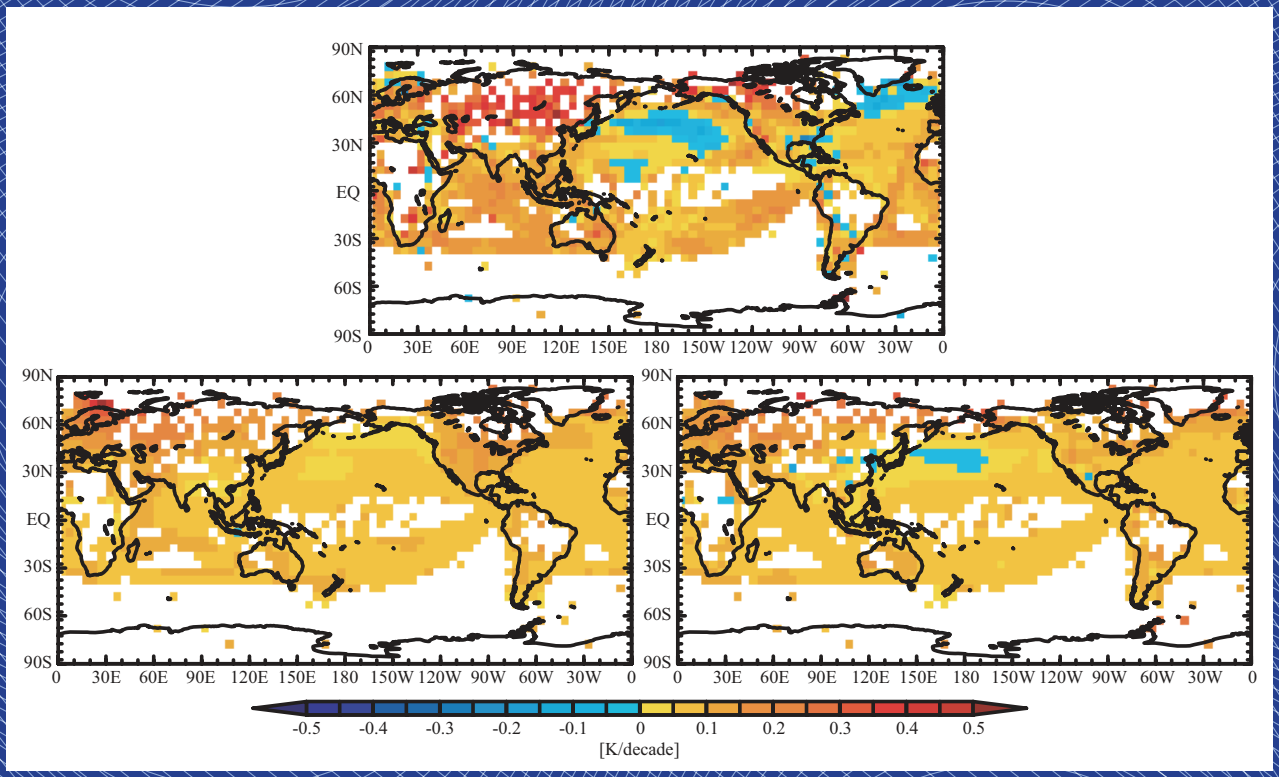
KAKUSHIN
21世紀気候変動予測革新プログラム

# 「地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験」

## 平成23年度研究成果報告書

平成24年3月





海洋研究開発機構

文部科学省研究開発局

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、独立行政法人海洋研究開発機構が実施した平成23年度「地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験」の成果を取りまとめたものです。

表紙の説明：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℃ /10 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）。

目次

Ⅰ. 研究計画の概要…… 1
1. 研究の趣旨 …… 1
2. 研究概要 …… 1
3. 研究年次計画…… 3
4. 平成23 年度研究計画 …… 7
5. 平成23 年度実施体制 …… 9
6. 研究運営委員会、研究連絡会議…… 10
Ⅱ. 研究成果の概要…… 13
1. 総括 …… 13
2. サブテーマごと、個別項目ごとの概要…… 14
3. 波及効果、発展方向、改善点等…… 21
4. 研究成果の発表状況 …… 22
5. 国際共同(協力)研究の状況…… 23
Ⅲ. 研究成果の詳細報告…… 31
e.1 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験…… 31
e.2 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…… 96
e.3 気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価 …… 119
e.4 長期的気候変動を視野に入れた沿岸域リスクの世界評価…… 127
e.5 全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上 …… 138
e.6 GCM(大気海洋結合気候モデル)と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証…… 153

# Ⅰ．研究計画の概要

## １．研究の趣旨

地球システム統合モデルに改良を施し、300年程度先までを対象として地球温暖化予測実験を行う。実験結果をもとに、IPCC第5次報告書など温暖化研究に関する国際的な活動へ貢献する。

また、温暖化予測に伴う不確実性を定量的に評価する。評価に際しては、大循環モデルをベースにした予測結果のみならず、より簡略で数多くの感度実験を行うのに適したタイプのモデルも併用し、多数の実験結果に基づいた統計情報を提供する。温暖化予測結果を応用した海岸防災や農業への影響評価も行う。さらに精緻な環境変化予測へ向け、全球雲解像モデルや植生動態モデルの開発にも取り組む。

## ２．研究概要

人為起源$CO_2$の排出による地球温暖化が進行している。最近の研究では、今世紀中に大気中の$CO_2$濃度を一定濃度に安定化することができたとしても、その後百年以上にわたって地球温暖化とそれに伴う海面の上昇が続くと言われている。また、地球温暖化が進めば、$CO_2$を吸収する海面の条件や、森林や土壌といった陸域生態系、栄養塩やプランクトンに関する海の生態系にも影響を与えるため、人為起源$CO_2$排出量だけに注目していたのでは、$CO_2$の安定化は達成できない可能性がある。本課題では、地球システム統合モデルを使用して、西暦2300年までの地球温暖化予測実験を行い、$CO_2$安定化シナリオの下での、長期的な地球環境の変化を予測する。また、大気中の$CO_2$濃度を安定化させる上で許容される人為起源$CO_2$排出量を評価する。地球環境変化予測の結果を用いて、予測の不確定性の評価・低減のための実験や、自然災害分野への影響評価を行う。

### 研究課題名：地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

地球システム統合モデルを改良し、西暦2300年までの地球温暖化予測実験を行う。このモデルは、従来の気候モデル（大気海洋結合気候モデル）に、大気-海洋-陸域炭素循環フィードバックや、大気化学-エアロゾルフィードバックといった生物・地球化学過程を組み合わせたものである。全球植生動態モデルの導入や、炭素循環モデルやエアロゾル輸送モデルの高度化、氷床モデルの改良などが計画されている。地球温暖化予測実験の結果を用いて、CO2安定化シナリオの下での、長期的な気温や海面高度の変化や、大気中のCO2濃度の変化を予測し、CO2濃度を一定値で安定化させる上で許容される人為起源CO2排出量を評価する。

### 研究課題名：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

地球温暖化予測には必ず不確実性が伴う。IPCC第4次評価報告書でも、CO2濃度シナリオ毎に予測値の幅を報告し、この点について注意を払っている。しかし、例えば予測幅の上限近くまで昇温する確率がどの程度あるかなど、具体的な確率を予測するまでにはいたっていない。そのような予測を行うためには、設定を少しずつ変えて非常に多数のシミュレーション実験を行う必要があり、コンピュータの計算能力や実験結果を整理する統計手法に高い水準が要求されるためである。本課題では、大気海洋結合気候

モデルに加え簡略気候モデルも併用し、高度な統計手法を用いながら、確率的地球温暖化予測手法の確立を目指す。

## 研究課題名：気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価

世界の主要穀物の中で、とりわけトウモロコシおよびダイズは、中国、アメリカ、ブラジルなどに生産地域が局在している。このような状況で、将来の気候変動に伴って発生する気象災害（とくに干ばつ）は、これらの生産量にどのような影響を及ぼすのか、今後も安定した生産供給は可能であろうか。

本研究は、気象災害影響予測モデルを作成し、最新の気候変化予測を利用して、異常気象の発生場所と頻度の変化に基づいて、世界同時不作の可能性などについて解析することにより穀物供給システムの安定性について予測評価を行う。

## 研究課題名：長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価

本研究は、2300年頃までの気候変動・海面上昇の長期予測結果を用いて、世界全体の沿岸災害リスクを予測することを目標とする。ここでいう沿岸災害リスクとは、世界規模の水没及び高潮氾濫によるリスクと特にアジアのメガデルタ・メガシティにおける複合的災害リスクである。このような沿岸災害リスクは、水没・氾濫予測域の面積、人口、資産（土地利用）などの指標を用いて行う。本研究では、沿岸災害リスクの長期予測を行うことで、世界全体が地球温暖化・海面上昇にうまく適応していくための施策検討の一助となることを目指す。

## 研究課題名：全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

従来の気候モデルによる気候予測において、最も不確定の大きな要素は「雲」のふるまいである。従来の気候モデルに比べて解像度を格段に向上した新しい数値モデル「全球雲解像モデル」により、雲の不確定性を低減することを目標としている。地球全体を数kmメッシュ（格子）に分割し、特に熱帯の積雲対流を直接シミュレートすることで、雲スケールから地球スケールのマルチスケール擾乱を同時にシミュレートする。これにより、雲のフィードバック効果を精緻化し、モンスーンや台風の将来予測の精度向上にも貢献することが期待される。

## 研究課題名：GCM（大気海洋結合気候モデル）と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証

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、炭素循環・水循環・太陽光エネルギー収支の変化を通じて、気候にフィードバック的な影響を与える。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（炭素や水の循環など）や構造（植生の分布や構成など）における短期的・長期的変化を予測する全球植生モデルを開発する。そしてモデルの信頼性を十分に検証した後に、このモデルを地球システム統合モデルへと結合することで、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、計算実験を行う。

# ３．研究年次計画

## ３．１　地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

平成19年度：物理過程改良、モデル高解像度化（大気200km程度、海洋100km程度）

平成20年度：生物・地球化学過程の高度化完了

平成21年度：地球システム統合モデルによる二十世紀再現実験、温暖化実験

平成22年度：温暖化実験結果の解析。また、3年目までに不確実性グループ、影響評価グループが開発した手法を用いて、不確実性や温暖化影響の評価を行う。

平成23年度：論文執筆、投稿。不確実性や影響評価のグループとの共同研究を含む。より高解像度の統合モデルによるテストラン実行。

### 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

平成19年度：EMICへの生物地球化学モデル移植

平成20年度：地球システム統合モデルのアンサンブル結果を取り込むための不確実性評価手法確立

平成21年度：EMICの結果に基づいた不確実性評価

平成22年度：地球システム統合モデルのアンサンブル実験実施。不確実性評価への実験結果取り込み

平成23年度：アンサンブル実験の継続。研究成果取りまとめ

### 気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価

平成19年度：対象穀物ごとの主要生産地域の抽出を行い、過去の環境データ、栽培、生産量データを収集する。生産量の時系列変化の特徴を解析するとともに、生産量変動の気象災害影響推定モデルのプロトタイプを作成する。

平成20年度：主要生産地域の環境データ、生産量データの収集を継続するとともに、生産量変動の気象災害影響推定モデルの検証と改良を行う。

平成21年度：生産量の気象災害影響推定モデルの検証と改良を行うとともに、既存の気候変化シナリオならびにA①～③の研究グループから出力される気候変化予測を利用した生産量変動の影響評価を行う。

平成22年度：Bの研究グループから出力される気候変動予測の不確実性を取り入れた影響評価を行う。

平成23年度：世界の主要穀物生産地域の同時不作の発生確率の評価を行うとともに、作期や生産地域の移動あるいは管理による緩和策の可能性について検討し、とりまとめを行う。

### 長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価

平成19年度：現状最新の全球データ（地盤高、人口）、個別地域データ（SRTM、自然生態系、土地利用）のデータを収集・整理する。

精密な標高データ（SRTM）の補正プロセスを確立し、メコン、チャオプラヤーおよび

珠江の各デルタ地域の補正処理・整備を進める。
これまでに開発した既有の高潮予測モデルの全球対応型への改善と20世紀の熱帯低気圧データの整備を行う。
20世紀の高潮を追算して、空間解像度（30秒以下）の地域設定を行う。
メガデルタ地域の地形・地盤・地質、植生などの情報を収集し、メガデルタDBの構築を行う。
メガデルタDBに基づいて、申請者らがこれまで行ってきた地盤沈下、海岸侵食に関する将来予測手法の適用性の検証および長期的将来予測のための高度化を図り、その有効性を検討する。

平成20年度：本研究プログラムの課題A①の出力結果（海面上昇量、潮位）を基にして、地盤高データ（GTOPO30）を用いた常時浸水リスク域を算定する。この算定は、2030年、2100年および2300年の3つのシナリオ毎に行う。
総合試行評価のために、既往の気候変動予測結果の熱帯低気圧を対象に、2030年と2100年の高潮氾濫の計算を行う。
また、メガデルタ地帯については、空間解像度を15″以下で計算を行う。
メガデルタDBを利用した地下水塩水化、生態に関する各種変動の長期的将来予測手法を確立するとともに、その適用性を過去の観測結果と比較することにより検討する。
総合評価試行のための、地盤沈下、地下水塩水化、海岸侵食、生態変動予測結果およびサブテーマ1、2の成果をメガデルタDBへ統合化する検討に着手する。

平成21年度：全球データ（地盤高、人口、自然生態系、土地利用）のデータの凡例項目の調整や、海岸線の統一処理を行い、常時浸水リスク域に該当する領域の人口（単位：人）、自然生態系（単位：$km^2$）、土地利用（単位：$km^2$）を算定する。
この時点で、全球を対象とした影響人口および影響面積が集計される。
北海沿岸などでは季節風による高潮の効果が著しいため、その算定方法を確立し計算を実行する。
総合試行評価として、GISを用いて氾濫域、その人口の世界リスクマップと国別値の一覧表を作成する。
地盤沈下、地下水塩水化、海岸侵食、生態変動予測結果およびサブテーマ1、2の成果をメガデルタDBへ統合化し、メガデルタ未来DBを構築する。
各デジタル情報をGIS上で表示させる。
メガデルタ・メガシティへの影響評価を2030年、2100年に対し試行的に実施し、総合評価手法について検討し、最良な総合評価フローを構築する。

平成22年度：本研究プログラムの課題A①の出力結果（海面上昇量、潮位）を基にして、精密な地盤高データ（SRTM）を用いた常時浸水リスク域を算定する。この処理は、2030年、2100年および2300年の3つのシナリオ毎に行う。
メコン、チャオプラヤーおよび珠江の各デルタ地域を対象として、衛星画像

（LANDSAT/ETM+：30mメッシュ）より土地被覆および自然生態系（沿岸植生および大規模都市内緑地）のデータを作成する。

「モデルの高度化と将来予測」A②、A③グループの結果を元にして、高潮予測モデルで21世紀から2300年までの高潮氾濫面積を算定し、氾濫域の危険人口を算出する。

メガデルタ地帯については、空間解像度を上げた同様の氾濫解析を行う。

総合評価フローに基づいて感度分析を実施し、高精度化、高信頼度化すべき情報を明らかにする。

最終評価を得るためのメガデルタ未来DBの再構築・再統合化を行う。

平成23年度：水没面積に加えて、影響を受ける人口・自然生態系（沿岸域植生：30mメッシュ）・土地利用（30mメッシュ）を定量的に算定する。

2300年までの氾濫面積と危険人口の推移を分析、各国の危険な区域と危険になる時期の特定を解析し、総合的な取りまとめを行う。

長期的気候変動を視野に入れたメガデルタ・メガシティに対する沿岸域災害リスク評価を実施し、2030年、2100年、2300年における当該地域の影響について明らかにする。得られた結果をGIS上で表示し、地域的インパクトの大きさを定量的に示す。

**全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上**

平成19年度：3ヶ月以上の全球雲解像モデルによる数値積分を行い、気候的な特性を得るとともに雲降水の時間空間変動を解析する。得られた全球雲解像データを解析し、高解像の衛星データ等の観測データと比較する。モデルの物理過程、特に、雲物理過程、境界層過程の改良をはかる。

平成20年度：エルニーニョ、ラニーニャ等の異なる環境場のケースをとりいれて、それぞれ3ヶ月程度の実験を行う。全球雲解像データを解析し、衛星データ等と比較する。引き続き、物理過程の改良をはかる。海洋混合層モデルを導入し、海洋とのカップリングの有無についての効果を検討する。

平成21年度：異なる環境場のケースの事例実験を行う。この時点までに改良を進めたモデルで、気候感度実験を開始する。得られた数値データの雲降水過程の再現性について定量的に解析する。物理過程の改良を通じて、再現性の向上をはかる。

平成22年度：改良した全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した実験を行い、気候感度を調べる。雲降水システムの特性の変化、モンスーンや台風の挙動の変化について結果を得る。引き続き、衛星データ等によるモデルの検証、物理過程の改良を行う。

平成23年度：改良した全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した実験結果の追加的な実験を行い、結果についてまとめる。全球雲解像モデルを、次代の計算機環境のもとでの日本気候モデル群のラインアップとして整備する。

**GCM（大気海洋結合気候モデル）と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証**

平成21年度までの計画：

サブ課題1（SEIB-DGVM の高度化と検証）に関して：

(1) 植物個体群モジュールを、熱帯域と寒帯域に対して拡張し、その有効性を確認する。

(2) 放射収支モジュールと水文モジュールを、地形の多様性を扱えるように拡張し、その有効性を検証する。

(3) モデル運用時の利便性を向上させ、それによって新たなモデル利用者を獲得するため、気象データセット取り出しweb システムの構築や、可視化ソフトウェアの高機能化を行う。

サブ課題2（Sim-CYCLE の高度化と検証）に関して：

(1) 森林の農地転換などの土地利用変化について、炭素循環モデルにおける評価手法を比較検討し、モデルへ導入する。そして、様々な生態系で観測された大気-陸域間の$CO_2$ 交換などのデータを用いて、モデルの推定精度を検証する。

(2) 現在のモデルで扱われていない生態過程（窒素循環、植生動態など）に関する重要性と不確定性を検討し、Sim-CYCLE のシンプルさと軽快さを大きく損なわない範囲で、必要な過程をモデルに導入する。

平成23年度までの計画：

サブ課題1（SEIB-DGVM の高度化と検証）に関して：

(1) 植物個体群モジュールを、温帯域に対して拡張し、その有効性を確認する。

(2) 高度化されたSEIB-DGVM を用いたGCM との結合実験を行い、種子分散力の大小が、植生分布の変化予測に与える効果、そしてそれを通じて気候変動予測がどのように変化するのかを予測。

サブ課題1、2共通：

(1) 全球のシミュレーション出力を、植生分布・葉面積指数などの全球データと比較することによって、検証する。また、入力データやパラメーターに関する各種の感度実験を行い、気候変動への生態系応答を推定すると共に、不確実性の評価を行う。

(2) SEIB-DGVMとSim-CYCLE との間で、シミュレーション結果の比較を行い、各モデルの特性を明らかにする。

・ 国際シンポジウムを複数回主催し、上記の成果を広く世界に発信する。また国際的な研究の枠組（IGBP-GLP、-iLEAPS、-AIMES、Global Carbon Project）へ貢献する。

# ４．平成23年度研究計画
## 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

**・地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験**

CMIP5プロトコルにある実験の内、一部残っている古気候実験や大気化学結合版実験などを平成23年度に行う。また、土地利用変化の効果を確かめるための実験など既に完了した実験を解析するために必要な補助的実験を行い、結果を解析し論文にまとめる。さらに、ジオエンジニアリング実験や、新たなシナリオ実験など、地球温暖化対策立案に対する示唆を与えうる実験を行う。

（業務分担責任者：　独立行政法人　海洋研究開発機構　時岡　達志）

**・モデルアンサンブルによる地球システムモデルの不確実性定量化**

米国大気研究センター(NCAR)で開発された最新の地球システムモデルCESM1を用いて、現在気候再現実験や温暖化予測実験を実施し、陸域及び海洋の生物地球化学過程について検討や、地球システムに関する科学的評価を行う。

地球システムモデルを用いた温暖化予測実験: 地球システムモデルCESM1を用いて、ゼロ排出シナリオ等の複数の温暖化シナリオに基づいた温暖化予測実験を実施する。大気、海洋、陸域、海氷の物理気候過程、および炭素循環過程の解析を行い、温暖化に対する炭素循環フィードバックの効果等、地球システムに関する診断的な考察を行う。

地球システムモデルの不確実性の評価：上記の温暖化予測結果と海洋研究開発機構の地球システムモデルによる温暖化予測結果を比較する。両モデル間の物理気候過程や炭素循環過程の差異を把握し、地球システムモデルの不確実性を評価する。

（業務分担責任者：　財団法人　電力中央研究所　中敷　憲和）

**・モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究**

平成23年度はカップラーの機能を拡張し、一つのタスク内に複数のコンポーネントが存在するマルチコンポーネント環境での結合を可能とする。作成されたカップラーを、テストモデル及び現実的な大気海洋モデルに適用し、機能テスト、性能評価を行う。更に、実用的なソフトウェアとしての完成度を高めるため、エラー処理やログ出力機能を追加・整備するとともに、詳細な利用マニュアルを作成する。

（業務分担責任者：　財団法人　高度情報科学技術研究所　荒川　隆）

**・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**

JAMSTECで開発している簡略気候モデルMIROC-liteを用いて、炭素循環過程についての不確実性評価を行う。とくに炭素循環フィードバックの強度が、モデルパラメータによってどのような影響を受けるかを中心に解析を行う。また、地球システムモデルを用いCMIP5プロトコルに基づいた温暖化実験のアンサンブルについて解析を行い、予測された温暖化の不確実性を定量化する。結果を論文にまとめる。

（業務分担責任者：　独立行政法人　海洋研究開発機構　河宮　未知生）

**・気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価**

気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価：既存と最新の気候変化シナリオデータをこれまでに開発したダイズおよびトウモロコシの生産性環境応答モデルに入力し、中国、アメリカならびにブラジルにおける生産性変動を推計する。その結果に基づいて各国内および国間の生産性変動の要因と安定性を不確実性も含めて解析する。とくに3カ国の同時減収確率などが気候変化によって今後どのように変化するかを示すことにより、各国内および国間の生産性変動の要因と安定性を不確実性も含めて解析する。

（業務分担責任者： 独立行政法人 農業環境研究所 横沢 正幸）

**・長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価**

全球常時浸水リスク域の算定：本研究プログラムの課題A①の出力結果（海面上昇量、潮位）を基にして、精密な地盤高データ（SRTMまたはGDEM)を用いた常時浸水リスク域を算定する。同時に、推定された浸水リスク域に対する人口（単位：人）、自然生態系（単位$km^2$）、土地利用（単位：$km^2$）を算定する。

・高潮氾濫計算・総合評価：「モデルの高度化と将来予測」A①（～2300年）グループの結果を元にして、高潮予測モデルで21世紀から2300年までの高潮氾濫面積を算定し、氾濫域の危険人口を算出する。メガデルタ地帯については、空間解像度を上げた同様の氾濫解析を行う。

・メガデルタDBを用いた将来予測手法確立・総合評価試行：総合評価フローに基づいて感度分析を実施し、高精度化、高信頼度化すべき情報を明らかにする。最終評価を得るためのメガデルタ未来DBの再構築・再統合化を行う。

