻度分布の将来変化を調べたところ、現在頻度が最も多い地域の極側・下流側 (北

東側) で頻度が増加し、赤道側・上流側 (南西側) では頻度が減少することが分かった (Mizuta *et al.* 2011)。またその地域の上流側 (西側) の、上空のジェット気流が強くなる場所で、低気圧の発達が強まっていた。ジェット気流・低気圧の発達・強い低気圧の頻度が関連し合っていないが、現在よりも極側で強くなることが予測される。

5 km 格子雲システム解像領域気候モデルは、降水のみでなく (Nakano *et al.* 2012)、気温の再現性においても20 km 格子全球大気モデルを上回る (Murata *et al.* 2012)。21世紀末の日本における夏季の顕著な高温の将来変化については、最低気温の昇温量については北海道南東地域 (日高山脈の風下側) で、最高気温の昇温量については東京西方の多摩丘陵で大きく、フェーン現象との関連が調べられている。このモデルは局所的な風系の再現性も良く、様々な応用が今後期待される。

3. モデル開発の現状と課題

3.1 長期予測に用いられる気候モデル (地球システムモデル)

CMIP5の実験仕様のうち、ESMを用いたものの大きな目的の一つは、気候-炭素循環フィードバックの強度の検討である。気温の上昇が陸域植生や海洋による人為起源二酸化炭素吸収能力に影響を与え、それにより加速あるいは減速するという気候-炭素循環フィードバックは、AR4でも中心的な話題の一つであった。世界10グループによる気候-炭素循環結合モデルを用いた実験結果では、同フィードバックは正のフィードバック、つまり気温上昇を加速する方向にあ

るとされたが、その強度はまちまちであり、SRES A2シナリオに基づく評価で0.2-1.5°C (2100年時点)の昇温に相当するとされた。CMIP5に提出した革新プロの結果でも同フィードバックは正であり、この点では従来の結論を追認する結果となった。

炭素循環の振舞いに関する予測の信頼性を確保するために、過去から現在にかけての二酸化炭素濃度の変遷や、現在気候のもとでの植生分布などの再現性を検証することが重要である。第1図に示した通り、こうした点についての再現性はある程度確保されている。ただし、ここで示したような検証は、予測の信頼性確保のために必要条件であって、十分条件ではない。すなわち、過去の変動や現在の分布が再現できたからといって、将来予測の信頼性に直結するわけではないことには注意を要する。

実際、気候-炭素循環フィードバックの強度には、(現状では多くのESMで欠けている)窒素循環と炭素循環の相互作用をモデルで考慮することにより、大きく強度が変わってくるという指摘がある。また、野外で二酸化炭素濃度の高い状態を作りそこでの植生動態を調べるFACE実験では、現状で多くのモデルに組み込まれている二酸化炭素施肥効果の強度が高すぎることが示唆されている。こうした点は、いずれも過去や現状の再現には必ずしも重要ではないものの、将来予測には大きくかかわってくるため、予測の信頼性確保のため更なる調査研究が望まれる。

さて海洋研究開発機構が中心となって開発しているESM (MIROC-ESM)は、大気化学過程やエアロゾル輸送過程を丁寧に扱っていること、モデル大気上端の設定高度が高く(約80 km)、中層の鉛直解像度も高いことなどが、各国研究機関で開発が進むESMと比較した場合の特徴である。このため成層圏準二年振動(QBO)等成層圏に特異な現象の再現性に優れ、中層大気による物質輸送についても信頼性が比較的高いといえる。こうした特質は、成層圏へのエアロゾルの人工散布といったいわゆるジオエンジニアリング(気候工学)に関する実験を行うには好都合である。CMIP5と連携する形で、成層圏エアロゾル散布の効果を評価するための国際プロジェクトGeoMIPが進行中である。MIROC-ESMはGeoMIPにも参加しデータを提出している。

言わずもがなではあるが、ESMに組み込まれた生物・化学過程モデルの再現性を向上させるには、土台となる大気海洋結合モデルの不断の改良が必須であ

る。この点について、2.1節で述べたとおり、革新プロではモデルの更新により、AR4の時点で用いていたモデルより良好な物理場の再現に成功している。ただしここで問題になるのは、大気海洋結合モデルのプログラムコードを改変した場合、生物・化学過程を表すプログラムコードに影響が及ぶことが往々にしてあるということである。つまり土台の大気海洋結合モデルに修正が加えられたときには、生物・化学過程のプログラムコードを、モデルの方程式そのものに何の変更もなくても更新する必要があるということであり、これはESMの効率的開発の重大な障害要因となる。こうした弊害を除去するため、コンポーネントモデルごとのプログラムコードをできるだけ独立させた上で、コンポーネントモデル間で必要となる変数の交換をつかさどる「カプラー」の開発が急務である。