（業務分担責任者： 茨城大学 広域水圏環境科学教育研究センター 横木 裕宗）

**・全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上**

平成22年度までに改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した追加的な実験を行い、結果についてまとめる。

・全球雲解像モデルの実験・解析：改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、現在気候実験および温暖化時を想定した実験を行う。雲降水システムの特性の変化、モンスーンや台風の挙動の変化について結果を得る。

・物理過程の改良：引き続き物理過程の改良を行い、モデルのバイアスを低減するための感度実験を行う。境界層過程、雲微物理過程（single-moment スキーム、two-momentスキーム）、陸面・海面過程（MATSIRO、 slab-ocean モデル）、サブグリッド対流の改良を行う。

・衛星観測データによる検証：得られた全球雲解像データを解析し、衛星データ等と比較する。衛星センサーシミュレータを利用し、モデルの出力結果を全球にわたって解析する。特に、アクティブセンサーデータを用いて、雲の鉛直構造の検証を行う。

（業務分担責任者： 独立行政法人 海洋研究開発機構 佐藤 正樹）

**・GCMと結合される全球植生動態モデルの高度化と検証**

地球システム統合モデルの実験から、陸域生態系による気候へのフィードバックの時間的変化や地域的変化の解析および陸域炭素循環への人為影響の解析を引き続き行う。

・陸域生態系変動過程および物質循環過程を明示的にシミュレーションするモデルVISIT (Sim-CYCLE)の高度化を進め、二酸化炭素やそれ以外の温室効果ガスのダイナミクスを明らかにする。

・地球システム統合モデルへの結合を前提とした陸域生態系モデルの改良のため、土壌物理プロセス過程の導入を実施し、温暖化時の土壌炭素の分解過程をメカニスティックに再現する。モデル予測を観測データと比較することで信頼性を定量的に確認する。

（業務分担責任者： 独立行政法人 海洋研究開発機構 原 登志彦）

# 5. 平成23年度実施体制

独立行政法人海洋研究開発機構を主管研究実施機関とし、研究代表者を時岡達志（IPCC貢献地球環境予測プロジェクト プロジェクトリーダー 上席研究員）とする。次の研究サブテーマを設けて研究開発を実施する。

## 5．1 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

代表者：時岡達志

サブテーマ名「生物地球化学過程改良」

実施機関名：独立行政法人海洋研究開発機構

サブテーマ名「物理気候過程改良」

実施機関名：東京大学

サブテーマ名「気候変動再現・温暖化予測実験」

実施機関名：国立環境研究所

サブテーマ名「モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究」

実施機関：（財）高度情報科学技術研究機構

サブテーマ名「モデルアンサンブルによる地球システムモデルの不確実性定量化」

実施機関：電力中央研究所・環境科学研究所

## 5．2 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

代表者：河宮未知生

サブテーマ名「簡略気候モデルを利用した不確実性評価 」

実施機関名：独立行政法人海洋研究開発機構

サブテーマ名「地球システム統合モデルを利用した不確実性評価 」

実施機関名：独立行政法人海洋研究開発機構

### ５．３　気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価

実施機関名：農業環境技術研究所

代表者：横沢正幸

### ５．４　長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価

実施機関名：茨城大学　広域水圏環境科学教育研究センター

代表者：横木裕宗

サブテーマ名「全球常時浸水リスク域の算定」

サブテーマ名「高潮氾濫計算・総合評価試行」

サブテーマ名「メガデルタDBを用いた将来予測手法確立・総合評価試行」

### ５．５　全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

代表者：佐藤正樹

実施機関名：独立行政法人海洋研究開発機構

### ５．６　GCM（大気海洋結合気候モデル）と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証

代表者:原登志彦

実施機関名：独立行政法人海洋研究開発機構

## ６．研究運営委員会、研究連絡会議

＜研究運営委員会＞

（1）任務

研究実施メンバーから研究計画と研究進捗状況、研究結果の報告を行い、これを受けて外部委員が研究実施計画全体、年次計画について随時評価と助言を行い、特に当該年度の研究計画について検討し適切な助言をするとともに進捗状況をチェックする。

（2）委員の構成

＜研究統括＞

松野　太郎（海洋研究開発機構 IPCC貢献地球環境予測プロジェクト 特任上席研究員）

西岡　秀三（文部科学省 革新プロジェクト 研究統括）

（役職等は平成23年4月1日現在のもの）

時岡　達志（海洋研究開発機構 IPCC貢献地球環境予測プロジェクト プロジェクトリーダー 上席研究員）

河宮　未知生（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 地球システム統合モデリング研究チーム チームリーダー 主任研究員）

横沢　正幸（農業環境技術研究所 大気環境研究領域 上席研究員）
横木　裕宗（茨城大学広域水圏環境科学教育研究センター 准教授）
荒川　隆 （高度情報科学技術研究機構 主任研究員）
仲敷　憲和（電力中央研究所 環境科学研究所 領域リーダー＜水域環境領域＞）
原　登志彦（海洋研究開発機構 地球環境変動領域 物質循環研究プログラム招聘上席研究員、北海道大学低温科学研究所 寒冷域植物生理生態研究室 教授）
佐藤　正樹（海洋研究開発機構 地球環境変動領域 次世代モデル研究プログラム 全球雲解像モデリング研究チーム チームリーダー 招聘主任研究員、東京大学大気海洋研究所 気候変動現象研究部門 準教授）
木本　昌秀（東京大学気候システム研究センター 副センター長・教授 /チーム近未来代表者）
野田　彰（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 プログラムディレクター 技術研究統括）
甲山　隆司（北海道大学大学院地球環境科学研究院 教授）
林　陽生 （筑波大学大学院 生命環境科学研究科 教授）
中川　博視（農業・食品産業技術総合研究機構 中央農業総合研究センター 研究チーム長）
斉藤　和雄（気象研究所予報研究部第二研究室 室長）
岩崎　俊樹（東北大学大学院理学系研究科地球物理学専攻 教授）
吉崎　正憲（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 技術研究統括）
江守　正多（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 室長）
竹内　邦良（土木研究所 水災害・リスクマネジメント国際センター・センター長）
住　明正（東京大学 サステイナビリティ学連携研究機構 地球持続戦略研究イニシアティブ統括ディレクター・教授）
中澤　高清（東北大学大学院理学研究科 大気海洋変動観測研究センター 教授）
坪木　和久（名古屋大学 地球水循環研究センター 准教授）

（3）開催日・場所

第1回　平成23年9月9日（金）
海洋研究開発機構　横浜研究所

第2回　平成23年12月21日（水）
海洋研究開発機構　横浜研究所

第3回　平成24年2月28日（火）
一ツ橋記念講堂 （学術総合センター）

# Ⅱ. 研究成果の概要

## 1. 総括

チーム1は地球システム統合モデル（MIROC-ESM）を高度化し、100年を超える長期シナリオを用いて300年程度先までの気候変化、環境変化の予測を行なうとともに、長期予測に伴う不確実性を明らかにし、また気候変化の自然の災害に及ぼす影響評価を行うものである。チーム1では、大きな不確実性要因である雲降水システムの変化予測を向上させるための全球雲解像大気大循環モデルによる研究と、全球植生動態モデルの高度化研究も併せて行っている。

平成23年度は革新プログラムの最終年度にあたり、これまでに行った数値実験データに基づく解析、結果をとりまとめるとともに、やり残していた数値実験を実施した。その結果、本プログラムは当初目的を達成し、科学的に意義のある研究結果を得た。以下、今年度得た主要な成果を記す。

国際的に提示された将来環境シナリオ（RCPシナリオ）の中のRCP4.5に関して、当プログラムで開発した地球システム統合モデル（MIROC-ESM）を用いて2300年まで予測実験を実施した。このシナリオでは2100年以降全ての温室効果気体の大気中濃度は安定化するが、海洋の中・深層への熱や炭素の流入は継続し、その結果海洋全体の平均水温及び海水の熱膨張による水位上昇は、2100年時点とほぼ同様の速度で上昇しつづけること、またこのシナリオを実現させるために求められる化石燃料起源の$CO_2$排出量も小さい値（1PgC/yr以下）ながら正であること、を確認した。

同モデルを用いた20世紀気候変動再現実験では実験例数を増やし統計的有意性をあげた結果、過去150年間に生じた人為的及び自然的気候変動要因を全て与えることにより観測された全球平均地上気温の変動を再現できることが結論付けられた。また単に全球平均のみならず、20世紀後半の北部北太平洋で観測されている降温域も我々の実験において再現されている。これはこの領域の雲量の増加による太陽放射の減少によっており、この減少にエアロゾル増加が関与していることが示唆された。

MIROC-ESMと、米国のNCARが開発した地球システムモデルCESM1、そして電力中央研究所の筒井の開発した簡易地球システムモデルSEEPLUSを用いて、大気中のCO2濃度が1%/yrで増加する実験を行い比較した。その結果、海洋に蓄積される炭素量に関してはMIROC-ESMとCESM1はほぼ一致するが、SEEPLUSは両者より早く多量の蓄積をすること、一方陸域の生態系に蓄積される炭素量に関しては3つのモデルの蓄積の仕方は夫々異なりモデル間のばらつきが大きく、現在のモデルによる環境予測における不確実性をもたらす一過程であること、が分かった。

北極海では海洋の酸性化が最も早く進む惧れがあることを昨年指摘したが、これは北極海において急激に進む夏季の海氷融解による海の$CO_2$吸収と淡水流入の増加がアラゴナイト飽和度を低下させ、$CO_2$増加と水温上昇がpHを低下させるため、であることが示唆された。

成層圏オゾンホールに関しては大気化学モデルが予測していたように今世紀半ばにはほぼ回復することを確認した。これに伴い地上に到達する紫外線量は減少すると考えられていたが、対流圏における人為的エアロゾル排出の減少も併せて考慮すると北半球中緯度から低緯度域にかけて増加することが解析された。また、赤道成層圏準2年振動（QBO）に関しては、温暖化の進展に伴い赤道域での上昇流の増加によってその周期が延び、振幅が減少するという結果を得た。

森林火災によってもたらされるエアロゾル量の推定に関し、衛星で観測された一酸化炭素量と森林火

災モデルによる推定量とを比較し、モデルの妥当性を確認できた。また、森林火災起源のエアロゾルは塩基性土壌粒子によりもたらされる鉄分を可溶鉄分に変化させる上で有効であることを明らかにした。

雲システム解像全球モデルに関しては、温暖化を想定した追加実験を行い結果を取りまとめると共に、モデルの降水バイアス低減に関する実験を行い改良に取り組んだ。また、衛星観測データを用いてモデルの雲の鉛直構造の検証を行った。全球植生動態モデルの高度化に関しては、MIROC-ESM実験データに基づいて気候と陸域生態系フィードバックの定量評価を行った。また、陸域生態系モデルVISITを用いた温室効果気体シミュレーション、および土壌炭素モデルと土壌物理モデルの結合による土壌内の物理環境と炭素の鉛直構造の再現、環境変動下の土壌炭素ダイナミクスの予測研究を行った。

長期気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価に関しては、数値表層モデル（DSM）データを用いて地球上の代表的な低平地が分布するアジア域を中心に推定を行い、社会基盤への影響量を国別、地域別、そして代表的都市ごとに整理した。

気候変化に伴う自然災害の主要穀物生産に及ぼす影響評価に関しては、これまでに開発したダイズおよびトウモロコシの生産性環境応答モデルのパラメタ推定を改良し、MIROC-ESMによるRCPシナリオについての予測データを用いて、アメリカ、ブラジル、中国における生産量を推定した。トウモロコシについてはRCP2.6、4.5では収量変化はあまりないが、RCP6.0では収量の減少トレンドが、RCP8.5では明確な減少トレンドが、3カ国全てにおいて現れた。ダイズでは、RCP2.6、4.5で2030年頃までわずかな収量増加が見られるが、それ以降減少トレンドに転じる。RCP6.0ではアメリカで、RCP8.5ではアメリカとブラジルで、強い減少トレンドが見られるという結果を得た。

この他に、地球システム統合モデルのような多数の過程を内包するモデル開発を効率的に進めるためのモデル標準化を目指したモデル構造の検討・整理を進め、多数の過程モデルを結びつける新たなインターフェイスJcupを開発した。

# 2. サブテーマごと、個別項目ごとの概要

## 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

### ・地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

IPCC第5次報告書に向けたモデル相互比較プロジェクトでは、将来の代表的な温室効果気体の濃度経路等を記述したRepresentative concentratin pathways シナリオと、さらにそれを2300年まで延長するシナリオを用いた気候変動予測実験等が求められている。ここでは、地球システム統合モデルMIROC-ESM(Watanabe et al., 2011)を用いた気候変動予測実験のうち、RCP4.5シナリオを用いた2300年までの延長実験結果を解析し、数百年スケールにおける気候変動において、全球炭素循環がどのように変化していくのかを調べた。RCP4.5シナリオでは2000年から2100年までに約2.5℃上昇するが、2100年以降も緩やかに全球平均気温は上昇し、2300年までにはさらに約0.4℃上昇していた。また、与えられた$CO_2$濃度シナリオを達成するために許容される化石燃料$CO_2$排出量を調べたところ、2100年以降に温室効果気体の濃度がほぼ一定であったとしても、許容排出量は低下していることがわかった。これは主に、

2100年以降、海洋の炭素蓄積の増加割合が低下していくことが主な理由であった。特に深さ200～1500mの間において、海洋に蓄積されている炭素量の増加率は2100年以降低下しており、この領域における炭素動態が全球の炭素動態に強く影響していると考えられた。加えて陸域では、21世紀中に貯留された土壌炭素が、生態系呼吸を通じて2100年以降も$CO_2$として徐々に大気に放出され、総光合成速度とバランスするようになる。その結果、陸域の正味の$CO_2$吸収速度は低下しており、これが2200年以降の全球の陸域炭素動態を決めていた。加えてMIROC-ESMでは、2200年以降にも気温上昇が続いており、これも温室効果気体の濃度安定化以降に生態系呼吸速度を増加させている要因の一つであることが示唆された。

**・地球システム統合モデルを用いた海面水位変化の長期予測**

今後300年間に予想される海面水位変化を調べた。地球システム統合モデルを用いて各種シナリオに基づく温暖化実験を行い、海水の熱膨張および海流の変動による海面水位変化をそれぞれ算出する。熱膨張による海面水位変化は、歴史再現実験では近年100年ほどの間に約 4cm上昇しており、概ね妥当な結果である。その後の温暖化実験では、21世紀半ばまでは各シナリオ間の差異は小さく、21世紀後半に入ってから緩やかに分岐する。RCP4.5シナリオの延長実験では、海面水温が安定化した後も勢いを保って水位上昇を続けるが、これは海洋の熱容量（熱慣性）が大きいためである。大西洋子午面循環の時系列変化と比べる限りでは、熱塩循環による深層水の形成よりは、大気からの顕熱供給および海中の鉛直下向きの熱伝導が、鉛直熱輸送に効くようである。海流の変動による海面水位変化は、日本列島の東方沖で上昇が顕著であるが、これは中高緯度の海陸の昇温偏差により海洋が高気圧性循環の海上風偏差に覆われ、赤道方向へのスヴェルドラップ輸送が増えるためにそれを補う黒潮流量が増えるのが原因である。モデルの解像度によっても結果が異なる可能性があるので、今後、様々なモデルの出力を比較検証するのが望ましい。

**・地球システム統合モデルを用いたIPCC実験の実施と科学的成果**

本年度は、IPCC第5次評価報告書(IPCC-AR5)に向けて、各国・各機関で実施が求められる一連の数値実験の実験設定（Coupled Model Intercomparison phase-5; CMIP5プロトコル）のうち、大気化学結合版の地球システム統合モデルを用いた過去再現・将来予測実験を行うとともに、過去の地球環境変化に対する人為的影響を抽出するための各種（温室効果ガス強制のみ、自然強制のみ、濃度駆動・排出駆動）のアンサンブル・シナリオ実験を実施した。また、古気候実験、土地利用変化の影響をみるための補助的実験、ジオエンジニアリング実験なども合わせて実施した。それらのうち、いくつかの実験を組み合わせて解析した成果を論文発表した。

**・20世紀再現実験における長期気温変化および個別フォーシングによる気候応答の解析**

地球システム統合モデルによる過去の気候変化再現実験（20世紀気候再現実験）において、20世紀後半以降の北部太平洋域における地上気温の長期トレンド分布の再現性が向上している。その原因について、全球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世紀気候再現実験の結果を総合的に解析した。その結果、対流圏エアロゾルモデルの高度

化・精緻化および放射スキームの改良が北太平洋域における地上気温の線形トレンド分布の再現性向上に少なからぬ影響を及ぼしていることが示唆された。また、人為的気候制御の検証実験であるジオエンジニアリング実験に関連して、太陽定数とCO2濃度を瞬時に強制した実験における降水量の応答を評価した。

**・モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究**

サブテーマ「モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究」の目標は、不確実性の評価に資するためのソフトウェアプラットフォームとしてカップラー（Jcup）を作成し地球システムモデルに適用することである。平成23年度は、MIROC海洋モデルCOCOをTripolar格子に変更して大気海洋結合を実施するとともに、格子情報とマルチコンポーネント結合を一般化し、汎用性を大幅に向上させた。

昨年度までの研究で、地球システムモデルMIROCの大気モデルー海洋モデル、大気モデルーエアロゾルモデルをJcupで結合し、その性能を評価した。これらのテストにおいて、MIROC海洋モデル（以下COCOと呼ぶ）は北極点を陸域に移動した一般直交曲線座標系を用いていた。今回、北極点をユーラシア大陸と北米大陸の2つに持つTripolar版COCOが開発されたため、Tripolar版COCOとMIROC大気モデル（以下単にAGCMと表記する）をJcupで結合する試験を行った。

次いで、インターフェースの改良を行った。昨年度までは、各プロセッサが担当する格子番号を与えるインターフェースサブルーチンはjcup_def_grid(is, ie, js, je, ks, ke, model_name, grid_name)のようになっていた。これはi, j, kで記述される構造格子を2次元領域分割することを前提としている。このインターフェースを改良し、jcup_def_grid(grid_index, model_name, grid_name)のように、格子番号を記述した1次元配列として与えるようにした。この改良によって、構造格子に限らず、正二十面体格子のような準構造格子や、非構造格子のモデルにも対応できるようになった。

昨年度の改良によって、Jcupは一つの実行単位（タスク）に複数の結合単位（コンポーネント）が存在する限定的なマルチコンポーネント結合に対応するようになった。ただし、このときの改良では、各コンポーネントはそれぞれのタスクのプロセッサを全て使うことを前提としていた。しかし実際には、1タスク内でコンポーネントが並列に実行される、あるいは、複数のタスクにまたがって一つのコンポーネントが実行される場合があり得る。そこで、今年度は、これらの結合パターンを含む様々なパターンの結合が可能なようにJcupを拡張した。

**・モデルアンサンブルによる地球システムモデルの不確実性定量化**

米国大気研究センター（NCAR）の最新の地球システムモデルCESM1を用い、長期気候安定化を目的に設計されたZ650シナリオとRCP2.6シナリオに基づいた長期気候予測実験を実施した。両シナリオの$CO_2$排出量は2020年頃ピークに達した後、減少傾向に転じ、Z650シナリオの場合はゼロ排出、RCP2.6シナリオの場合は負の排出に至る。Z650 (RCP2.6) シナリオでは、2090 (2050) 年に522 (472) ppmの大気中$CO_2$濃度の最大値となり、昇温量については2110 (2060) 年に2.5 (2.1) 度のピーク値に達した。その後、Z650シナリオに基づき予測された気温は、RCP2.6シナリオと同様に徐々に低下していく。この結果は、Z650シナリオによる長期的な気候安定化が、気候-炭素循環システムの科学的観点から成立し得るものであることを示している。また、気候や炭素循環の長期的な変化の不確実性を把握するため、CESM1と

海洋研究開発機構の地球システムモデルであるMIROC-ESMによる$CO_2$漸増実験の結果を比較した。CESM1における気温の昇温量はMIROC-ESMと比較して小さく、海氷面積の減少の程度も少なかった。海洋の炭素循環は、両モデルでほぼ一致しているが、陸域炭素循環の長期的な変動には大きな違いが見られた。

**・気候変化シミュレーションにおける雲-放射フィードバック不確実性評価**

CMIP5に提出する新版気候モデル(GCM)であるMIROC5を用いて、理想的な温暖化実験における地表気温上昇およびそれに寄与する気候フィードバックのメカニズムについて調べた。具体的には、平衡気候感度が前バージョンであるMIROC3.2よりも低くなった理由が、雲短波放射フィードバックの符号の変化によるものであることを明らかにし、さらにバージョン間（敷衍すればモデル間）のフィードバックの相違を、2種類の異なるモデルアンサンブルを作成して調べ、今後の研究に対して発展性のある成果を得た。

**・地球システム統合モデルを用いた古気候実験**

地球システム統合モデルを用いた古気候実験について、実施した3実験の設定と結果について述べる。CMIP5/PMIP3実験プロトコルには3つの古気候実験が含まれている。21,000年前の最終氷期最盛期（LGM）、6,000年前の完新世中期（6ka）、そして西暦850年から1850年の過去千年実験（Last Millennium）である。各実験は原則としてCMIP5/PMIPに従って実行されたが、初期値の準備には実験毎に個別の作業を要した。実験により、LGMの寒冷な気候、6kaの温暖な気候、過去1000年の気温変動トレンドがこれまでの古気候研究の結果と整合的な形で再現された。これはモデルの検証材料の一つとして有効な結果であるといえる。今後、さらに細かい解析を進めることで、過去の自然要因による気候変動の幅や、そのような変動に伴う炭素循環の変化などについて新たな知見が得られるものと期待できる。

**・北極海における急速な海氷減少が表層の海洋酸性化に与える影響**

海洋は大気中に放出された人為起源二酸化炭素の約1/4を吸収し温暖化を緩和する一方、海水へ溶けた$CO_2$はpHや炭酸カルシウム($CaCO_3$)の飽和度(Ω)を低下させる。北極海は海洋酸性化が最も進むと予測されている海域であるため、気候変動に対して北極海の海洋酸性化がどのように進むのかを理解することは重要である。昨年度の研究では急速な海氷減少が起きた場合、これまで考えられてきたよりも早くpHとアラゴナイトの飽和度(Ωarag)の減少が起きることを示唆した。本年度は急速な海氷減少によってpH、Ωaragが低くなるメカニズムについてそれぞれ解析した。その結果、海氷が溶けることで海の$CO_2$吸収と淡水流入が増加することによりΩaragが低下し、$CO_2$吸収の増加と水温上昇によりpHの低下が引き起こされることが示された。またΩaragの季節変動についても解析を行い、海氷が早く溶けると季節変動の位相が逆になることが分かった。

**・Modelling Uncertainty in Climate Forecasts**

Ever since the first general circulation models (GCMs) were developed in the late 1970s, it has been apparent that models created by different scientists produce quite different forecasts of the future, even when forced with the same scenario of future greenhouse gas concentrations. Of course the model results

have many things in common, and all show persistent warming under increasing carbon dioxide concentrations. However the difference in the amount of warming on century and longer timescales between the different models remains significant, and seems likely to remain so. The most cursory comparison between models and data at the present day makes it clear that none of the models are perfect, and how to convincingly evaluate the relative worth of each model remains an open problem. The reason it is so difficult to validate the long-term forecast ability of the models is because the future climate is known to be unlike the climate in the recent past, and also to bear only partial resemblance to climates previously experienced by the earth.