3.2 近未来予測に用いられる気候モデル

近未来予測チームでは、予測システムの方法論確立のために、旧低解像度モデル(MIROC3; Nozawa *et al.* 2005)を用いた実験を行う一方で、影響評価研究に求められる高解像度モデル(MIROC4; Sakamoto *et al.* 2012)を構築し、また、チーム長期と協力して大気海洋とも物理過程を一新した新モデル(MIROC5; Watanabe *et al.* 2012)の開発も行った。MIROC4では、大気解像度を従来の120 kmから60 kmとし、渦許容の海洋モデルとの解像度のギャップを縮めたことにより、モデル気候値、季節変化、主要な気候変動の再現性が飛躍的に改善することを確認した。また、MIROC5では、ほとんどの物理スキームを日本人研究者の手によるものに差し替えた。ことに新積雲スキーム(Chikira and Sugiyama 2010)のインパクトは大きく、大気海洋結合モデルの積年の課題であったdouble ITCZ問題を大幅に改善し(Hirota *et al.* 2011)、また、エルニーニョ振幅をコントロールするメカニズムの理解を進展させた(Watanabe *et al.* 2011a)。ここでは詳しく触れる余裕がないが、モデル開発の経験は、気候感度に対する研究も大いに推進し、MIROCグループ若手の研究は、国際的にも重要な位置を占めつつある。

モデル開発は労多くして論文少なし、となりがちで、周囲からも「何をやっているのかよくわからない」などと言われがちであるが、自力でモデル開発できるグループに対する国際コミュニティの信頼は厚い。共生、革新プログラムを通じて、予測計算を行う

だけでなく、世界に誇れるモデル開発コンソーシアムを構築する機会を与えて頂いた文科省のご支援にこの場を借りて御礼申し上げます。

革新プロの近未来予測課題では、気候の十年規模変動の予測という新しい研究領域について、十年規模変動に予測可能性があるという萌芽的な研究成果を残すことができた。現時点においては、実用的な利用が可能なる程に予測スキルがあるわけではないし、影響評価等の予測出力の応用でも、従来の温暖化気体や各種エアロゾルの将来シナリオを与える温暖化予測実験との差別は困難であろう。だからといって十年規模変動予測を単独で改善すると考えるのではなく、季節変動から十年規模変動まで継ぎ目なく予測する（シームレス予測）ことがこの問題解決の糸口となるだろうと考える。すなわち、温暖化トレンドとともに10年規模の位相を再現・予測することで、季節変動の理解と予測精度が高まり、一方で、エルニーニョの予測可能性は高々2年程度ではあろうが、その予測の成功をもって長期的な予測可能性の延長を狙う。気候モデル、データ同化、アンサンブル予測など、気候研究の柱となっている道具を有効に活用しながら問題へ有効なアプローチを探索していくことが今後必要である。それらの道具に付随する研究テーマを考えれば、研究の裾野は広く、現業機関も含めて多方面の研究者の参加が期待される。

3.3 極端現象予測に用いられる気候モデル

極端現象チームでは、台風など世界各地における熱帯低気圧の発生数や強度の変化、梅雨期の降水強度の変化の予測を、高精度かつ定量的に見積もることを目標としたため、それらの現象を陽に表現できるように、従来地球温暖化研究では用いられていなかった水平方向に非常に細かい格子を持った大気モデルを使用する必要があった。そのため、熱帯低気圧等の変化予測を行うために、全球20 km 格子大気大循環モデルを、また日本における集中豪雨などの予測を行うために、日本付近に領域を限定した5 km および2 km 格子間隔の雲解像非静力領域大気モデルを用いることとした。これらのモデルは極端現象チームで気象研究所とチームを組んだ気象庁予報部数値予報課が短期予報のために開発してきたものであるが、これを気候モデルとして使うため、長期間積分の安定性の他に、気候モデル用の物理過程を導入した。共生プロジェクトと革新プログラムにおけるモデル開発は、まさに予報か

ら気候へのシームレスなモデル開発を指向するものであった。

日本域の力学的領域ダウンスケーリングを実施するためには、側面境界条件を提供する全球モデルの気候バイアスが大きな問題であった。全球大気海洋結合モデルは、徐々にその気候値再現性を向上させてきてはいるが、太平洋高気圧の軸の位置や形さらには梅雨前線の形状等には依然としてバイアスがある。海面水温自体のバイアスもある。これらを回避するために、海面水温を下部境界条件（海面水温および海水の分布）として与える大気大循環モデルを使うこととした。またタイムスライス実験で必要な将来の下部境界データは、平均的な気候値だけでなく時間的な変動性についても、信頼性の高いものであることが重要な要素となる。CMIP3の多数の全球大気海洋結合モデルの平均から得られる将来の海面水温や海水分布の予測結果は、その境界データとして最良の選択であると考えられた。しかし、マルチモデルデータを単純に平均するだけではいくつかの問題が生じる。我々は、それぞれのモデルのバイアスを補正し、マルチモデルを平均した場合に平滑化されて消えてしまう年々変動を現実的に表現しつつ将来の気候変化の効果を取り入れる手法を開発した（Mizuta *et al.* 2008）。

大気モデルの欠点は大気海洋相互作用の欠如であることは言うまでもないが、大気海洋結合過程の導入はモデルバイアスとのトレードオフの問題でもある。台風の過発達を抑えるように大気海洋結合過程を導入しつつ、大気海洋結合モデルで生じるバイアスを如何に抑えるかといった課題を克服する必要がある。

革新プログラムでは、5 km/2 km 雲解像領域大気モデルは夏季期間に限定した運用を行った。これは一つには計算機資源の問題が関係するが、モデルの物理過程の改良とも関係している。夏季の積雲対流による降水に関しては、空間解像度を5 km から2 km にすることで観測と匹敵する日降水量頻度分布を再現することが可能になった。しかしながら冬季の降雪や積雪過程を満足出来るように表現できていない。降水過程と陸面過程の高度化が待たれる。

極端現象チームでは、研究期間当初から全球モデルグループと領域ダウンスケーリンググループ及び災害影響評価グループで密接に連携を図れるよう研究開発スケジュールを組んだ。具体的には、研究期間の前半に共生プロジェクトのモデルを改良したモデルを、後半に新たに開発した現在気候再現性の良いモデルを、

それぞれ用いて実験を行うことで、5年間の研究期間を通じて、全球から領域へのダウンスケーリング及び災害影響評価グループとの連携を図って研究を進めた。モデル出力データについても、前期モデル実験実施前にモデルグループと災害影響評価グループで議論した。また前期モデル実験結果を踏まえ、後期モデル実験でのモデル出力データを再討議した後、後期実験を行い、影響評価に利用するなど、モデルグループと災害影響評価グループの良好なコミュニケーションの熟成がなされた。この良好なコミュニケーションを活かしていくことが今後の研究の進展に役立つと考えている。

4. 革新プロが残したものと

AR4で20世紀後半以降の温暖化が人間活動によるとほぼ断定されたことを受け、予測を支える科学の役割も、気候変化の根拠明示から温暖化の抑制・適応策立案へ資する知見獲得へと比重を移した。こうした状況を反映し、革新プロでは予測モデル開発に携わる研究者と連携して影響評価に取り組むグループも組み入れられた。また革新プロと同時期に、環境省の地球環境研究総合推進費による「温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究」(通称S-4)や「地球環境に関わる政策支援と普及啓発のための気候変動におけるシナリオに関わる総合的研究」(通称S-5)が実施されており、予測データを用いて温暖化の産業や生活への影響を評価する研究が行われていた。

影響評価を行う際には、予測データの中身をよく理解したうえで、最新の気候変化予測結果に基づいて行うのが望ましい。しかし、従来はコミュニティ間の情報交換が必ずしも充分に行われておらず、影響評価に必要な変数が気候モデルの出力として保存されていないなどの事態が発生していた。また、たとえば海面上昇に関する予測データは、海流に呼応して力学的に変化する成分、海水の熱膨張による成分、氷床や氷河の融解による成分に分かれて存在する。海岸工学分野などで海面上昇の予測データを影響評価に利用しようとする研究者にとって、そうした事実は自明のものではないが、さりとて情報の入手先が確立しているわけではなく、予測結果の的確な利用法が影響評価分野へ円滑に伝達されているとはいいがたい状態であった。

こうした状況を改善し、S-4やS-5の研究者と革新プロの研究者とのコミュニケーションを促進する目的

で、2008年5月「気候シナリオ利用タスクグループ」(TG)が文部科学・環境両省の支援のもと発足した。おもな活動内容は、年に2-3回の会合における情報交換や、それに基づいた影響評価に必要な予測変数と出力頻度についてのリストの作成、年1回のワークショップの開催などである。こうした活動は、モデル開発者と影響評価の研究者との交流を促すだけでなく、影響評価にかかわる各分野間での情報交換促進にも貢献した。例えばTGによる初回のワークショップでは、「気候予測データのバイアス補正」と「確率的予測」がテーマであったが、これは影響評価の各分野に共通の話題であり、分野の壁を越えた活発な討論が展開された。

さらに、革新プロで台風の再現、発生メカニズム解析などに携わる気象研究者と、高潮や風水害の防止に取り組む防災の研究者との間では、台風をキーワードとした「台風チーム」が結成され、それぞれの分野での台風に対する取り組みを紹介し、それらの改善について議論が交わされた。またCMIP5に提出されたデータは、文部科学省による「データ統合・解析システム」(DIAS)に携わる情報科学の研究者と革新プロが共同でサーバの構築にあたり、国際的なデータ配信体制の一翼を担う形で対応がなされた。CMIP5に提出された各国の気候モデル開発グループによる予測データの中では、革新プロからのデータは比較的早くから世界各国で利用されることとなったが、これには上記のような連携体制の確立が大きく寄与している。