Over the last few years there has been considerable debate over the nature of the differences between the models. Many have attempted to devise “metrics” which can be used to weight the models, or discard some from the ensemble. Others have argued quite the opposite, that the ensemble formed by putting all the models together is actually too narrow, and that more diversity between models is required. We have been involved in this debate, and in the last year have published several papers on this topic. We find that on broad spatial scales the spread of the GCMs is roughly commensurate with our uncertainty about the climate system for both modern and past climates. Thus there does not seem to be evidence that the ensemble should be considered either too broad nor too narrow when considered on these large scales.

We have arrived at this conclusion through a number of means. We have devised methods for efficient creation of ensembles from single models (Tachiiri et al 2012a, 2012b), including both relatively large ensembles of simple models, and smaller ensembles of very complex and computationally expensive GCMs such as MIROC5 (Shiogama et al (2012), Watanabe et al (2012)). Due to the problem mentioned above of the future being unlike the present day climate, we have used paleoclimates in order to update our confidence in the reliability of model ensembles (Hargreaves et al 2011). The results obtained suggest that the multi-model ensembles are reliable at least on broad temporal and spatial scales.

The understanding gained by these efforts provides the theoretical underpinnings for the work with the lightweight MIROC-based “loosely coupled model”, aimed at quantifying uncertainty due to the terrestrial carbon cycle. Given our result that the multi-model ensembles are reliable on broad scales, in this work we used the C4MIP and CMIP3 ensembles as a guide to the appropriate spread of our model ensembles for the present day climate. This ensemble was then further constrained by historical data and projected forwards 300 years into the future. The result obtained is that, to maintain carbon dioxide levels even to the moderate scenario, only very low emission are permissible　beyond 2100.

**・簡略化モデルを用いた長期気候変動・許容排出量の不確実性評価**

世界の気候研究センターにより、代表的な濃度経路シナリオ（RCP）に基づいた地球システムモデル実験が進んでいる。大気中の温室効果ガス濃度の将来経路に基づいて予測されるもののうち、最も重要な量は気温上昇であるが、それとともに社会経済学的に重要なものとして許容排出量がある。ここでは、確率的なフレームワークを使用して穏健な$CO_2$濃度経路（RCP4.5）に対する将来の気温変化と許容炭素排出量の範囲を推定した。不確実性は、平衡気候感度、エアロゾルフォーシング、重要な物理的および生

物地球化学的プロセスを広く受け入れられている範囲内で変化させることによって考慮した。計算結果は、現在気候についての観測データによって制約した。 RCP4.5に対応する気温変化の不確実性は制約後も大きいままであり、2300年における産業革命前からの予測気温上昇は、3.0±1.4K（2×標準偏差）であった。この結果は、地球温暖化の予測幅の上限と下限に大きな差があることを示しており、将来の排出量抑制計画を策定する上で重要な意味を持っている。現在気候のデータを使用して制約した後の許容排出量のアンサンブル平均はRCP4.5の標準排出量シナリオに近く、排出量がピークになる時期の許容排出量は11.5±2.0 PgC yr-1であった。

**・大気を通して海洋へ供給される可溶性鉄に関する全球化学輸送モデル解析**

本研究では、シベリア森林火災による発生量を新たに算出し、全球大気化学輸送モデルに導入した数値実験を行った。そのモデル計算結果は一酸化炭素の衛星観測値と良い一致を示した。このようにして算出した大規模な森林火災の可溶性鉄発生速度を全球エアロゾル化学輸送モデルに導入し、数値実験を行った。大気汚染物質の発生量が抑制されることによって酸による鉄の溶解は起こらないと考えた場合と比較して、東シベリアにおける大規模な森林火災時に発生した可溶性鉄が西北太平洋への可溶性鉄の主要な供給源となり得ることがモデル計算により初めて示された。さらに、全球エアロゾル化学輸送モデルを用いて、粒径分割された粒子中の鉄変質過程が海洋への可溶性鉄供給量に与える影響を調べた。その計算結果によると、北半球の太平洋と大西洋では酸変質過程により微小粒子が可溶性鉄の主要な供給源 (70–100%) であった。対照的に南大洋の広い範囲では、大気汚染の影響が少なく、微小粒子中の鉄は酸による変質を受けにくい。結果として、南米のパタゴニア砂漠の風下に当たる南大西洋では粗大粒子が可溶性鉄の重要な供給源 (40–60%) となった。鉄溶解度に対する感度実験の結果、鉱物起源と比較して、大規模な植生燃焼は海洋への可溶性鉄にとって重要な供給源となる可能性が示唆された。

## 気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産性の安定性に及ぼす影響評価

**・気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産性の安定性に及ぼす影響評価**

ダイズについては、これまでに開発した生産性環境応答モデルを改良するとともに開放系大気$CO_2$増加実験結果を取り込んで大気$CO_2$濃度の上昇に対する植物生理的応答を高度化した。地域の作物生産の不均一性を考慮するために、ダイズおよびトウモロコシの生産性環境応答モデルのパラメータを、アメリカ、ブラジル、中国の主要生産地帯を中心として緯度・経度方向約1度グリッドごとに、新たなキャリブレーション手法を援用してベイズ推定を行った。そのモデルにMIROC-ESMの出力結果を入力し、3ヵ国の生産性変動を推計した結果、トウモロコシについては、RCP2.6およびRCP4.5では収量の変化はあまり見られないが、RCP6.0で各国において収量の減少トレンドが若干現れ、RCP8.5では3ヵ国ともに明確な減少トレンドが現れた。ダイズでは、RCP2.6とRCP4.5で、2030年頃まではわずかな収量の増加トレンドが見られるが、それ以降は減少トレンドに転じることが示された。RCP6.0ではアメリカで強い減少トレンドが見られた。RCP8.5では、アメリカおよびブラジルにおいて特に強い減少トレンドが見られた。生産性の安定性を評価する同時不作確率は、トウモロコシでは、特にRCP2.6およびRCP8.5において顕著に表れると推計された。

ダイズでは、RCP2.6からRCP8.5にかけて徐々に将来の同時不作が高くなると推計された。特にRCP8.5での同時不作確率の増加は著しい。以上の影響を引き起こす要因を解析した結果、どの地域でも気温要因が最も大きな影響を与えていることが示唆された。大気$CO_2$濃度上昇に伴う施肥効果に対して、気温上昇に伴う呼吸量の増加によるバイオマス減少が勝るとともに、気温上昇により生育期間の短縮とともに積算日射量が小さくなる。これらの差引により収量の減少トレンドならびに3ヵ国の同時不作確率の増大が見通された。

## 長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価

### ・世界水没リスク

平成23年度の検討では、単一の潮位偏差データを使用し、観測方法の異なる2種類の数値表層モデル（DSM:Digital Surface Model）を対象とした水没域推定処理を行った。水没域の推定は、①市街地および樹林の分布域に対する標高を補正した、②探索処理の効率化を目的として、標高データの平滑化処理を施した、以上の2つの補正処理を施したDSMデータを用い、全球の代表的な低平地が分布するアジア地域を中心に領域の推定を行った。結論として、国別およびアジア・オセアニア等地域毎に水没域を集計するとともに、領域に含まれる代表的な都市が受ける社会基盤の影響量を整理した。

## 全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

### ・全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

昨年度までに改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した追加的な実験を行い、結果についてまとめた。

- 全球雲解像モデルの実験・解析：改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、現在気候実験および温暖化時を想定した実験を行った。雲降水システムの特性の変化、台風の挙動や熱帯循環の変化について結果を得た。
- 物理過程の改良：引き続き物理過程の改良を行い、モデルのバイアスを低減するための感度実験を行った。境界層過程、雲微物理過程（single-moment スキーム、two-moment スキーム）、陸面・海面過程（MATSIRO、 slab-ocean モデル）、サブグリッド対流の改良について引き続き検討した。
- 衛星観測データによる検証：得られた全球雲解像データを解析し、衛星データ等と比較した。衛星センサーシミュレータを利用し、モデルの出力結果を全球にわたって解析した。特に、アクティブセンサーデータを用いて、雲の鉛直構造の検証を行った。

### ・GCMと結合される全球植生動態モデルの高度化と検証

陸域生態系は気候と強い相互作用を持つため、その正確なシミュレーションによる将来予測は気候変動研究の重要な研究テーマである。本課題では、（1）地球システム統合モデルを用いた気候と陸域生態系のフィードバックの定量評価、（2）陸域生態系モデルVISIT（Sim-CYCLE）を用いた温室効果ガスのシミュレーション、および（3）土壌炭素循環モデルと土壌物理モデルの結合による土壌内の物理環境および炭素の垂直構造の再現と、環境変動下での土壌炭素ダイナミクスの予測研究を行った。これらの研究

により、温暖化時の陸域生態系の挙動をこれまで以上に正確に再現することで、気候変動研究の進歩に貢献した。

## 3. 波及効果、発展方向、改善点等

革新プロで得られた予測データが広く利用されるよう、データ配信システムの整備が「データ統合・解析システム(DIAS)」との協力のもと進み、革新プロで作成されたデータの配信が行われている。国際的にみても、最新の温暖化予測結果に基づいたメカニズム解析や影響評価のため、Earth System Grid (ESG)と呼ばれるシミュレーションデータ配信システムが稼働し、DIASも日本からのデータを担当するESGの重要なノードとして貢献している。ESGからは、DIASを通して革新プロのデータが各国の研究者によりダウンロードされており、国際会議などでのモデル相互比較研究の発表で、海外の研究者が革新プロの結果を利用している場面を目にすることも多い。平成23年3月11日に発生した震災とそれに引き続く計画停電の影響により、ESGに"Gateway"として参加するとしていた当初の計画に変更が加えられ、現在は「ノード」としての貢献にとどまっている。しかし、国内の影響予測研究を推進するためにはDIASを通じたデータ配信システムの維持が不可欠であり、今後も国内外の関係者と調整を進め、方針を検討していく。

また、平成20年度から文部科学・環境両省の支援を得て発足した「気候シナリオ利用タスクグループ(以下、TG)」は、最新の温暖化予測データに基づいた影響評価研究を支援する活動を行っている。平成23年度は、文部科学省による革新プロやRECCA、環境省によるS-4, S-8など、国内の温暖化予測関連の研究計画間の連携推進と、そのために必要な「統合シナリオ」の開発をテーマとするシンポジウムを、「統合シナリオの開発に向けて　－国内研究課題の連携を考える－」と題し、平成24年1月27日に東京都内にて主催した。複数の研究計画からの参加者、講演者を得て、発表も多様な分野からの報告となったが、質疑応答や総合討論では分野横断的で活発な議論が交わされた。

周辺分野で関連の深い研究も活発に行われており、なかでも二酸化炭素観測衛星GOSATによる観測の進捗は特筆に値する。平成24年2月29日－3月2日には、東京大学において"The GOSAT Workshop 2012 – Towards GOSAT-2 Mission"が開催されている。革新プロ関係者も参加し、GOSATデータとモデル結果の比較などの活動がすすめられていることなどの報告があった。将来的には、ESMをベースにして衛星データを含めた観測データを同化しながら将来予測を行い、精緻な「地球観測監視予測システム」の構築も可能になると期待されており、今年度の革新プロ終了の後も、ESM開発とGOSAT計画との連携は重要性を増しながら発展していくと考えられる。

また次世代コンピュータ「京」の後継機に関する検討が既に始まっている。いわゆる「ポスト京」の議論では、科学的な問題として何に取り組むかを明確にしたうえで設計を定めていくという「サイエンスドリブン」の方針のもと、計算機の利用者側と設計者側が十分なコミュニケーションをとりながら仕様決定作業をすすめる "co-design" の重要性が強調されている。革新プロで開発をすすめるESMを利用した地球環境の包括的予測は、いわゆる「ゲリラ豪雨」の予報を可能にする予報技術開発などとともに、ポスト京開発の主要なターゲットの一つとして位置付けられている。ポスト京の議論には地球科学分野だけでなく、生命科学や物性科学、天文学などの分野からも研究者が参加している。これらの分野のなかには、気象・気候分野での大型計算に求められる仕様とは異なった仕様の計算機を要求している分野もある。他分野

からの要求とのバランスを取りながら、気象・気候分野の研究者にとっても有用な計算機開発を進めていくために、RIST（高度情報科学技術連携機構）など気候モデルの計算科学的側面に素養をもつ研究者と、革新プロからの研究者との協力体制が構築されている。

# 4. 研究成果の発表状況

## 4.1 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

研究発表件数:27

ポスター発表件数:3

論文数:21

招待講演数:5

メディア発表:1

## 4.2 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

研究発表件数:8

ポスター発表数:3

論文数:16

## 4.3 気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価

研究発表件数:0

ポスター発表数:3

論文数:3

## 4.4 長期的気候変動を視野に入れた沿岸域災害リスクの世界評価

研究発表件数:1

論文数:3

## 4.5 全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

研究発表件数:30

論文数:23

受賞等:1

メディア発表:3

## 4.6 GCM（大気海洋結合気候モデル）と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証

研究発表件数:4

ポスター発表数:2

論文数:2

メディア発表:2

# 5. 国際共同(協力)研究の状況

## (1) 本研究に関連の深い国際協力の枠組み

### A. 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の 第 5 次評価報告書(AR5)への動向

革新プログラムは、IPCCの第1作業部会(WG1)担当分の第4次評価報告書(AR4)が2月1日に完成後間もない**2007年**4月に立ち上がった。同月には第2・第3作業部会(WG2・WG3)担当分が次々に完成し、11月には統合報告書が完成して、AR4全体が出来上がった。

**2008年**に入って、第5次評価報告書(AR5)にむけた活動がはじまり、8月には、IPCC創立20周年記念式典に引き続いて開かれた総会で、IPCCビューロー(役員団)の選挙による新体制が発足した。

**2009年**には、スコーピング会合による、各WGのAR5の章立て案に基づく、総会審議で章立てや扱う主な項目が確定した。また、作成のスケジュールも決められた。当面する重要な課題に関する専門家会合やワークショップなども計画された。

**2010年**には、6月にIPCCビューローにより、AR5の執筆陣が選出された。前年のスコーピング会合からの継続したスコーピング会合による案から、AR5の統合報告書に関しても、扱うトピックスなど作成概要が決まるとともに、インターアカデミーカウンシル(IAC)によるIPCCレビュー報告書からの勧告への対応が始まった。

**2011年**には、2回の総会を通して、上記勧告への対応上主要な4つの課題に関して総会審議が進んだが、若干の課題は2012年へ残された。また、WG1/WG2による「極端現象に関する特別報告書」も承認・受諾された。以下、2011年度に関して詳細を示す。

- **2011 年度の IPCC の活動**

**33回総会(アラブ首長国連邦・アブダビ、5月10－13日、2011年)**

会議直前の「**再生可能エネルギーに関する特別報告書**」の政策決定者向け要約(SPM)の承認と主文の受諾を行った、WG3全体会合の結果を受諾した。4つのタスクグループ(TGs)の報告に基づく、IAC勧告への対応の審議が行われ、次のような結果となった。

- ◆ **手続き規則**に関しては、スコーピング会合参加者の選定、CLAs (Coordinating Lead Authors)及びLAs (Lead Authors)の選出、データ及び文献の出所、すべての範囲に関する見解の取り扱い、報告書の査読(査読の質の更なる確証、報告案の秘匿性、SPM 等)などかなりの点に関して合意が成立した。
- ◆ **管理運営体制**に関しては、勧告に沿う理事会(Executive Committee)設置、役員の任期、事務局の構成員などある程度合意が成立した。
- ◆ **利益相反策**に関しては、主要な点は合意され、関係者の公開様式(Disclosure Form)の検討が残された。

◆ **コミュニケーション戦略**に関しては、「IPCC コミュニケーション戦略に関するガイダンス」を採択した。事務局に対し、このガイダンスに沿った「IPCC コミュニケーション戦略」を策定して次回総会への提出を要請した。

**第1回WG1/WG2合同会合（ウガンダ・カンパラ、11月14～17日、2011年）**

**「気候変動への適応推進に向けた極端現象及び災害のリスク管理に関する特別報告書（以下、「極端現象の特別報告書」、またはSREXと略記。SREX=Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation)）**のSPMの承認と主文の受諾が行われた。SPMでの主題は:

A. 背景(Context):気象・気候の極端現象
B. 暴露、脆弱性、極端現象、影響、および災害損失の観測/所見（Observation）
C. 災害リスク管理と気候変動に対する適応:過去の極端現象についての経験
D. 将来の極端現象、影響、及び災害損失
E. 変化する極端現象・災害のリスクの管理

**34回総会（ウガンダ・カンパラ、11月18～19日、2011年）**

**上記の合同会合結果の報告を受諾**した。

また、前々回（第32回総会、釜山）及び前回（第33回総会、アブダビ）で、インター・アカデミー・カウンシル (IAC=InterAcademy Council)によるIPCCレビューへの対応として、**IPCCの諸過程と手続き規則（Process and Procedures）の4つの課題**について前回総会で決着していない課題に関して審議をすることになっていた。

◆ **手続き規則**:ガイダンスノート、ガイダンス文書の性格位置づけなどが明確にされた。また、ワークショップ及び IPCC 専門家会議への参加者の選定の詳細が明確にされた。さらに、査読プロセスの透明性・品質・効率性に関しても明確化された。
◆ **管理運営体制**:担当のタスクグループ（TG）のワリロー（英国）共同議長が急病で欠席となり、もう一人の共同議長も欠席したため報告がなく、審議は次回送りとなった。
◆ **利益相反策**:WG によってはすでにある程度実施されているが、Disclosure Form などが確定し、それに基づいた実施が行われることになる。
◆ **コミュニケーション戦略**:IPCC 事務局で予定されていた担当の上級コミュニケーション管理間の採用が遅れているため、今総会では策定が間に合わず次回に繰越となった。

● **AR5 統合報告書の作成活動:**

2010年5月に選出された執筆人による、AR5の主文案の作成はすぐに始まり、すでに2回の執筆陣の会合（**LA会合**）が開かれている:

- **第 1 回会合**:2010 年 11 月 8－11 日、中国・昆明(Kunming)
- **第 2 回会合**:2011 年 7 月 18－22 日、フランス・ブレスト(Brest)

- **2011 年度のその他の IPCC 活動**

AR5の統合報告書でも項目として扱われることになっている、**ジオエンジニアリングに**関しては、**専門家会議（ペルー・リマ、6月20-22日、2011年）**が、WG1・WG2・WG3の共催で開かれた。

## B. 日－EU 間の研究協力状況

第6回日-EU気候変動研究ワークショップ(6th EU-Japan Workshop on Climate Change Research）の会合は、欧州委員会（EC）研究革新総局（Directorate General for Research and Innovation）の招きで、文部科学省・海洋研究開発機構との共同の組織により、2011年10月10～11日に、ベルギー・ブリュッセル市のEC会議施設で開催された。

日本－EU気候変動研究ワークショップは、科学技術協力活動の一環として、平成11年3月に開催された第1回日-EU気候変動ワークショップ／シンポジウム以来これまで5回、相互に開催しながら継続してきた。今回は第6回に当たり、前回平成21年JAMSTEC東京事務所で開催されたワークショップで採択された共同宣言に基づき、ベルギーのブリュッセルで開催されることとなった。

前回に引き続き、日本とEU双方の地球温暖化及び気候変動研究への取り組みやプロジェクトの研究成果、今後の研究方針、相互協力について情報交換を行うことが目的であるが、今回はIPCC第5次評価報告書に向けて、WCRPのモデル相互比較実験（CMIP5）に参加している「21世紀気候変動予測革新プログラム（以下、「革新プロ」と略称）」による、研究成果が出ており、その報告を中心とした報告を行い、EU側も同様にCMIP5での成果が期待され、情報交換を行うことが主要な目的であり、その結果は共同ステートメント（省略）にまとめられた。ワークショップの意義が確認され、今後も継続することとなり、2013年に日本で次回の第7回日－EU気候変動ワークショップを開催することが合意された。以下では、議論の中心となった、科学セッションの概略を記す:

***セッション1：長期気候変動：モニタリング、予測、解析、及び非可逆性***

日本側より、革新プロの地球環境予測チームを率いる、JAMSTECの時岡プロジェクトリーダーから、地球システムモデル(ESM)によるCMIP5の予測結果が、また、ESMにおける不確実性に関してJAMSTECの河宮グループリーダーから、さらには、中間層大気大循環に関するESMの実験結果についてJAMSTECの渡邉サブリーダーから、それぞれ発表があった。関連する観測分野からは、GOSATの最新データとGOSATプロジェクトの現状について、国立環境研究所の横田室長から発表があった。

EU側からは、長期気候予測に関し、FP7/COMBINEプロジェクトの成果が、MPIのM.Giorgettaから、不確実性に関して、雲フィードバック問題への取り組みとして、FP7/EUCLIPSEプロジェクトの成果がKNMIのP. Siebesmaからそれぞれ発表された。

観測では、炭素観測システムに関して、アムステルダム自由大学のA.J.Dolmanから、また、気候変動下での海洋の炭素吸収につて、FP7/CARBOCHANGEでの成果が紹介された。

***セッション2：気候変動影響（全球的及び地域的スケール）および関連課題***

日本側より、JAMSTECの齋藤研究員から氷床モデル研究の成果が、京都大学防災研究所の中北教授から、極端現象への影響評価として、日本における自然災害に関しての成果が、また、北海道大学の山中教授から、海洋生態系への気候変動影響に関する成果が発表された。

EU側からは、海面水位上昇と気候変動に関して、FP7/ICE2SEAプロジェクトによる成果が、2℃上昇

の温暖化の影響に関して、FP7/IMPACT2Cプロジェクトによる成果が、また、気候変動の水と安全に対する影響に関して、PF7/WESSERMED/CLIMB/CLICOプロジェクト による成果が紹介された。

***セッション3：近未来（10年規模）気候変動：モニタリング、予測及び予測可能性***

日本側より、革新プロ近未来予測チームのリーダである、東大大気海洋研究所の木本教授から、革新プロによる、近未来気候変動予測の成果が、またJAMSTECの石井グループリーダーから、革新プロでの、アンサンブルデータ同化法による不確実性定量化についての成果が、さらに名古屋大学の須藤準教授から、気候に対する短期強制力要因のモデル開発についての成果が、それぞれ発表された。

EU側からは、SMHIのC. Jonesから、十年規模予測に関し、FP7/COMBINEプロジェクトによる成果が、CNR-ISACのS. Fuzziから、エアロゾルと気候の相互作用に関する成果、および大気成分と気候変動に関する、FP7/ACCENT+プロジェクトによる成果が発表された

***セッション4：地域的規模における極端現象影響のモニタリングと予測***

日本側より、革新プロ極端現象チームのリーダである、気象研究所の鬼頭部長から、高解像度全球及び地域気候モデルと予測された将来の極端現象についての成果が、同研究所の上口主任研究官から、高解像度大気大循環モデルによる地球温暖化下での地域的な豪雨の再現可能性についての成果が、さらに理化学研究所AICの冨田チームリーダーから、NICAMの最近の成果が発表された。

EU側からは、イタリア・フェラーラ大学（UNIFE）のP.Clavolaから、EUにおける高潮・高波のリスクに関し、FP7/MICOREプロジェクトから得られた教訓が、スペイン・CETAQUAのM. Velascoから、変動する環境での鉄砲水と土石流のリスク管理・軽減に関し、FP7/IMPRINTSプロジェクトでの進展について発表があった。

## （2） 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)への関与

＝IPCC WG1 国内支援事務局の運営＝

### A. 平成 21 年度国内・国際活動概要

IPCC WG1国内支援事務局では、IPCC/WG1の活動、特にAR5に向けた日本からの国際的・国内的な活動の支援を行なっている。活動の内容は、IPCC関連会合の情報収集、**IPCC WG1国内幹事会**の事務局業務、関係国内専門家の意見交換、LA等AR4作成関係者の関係会議への出席支援など多岐にわたる。ここでは、2011年度の活動をまとめる。

2011年度は各WGにおける第1回のLA会合が終わった段階で、同じ8月11日に、**IPCC WG1国内幹事会の第3回会合**と、**IPCC国内連絡会の第2回会合**が開かれた。

- IPCC **WG1 国内幹事会**の会合を開催。
  - ✓ **第3回会合(JAMSTEC 東京事務所、2011 年 8 月 11 日午前)**
  - － 新メンバーの紹介
  - － IPCC WG1 LA会合(France, Brest)について
  - － IPCC第33回総会（アブダビ）について

－ Dr. Susan Solomon の来日について
－ SBSTA34（ドイツ・ボン、6月）及び関連するWSの参加報告
－ 気候変動監視レポートについて（気象庁）

**第4回会合（JAMSTEC東京事務所、2011年9月15日午後）:**

－ソロモン(Susan Solomon)AR4/WG1共同議長の講演と討論

- IPCC 国内連絡会の開催:
  - ✓ **第2回会合（都道府県会館、8 月11日午後）**
  - － IPCC第33回総会（アブダビ）報告
  - － 各作業部会のLA会合の報告
  - － ジオエンジニアリング専門家会合の報告
  - － 極端現象に関する特別報告書(SREX)について
  - － 再生可能エネルギーに関する特別報告書(SRREN)に関する報道について
  - － 緩和政策とシナリオに関する国際シンポジュウム開催報告

- **下記の IPCC 関連会合出席・及び/または出席者への支援**:
  - ✓ 第 2 回 WG1/LA 会合（フランス・ブレスト、2011 年7月）、
  - ✓ IPCC WG1/WG2 第1回合同会合（ウガンダ・カンパラ、2010 年 11 月）
  - ✓ IPCC 第 33 回総会（ウガンダ・カンパラ、2011 年 11 月）

- **IPCC WG1 国内支援事務局のホームページ**を通して、IPCC 関連会合及びワークショップ等の報告や最新情報を国内向けに発信した（随時）。

- **講演会の開催（革新プログラムと共催、2012 年 3 月 5 日午後）**:

真鍋淑郎氏の講演と討論

## (3) その他の研究コミュニティにおける活動

### 国際科学会議(ICSU)における議論

国際科学会議(ICSU)では、平成22年10月に今後10年程度の地球環境研究の指針とするために“Earth System Science for Global Sustainability: The Grand Challenges”と題した報告書をまとめた。環境変化に伴う危機を人類が克服し持続性のある社会を築いていくために、自然科学者と人文・社会科学者とがいかに協力しどのような研究を行っていくべきか、の議論が中心になっている。それに基づき、地球環境研究に関する国際プロジェクト(IGBP, WCRP, Diversitas, IHDP)間の関係再編を行うためにTransition Teamを編成し、活動を進めている。平成23年12月には、IGBP, IHDP, Diversitasを統合し、WCRPを「オブザーバー」として加えた”Future Earth”と呼ばれる国際的な枠組みが設立された。またBelmont Forumと呼ばれる各国の研究行政組織の集まりでも、“Belmont Challenge”と題した報告書をまとめ、ICSUのこうした活動を資金面でも支援する姿勢を示している。日本では、東京大学や総合地球環境学研究所、海洋研究開発機構の研究者などが関心をもち、活動に関与している。

**Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)**

CMIP5は、各国の研究機関で開発された大気海洋結合モデルによる20世紀気候再現実験や温暖化予測実験の結果を比較検討するための国際プロジェクトであり、IPCC 第5次報告書の根幹をなすデータを提供することになると考えられる。革新プロも、CMIP5で定められたプロトコルにある実験の遂行を中心的業務としてとらえ積極的に関与してきた。各研究機関からのデータはESGと呼ばれるシステムを通じ世界中に配布されることになっており、革新プロはこの面でも国内の情報科学関連プロジェクトDIASと共同して国際的なデータ配布システムに貢献している。革新プロからDIASを通じて配信されたデータは各国の研究機関で進むモデル相互比較研究などに利用されており、国際学会などで革新プロからの結果を目にする機会も多い。

**International Land Model Benchmarking Project (ILAMB)**

ILAMBは、陸域モデルの相互比較や観測との照合を推進する目的で設立された国際プロジェクトである。ILAMBでは、LUCID (Land-Use and Climate, Identification of Robust Impacts) と呼ばれるモデル相互比較研究を推進している。LUCIDはもともと陸域生態系単体モデルを対象にした枠組みであったが、土地利用変化を含んだESMによる温暖化予測実験も対象に含めるよう、CMIP5のプロトコルを拡張する形で実験デザインが整備された。革新プロからもこの実験デザインに基づいて実験を行ってデータを提出し、DIASを通じて国際的にデータを配信している。

**Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP)**

GeoMIPは、地球工学的手法、とくに成層圏へのエアロゾル注入による温暖化抑制のモデル評価に関する国際プロジェクトである。CMIP5のプロトコルを拡張する形で実験デザインがまとめられており、革新プロでもこのデザインに基づいて実験を行っている。GeoMIPのような目的にモデルを使用する際には、エアロゾルや大気化学過程、成層圏物理過程について詳細な取り扱いがなされていることが望ましい。

革新プロで開発してきた地球システムモデルはそれらの特性を備えており、革新プロとしてもGeoMIPを国際コミュニティへの貢献の重要な足掛かりとして認識している。

**Coupled Carbon Cycle Climate Model Intercomparison Project ($C^4$MIP)**

$C^4$MIPは、炭素循環と気候との相互作用を含むモデルによる結果を比較検討するための国際プロジェクトである。先のIPCC第4次報告書に向けては、独自に実験デザインを行っていた。しかし、炭素循環を含んだモデルによる実験がCMIP5プロトコルに含まれたこともあり、IPCC第5次報告書へ向けては実験仕様策定の活動は行っていない。現時点では、CMIP5プロトコルに基づいた炭素循環関連実験の解析結果に基づき、学術誌の特集号を出版することが検討されている。関連分野の研究者間のネットワークとしては引き続き常用な枠組みと考えられ、革新プロとしても積極的に関与していく方針である。

# Ⅲ. 研究成果の詳細報告

## e.1 地球システム統合モデルによる長期気候変動予測実験

### e.1.1 MIROC-ESM を用いた 2300 年長期予測における全球炭素動態の解析

担当機関：海洋研究開発機構
研究者名：羽島 知洋

**要旨**

IPCC 第 5 次報告書に向けたモデル相互比較プロジェクトでは、将来の代表的な温室効果気体の濃度経路等を記述した Representative concentratin pathways シナリオと、さらにそれを 2300 年まで延長するシナリオを用いた気候変動予測実験等が求められている。ここでは、地球システム統合モデル MIROC-ESM (Watanabe et al., 2011) を用いた気候変動予測実験のうち、RCP4.5 シナリオを用いた 2300 年までの延長実験結果を解析し、数百年スケールにおける気候変動において、全球炭素循環がどのように変化していくのかを調べた。RCP4.5 シナリオでは 2000 年から 2100 年までに約 2.5℃上昇するが、2100 年以降も緩やかに全球平均気温は上昇し、2300 年までにはさらに約 0.4℃上昇していた。また、与えられた $CO_2$ 濃度シナリオを達成するために許容される化石燃料 $CO_2$ 排出量を調べたところ、2100 年以降に温室効果気体の濃度がほぼ一定であったとしても、許容排出量は低下していることがわかった。これは主に、2100 年以降、海洋の炭素蓄積の増加割合が低下していくことが主な理由であった。特に深さ 200～1500m の間において、海洋に蓄積されている炭素量の増加率は 2100 年以降低下しており、この領域における炭素動態が全球の炭素動態に強く影響していると考えられた。加えて陸域では、21 世紀中に貯留された土壌炭素が、生態系呼吸を通じて 2100 年以降も $CO_2$ として徐々に大気に放出され、総光合成速度とバランスするようになる。その結果、陸域の正味の $CO_2$ 吸収速度は低下しており、これが 2200 年以降の全球の陸域炭素動態を決めていた。加えて MIROC-ESM では、2200 年以降にも気温上昇が続いており、これも温室効果気体の濃度安定化以降に生態系呼吸速度を増加させている要因の一つであることが示唆された。

(1) はじめに

モデル相互比較プロジェクト CMIP5 では、Representative concentration pathways (RCPs)という将来のシナリオを基に気候変動予測実験を行うことが求められている (Taylor et al., 2011)。このシナリオは、人為的に排出される $CO_2$ や他の温室効果気体、エアロゾル等の排出量/濃度に加え、人間の土地利用変化の遷移も記述されている。これらのシナリオを用いて、地球システム統合モデル MIROC-ESM による気候変動予測実験が行われてきた。RCP シナリオは 21 世紀末までに 4 つのシナリオで構成されており、放射強制力が弱い順に RCP3-PD, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 と呼ばれている。また各シナリオを 2100 年以降も比較的単純な仮定に基づいて延長するシナリオも用意されている（図1）。特に RCP4.5 シナリオでは、2100 年以降、大気 $CO_2$ 濃度や他の温室効果気体の濃度はほぼ一定に保たれるというシナリオとなっている。地球環境予測研究チームではこのシナリオを用いた 2300 年までの延長実験を終えており、この長期予測実験の結果を解析することにより、長期的な気候変動下において主に全球炭素動態がどのように変化していくのかをここでは調べた。

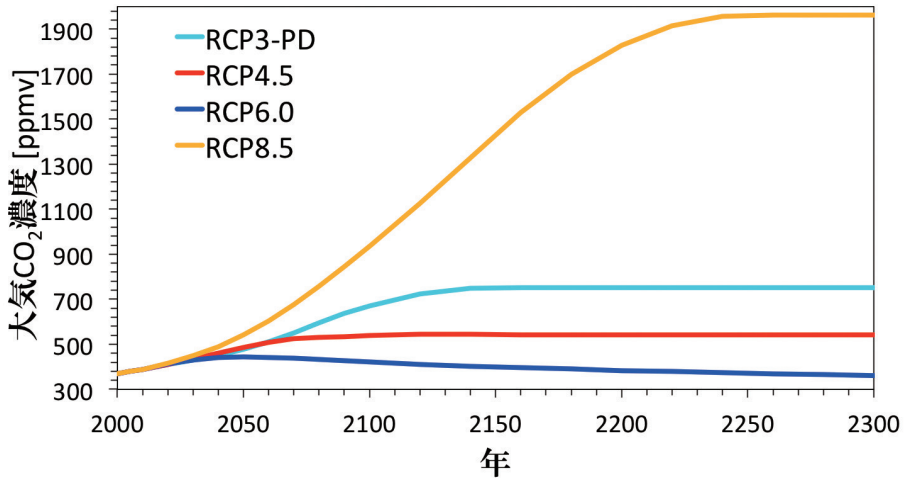



図１　気候変動予測に使用した Representative concentration pathways（RCP シナリオ）に記述されている大気 $CO_2$ 濃度。

(2) 結果および考察

図2左は、2000 年以降の地表面付近の全球平均気温の変化である。なお、対照実験（コントロールラン）における 2000 年から 2300 年までの計 300 年の全球平均気温を確認したところ、わずかに気温の上昇トレンドが存在することが確認されたため、このトレンドを除去した後のものを示している。RCP4.5（赤線）では 1980～1999 年の全球平均気温から 2100 年までに約 2.5℃上昇、以降 200 年でさらに約 0.4℃上昇しており、温室効果気体の濃度が例え一定になった後においても緩やかに気温上昇は続いていた。

このような気候変化のもと、RCP4.5 シナリオの $CO_2$ 濃度を達成するために許容される $CO_2$ 排出量を図2右（赤線）に示す。RCP4.5 シナリオの 2100 年頃では、許容排出量は約 3[PgC year-1] 弱と計算されるが、2100 年以降は徐々に低下し、2300 年にはほぼゼロに近くなる。つまり緩和策を通して大気の温室効果気体の濃度安定化を達成した後にも、化石燃料による $CO_2$ 排出を低減させる必要があるということを示している。

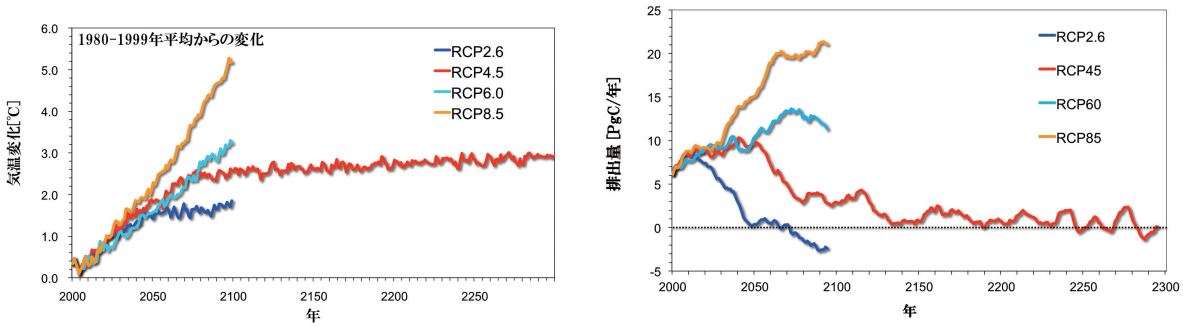



図２　地球システム統合モデルを用いた RCP シナリオ実験の予測結果。RCP3-PD（青線）、RCP6.0（淡青線）、RCP8.5（黄線）シナリオは 2100 年までであり、RCP4.5（赤線）シナリオは 2300 年まで延長数値実験を行っている。図左は 20 世紀末からの気温の変化であり、図右は、シナリオとして与えられる $CO_2$ 濃度を達成するために許容される化石燃料 $CO_2$ 排出量。

この2100年以降の許容$CO_2$排出量が低下していく原因を明らかにするために、海洋および陸域における炭素蓄積量の変化を調べてみた結果が図3である。2000 年以降、海洋および陸域は全球積算でみると炭素のシンクとして機能しており、2100 年までに海洋では約 240PgC、陸域では約 90PgC の増加となっていた。2100 年以降、海洋では炭素蓄積の増加率は落ちるものの、蓄積が進行する。一方陸域では、2100 年以降はかなりその蓄積が緩やかになり、2200 年以降は大きく変動していなかった。

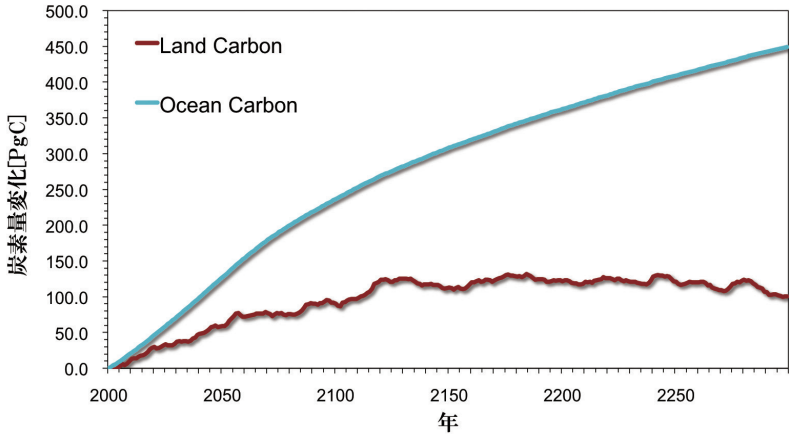



図３　地球システム統合モデルを用いた RCP4.5 シナリオ実験における海洋（淡青線）および陸域生態系の炭素蓄積量の変化（茶線）。

Miyama and Kawamiya (2009)の手法を参考に、海洋の炭素蓄積量を深さ別に見てみると(図4左)、深さ 200m までの炭素量は既に飽和しているが、200m から 1500m までの炭素量は 2100 年以降に蓄積速度が低下していた。また 1500m 以深では、2000 年から 2300 年までの間、ほぼ線形にその炭素が蓄積されていた。これらを踏まえると、1500m 以深の海洋炭素は増え続けているものの、2100 年以降の海洋全体の炭素蓄積の増加率の低下は、主に 200m から 1500m までの炭素動態に支配されているものと考えられる。

2100 年以降の陸の炭素蓄積量の変化を調べるために、陸域生態系における炭素収支を調べた結果が図4右である。ここでは、光合成により大気から生態系向きに生じる $CO_2$ フラックス(黒線)と、土壌有機物分解等によって生じる生態系から大気の向きに生じるフラックス(赤線)が示されている(これら 2 つのフラックスの差を時間積分すると、陸域生態系の炭素蓄積量の変化と等しくなる)。大気の $CO_2$ 分圧が上がると光合成の基質が増加するために光合成速度が上がる(施肥効果)が、2100 年以降は大気 $CO_2$ 濃度がほぼ一定になることにより、この効果は弱まる。一方、植物体内に存在する炭素に比べて、土壌中の炭素は滞留時間が長いため、2100 年以降も生態系呼吸は徐々に増加し、次第に生態系全体での炭素収支のインバランスを解消していく。さらに、MIROC-ESM では 2100 年以降も緩やかに気温上昇が続くために土壌有機物の分解が促進されている可能性があり、これらが 2100 年以降の陸域生態系の炭素動態を決めていたと考えられる。

ここでは、MIROC-ESM を用いた 2300 年までの長期気候変動予測実験を解析することにより、主に濃度安定化を達成した後の全球炭素循環を調べた。その結果、22 世紀以降の全球炭素循環は 21 世紀中の人為活動の影響をまだ残しており、さらに変動を続ける可能性があることが示唆された。また、これら全球炭素循環や前述の全球平均気温といった気候の変化に加え、北極海に存在する海氷も濃度安定化

以降に変化を続けている(図5、6)。冬の北極点周囲は2300年時点でも現在と同様に海氷で覆われているが、冬以外の季節における海氷は 2100 年以降も緩やかに減少し続けている。このように、濃度安定化以降の地球環境の変化を調べていくことが今後重要な課題であると考えられる。

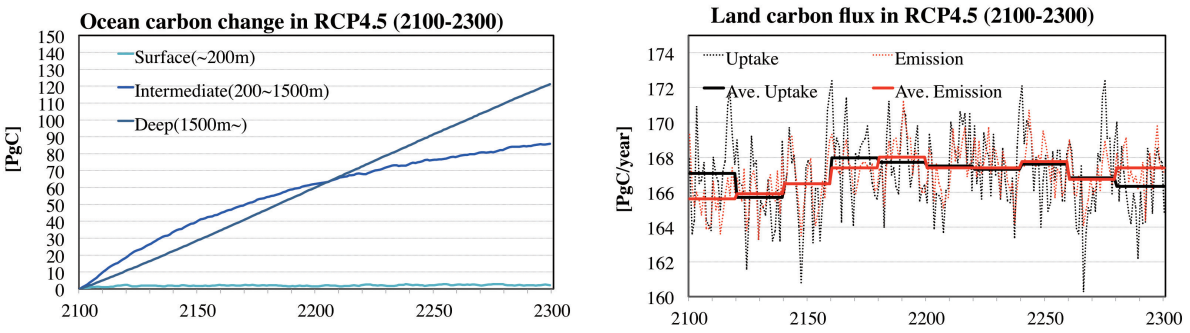



図４　海洋の炭素蓄積量の深さ別の変化（左）および陸域生態系における炭素収支（右）。陸域生態系における炭素収支では、年平均（点線）および各年代平均（実線）の 2 つの値が示されている。

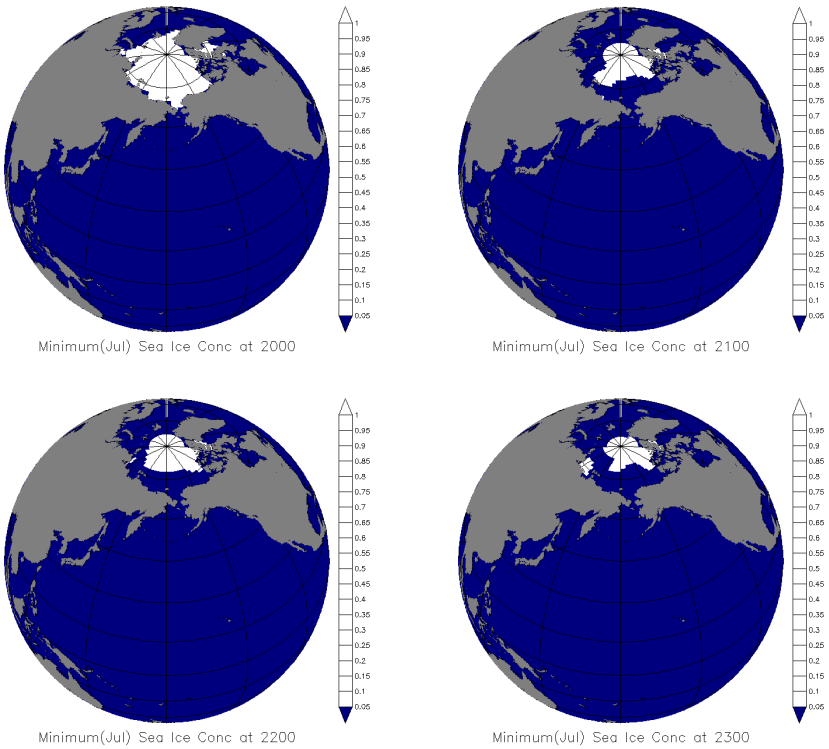



図５　海氷密接度の変化。各図は 2000 年（左上）、2100 年（右上）、2200 年（左下）、2300 年（右下）の 7 月平均値を表している。

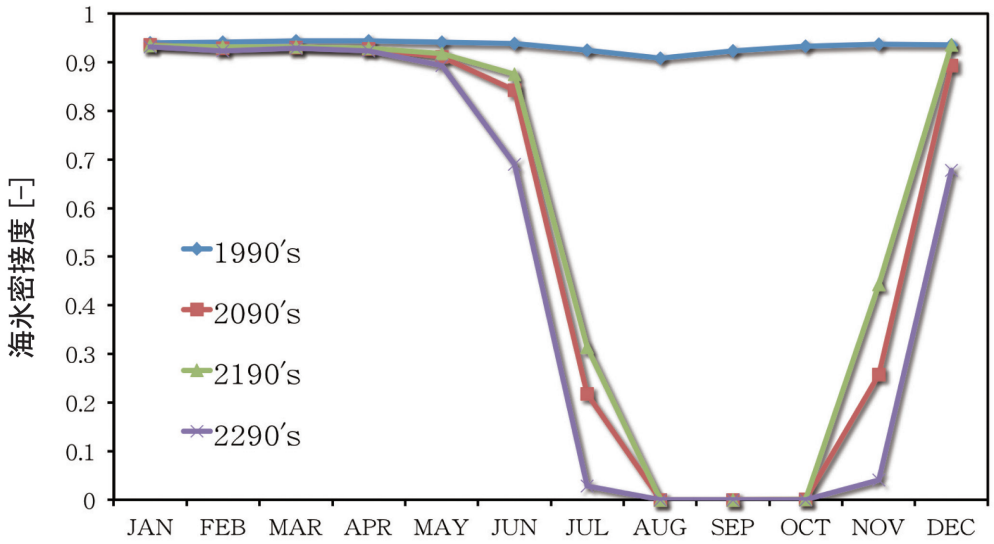



図６　北極点周辺 (89N-90N) における海氷密接度の季節変化。

g.1.1　引用文献

Karl E. Taylor, Ronald J. Stouffer, and Gerald A. Meehl, A Summary of the CMIP5 Experiment Design, available on line: http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/, Published: 18 December 2009.