このように、これまで交流の少なかった関連分野間でのネットワークが形成されたことが、革新プロの重要な副産物といえよう。今後、温暖化への適応策や緩和・抑制策の立案への温暖化予測データの利用がますます盛んになると予想される。上述のプログラム間協力を契機に培われた研究者間の信頼関係が、異分野が一体となった包括的な温暖化対策に結びつくことを期待する。

5. 今後の改善が期待される点

5.1 プロトコル準拠の実験遂行と研究成果創出の背反性

CMIP5では、第3期結合モデル相互比較計画(CMIP3)のときと比べ実験数や提出データに含まれる変数の数・出力頻度、データ総量などが格段に増大した。それに伴い、実験実施や実験出力を指定された形式に変換するなどの作業量が膨大になった。これは

一面では、影響評価分野などでの温暖化予測データが頻繁に活用されるようになったことの反映であり歓迎すべき事態ともいえるが、他方、一部の若年層の研究者が論文執筆に直接結びつかない業務に多大な労力を割かざるを得ない期間が1年ほど続くという事態にもつながった。

現行の若手研究者の雇用体制を鑑みるに、これは決して望ましい状況とは言えない。実験仕様を設計する際には、包括性と実行可能性のバランスをより慎重に吟味していく必要がある。そうした観点から、実験仕様やデータ形式を策定するプロセスに対する国内研究者の関与を増やしていく必要があろう。また一方で、こうした若手研究者による献身的な作業が科学の進展に一定の役割を果たしていることも事実である。若手研究者の雇用システムにおいて、論文という形での業績以外にもこうした貢献を正しく評価する仕組みを確立する努力を進めねばならない。

実験仕様の複雑さはまた、モデリングに従事する研究者以外の研究者に対し、「モデリングの研究をしている人たちのやっていることは、分からない」といったイメージを助長することにもつながりかねない。一部の研究者にこのようなイメージが広がっている背景の一つには、モデリングに従事する研究者自身が他分野の研究者に対して十分な説明を行ってこなかったことがある。今後は、データ同化技術の開発など具体的な課題を通じてモデル開発者と観測従事者のより緊密な連携を図り、モデリング研究の意義の理解促進を図っていくべきであろう。

5.2 データ配信サーバの運営体制

CMIP5に収められる総データ量は最終的に3ペタバイトとも言われ、前回のCMIP3の約35テラバイトに比べれば100倍にもなる。そのうち国内機関から提出したデータ量は500テラバイト以上あり相応の貢献をしている。問題は、このデータをいかに有効に活用するかである。データ量は一組織で管理できる量を遙かに超えているし、出力データを解析するにも、相応の計算能力を持つマシンが必要になっている。この膨大な出力データに対応すべく国際的にはGOESSPなるワーキンググループが活動し、現在までに世界中に配置したデータサーバでデータを分散管理するシステムを構築し、同時にメタデータを収集管理するMETAFOR、提出されたデータを品質管理するQCの体制を敷いた。途中から日本もGOESSPに関わ

り、DIASにデータノードを立ち上げて国内機関による全てのデータ管理・配布を実施している。データを配布するシステムはできたが、ユーザーがデータを効率的に利用するための仕組みは十分ではない。今後ユーザーとサーバを管理する機関との密な情報交換のもと試行錯誤しながら、有効な手立てを探っていく必要がある。

5.3 研究インフラストラクチャの整備

革新プログラムの出力データは量、種類とも多岐にわたった。需要も大きく、さらに増やしてほしいとする要請もあったが、ディスク量や転送に要する時間の制約から実験計画段階で絞らざるを得なかった。計算にあたっては、かなりの便宜をはかっていたので感謝の念に堪えないとはいえ、必ずしも潤沢とはいえない計算機直結のディスクを常時やりくりしながら行うこととなった。計算終了後は直ちに大量のデータを遠隔地のデータサーバに転送する必要に迫られたが、その回線の細さも深刻な問題であった。事実、プログラムの前半は、宅配便によるディスクの配送で転送していた。今後はより一層データ量が増えることが予想され、こうしたハード・インフラの整備は進めていただきたい。

また、外部からのデータ提供の要請に応えるのも、使っていただけるのでありがたい話であるとはいえ、容易ではなかった。利用者は必ずしもモデル出力の取り扱いに慣れておらず、データの形式からはじまり、モデルのデータの性質を説明する必要もあった。提供側の努力と利用者側の勉強が必要であろう。提供のための道具立ても十分ではなく、提供側が手で領域・要素を切り出してディスクに詰めて送付することが多かった。CMIP5もありシステムが出来つつあるが、まだこの分野も研究・開発中のようで、現状では必ずしも便利とはいえないシステムもあるようである。今後の発展が望まれる。