Toru Miyama and Michio Kawamiya, 2009, Estimating allowable carbon emission for CO2 concentration stabilization using a GCM-based Earth system model, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L19709, doi:10.1029/2009GL039678.

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, 2011: MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev, 4, 845-872.

h.1.1　成果の発表

❖　論文

1. 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, 2011: MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev, 4, 845-872.
2. Hajima T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe, and M. Kawamiya, (submitted): Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios, Journal of the Meteorological Society of Japan.
3. Tachiiri K., A. Ito, T. Hajima, J. C. Hargreaves, J. D. Annan, M. Kawamiya, (in press): Nonlinearity of Land Carbon Sensitivities in Climate Change Simulations, Journal of the Meteorological Society of Japan.

Ⅲ．研究成果の詳細報告

❖ 著書・報文等

1. Kawamiya M., T. Hajima, T. Tokioka, (in press): Vegetation dynamics in an earth system model, Forests for People: UNFFS publication for 'Forests 2011'.

❖ 口頭発表

1. 羽島 知洋, 日本気象学会2011年度春季大会、東京、5/21：D460, 地球システム統合モデル MIROC-ESM における RCPs シナリオ下での陸域炭素循環・土地利用変化の影響解析
2. 羽島 知洋、平成 23 年度農業農村工学会大会講演会、企画セッション「水資源・水環境管理と情報技術 -健全な水環境と水利用-」、福岡、9/8：IPCC 第 5 次報告書にむけた地球システムモデルによる長期気候変動予測実験
3. 羽島知洋、日本気象学会2011年度秋季大会研究会「ユーラシア・アジアモンスーン地域の気候―陸域相互作用研究会 」、名古屋、11/15：地球システムモデル（気候－炭素循環モデル）における大気－陸域相互作用

❖ ポスター発表

1. Tomohiro Hajima, Takeshi Ise, Kaoru Tachiiri, Etsushi Kato, Shingo Watanabe, Michio Kawamiya, World Climate Research Programme Open Science Conference, Denver, 10/26:W121A, Climate change and carbon dynamics using RCP scenarios by MIROC-ESM (Poster)

## e.1.2 地球システム統合モデルを用いた海面水位変化の長期予測

担当機関: 海洋研究開発機構
研究者名: 岡島 秀樹

**要旨**

今後 300 年間に予想される海面水位変化を調べた。地球システム統合モデルを用いて各種シナリオに基づく温暖化実験を行い、海水の熱膨張および海流の変動による海面水位変化をそれぞれ算出する。熱膨張による海面水位変化は、歴史再現実験では近年 100 年ほどの間に約 4cm 上昇しており、概ね妥当な結果である。その後の温暖化実験では、21 世紀半ばまでは各シナリオ間の差異は小さく、21 世紀後半に入ってから緩やかに分岐する。RCP4.5 シナリオの延長実験では、海面水温が安定化した後も勢いを保って水位上昇を続けるが、これは海洋の熱容量(熱慣性)が大きいためである。大西洋子午面循環の時系列変化と比べる限りでは、熱塩循環による深層水の形成よりは、大気からの顕熱供給および海中の鉛直下向きの熱伝導が、鉛直熱輸送に効くようである。海流の変動による海面水位変化は、日本列島の東方沖で上昇が顕著であるが、これは中高緯度の海陸の昇温偏差により海洋が高気圧性循環の海上風偏差に覆われ、赤道方向へのスヴェルドラップ輸送が増えるためにそれを補う黒潮流量が増えるのが原因である。モデルの解像度によっても結果が異なる可能性があるので、今後、様々なモデルの出力を比較検証するのが望ましい。

(1) はじめに

海洋の熱容量は大気に比べると 1000 倍以上も大きく、また二酸化炭素を始めとした物質循環の時間スケールも桁違いに長いので、長期的な気候変動においては海洋が本質的な役割を担っているといえる(IPCC 2007)。そのため、数百年規模の気候変動を予測するには、大気海洋の力学だけでなく、海洋や陸域の生物化学過程も含めた統合的な系で捉える必要がある。当チームでは、300 年先の将来を見据えた気候変動予測を目標として、Kawamiya et al. (2005)に記述される地球システム統合モデルに改良を加え、標準実験や歴史再現実験や各種シナリオに基づいた温暖化実験を行ってきた。標準実験および歴史再現実験において概ね妥当な結果が得られているので、温暖化実験における結果も今後の気候変化をある程度確からしく表現するものと期待される。温暖化にともなう長期的な気候変化が引き起こす現象のひとつとして海面水位変化が挙げられるが、統合モデルの温暖化実験の結果から海水の熱膨張および海流の変動による海面水位変化を調べた。

(2) 海水の熱膨張による海面水位変化

図 1 は歴史再現実験(黒)および RCP2.6(水色)、RCP4.5 シナリオ(緑)、RCP6.0 シナリオ(橙)、RCP8.5 シナリオ(赤)について 1850 年から 2100 年まで、さらに RCP4.5 シナリオの延長(黄緑)については 2300 年まで、熱膨張による全球平均海面水位変化の時系列を図示したものである。歴史再現実験では、産業革命開始から現在まで、特に近年 100 年ほどの間に水位が約 4cm 上昇しており、概ね妥当な結果が得られている。その後の温暖化実験の結果によると、2100 年までの約 100 年間に RCP2.6 シナリオでは約 18cm、RCP4.5 シナリオでは約 24cm、RCP6.0 シナリオでは約 26cm、RCP8.5 シナリオでは約 38cm、それぞれ水位が熱膨張により上昇する。さらに RCP4.5 シナリオの延長実験では、現在から 2300 年までの約 300 年間に約 66cm 水位が上昇する。図 2 および図 3 はそれぞれ全球平均海面水温および

全球全層平均水温の時系列変化であるが、海面水温は 2100 年までに安定化して以後ほぼ横ばいに推移しているのに対し、全層平均水温は 2100 年以後も勢いを保って昇温を続けており、深層も含めた水温変化が熱膨張による全球平均水位変化に寄与していることが分かる。表層での変動が落ち着いた後も深層で変動が続くのは、海洋の熱容量（熱慣性）が大きいためである。

また各シナリオ間での変動の違いに着目すると、21 世紀前半までの熱膨張による水位上昇および全層平均水温の昇温は、RCP8.5 シナリオで最大ではあるが、各シナリオ間の差異は顕著ではなく、RCP4.5 シナリオのせいぜい上下 10 パーセント程度の範囲に収まっている。そしてその後 21 世紀半ばから、緩やかにシナリオごとに枝分かれする結果となっている。図 4 は大西洋子午面循環の流線函数の北緯 30 度付近の最大値を時系列描画したものであるが、海洋熱塩循環の強度の時間変化を表している。20 世紀末までは 16Sv 前後で準定常であった循環が温暖化とともに急激に弱化しており、21 世紀末にはほぼ半減し、さらにその後 300 年間は（海面水温の安定化からはやや遅れて）緩やかに減少しながら 5Sv 程度の平衡解に漸近していく様子が見て取れる。子午面循環の変化は 21 世紀末までシナリオによる差異が顕著でないので、熱膨張や全層平均水温の変化には、熱塩循環（深層水形成）の弱まりによる力学的な鉛直熱輸送の変化よりも、大気からの顕熱供給および海中の鉛直下向き熱伝導による熱輸送の増加の方が大きく寄与していると推察される。

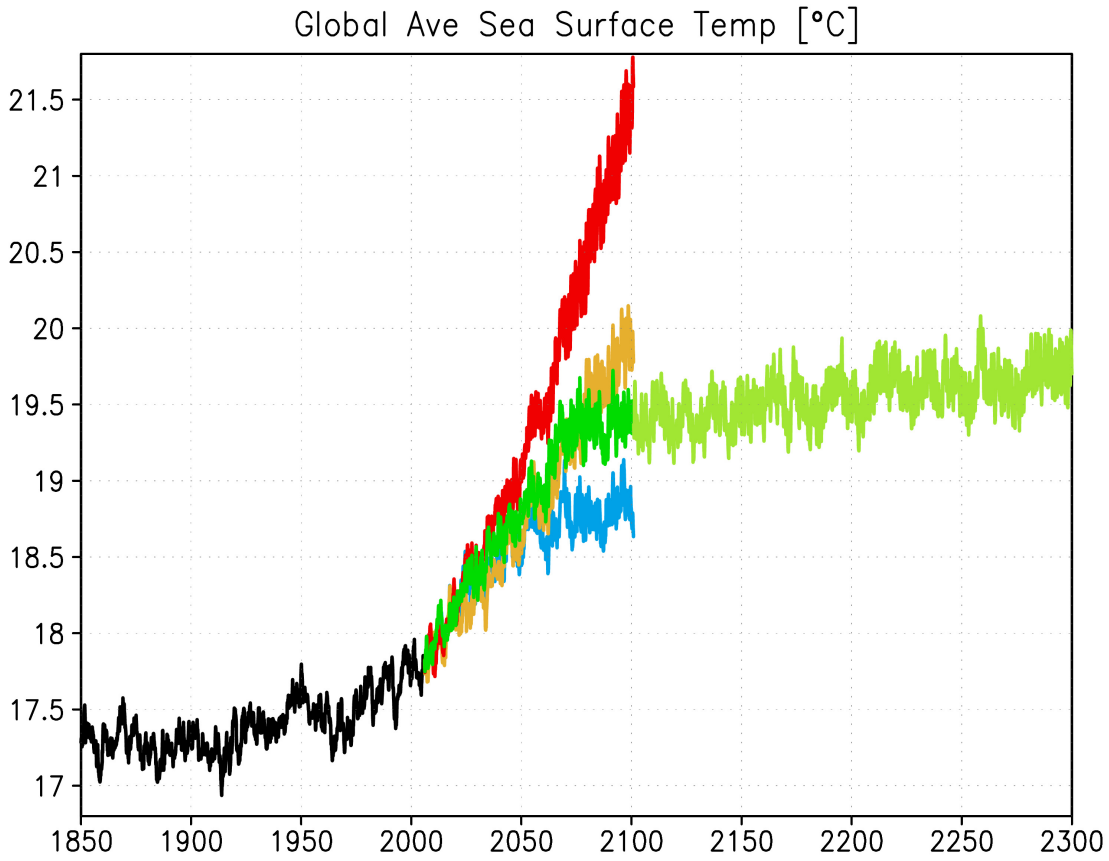



図 1. 熱膨張による全球平均海面水位変化(cm)。2006 年 1 月の水準を基点としている。歴史再現実験（黒）、RCP2.6 シナリオ（水色）、RCP4.5 シナリオ（緑）、RCP6.0 シナリオ（橙）、RCP8.5 シナリオ（赤）、および RCP4.5 シナリオ延長（黄緑）。

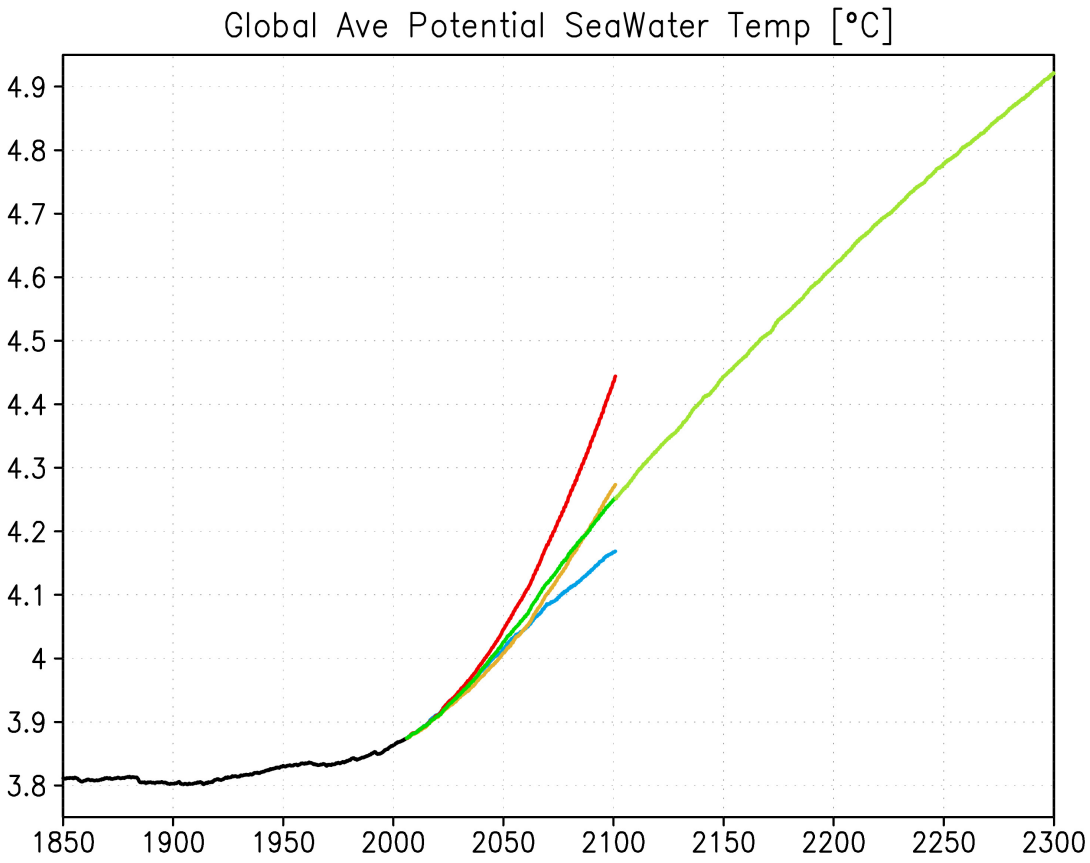



図 2. 全球平均海面水温(℃)。その他の説明は図 1 と同じ。

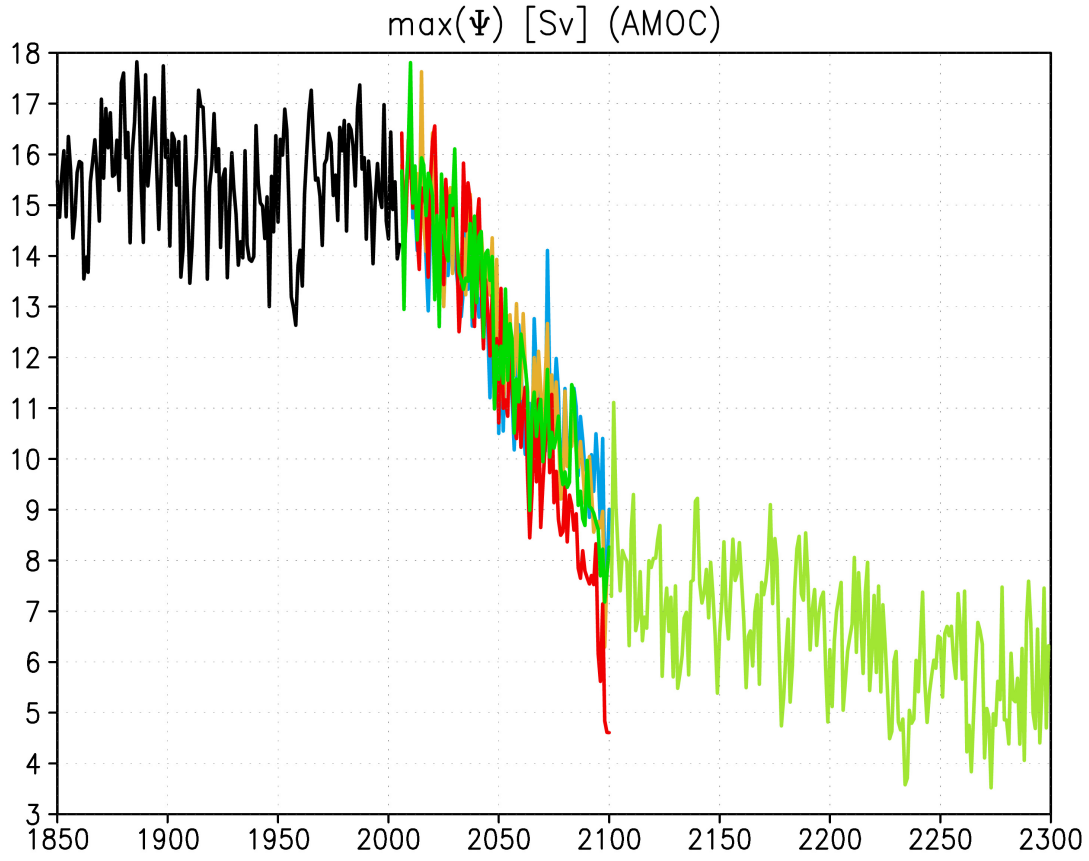



図 3. 全球全層平均水温(℃)。その他の説明は図 1 と同じ。

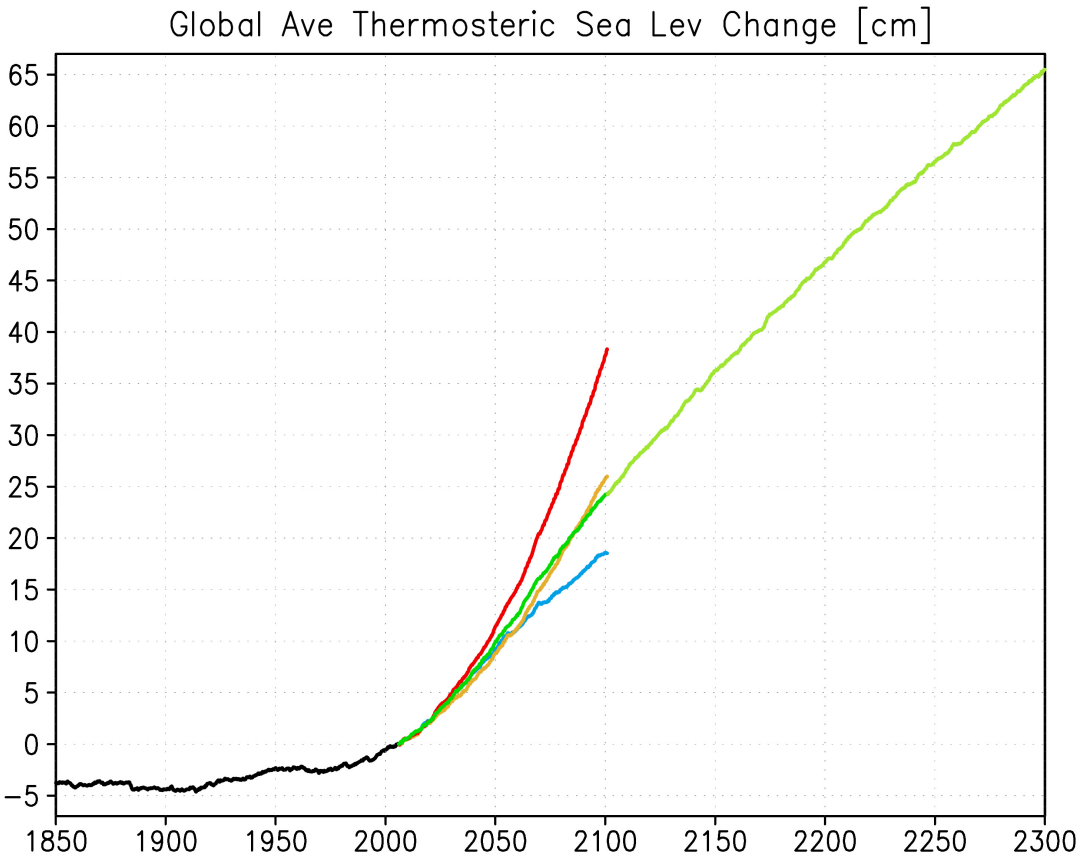



図 4. 大西洋子午面循環の流線函数の北緯 30 度付近の最大値(Sv)。その他の説明は図 1 と同じ。

(3) 海流による海面水位変化

図 5 は RCP4.5 シナリオの 1990 年代から 2290 年代まで約 300 年間における太平洋北西部の力学海面高度変化を図示したものであるが、日本列島の本州東側で特に水位上昇が大きいことが分かる。地表気温および海上風の変化に着目すると(図 6)、中高緯度では陸域の昇温が著しく、海洋は相対的に低温偏差となるので高気圧性循環の海上風偏差が卓越する。風応力の増加に伴い赤道方向へのスヴェルドラップ輸送が増え、それを補うために西岸境界流である黒潮の流量が増える。流量変化に対する黒潮の応答はモデルによって異なり、統合モデルのような中解像度の海洋モデルの場合は黒潮続流域は北にシフトするが、高解像度の海洋モデルの場合は黒潮の位置は変わらずに強化されることもあり(Sakamoto et al. 2005, Suzuki et al. 2005)、さらに様々なモデル間での比較検証が望まれる。

その他、熱帯太平洋の気候変動と全球二酸化炭素収支に関する論文(Okajima and Kawamiya 2011)およびモデル仕様書(Watanabe et al. 2011)を改訂投稿し、受理掲載された。