さらに、今後地球環境予測を進める上で問題になるのが計算機である。こうした研究では多岐にわたる情報を作成するため、計算量に比して相対的に大量のメモリ・ディスクアクセスが必要となるが、これらは最新の計算機システムが得意としないものである。計算機向きのモデルを作る努力も必要ではあろうが、それについていくには主に人的資源の上でも限界がある。地球環境予測研究向きの計算機の開発を期待する。

6. おわりに

平成24年度からは、地球温暖化予測に関係するプロジェクトとして文部科学省による「気候変動リスク情報創生プログラム」が発足する。4節で述べた「気候変化の根拠明示から温暖化の抑制・適応策立案へ資する知見獲得へ」という流れを一層意識し、異常気象頻度の変化についての評価、地域レベルでの温暖化の確率情報といった適応に必要な基盤的情報を提供するとともに、ティッピングエレメント（氷床の崩壊など、ある閾値を超えることによりもたらされるかもしれない激変）、ジオエンジニアリング（人工的な気候制御による温暖化抑止）といった、これまで指摘されつつも詳細な評価がなされていなかった話題にも取り組み、長期的な気候安定化目標設定に資する情報提供を通じ緩和・抑制策立案への貢献も目指す。

これら温暖化対策立案への貢献とともに、地球環境を形成する様々なプロセスの科学的知見獲得も、もちろん重要なターゲットである。この2つが両立可能であることは、本稿で示した革新プロの成果を見ても想像に難くない。革新プロの遺産を存分に活用し新しいプログラムを成功に導くことが、科学の発展への寄与につながると期待している。

謝辞

図の作成に関し、革新プログラムに参加する多数の研究者の協力を得た。お世話になった研究者らの協力と、文部科学省の支援に感謝している。本稿で示した数値実験結果の多くは海洋研究開発機構が運営する地球シミュレーターによって計算されたものである。またCMIP5の計算結果の配信に関して、データ統合解析システム（DIAS）の関係者には多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表する。

略語一覧

AMO : Atlantic Multi-decadal Oscillation 大西洋数十年規模振動
 APHRO_JP : Asian Precipitation-Highly-Resolved Observational Data integration towards Evaluation of the Water Resources, Japan 日本における高解像度アジア日降水量グリッドデータ
 AR4 : 4th Assessment Report 第4次評価報告書
 AR5 : 5th Assessment Report 第5次評価報告書
 CMIP3 : 3rd phase of the Coupled Model Intercomparison Project 第3期結合モデル相互比較計画
 CMIP5 : 5th phase of the Coupled Model Intercompar-

ison Project 第5期結合モデル相互比較計画
 C4MIP : Coupled Climate Carbon Cycle Model Intercomparison Project 結合気候炭素循環モデル相互比較計画
 DIAS : Data Integration and Analysis System データ統合・解析システム
 EMICs : Earth System Models for Intermediate Complexity 中程度の複雑さの地球システムモデル
 ESM : Earth System Model 地球システムモデル
 FACE : Free Air CO₂ Enrichment 開放系大気CO₂増加実験
 GCM : General Circulation Model 大循環モデル
 GeoMIP : Geoengineering Model Intercomparison Project 気候工学モデル相互比較計画
 GOESSP : Global Organization for Earth System Science Portals 地球システム科学ポータル全球組織
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change 気候変動に関する政府間パネル
 ITCZ : Intertropical Convergence Zone 熱帯収束帯
 JUMP-LCM : Japan Uncertainty Modeling Project -Loosely Coupled Model 日本不確実性モデリング計画-緩やかな結合モデル
 METAFOR : Common Metadata for Climate Modeling Digital Repositories 気候モデリングデジタル貯蔵のための共通メタデータ
 MIROC : Model for Interdisciplinary Research on Climate 気候についての学際研究モデル
 MIROC-ESM : MIROC-Earth System Model MIROC地球システムモデル
 MRI-AGCM : Meteorological Research Institute-Atmospheric General Circulation Model 気象研究所大気大循環モデル
 PDO : Pacific Decadal Oscillation 太平洋十年規模変動
 QBO : Quasi-Biennial Oscillation 準二年振動
 RCP : Representative Concentration Pathway 代表的濃度経路
 SEIB-DGVM : Spatially Explicit Individual-Based Dynamic Global Vegetation Model 空間明示的な個体モデル-動的全球植生モデル
 Sim-CYCLE : Simulation Model of the Carbon Cycle in Land Ecosystem 陸域生態系における炭素循環モデル
 SPRINTARS : Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species エアロゾル種に関するスペクトル放射輸送モデル
 S-4 : 温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合的評価に関する研究
 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
 TG : Task Group on Climate Scenario 気候シナリオ利