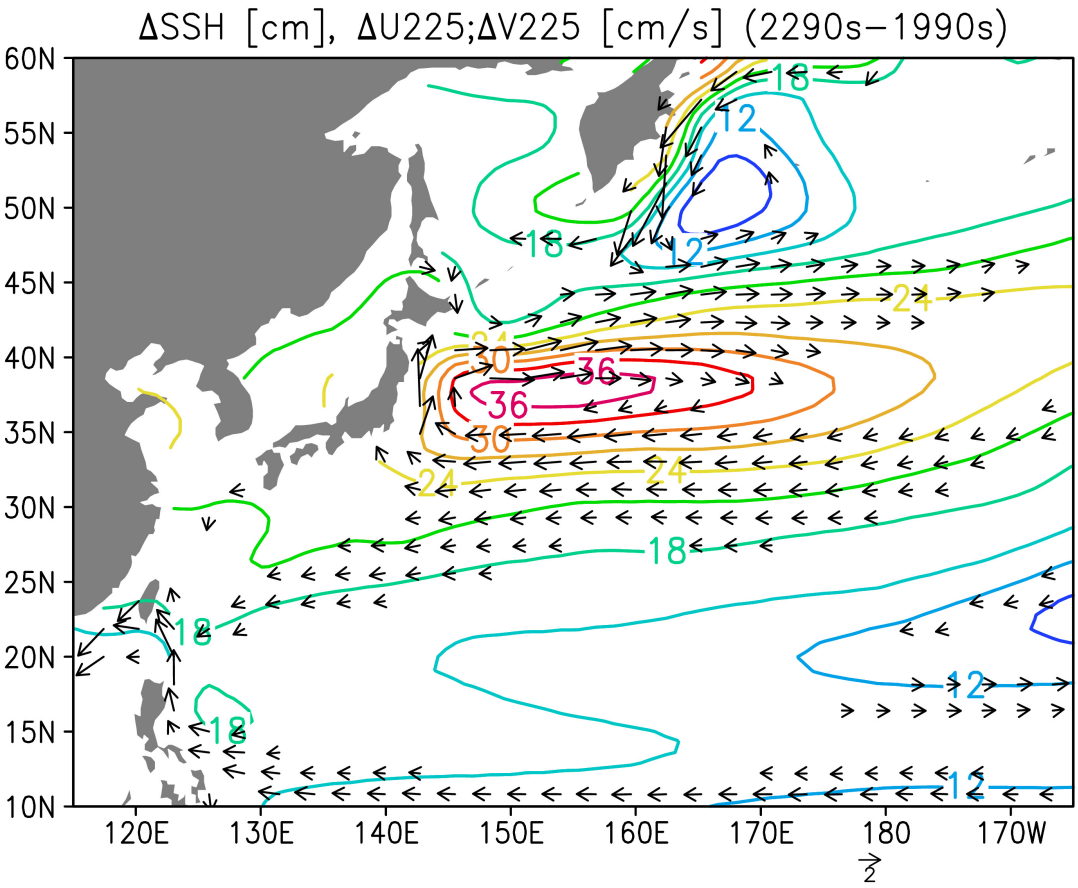



図 5. RCP4.5 シナリオ 300 年間での力学海面高度変化(cm)および表層 225m までの流速変化(cm/s)。2290 年代の平均から 1990 年代の平均を差し引いている。

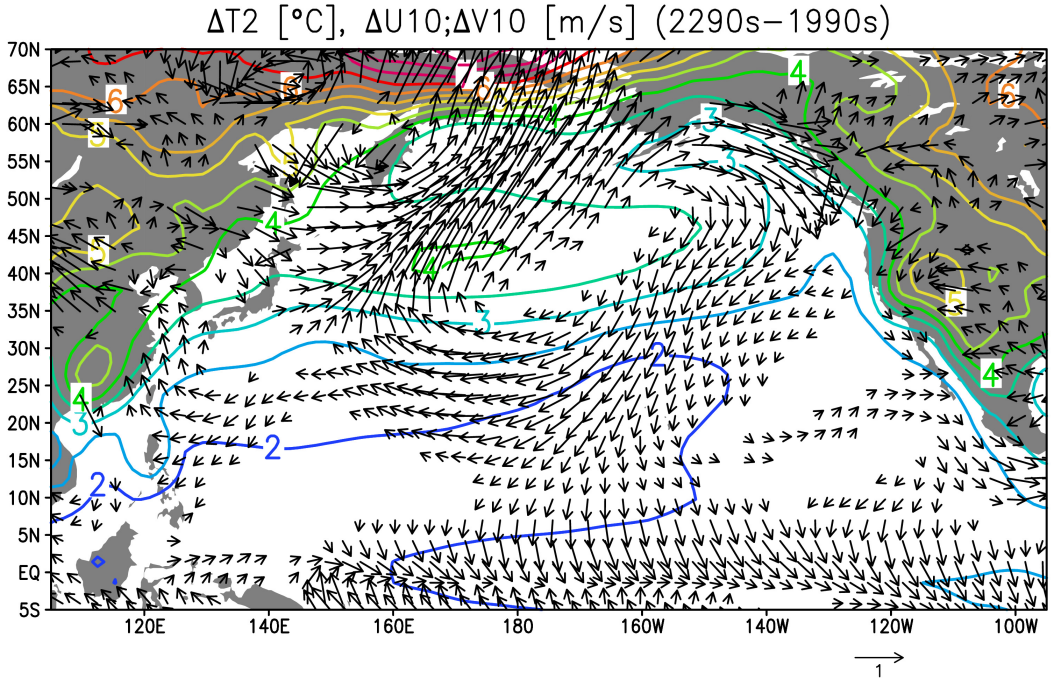



図 6. RCP4.5 シナリオ 300 年間での 2m 表層気温変化(℃)および 10m 表層風変化(m/s)。2290 年代の平均から 1990 年代の平均を差し引いている。

考察

熱膨張による海面水位変化から、歴史再現実験のモデル出力が妥当であることが示された。また温暖化実験の結果から、海面水温が安定した後も海面水位上昇は続くと考えられる。21 世紀半ばまでは各シナリオ間での差異は小さく、21 世紀後半に入ってから緩やかに違いが顕れることが示唆された。また温暖化による気候場の変化に伴い、黒潮の流量が増加し、日本の本州沿岸で水位上昇が特に大きくなる可能性がある。今後も更なる環境監視とモデル実験の比較検証が望まれる。

参考文献

IPCC (2007), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, New York.

Kawamiya, M., C. Yoshikawa, T. Kato, H. Sato, K. Sudo, S. Watanabe and T. Matsuno (2005), Development of an Integrated Earth System Model on the Earth Simulator, Journal of the Earth Simulator, 4, 18-30.

Okajima, H. and M. Kawamiya (2011), Pacific climate variability and possible impact on global surface CO2 flux, Carbon Balance Management, 6, 6:8, doi:10.1186/1750-0680-6-8.

Sakamoto, T.T., H. Hasumi, M. Ishii, S. Emori, T. Suzuki, T. Nishimura and A. Sumi (2005), Responses of the Kuroshio and the Kuroshio Extenshion to global warming in a high-resolution climate model, Geophys. Res. Lett., 32, L14617, doi:10.1029/2005GL023384.

Suzuki, T., H. Hasumi, T. Sakamoto, T. Nishimura, A. Abe-Ouchi, T. Segawa, N. Okada, A. Oka and S. Emori (2005), Projections of future sea level and its variability in a high-resolution climate model: Ocean processes and Greenland and Antarctic ice-melt contribution, Geophys. Res. Lett., 32, L19706, 10.1029/2005GL023677.

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 (2011), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

成果発表

論文出版

Okajima, H. and M. Kawamiya (2011), Pacific climate variability and possible impact on global surface CO2 flux, Carbon Balance Management, 6, 6:8, doi:10.1186/1750-0680-6-8.

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 (2011), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

口頭発表

岡島秀樹・河宮未知生(2011) 南極オゾン層回復が南大洋二酸化炭素吸収に及ぼす影響, 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011/11/18.

## e.1.3 地球システム統合モデルを用いた IPCC 実験の実施と科学的成果

担当機関:海洋研究開発機構
研究者名:渡邉 真吾

### 要旨

本年度は、IPCC 第 5 次評価報告書(IPCC-AR5)に向けて、各国・各機関で実施が求められる一連の数値実験の実験設定(Coupled Model Intercomparison phase-5; CMIP5 プロトコル)のうち、大気化学結合版の地球システム統合モデルを用いた過去再現・将来予測実験を行うとともに、過去の地球環境変化に対する人為的影響を抽出するための各種(温室効果ガス強制のみ、自然強制のみ、濃度駆動・排出駆動)のアンサンブル・シナリオ実験を実施した。また、古気候実験、土地利用変化の影響をみるための補助的実験、ジオエンジニアリング実験なども合わせて実施した。それらのうち、いくつかの実験を組み合わせて解析した成果を論文発表した。

(1) はじめに

本年度の本サブグループの目標は、IPCC-AR5 に向けて地球システム統合モデルを用いて行う、一連の数値実験の残り(全体の約 3 割)を実施し、さらにそれらの実験結果を定量的に解釈するために必要な補助的実験を実施して結果を論文にまとめることであった。本年度中に行った実験の概要に関しては、要旨に述べたとおりであり、本報告書のなかで各実験の担当者から別途報告があるため、ここでは詳述しない。以下、本年度中に論文発表した成果の要約を記す。

(2) 地球システム統合モデル MIROC-ESM 2010 の参照論文

CMIP5 に向けて、大気化学過程を結合したフルセットアップのバージョン(MIROC-ESM-CHEM)と、大気化学過程を省略した簡易バージョン(MIROC-ESM)の 2 種類の地球システム統合モデルを用意した。このうち前者のフルバージョンのモデルに関して、モデル全体のフレームワーク、各サブモジュールの詳細とモジュール間の結合、モデルのスピンアップ過程、各種のフォーシング設定、そして、観測や再解析データと比較した際の過去再現実験のパフォーマンス評価について、Geosci. Model Dev. 誌に"MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments"というタイトルで論文発表を行った(Watanabe et al. 2011a)。それぞれのモジュールの担当する結果に関して大小さまざまな系統的なバイアスが存在するものの、総合的な観点から見て、MIROC－ESM-CHEM は 20 世紀から 21 世紀初頭にかけての地球環境を概ね良好に再現できることを示すことができた。別途他のサブグループから報告があるが、とりわけ 20 世紀中の地表気温の時系列的な変化に関しては、従来の気候モデル MIROC3.2 に比べてはるかによい再現性を示すことが分かった。

(3) 21 世紀の全球紫外線量予測シミュレーション

MIROC-ESM-CHEM は、気候や生態系だけでなく、成層圏・対流圏のオゾンを中心とする大気化学や対流圏エアロゾルを予報するため、地表の紫外線量の将来予測にも用いることができる。従来のモデルによる紫外線量の予測研究は、専ら成層圏オゾン層の将来変化の影響のみを考慮していたが、MIROC-ESM-CHEM を用いることではじめて、対流圏諸要素の変化を考慮した紫外線量予測が可能となった。IPCC-AR5 向けに開発された 4 種類の社会経済シナリオ(RCPs: Representative Concentration

Pathways)では、将来、化石燃料やバイオマス燃料の使用量の減少に伴って、対流圏のエアロゾル量が減少すると想定されている。また、対流圏オゾン前駆気体も次第に減少すると想定されており、結果として対流圏オゾン濃度が低下する。これらはいずれも、地表に到達する紫外線量を増加させる効果がある。成層圏ではフロンガス等のオゾン層破壊物質の規制の効果によって化学的にオゾン層が回復することが予測される一方で、温室効果ガスの増加に対する応答としてオゾンを輸送する循環が変化し、オゾン層濃度の緯度分布が変化（熱帯で減少＆中・高緯度で増加）することが予測された。こうした効果による地表紫外線量の増減には地理的な偏りがあり、低緯度や北半球中緯度では 21 世紀後半に紫外線が顕著に増加する一方で、両半球の高緯度では顕著に減少する可能性があることが示唆された（図1）。紫外線の年々変動には太陽活動のほか、雲とエアロゾルの変動の効果が大きいが、その大きさにもまた、地理的な違いが存在する。以上のようなシミュレーション結果および紫外線量変化のメカニズムに関して、J. Geophys. Res.誌に、”Future projections of surface UV‐B in a changing climate”というタイトルで論文発表を行った(Watanabe et al., 2011b)。また、海洋研究開発機構より「今世紀後半、紫外線が増加する可能性 成層圏を含めた地球環境の長期変動予測シミュレーションによる成果」というタイトルで記者発表を行った。

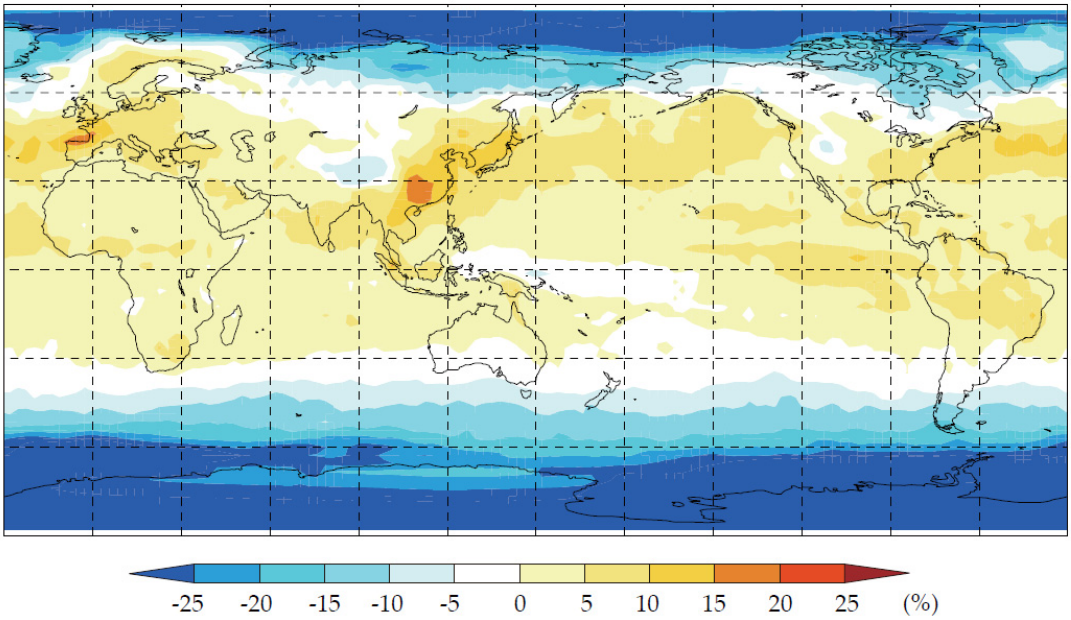



図 1:地表に到達する有害紫外線量の将来変化予測

今世紀の末頃（2090～2099 年の平均）の今世紀の初め（2000～2009 年の平均）に対する有害紫外線量増減の割合を示す。南半球中・高緯度は主にオゾン層回復のため、北欧を除く北極域は雪氷の減少と雲・エアロゾルの増加のため、それぞれ紫外線が減少する。これに対し、5%以上の紫外線増加が予測された地域は、現在の工業地域や森林伐採地域の周辺とその風下に分布している。

(4) アジア域の紫外線量検証と将来予測

前項で述べた MIROC-ESM-CHEM による地表紫外線量予測において、21 世紀中に最も紫外線量の増える割合が大きかった地域は日本を含む東アジアであった。日本には気象庁による紫外線のスペクトル観測地点が札幌・つくば・鹿児島・那覇の 4 地点あり、1990 年代の最初から現在まで（鹿児島は 2004

年まで)にわたる紫外線量のデータが存在する。このデータを用いることによって、モデルの予測する紫外線量の定量的な検証を行ったところ、モデルの雲アルベドの系統的なバイアスの比較的小さい札幌と那覇では、紫外線量の気候値的な季節変化を良く再現する一方で、とくに夏場にモデルの雲が少ないバイアスがあるつくばと鹿児島では紫外線量を過大評価する傾向が顕著であった。雲のバイアスは地表気温や降水量にも関係するので、今後のモデル改良のカギを握るポイントである。21 世紀中の紫外線量増加がもっとも大きいと予測されたのは中国華南の内陸部(+18%)であり、そこではエアロゾルの減少(大気汚染の改善)の効果によって、現在よりも多くの日射量(含紫外線)が地表に到達する可能性が高い(図2)。日本はそうした大気汚染発生域の風下に位置する関係で、現在はエアロゾルによって紫外線がある程度遮蔽された状態であるが、将来大気汚染が改善されたときには全土平均しておおよそ 10%多くの紫外線が地表に到達するようになる可能性が高い。北日本ではエアロゾルの減少そのものの効果よりも、温暖化およびエアロゾルが減る影響で雲が減少する効果が卓越する可能性が示唆された。以上の研究成果は J. Meteorol. Soc. Jpn 誌に“Future Increase in the All-sky UV-B Radiation over Asia Projected by an Earth System Model”というタイトルで論文発表を行った(Watanabe and Yokohata, 2011)。

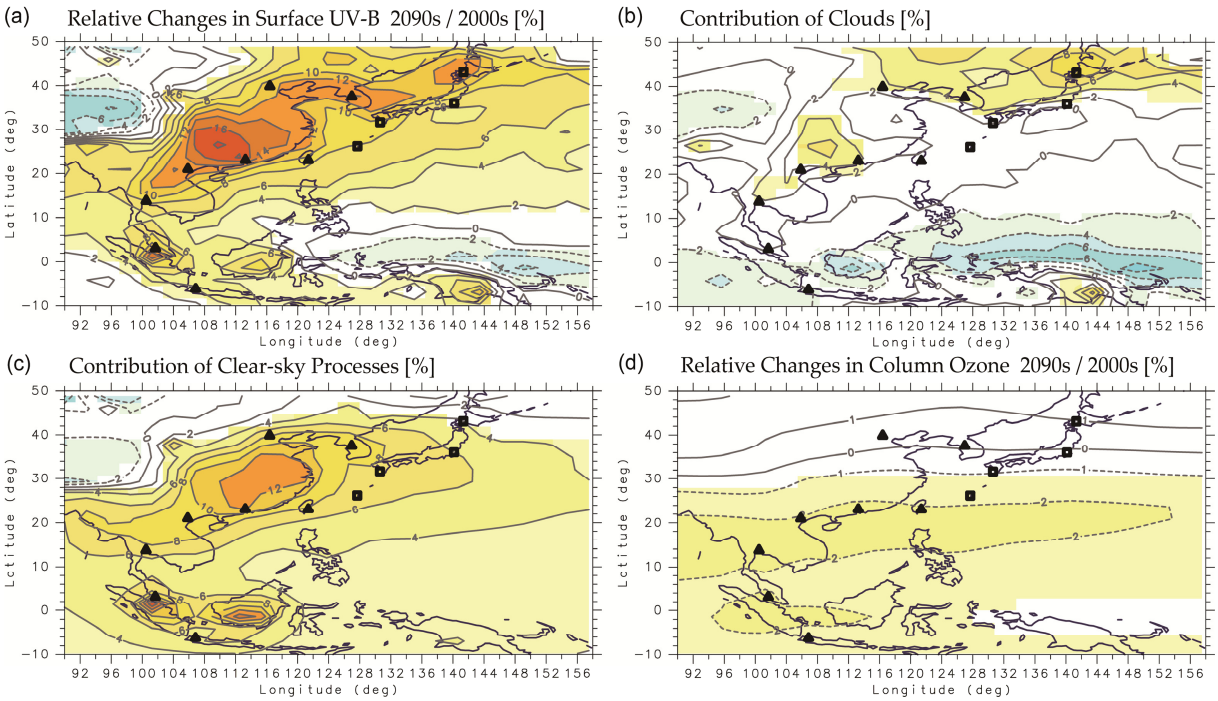



図2:2090-2099 年平均の、2000-2009 年平均に対する紫外線量増減の割合(%)。
(a):紫外線量増減の割合(%)。(b):(a)に対する雲の変化の寄与。(c):(a)に対するオゾンとエアロゾルの変化の寄与。(d):オゾン全量の変化率(%)。(b)(c)(d)と(a)との比較から、北日本を除く広範な領域において、エアロゾル変化の寄与が卓越することが分かる。

(5) 過去～現在の人為的要因による地表紫外線量変化

前項・前々項で述べた21 世紀の紫外線量変化の予測シミュレーションで得られた重要な知見のひとつは、「現在の紫外線に関わる環境は人為的な大気汚染と成層圏オゾン層の破壊によって大きく撹乱されており、将来の紫外線変化もまた、大部分が人類の手に委ねられている」という点である。では産業革命以後、人類の活動はどのようなペースで、またどのような地理分布で地表の紫外線量に影響を及ぼしてき

たのか？この疑問に答えるために、MIROC-ESM-CHEM の過去再現実験(1850-2005)、同期間に温室効果気体の変化のみを強制として与えた実験（大気中のオゾン濃度は対流圏オゾンの前駆気体や成層圏オゾンの破壊物質の濃度に化学的に応答する）、同・自然強制（太陽活動変化と、火山噴火に伴う成層圏エアロゾル量の変化）のみを与えた実験の 3 組を比較した（図3）。

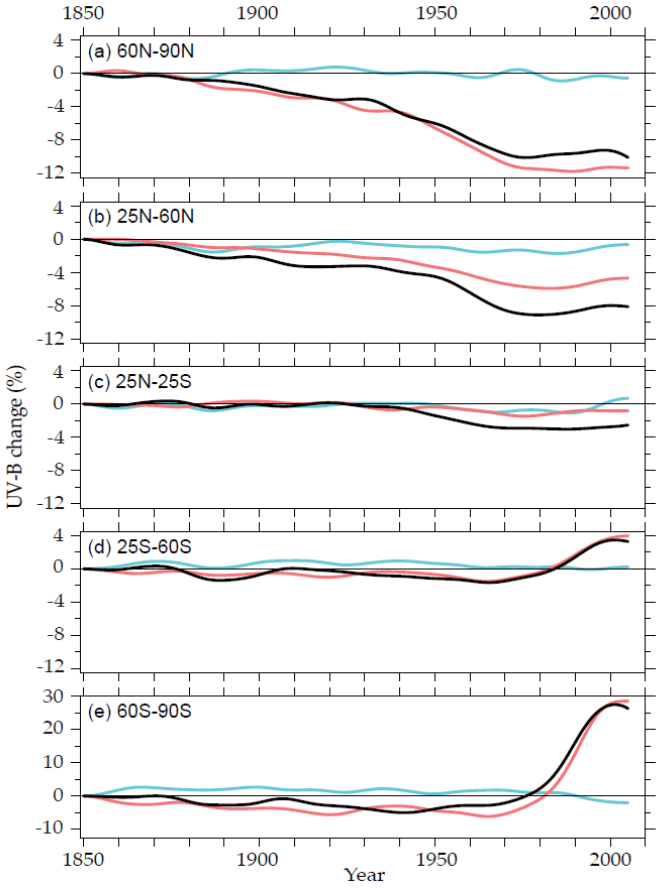



図3：1850-1859 年平均値に対する紫外線量増減の割合(%)。

黒：すべての人為強制・自然強制を与えた実験。赤：対流圏オゾン前駆気体や成層圏オゾン層破壊物質を含む温室効果ガス強制のみを与えた実験。青：自然（太陽活動と成層圏火山性エアロゾル）強制のみを与えた実験。自然強制の影響は全体および人為強制に比較して小さいことが分かる。

緯度帯によって過去から現在の地表紫外線量の時間発展は大きく異なることが分かる。比較的大気汚染の少ない南半球中・高緯度では、1980 年頃までは変化が小さく、1980 年以後成層圏オゾン層の破壊や南極オゾンホールの発達に伴って、顕著な紫外線量の増加が生じている。一方他の緯度帯では、成層圏オゾン層破壊の影響は他の要素の影響に比べて限定的である。化石燃料の燃焼に伴う大気汚染の深刻な北半球の中緯度では、1850 年以後次第にエアロゾルと対流圏オゾンが増加し、地表に到達する紫外線量が少なくなっていく。図の黒線は両者の効果を表し、赤線は対流圏オゾン増加の効果を主に表している。自然強制の影響は比較的小さいため、黒線と赤線の違いは、エアロゾルの増加による効果を近似的に表している。2000 年の時点では、地表紫外線の減少（1850 年代比で約 8%減）に及ぼすオゾン増加とエアロゾル増加の効果の寄与は概ね半々である。バイオマス燃焼に伴う炭素性エアロゾルの排出

が盛んな低緯度では、1950 年前後から地表紫外線量が減少し、2000 年時点では産業革命前と比較して約 3%減となっている。以上の解析結果を雲がある領域と無い領域に分けてより詳細に区分し、オゾン変化とエアロゾル変化と雲の変化がそれぞれ地表の紫外線量の変化に及ぼす寄与を定量的に評価した結果を、Atmos. Chem. Phys. Discuss.誌に ”Anthropogenic changes in the surface all-sky UV-B radiation through 1850-2005 simulated by an Earth system model”というタイトルで論文発表した(Watanabe et al., 2012)。

(6) 将来の成層圏子午面循環の変化と成層圏赤道準二年周期振動の変化

MIROC-ESM をはじめ、成層圏を含む多くの気候モデルが予測するところによると、温室効果ガスの増加にともなって、低緯度上部対流圏は強く温暖化する。それに対して、中・高緯度の下部成層圏は寒冷化する。このため、200-300 hPa を中心に元々あった気温が極向きに下がる緯度勾配がより強化される。すると温度風の関係によって亜熱帯の西風ジェットの上端がより高高度まで拡張するようになり、惑星規模の波動や内部重力波の散逸が生じる緯度・高度分布が変化し、それは下部成層圏の極向き子午面循環である Brewer-Dobson 循環を強化させる。この循環の強化は、熱帯下部成層圏の上昇流の強化を伴う。そうした変化が赤道下部成層圏の東西風準二年周期振動(QBO)にどのような影響を与えるか、MIROC-ESM の一連の実験によって調べた。図4の時系列グラフの青線は、Brewer-Dobson 循環の強度の指標となる、70 hPa 面を横切る質量フラックスである、温室効果ガスの増加とともに次第に値が大きくなっているのが分かる。それにともなって QBO 東西風の下方伝播が次第にゆっくりになり、QBO は長周期化することが予測された。これは QBO 位相の下方伝播を妨げる働きを持つ熱帯の上昇流が強化されることの結果であると解釈される。以上の解析結果は、J. Meterol Soc. Jpn 誌に”Sensitivity of the QBO to Mean Tropical Upwelling under a Changing Climate Simulated with an Earth System Model”というタイトルで論文発表した(Watanabe and Kawatani, 2012)。

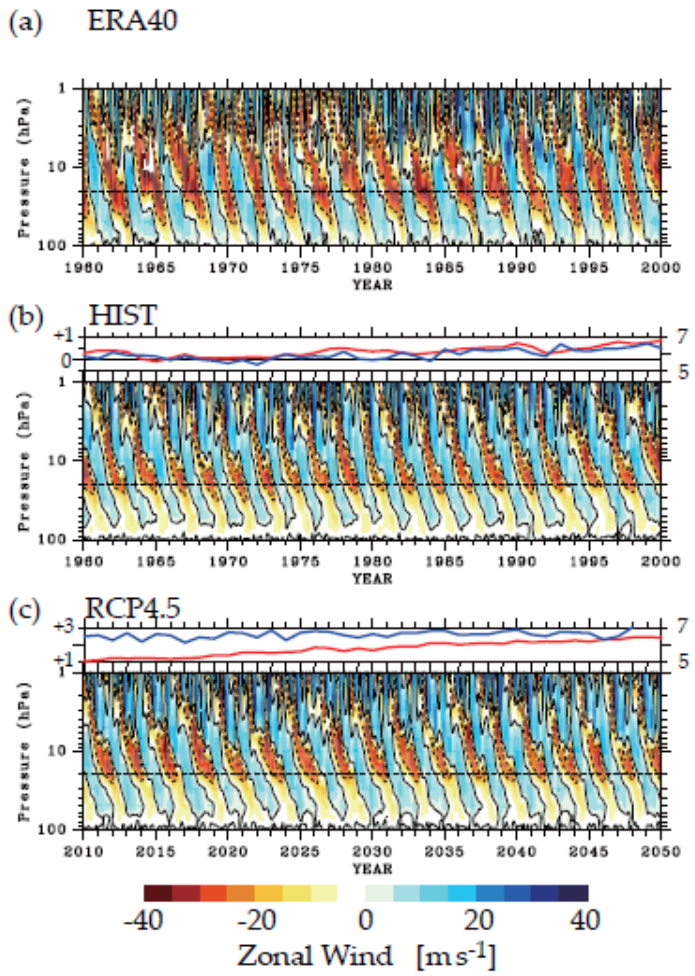



図4：赤道成層圏の帯状平均東西風（西風：正）鉛直プロファイルの時間変化（カラー）。図の上部の時系列グラフは、赤線：全球平均地表気温の 1850 年からのアノマリ（左軸：K）、青線：70 hPa を上向きに横切る質量フラックス（右軸：$10^9$kg $s^{-1}$）。(b)と(c)より、温室効果ガス濃度の増加に伴って全球平均地上気温が上昇する一方で、成層圏では熱帯の上昇流が強まるのと同時に、赤道 QBO が長周期化する様子が見て取れる。

f.1.3　考察

本年度は CMIP5 で要請のある主要実験の残りと、それらの結果の解析や解釈に必要な追加実験、新シナリオ実験・ジオエンジニアリング実験などを計画通りに実施することができた。謝辞に代えて、この実験実施には、地球シミュレータ(ES)センター・文部科学省・他の ES 利用課題グループの協力による ES の優先的利用、さらにグループのメンバーの協力（実験準備・実施担当・ES　上での実行状態および結果監視）が不可欠であった。また CMIP5 データの公開にあたっては、グループ内外の SE ならびに DIAS の担当者にも尽力頂いた。

MIROC-ESM および MIROC-ESM-CHEM の過去再現・将来予測予測実験等の解析から、様々な新しい知見が得られ、その多くを論文発表することができた。一連の紫外線のシミュレーションは先端的な結果と評価されている。また現在 CMIP5 のマルチモデル解析が各国・各機関で進められており、我々のモデルのパフォーマンスや、将来予測実験結果の傾向などに関しても、論文ドラフトが作成されつつある。例えば成層圏の現在気候の再現性に関しては、他のモデル群と比較してより再解析データ等に近い良好な結果を示している(SPARC-DynVar project, personal communication)。今後 CMIP5 および IPCC-AR5

の中で我々のモデルデータが貢献を果たすとともに、我々のモデルに必要な改良の方向性なども遠からず明らかになるであろう。

g.1.3　引用文献

Watanabe, S., and Y. Kawatani (2012), Sensitivity of the QBO to mean tropical upwelling under a changing climate simulated by an Earth system model, *J. Metorol. Soc. Jpn*., in press.

Watanabe, S., and T. Yokohata (2012), Future Increase of All-sky UV-B over Asia Projected by an Earth System Model., J. Metorol. Soc. Jpn., in press.

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 (2011a), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev*., 4, 1-28, doi:10.5194/gmd-4-1-2011.

Watanabe, S., K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Kawase, and T. Nozawa (2011b), 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. Discuss.*, in press.

h.1.3　成果の発表

❖　論文（査読あり、印刷中あるいは掲載済み。）

1. Gerber, E., A. Butler, N. Calvo, A. Charlton-Perez, M. Giorgetta, E. Manzini, J. Perlwitz, L. M. Polvani, F. Sassi, A. Scaife, T. A. Shaw, S.-W. Son, and S. Watanabe (2012), Assesing and understanding the impact of stratospheric dynamics and variability on the Earth system, *Bull. American. Met. Soc.*, accepted.
2. Kawatani, Y., K. Hamilton, and S. Watanabe (2011), The quasi-biennial oscillation in a double CO2 climate, *J. Atmos. Sci.*, 68, 265-283, doi: 10.1175/2010JAS3623.1.
3. Sato, K., S. Tateno, S. Watanabe, and Y. Kawatani (2012), Gravity wave characteristics in the Southern Hemisphere revealed by a high-resolution middle-atmosphere general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, accepted.
4. Watanabe, S., and Y. Kawatani (2012), Sensitivity of the QBO to mean tropical upwelling under a changing climate simulated by an Earth system model, *J. Metorol. Soc. Jpn*., in press.
5. Watanabe, S., and T. Yokohata (2012), Future Increase of All-sky UV-B over Asia Projected by an Earth System Model., J. Metorol. Soc. Jpn., in press.
6. 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 (2011a), MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, *Geosci. Model Dev*., 4, 1-28, doi:10.5194/gmd-4-1-2011.
7. Watanabe, S., K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Kawase, and T. Nozawa (2011b), Future projections of surface UV‐B in a changing climate, *J. Geophys. Res*., 116, D16118, doi:10.1029/2011JD015749.

❖ 論文（査読あり、査読中。）

1. 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. Discuss.*, in press.

❖ 口頭発表・ポスター発表

1. Watanabe, S., K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Kawase, and T. Nozawa, 2011: Global simulations of surface UV in a changing climate, IUGG2011, Meruborune, July 2011.
2. Watanabe, S., Outcomes from MIROC-ESM on the middle atmosphere general circulation, EU-JP Workshop, Bluxellus, Septermber 2011.
3. Watanabe, S., K. Sudo, T. Nagashima, T. Takemura, H. Kawase, and T. Nozawa, 2011: Global simulations of surface UV in a changing climate, WCRP OSC, Denver, October 2011.
4. 渡辺真吾, 岡本功太, 佐藤薫, 2011: 成層圏循環の変動と大気の平均年代の関係について, 日本気象学会 春季大会, 東京, 2011 年 5 月。
5. 渡辺真吾, 須藤健悟, 永島達也, 竹村俊彦, 川瀬宏明, 野沢徹, 2011: 地球システムモデル MIROC-ESM-CHEM によるアジア域の有害紫外線シミュレーション, 日本気象学会 春季大会, 東京, 2011 年 5 月。
6. 渡辺真吾, 2011: 地表 UV-B の将来予測シミュレーション, 地球惑星連合学会, 幕張, 2011 年 5 月。
7. 渡辺真吾, 2011: 高解像度気候モデルの開発-新しい観測成果との統合的理解を目指して大気圏シンポジウム, 相模原, 2011 年 3 月。

❖ 著書

1. 不完全だった紫外線予測、パリティ、丸善、2012.01.25 発行。

❖ 記者発表

1. 今世紀後半紫外線が増加する可能性 成層圏を含めた地球環境の長期シミュレーションによる成果、独立行政法人海洋研究開発機構からの記者発表、2011.06.01。

## e.1.4 20 世紀再現実験における長期気温変化および個別フォーシングによる気候応答の解析

担当機関：国立環境研究所
研究者名：野沢　徹、阿部　学

**要旨**

地球システム統合モデルによる過去の気候変化再現実験（20 世紀気候再現実験）において、20 世紀後半以降の北部太平洋域における地上気温の長期トレンド分布の再現性が向上している。その原因について、全球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 世紀気候再現実験の結果を総合的に解析した。その結果、対流圏エアロゾルモデルの高度化・精緻化および放射スキームの改良が北太平洋域における地上気温の線形トレンド分布の再現性向上に少なからぬ影響を及ぼしていることが示唆された。また、人為的気候制御の検証実験であるジオエンジニアリング実験に関連して、太陽定数とCO2 濃度を瞬時に強制した実験における降水量の応答を評価した。

(1) はじめに

本課題の最終目的は、地球システム統合モデルを用いて、過去の長期気候変化再現実験および将来の長期気候変化予測実験を行い、過去の気候変化要因や将来予測に関して最新の科学的な知見を得るとともに、気候変動に関する政府間パネル（Intergovernmebtal Panel on Climate Change: IPCC）の第 5 次評価報告書（Fifth Assessment Report: AR5）作成に貢献することにある。地球システム統合モデルを用いて過去の気候変化再現実験および将来の気候変化予測実験を実施する際には、太陽活動や火山噴火、温室効果ガス、対流圏エアロゾルなどさまざまな気候変動要因に関する情報が必要となるが、国立環境研究所では、これらさまざまな気候変動要因データを整備するとともに、それら気候変動要因の影響を地球システム統合モデルに取り込むためのコード改変を行ってきた。本年度は、昨年度より継続して実施している、地球システム統合モデルを用いた第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト（Phase 5 of the Coupled Model Intercomparison Project: CMIP5）に準拠したさまざまな長期気候変化実験の解析を行った。特に、地球システム統合モデルによる過去の気候変化再現実験（20 世紀気候再現実験）において、20 世紀後半以降の北部太平洋域における地上気温の長期トレンド分布の再現性が向上している原因について、全球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 世紀気候再現実験の結果を総合的に解析した。

また、近年、技術を使った人為的気候制御の試みに対し、その効果を検証する研究が行われいる。そのような試みを Geoengineering：ジオエンジニアリングと呼んでいる。例えば、成層圏にエアロゾルを散布し地表に達する太陽放射量を人為的に抑制した場合の地球温暖化の抑制効果を検証・評価する。このような検証を目的として、様々な研究機関が、世界で共通した複数の強制条件の下で、全球大気海洋結合モデルや地球システム統合モデルを用いた感度実験を行っている。ここでは、ジオエンジニアリング実験のうちの一つである、太陽定数と CO2 濃度を瞬時に強制した実験の降水量の応答を、旧バージョンの大気海洋結合モデル MIROC3.2 を用いて評価した。

(2) 過去の気候再現実験における 20 世紀後半以降の長期気温変化

図 1 は 20 世紀後半以降の 1951～2005 年における年平均地上気温の線形トレンドの空間分布を示す。本課題で開発した地球システム統合モデル MIROC-ESM シリーズによる過去の気候再現実験（Watanabe et al., 2011）だけでなく、最新の大気海洋結合モデル MIROC5（Watanabe et al., 2010）や近未来予測実験に用いた超高解像度版 MIROC4（Sakamoto et al., 2012）、第 4 次評価報告書（Fourth Assessment Report: AR4）作成に貢献した MIROC3.2（高解像度版および中解像度版）による過去の気候再現実験結果（Nozawa et al., 2005）も併せて示している。また、気候変動要因の違いによる差異を調べるため、MIROC3.2 の中解像度版に CMIP5 推奨の気候変動要因データを与えた場合の実験結果も示している。なお、これら各実験およびモデルの詳細を表 1 に示す。なお、モデル出力データは 1961～1990 年の 30 年平均値からの偏差を求めた上で観測データ（HadCRUT3: Brohan et al., 2006）と同じ水平解像度に補間し、観測データが存在しないグリッドについてはモデル出力データでも欠損値として扱うなどの処理を施している。観測では、ユーラシア大陸上で顕著な昇温傾向を示す一方で北部太平洋域に弱いながらも比較的広範囲にわたって気温が降下している領域が見られる。ユーラシア大陸上での昇温傾向はいずれのモデルでも見られるものの、北部太平洋域で気温降下傾向を示しているのは MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MIROC-ESM-ED、MIROC5、MIROC3.2h であり、MIROC4、MIROC3.2m、MIROC3.2m-NewForc には見られない。特に、MIROC3.2m と MIROC3.2m-NewForc のトレンド分布には大きな差異は認められず、20 世紀後半以降における年平均地上気温の線形トレンドの地理分布は、気候変動要因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る。20 世紀後半以降の北部太平洋域における気温低下傾向の再現性を向上させている具体的な原因については今後の解析を待たねばならないが、表 1 から判断して、対流圏エアロゾルモデルの高度化・精緻化あるいは放射スキームの改良が何らかの影響を及ぼしていることが示唆される。

| Model & exp. name | Resolution | Cloud schemes | Radiation scheme | Aerosol modules | Forcings | No. of ensembles |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MIROC-ESM-CHEM | T42L80 | Old | Update | New | New | 1 |
| MIROC-ESM | T42L80 | Old | Update | New | New | 3 |
| MIROC-ESM-ED | T42L80 | Old | Update | New | New | 3 |
| MIROC5 | T85L40 | New | Update | New | New | 3 |
| MIROC4 | T213L56 | Old | Old | Old | New | 3 |
| MIROC3.2h | T106L56 | Old | Old | Old | Old | 1 |
| MIROC3.2m | T42L20 | Old | Old | Old | Old | 10 |
| MIROC3.2m-NewForc | T42L20 | Old | Old | Old | New | 10 |

表 1:解析対象とした実験および用いた大気海洋結合モデルの詳細。モデル(MIROC)の解像度、雲スキームのバージョン、放射スキーム改良の有無、エアロゾルモデルのバージョン、気候変動要因データのバージョン、および初期値アンサンブルメンバー数を示す。

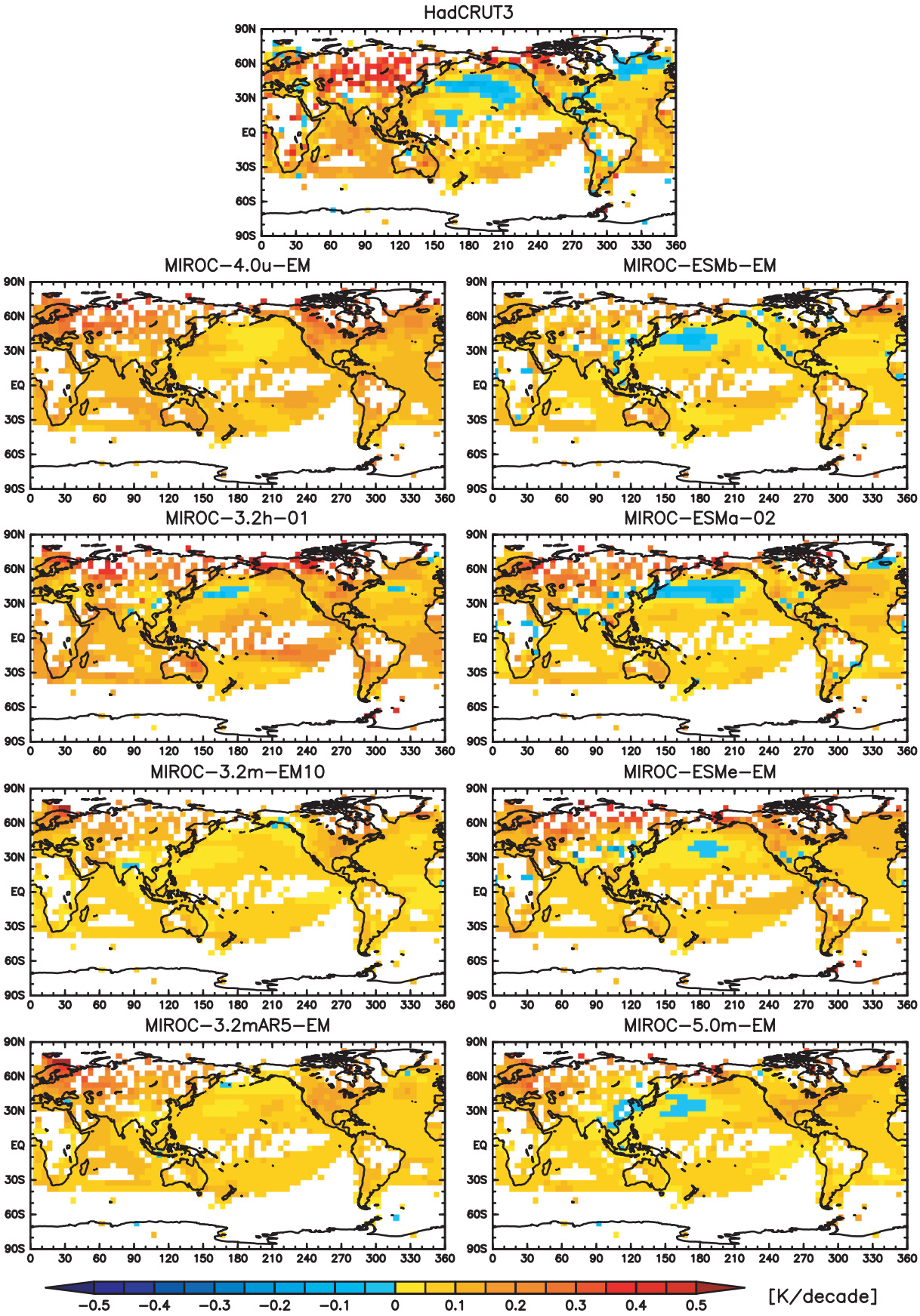



図 1: 1951～2005 年における年平均地上気温の線形トレンドの空間分布。単位は K/10 年。最上段：観測データ（HadCRUT3）、左側：上から MIROC4、MIROC3.2h、MIROC3.2m、MIROC3.2m-NewForc、右側：上から MIROC-ESM、MIROC-ESM-CHEM、MIROC-ESM-ED、MIROC5 をそれぞれ示す（モデルはいずれもアンサンブル平均）。

(3) 地球システム統合モデルによる気候変動要因切り分け実験

図 2 は地球システム統合モデルを用いた 20 世紀の気候変動要因切り分け実験の結果を示す。モデルデータは図 1 と同様に観測の有無に合わせた処理を施している。従来のモデル（MIROC3.2m）による結果と同様に、人為起源の気候変動要因である温室効果ガス、オゾン、エアロゾル等を考慮しなければ 20 世紀後半以降における著しい温暖化は再現できておらず、近年の温暖化が人間活動に起因しているとの認識を補強する結果を示していることが分かった。

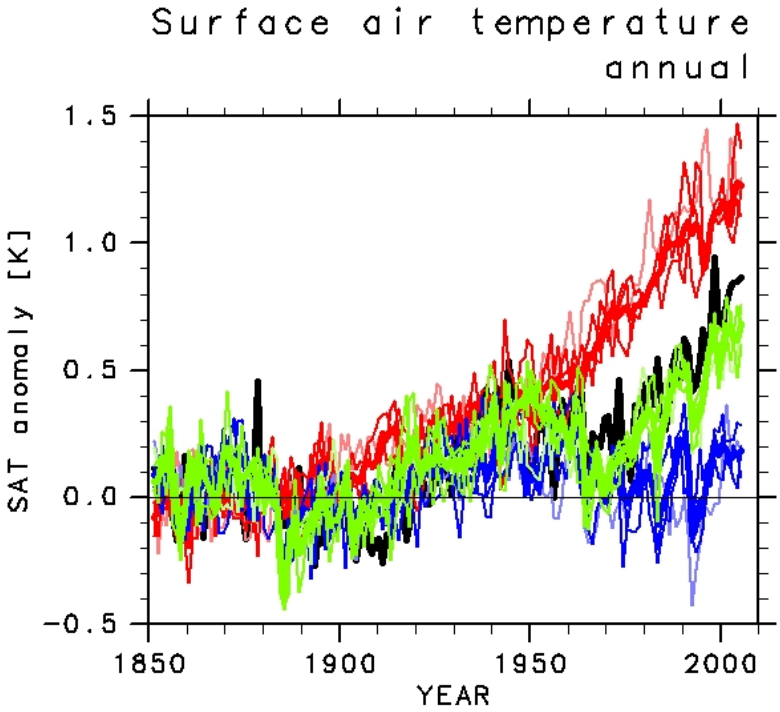



図 2: 地球システム統合モデルを用いた 20 世紀再現実験における全球年平均地上気温の経年変化。単位は K。1851～1900 年の 50 年平均値からの偏差を示す。黒線：観測（HadCRUT3）、赤線：温室効果ガスのみ与えた実験、青線：自然要因のみ与えた実験、緑線：すべての気候変動要因を与えた実験をそれぞれ示す。いずれも、細線は 3 メンバーの初期値アンサンブル実験を、太線はアンサンブル平均を示している。