用タスクグループ

VISIT : Vegetation Integrative Simulator for Trace Gasses 微量気体についての植生統合シミュレーター

WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画

XBT : Expendable Bathythermograph 投棄型水温記録器

参考文献

- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Ishii, T. Mochizuki, T. T. Sakamoto, H. Tatebe, Y. Komuro, M. Watanabe, T. Nozawa, H. Shiogama, M. Mori, S. Yasunaka and Y. Imada, 2012a : An overview of decadal climate predictability in a multi-model ensemble by climate model MIROC. *Clim. Dyn.*, Online First, doi:10.1007/s00382-012-1351-y.
- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Ishii, M. Watanabe, T. Nozawa, T. Mochizuki, H. Tatebe, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, H. Shiogama, M. Mori, S. Yasunaka, Y. Imada, H. Koyama, M. Nozu and F.-F. Jin, 2012b : Predictability of a stepwise shift in Pacific climate during the late 1990s in hindcast experiments using MIROC. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 1-21.
- Chikamoto, Y., M. Kimoto, M. Watanabe, M. Ishii and T. Mochizuki, 2012c : Relationship between the Pacific and Atlantic stepwise climate change during the 1990s. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L21710, doi:10.1029/2012GL053901.
- Chikira, M. and M. Sugiyama, 2010 : A cumulus parameterization with state-dependent entrainment rate. Part I : Description and sensitivity to temperature and humidity profiles. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 2171-2193.
- Endo, H., A. Kitoh, T. Ose, R. Mizuta and S. Kusunoki, 2012 : Future changes and uncertainties in Asian precipitation simulated by multiphysics and multi-sea surface temperature ensemble experiments with high-resolution Meteorological Research Institute atmospheric general circulation models (MRI-AGCMs). *J. Geophys. Res.*, **117**, D16118, doi:10.1029/2012JD017874.
- Hajima, T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe and M. Kawamiya, 2012 : Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 417-434.
- 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.
- IPCC, 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. Solomon *et al.* eds, Cambridge, 996pp.
- Ishii, M. and M. Kimoto, 2009 : Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections. *J. Oceanogr.*, **65**, 287-299.
- Ito, A. and M. Kawamiya, 2010 : Potential impact of ocean ecosystem changes due to global warming on marine organic carbon aerosols. *Glob. Biogeochem. Cycles*, **24**, GB1012, doi:10.1029/2009GB003559.
- Kanada, S., M. Nakano and T. Kato, 2012 : Projections of future changes in precipitation and the vertical structure of the frontal zone during the Baiu season in the vicinity of Japan using a 5-km-mesh regional climate model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 65-86.
- Kawamiya, M., T. Hajima and T. Tokioka, 2011 : Foreseeing the forests : vegetation dynamics in an earth system model. Forest for People, World Meteorological Organization, Tudor Rose, Leicester, 291-294.
- Kitoh, A., T. Ose, K. Kurihara, S. Kusunoki, M. Sugi and KAKUSHIN Team-3 Modeling Group, 2009 : Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the KAKUSHIN Program : Results of preliminary experiments. *Hydrol. Res. Lett.*, **3**, 49-53.
- Kusunoki, S. and R. Mizuta, 2008 : Future changes in the Baiu rain band projected by a 20-km mesh global atmospheric model : Sea surface temperature dependence. *SOLA*, **4**, 85-88.
- Kusunoki, S., R. Mizuta and M. Matsueda, 2011 : Future changes in the East Asian rain band projected by global atmospheric models with 20-km and 60-km grid size. *Clim. Dyn.*, **37**, 2481-2493.
- Matsueda, M., R. Mizuta and S. Kusunoki, 2009 : Future change in wintertime atmospheric blocking simulated using a 20-km-mesh atmospheric global circulation model. *J. Geophys. Res.*, **114**, D12114, doi:10.1029/2009JD011919.
- Meehl, G. A., L. Goddard, B. Kirtman, G. Branstator, G. Danabasoglu, E. Hawkins, A. Kumar, A. Rosati, D. Smith, R. Sutton, G. J. Boer, R. Burgman, C. Cassou, S. Corti, A. Karspeck, N. Keenlyside, M. Kimoto, D. Matei, J. Mignot, R. Msadek, A. Navarra, H. Pohl

- mann, M. Rienecker, E. Schneider, C. Tebaldi, H. Teng, G. J. van Oldenborgh, G. Vecchi and S. Yeager, 2013 : Decadal climate prediction : an update from the trenches. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, submitted.
- Miyama, T. and M. Kawamiya, 2009 : Estimating allowable carbon emission for CO₂ concentration stabilization using a GCM-based Earth system model. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L19709, doi:10.1029/2009GL039678.
- Mizuta, R., Y. Adachi, S. Yukimoto and S. Kusunoki, 2008 : Estimation of the future distribution of sea surface temperature and sea ice using the CMIP3 multi-model ensemble mean. *Tech. Rep. Meteor. Res. Inst.*, (56), 28pp.
- Mizuta, R., M. Matsueda, H. Endo and S. Yukimoto, 2011 : Future change in extratropical cyclones associated with change in the upper troposphere. *J. Climate*, **24**, 6456-6470.
- Mizuta, R., H. Yoshimura, H. Murakami, M. Matsueda, H. Endo, T. Ose, K. Kamiguchi, M. Hosaka, M. Sugi, S. Yukimoto, S. Kusunoki and A. Kitoh, 2012 : Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 233-258.
- Mochizuki, T., M. Ishii, M. Kimoto, Y. Chikamoto, M. Watanabe, T. Nozawa, T. T. Sakamoto, H. Shiogama, T. Awaji, N. Sugiura, T. Toyoda, S. Yasunaka, H. Tatebe and M. Mori, 2010 : Pacific decadal oscillation hindcasts relevant to near-term climate prediction. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **107**, 1833-1837.
- Mochizuki, T., Y. Chikamoto, M. Kimoto, M. Ishii, H. Tatebe, Y. Komuro, T. T. Sakamoto, M. Watanabe and M. Mori, 2012 : Decadal prediction using a recent series of MIROC global climate models. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 373-383.
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant and T. J. Wilbanks, 2010 : The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, **463**, 747-756.
- Murakami, H., B. Wang and A. Kitoh, 2011a : Future change of western North Pacific typhoons : Projections by a 20-km-mesh global atmospheric model. *J. Climate*, **24**, 1154-1169.
- Murakami, H., R. Mizuta and E. Shindo, 2011b : Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM. *Clim. Dyn.*, **39**, 2569-2584.
- Murakami, H., Y. Wang, H. Yoshimura, R. Mizuta, M. Sugi, E. Shindo, Y. Adachi, S. Yukimoto, M. Hosaka, S. Kusunoki, T. Ose and A. Kitoh, 2012 : Future changes in tropical cyclone activity projected by the new high-resolution MRI-AGCM. *J. Climate*, **25**, 3237-3260.
- Murata, A., M. Nakano, S. Kanada, K. Kurihara and H. Sasaki, 2012 : Summertime temperature extremes over Japan in the late 21st century projected by a high-resolution regional climate model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 101-122.
- Nakano, M., T. Kato, S. Hayashi, S. Kanada, Y. Yamada and K. Kurihara, 2012 : Development of a 5-km-mesh cloud-system-resolving regional climate model at the Meteorological Research Institute. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 339-350.
- Nozawa, T., T. Nagashima, H. Shiogama and S. A. Crooks, 2005 : Detecting natural influence on surface air temperature change in the early twentieth century. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L20719, doi:10.1029/2005GL023540.
- 野沢 徹, 小倉知夫, 阿部 学, 竹村俊彦, 渡邊真吾, 河宮未知生, 時岡達志, 2012 : 20世紀後半における北部太平洋域の寒冷化傾向に対する人為起源エアロゾルの影響. *日本気象学会2012年度秋季大会予稿集*, 468.
- Okajima, H. and M. Kawamiya, 2011 : Pacific climate variability and the possible impact on global surface CO₂ flux. *Carbon Balance Manag.*, **6**, doi:10.1186/1750-0680-6-8.
- Sakamoto, T. T., Y. Komuro, T. Nishimura, M. Ishii, H. Tatebe, H. Shiogama, A. Hasegawa, T. Toyoda, M. Mori, T. Suzuki, Y. Imada, T. Nozawa, K. Takata, T. Mochizuki, K. Ogochi, S. Emori, H. Hasumi and M. Kimoto, 2012 : MIROC4-A new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90**, 325-359.
- Smith, D. M., A. A. Scaife, G. J. Boer, M. Caian, F. J. Doblas-Reyes, V. Guemas, E. Hawkins, W. Hazeleger, L. Hermanson, C. K. Ho, M. Ishii, V. Kharin, M. Kimoto, B. Kirtman, J. Lean, D. Matei, W. J. Merryfield, W. A. Müller, H. Pohlmann, A. Rosati, B. Wouters and K. Wyser, 2012 : Real-time multi-model decadal climate predictions. *Clim. Dyn.*, doi:10.1007/s00382-012-1600-0.
- 住 明正, 露木 義, 河宮未知生, 木本昌秀, 2012 : 計算と地球環境 (岩波講座計算科学第5巻), 岩波書店, 256

- pp.
- Tachiiri, K., J. C. Hargreaves, J. D. Annan, A. Oka, A. Abe-Ouchi and M. Kawamiya, 2010 : Development of a system emulating the global carbon cycle in Earth system models. *Geosci. Model Dev.*, **3**, 365–376.
- Tachiiri, K., J. C. Hargreaves, J. D. Annan, C. Huntingford and M. Kawamiya, 2013 : Temperature rise and allowable carbon emissions for medium mitigation scenario RCP4.5. in preparation.
- Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi and T. Nakajima, 2000 : Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. *J. Geophys. Res.*, **105**, 17853–17873.
- Tatebe, H., M. Ishii, T. Mochizuki, Y. Chikamoto, T. T. Sakamoto, Y. Komuro, M. Mori, S. Yasunaka, M. Watanabe, K. Ogochi, T. Suzuki, T. Nishimura and M. Kimoto, 2012 : The initialization of the MIROC climate models with hydrographic data assimilation for decadal prediction. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 275–294.
- Toyoda, T., T. Awaji, N. Sugiura, S. Masuda, H. Igarashi, Y. Sasaki, Y. Hiyoshi, Y. Ishikawa, T. Mochizuki, T. T. Sakamoto, H. Tatebe, Y. Komuro, T. Suzuki, T. Nishimura, M. Mori, Y. Chikamoto, S. Yasunaka, Y. Imada, M. Arai, M. Watanabe, H. Shiogama, T. Nozawa, A. Hasegawa, M. Ishii and M. Kimoto, 2011 : Impact of the assimilation of sea ice concentration data on an atmosphere–ocean–sea ice coupled simulation of the Arctic Ocean climate. *SOLA*, **7**, 37–40.
- Watanabe, M., T. Suzuki, R. O’ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe and M. Kimoto, 2010 : Improved climate simulation by MIROC5 : Mean states, variability, and climate sensitivity. *J. Climate*, **23**, 6312–6335.
- Watanabe, M., M. Chikira, Y. Imada and M. Kimoto, 2011a : Convective control of ENSO simulated in MIROC. *J. Climate*, **24**, 543–562.
- Watanabe, S., T. Hajima, K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Okajima, T. Nozawa, H. Kawase, M. Abe, T. Yokohata, T. Ise, H. Sato, E. Kato, K. Takata, S. Emori and M. Kawamiya, 2011b : MIROC-ESM 2010 : model description and basic results of CMIP5–20c3m experiments. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 845–872.
- Watanabe, S., K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Kawase and T. Nozawa, 2011c : Future projections of surface UV-B in a changing climate. *J. Geophys. Res.*, **116**, D16118, doi:10.1029/2011JD015749.
- Watanabe, S., T. Takemura, K. Sudo, T. Yokohata and H. Kawase, 2012 : Anthropogenic changes in the surface all-sky UV-B radiation through 1850–2005 simulated by an Earth system model. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 5249–5257.
- Yamamoto, A., M. Kawamiya, A. Ishida, Y. Yamanaka and S. Watanabe, 2012 : Impact of rapid sea-ice reduction in the Arctic Ocean on the rate of ocean acidification. *Biogeosciences*, **9**, 2365–2375.
- Yasunaka, S., M. Ishii, M. Kimoto, T. Mochizuki and H. Shiogama, 2011 : Influence of XBT temperature bias on decadal climate prediction with a coupled climate model. *J. Climate*, **24**, 5303–5308.

Results from Global Warming Projection Experiments Based on CMIP5 Protocol under the KAKUSHIN Program

Michio KAWAMIYA^{*1}, Masayoshi ISHII^{*2}, Akio KITOH^{*2},
and Masahide KIMOTO^{*3}

^{*1} (*Corresponding author*) *Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3173-25, Showa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama-city, Kanagawa, 236-0001, Japan.*

^{*2} *Climate Research Department, Meteorological Research Institute.*

^{*3} *Atmosphere Ocean Research Institute, University of Tokyo.*

(Received 18 September 2012 ; Accepted 20 December 2012)

Abstract

We report results from “Innovative Program of Climate Change Projection for the 21st Century” (KAKUSHIN program) by Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), under which most part of the data from Japan have been obtained for submission to the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), putting emphasis on CMIP5 simulations. CMIP5 experiments in the program have been conducted by Long-Term Global Change Projection Team (Team 1), Near-Term Climate Prediction Team (Team 2) and Extreme Event Projection Team (Team 3) focusing on a centennial (Team 1) and decadal (Team 2) timescale, and extreme events such as typhoon and downpour (Team 3). Team 1 obtained results such as improved reproducibility for past climate change during the 20th century and projection for future vegetation shift, Team 2 establishment of an initialization scheme for a climate change projection model and improved predictability of climate change on a multiple-year timescale, and Team 3 projection of typhoon intensity approaching to Japan and creation of a map of Japan for probabilistic precipitation change. Also, it is a great legacy of the program that a network between the two research communities of climate change projection and impact assessment has been established. These results will be succeeded to a new program by MEXT “Program for Risk Information on Climate Change”, and it is hoped that they are further developed and utilized for developing climate mitigation and adaptation policies.