(4) 太陽定数と CO2 濃度の瞬時強制実験における降水量応答

本研究では、国際的なジオエンジニアリング実験に準拠して、産業革命前の大気中 CO2 濃度を基準にし、CO2 濃度を 4 倍と 1/4 倍した実験（4CO2、025CO2）と、それらと同程度の放射強制力を与えるように、太陽定数を瞬時に 53W/m2 増減させた実験（SL51I、SL53D）を行った。また、初期値の異なる 5 つのアンサンブルを各実験で実施し、各アンサンブルで 20 年間分の計算を行った。ここでは、Andrews et al. (2009)と同様の方法を用いて、降水量の短期（瞬時）応答と長期応答に降水量の応答を分けて調べた（短期応答は全球平均気温変化に依存しない変化として示され、長期応答は全球気温変化に対する線形変化として示される）。本報告書では実験間の違いが顕著にみられた短期応答の結果のみを記す。

図 3 に各実験の全球平均した年平均降水量の短期応答の結果を示す。正の強制を与えた実験では降水量の短期の減少が起こった。一方、負の強制を与えた実験では降水量の短期の増加が起こった（図

3 では負の強制実験は符号を反転させて示してある。)。実験間で、短期応答の絶対量に関して比較すると、SL53D は SL53I に対し 2 倍程度あった。一方、4CO2 は 025CO2 に対し約 2.5 倍であった。このように、強制の方向により降水量の応答の絶対量が異なることが分かった。CO2 濃度強制実験のこの差には、CO2 濃度の強制に対し陸域植生の気孔抵抗が変わるために生じた効果が含まれる。つまり、CO2 濃度の上昇や低下により、気孔抵抗が上昇し蒸散量が抑制され降水量が減少するために、4CO2 では降水量の減少が強化されたり、025CO2 では降水量の増加が抑制されている。また、太陽定数による降水量の短期応答に対し、CO2 濃度の強制の方が短期応答が顕著であった。これは、CO2 濃度の強制は直接的に大気中の放射エネルギーを増やす(減らす)ため、増加(減少)したエネルギー分を降水による潜熱放出を減らす(増やす)ことでエネルギー収支を 0 に保つ過程が短期に働くためである。一方で、太陽定数による強制は、短期に直接大気に与えるエネルギー量は小さく、地表面を暖めた後に大気を暖めることになるために、全球的にみると短期応答量が小さい。

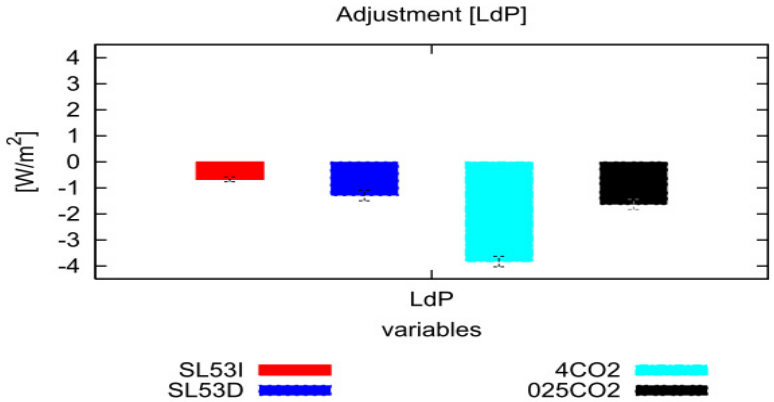



図 3: 全球平均した年平均降水量の短期応答量。降水量に蒸発の潜熱をかけることによって、降水による潜熱として示している。[W $m^{-2}$]。ただし、比較を容易にするため、SL53D と 025CO2 の値は符号を反転させてある。

### f.1.4 考察

地球システム統合モデルを用いた過去の気候再現実験においては、20 世紀後半以降の北部太平洋域における地上気温トレンドの地理分布の再現性が向上している。全球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 世紀気候再現実験の結果を含めて総合的に解析した結果、北太平洋域における地上気温の線形トレンド分布の再現性向上には気候変動要因の変更はほとんど影響しておらず、対流圏エアロゾルモデルの高度化・精緻化および放射スキームの改良が少なからぬ影響を及ぼしていることが示唆された。具体的な原因追及は今後の詳細な解析結果を待たねばならないが、これら二つの効果は切り分けて考えることが難しく、複合した効果が影響している可能性が高い。気候変動要因切り分け実験なども活用しながら、詳細な原因について今後も解明していく予定である。

また、ジオエンジニアリング実験に関連して、太陽定数と CO2 濃度の瞬時強制実験を実施し、降水量の短期応答を調べた。地球温暖化の抑制策として太陽放射量をコントロールすると、CO2 の強制とは異なる降水量の応答をする可能性があることから、それらに対する詳細な応答メカニズムの解明が必要であることが示唆された。

g.1.4　引用文献

Andrews T., P.M. Forster, and J.M. Gregory (2009), A surface energy perspective on climate change. J. Clim., 22, 2557–2570.

Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett, and P.D. Jones (2006), Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, J. Geophys. Res., 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.

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.

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 (2011), MIROC4h - a new high-resolution atmosphere-ocean coupled general circulation model. J. Meteor. Soc. Japan, submitted.

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.Clim., 23, 6312-6334.

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 (2011), MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geosci. Model Dev. Discuss., 4, 1063–1128.

h.1.4　成果の発表

❖　論文

1. Kawase, H., T. Nagashima, K. Sudo, and T. Nozawa (2011), Future changes in tropospheric ozone under Representative Concentration Pathways (RCPs), Geophys. Res. Lett., 38, L05801, doi:10.1029/2010GL046402.
2. Kawase, H., T. Takemura, and T. Nozawa (2011), Impact of carbonaceous aerosols on precipitation in tropical Africa during the austral summer in the twentieth century, J. Geophys. Res., 116, D18116, doi:10.1029/2011JD015933.

❖　著書･報文等

なし

❖　口頭発表

1. Abe, M., H. Shiogama, T. Yokohata, S. Emori, and T. Nozawa (2011), Response of precipitation over land to solar forcing and CO2 forcing. 2011 International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly, Melbourne, Australia.
2. Abe, M., H. Shiogama, T. Yokohata, T. Nozawa, and S. Emori (2011), Effect of change in stomatal conductance on precipitation response to CO2 instantaneous forcing. American

Geophysical Union (AGU) Fall Meeting 2011, December 5-9, San Francisco, USA.

3. 阿部 学, 塩竈秀夫, 横畠徳太, 野沢 徹, 江守正多 (2011), CO2 の瞬時強制による降 水量変化に対する気孔コンダクタンス変化の効果. 2011 年日本気象学会秋季大 会, 名古屋.

## e.1.5 モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究

担当機関：(財) 高度情報科学技術研究機構
研究者名：荒川　隆

### 要旨

サブテーマ「モデル相互比較による温暖化予測不確実性の評価研究」の目標は、不確実性の評価に資するためのソフトウェアプラットフォームとしてカップラー（Jcup）を作成し地球システムモデルに適用することである。平成23年度は、MIROC海洋モデルCOCOをTripolar格子に変更して大気海洋結合を実施するとともに、格子情報とマルチコンポーネント結合を一般化し、汎用性を大幅に向上させた。

昨年度までの研究で、地球システムモデルMIROCの大気モデルー海洋モデル、大気モデルーエアロゾルモデルをJcupで結合し、その性能を評価した。これらのテストにおいて、MIROC海洋モデル（以下COCOと呼ぶ）は北極点を陸域に移動した一般直交曲線座標系を用いていた。今回、北極点をユーラシア大陸と北米大陸の2つに持つTripolar版COCOが開発されたため、Tripolar版COCOとMIROC大気モデル（以下単にAGCMと表記する）をJcupで結合する試験を行った。

次いで、インターフェースの改良を行った。昨年度までは、各プロセッサが担当する格子番号を与えるインターフェースサブルーチンはjcup_def_grid (is, ie, js, je, ks, ke, model_name, grid_name) のようになっていた。これはi, j, kで記述される構造格子を2次元領域分割することを前提としている。このインターフェースを改良し、jcup_def_grid (grid_index, model_name, grid_name) のように、格子番号を記述した1次元配列として与えるようにした。この改良によって、構造格子に限らず、正二十面体格子のような準構造格子や、非構造格子のモデルにも対応できるようになった。

昨年度の改良によって、Jcupは一つの実行単位（タスク）に複数の結合単位（コンポーネント）が存在する限定的なマルチコンポーネント結合に対応するようになった。ただし、このときの改良では、各コンポーネントはそれぞれのタスクのプロセッサを全て使うことを前提としていた。しかし実際には，1タスク内でコンポーネントが並列に実行される、あるいは、複数のタスクにまたがって一つのコンポーネントが実行される場合があり得る。そこで、今年度は、これらの結合パターンを含む様々なパターンの結合が可能なようにJcupを拡張した。

### (1) はじめに

気候変動予測に用いられるシミュレーションモデルは大気大循環モデル、海洋大循環モデル、陸面モデル、氷床モデルなど、個々の物理プロセスをシミュレートする要素モデルによって構成される。気候変動予測におけるモデル間の気候感度のばらつきについて、その原因を調査し低減をはかる上で、要素モデルを交換し応答特性を調べることは重要かつ効果的な研究手法である。他方、これらの要素モデルは各分野の研究者・研究機関によって個別に開発されることが一般的で、それぞれ独自のプログラム構造を持っているため、要素モデルの結合や交換にはプログラム上の差違を吸収するカップリングソフトウェア（カップラー）が不可欠である。上記の観点から、米国ではESMF(Earth System Modeling Framework)プロジェクト (Hill et al. 2004)、欧州ではPRISM (Programme for Integrated Earth System Modeling) プロジェクトにおいてモデルカップリングソフトウェアの研究開発を行っている (Valche et al. 2006, Redler et al. 2009)。

本研究では地球システムモデル（特にMIROCを中心とした地球システムモデル）を構成する個々のサ

ブシステムの不確実性が温暖化予測に及ぼす影響について定量化し、地球温暖化予測の不確実性低減に資するためのソフトウェアとして、地球システムモデルの要素モデル相互交換を可能とするカップラーを開発することを目的とする。

昨年度までの研究で、地球システムモデル MIROC の大気モデルー海洋モデル、大気モデルーエアロゾルモデルを Jcup で結合し、その性能を評価した（荒川 and 吉村 2009, 2010）。大気海洋モデル結合では、既存の補間計算プログラムに比して Jcup による補間計算の効率の高さが実証された。また、大気エアロゾルモデル結合では、3 次元場の大量データ交換時に有効なデータ交換アルゴリズムが確かめられた。平成 23 年度は新たな結合事例として、MIROC 海洋モデルの格子系を Tripolar に改良した Tripolar-COCO を MIROC 大気モデルと結合した。また、カップラーのインターフェースを改良し構造格子だけでなく一般的な格子系に対応できるようにしたほか、従来のマルチコンポーネント結合の方式を拡張し、複数のコンポーネントを自由に組み合わせて結合出来るようにした。

(2) Tripolar 海洋モデルの結合

これまで Jcup の適用事例として、MIROC AGCM と一般格子系の COCO および MIROC AGCM とエアロゾルモデル SPRINTERS の 2 種類の結合例がある。これらは、結合計算における実行速度やメモリ消費と言ったパフォーマンス評価のために実施されており、長期積分時の安定性については検証されていなかった。そこで、COCO の格子系が Tripolar 格子に改良されたことを受けて Tripolar-COCO を AGCM と結合し、1 年積分を実施した。Tripolar-COCO の格子を図1に示す。

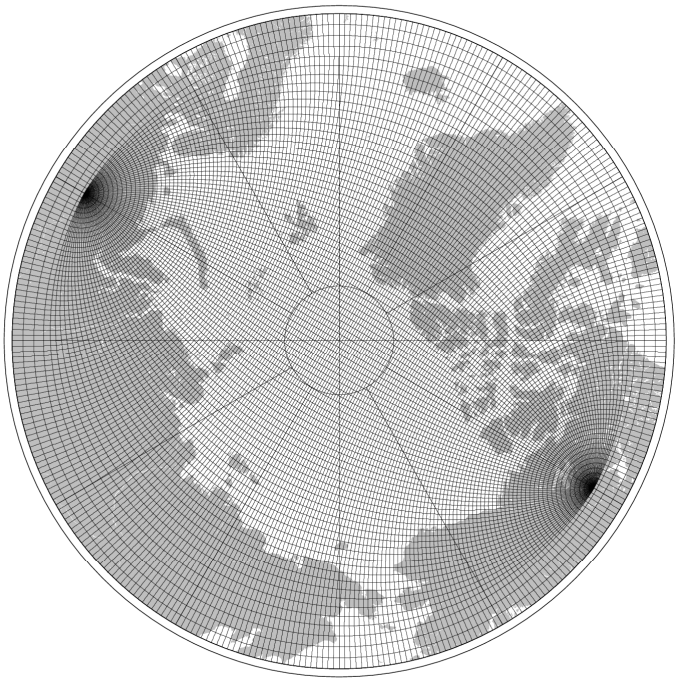


図1 : Tripolar-COCO の格子形状。図では北極域のみを示す。

Tripolar 格子は一般的な緯度経度格子の北極点をある経度線に沿って 2 方向に移動したような形状である。本事例では経度 60°（と 240°）に沿って移動しており、ロシアとカナダに格子の集中点がある。また、北緯 62° 以南では、一般的な緯度経度格子となっている。なお、Tripolar 格子は I,J の 2 次元で記述

できるため、次節で述べる Jcup のインターフェース改良前の旧ヴァージョンの Jcup で結合可能である。テストに用いた解像度は AGCM が T85（256×128）、COCO が 360×192、試験に用いたハードウェアは JAMSTEC 所有の地球シミュレータおよび SGI Altix4700 である。これらのマシンで一年積分を実施、Jcup を用いない場合と結果を比較して計算の妥当性を検証することにより、Jcup が長期積分についても問題なく適用出来ることが確認された。

(2) インターフェースの改良と適用格子の一般化

これまでの Jcup は各プロセッサが担当している格子番号の情報を与えるインターフェースサブルーチン jcup_def_grid において、

```
jcup_def_grid(is, ie, js, je, ks, ke, model_name, grid_name)
  integer, intent(IN) :: is, ie, js, je, ks, ke
  character(len=*), intent(IN) :: model_name
  character(len=*), intent(IN) :: grid_name
```

という引数を用いていた。この場合、格子は (I, J, K) の 3 次元もしくは (I, J) の 2 次元で記述されており、かつ各領域は I 方向、J 方向の 2 次元領域分割により並列化されていることを前提条件としている。これらの情報を用いて Jcup 内部で各次元の格子番号の最大値 I_MAX, J_MAX, K_MAX を計算し、ある格子点 (i, j, k) の格子番号を i+I_MAX*(j-1)+I_MAX*J_MAX*(k-1) として求めていた。しかし、このインターフェースでは、各国の研究機関で開発が進められている Cubic 格子（Adcroft et al. 2004）や正多面体格子（Tomita et al. 2008）を用いた次世代大気モデルのような変則的な格子系のモデルには適用出来ない。そこでインターフェースを改良し、

```
jcup_def_grid(grid_index, model_name, grid_name)
  integer, intent(IN) :: grid_index(:)
  character(len=*), intent(IN) :: model_name
  character(len=*), intent(IN) :: grid_name
```

のように 1 次元の配列として、各プロセッサが担当している格子番号を与えるようにした。これによって、1 次元配列として番号づけ可能なあらゆる格子系について Jcup を適用出来ることになる。

一般化された格子番号付の設定で問題となるのは、「ある番号の格子点をどのプロセッサが保持しているか」、の情報を計算では求める事が出来ないという点である。「ある番号の格子点をどのプロセッサが保持しているか」の情報は、送受信テーブル、すなわちデータ交換時に自プロセッサが何番のプロセッサと送受信をしなければならないか、を求めるために必要であり、その計算はマッピングテーブル情報設定時、すなわちインターフェースサブルーチン jcup_set_mapping_table がコールされた時点で行われる。従来の格子番号設定方法では、それぞれのプロセッサが他プロセッサの is, ie, js, je, ks, ke の値を得ることにより、格子点番号とプロセッサ番号の対応付けが容易に可能である。しかし、一般化された格子番号ではこのような対応付けが計算では出来ないため、格子番号から担当プロセッサ番号への変換テーブルを用意し、送受信テーブルの計算時にはこの変換テーブルを用いるようにした。なお、変換テーブルの配列サイズは全領域の格子サイズと等しいため、メモリを圧迫しないよう、送受信テーブルの計算終了時に変換テーブルを破棄し、メモリを解放するようにプログラムを作成した。

(4) マルチコンポーネント結合への拡張

これまでの Jcup は、複数の実行単位（タスク）のそれぞれに複数の結合単位（コンポーネント）が存在し、かつそれぞれのコンポーネントは所属するタスクの全プロセッサを使う、という事を前提条件としていた。その概念を示したのが図2である。図の例では TaskA に Atm と Land、TaskB に Ocn と Ice のコンポーネントがある（なお、それぞれのコンポーネントは独自の時間ステップを持つことができ、Jcup は適切なタイミングでデータ交換を行うように設計されている）。

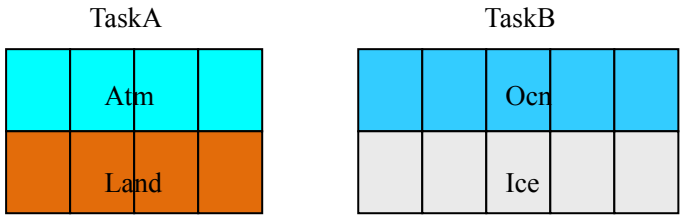



図2：拡張前の Jcup におけるタスクとコンポーネントの関係。各コンポーネントは所属するタスクの全プロセッサを使用する。

しかし、実際の地球システムモデルでは大気モデルや海洋モデルに比して陸面や海氷モデルは計算負荷が軽く、全てのプロセッサをこれらのコンポーネントに割り振ることは、並列効率の面から必ずしも適切ではない。従って、あるタスクの内部を複数のコンポーネントが分割して使用するような計算方法が必要となる。また逆に、複数のコンポーネントの計算結果を全プロセッサで一斉に解析するような計算方法も求められている。これらの計算方法を概念的に示したの図3である。

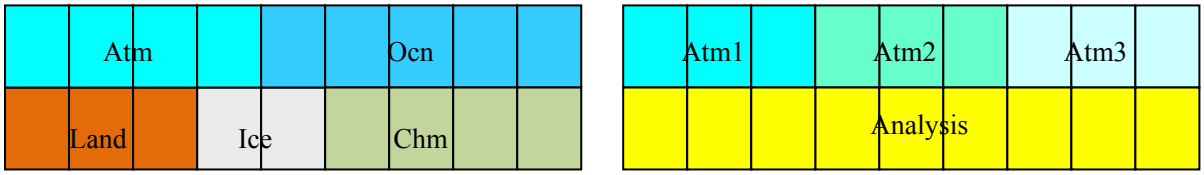



図3：拡張されたコンポーネントの関係。左図は一つのタスクで複数のコンポーネントが並列に動作する場合、右図は複数のタスクで計算された結果を全プロセッサで解析する場合を表す。

図3に示すような結合が可能となるよう Jcup を改良し、機能を拡張した。改良の中心となったのはコンポーネント間のデータ交換ロジックである。MPI において、データ交換の単位となるのはコミュニケータである。従来の Jcup は図4に示す通り、タスク毎にコミュニケータを生成し（Local Communicator）、タスク内部のコンポーネント間データ交換は Local Communicator を通じて行うようになっていた。一方タスク間のデータ交換については、MPI の機能であるタスク間コミュニケータ（Inter Communicator）を用いて行っていた。しかし、MPI の規格では、図3左図のように各コンポーネントでプロセッサが重なる場合、すなわち各 Local Communicator が同じプロセッサを含む場合、これらのコミュニケータ間で Inter Communicator を生成することが出来ない。

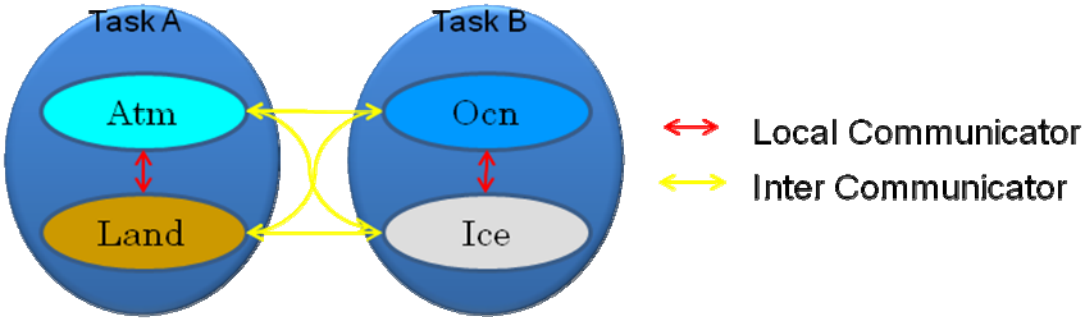



図4：従来の Jcup のコミュニケータ。タスク内では Local Communicator を、タスク間は Inter Communicator を用いて通信を行う。

そこで、今回の改良では Inter Communicator を廃し、図5に示すように各コンポーネントで Local Communicator を生成した上で、更に 2 つのコンポーネントのペア毎にコンポーネント間通信用のコミュニケータを生成するようにした。

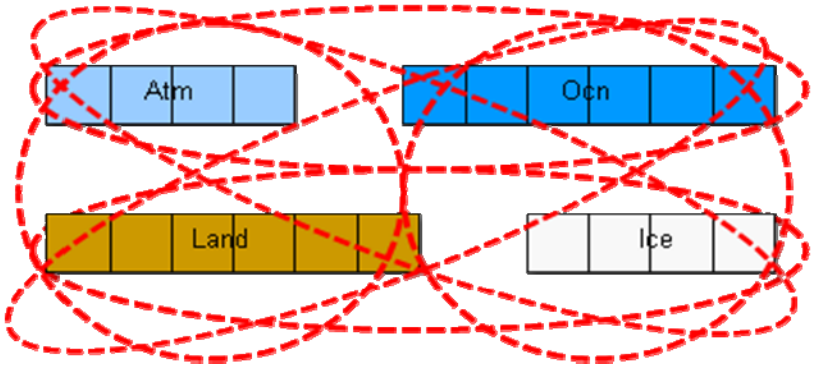



図5：改良後の Jcup のコミュニケータ。コンポーネント内の Local Communicator に加えて、2 つのコンポーネントのペア毎にコンポーネント間通信用コミュニケータ（図の赤い点線）を生成するようにした。

これらの改良に伴って、タスクの概念はなくなり、各コンポーネントは実行単位に関わらず単一のコンポーネントとして取り扱えるようになった。タスクとコンポーネントという 2 つのレベルからコンポーネントのみの 1 レベルへと概念が単純化されたことにより、コードも単純化され、改良前は 17800 行だった Jcup のコードは改良後 16000 行とコンパクトになった。

(5) テスト計算

改良後の Jcup を MIROC5.0 の大気海洋結合に適用し、Jcup を用いない場合とバイナリレベルで結果が一致することを確認した。更に、複数の簡易モデルを用いて複雑な通信パターンを含むデータ交換テストを行った。用いた簡易モデルは Atm, Land, Ocn, Ice, Chm の 5 種類である。これらを図6で表されるような組み合わせで実行し、データ交換を行った。なお、図では便宜上、TaskA, TaskB, TaskC の3つのタスクがあるように表現されているが、前述の通り Jcup の内部ではタスクの区別は存在しない。

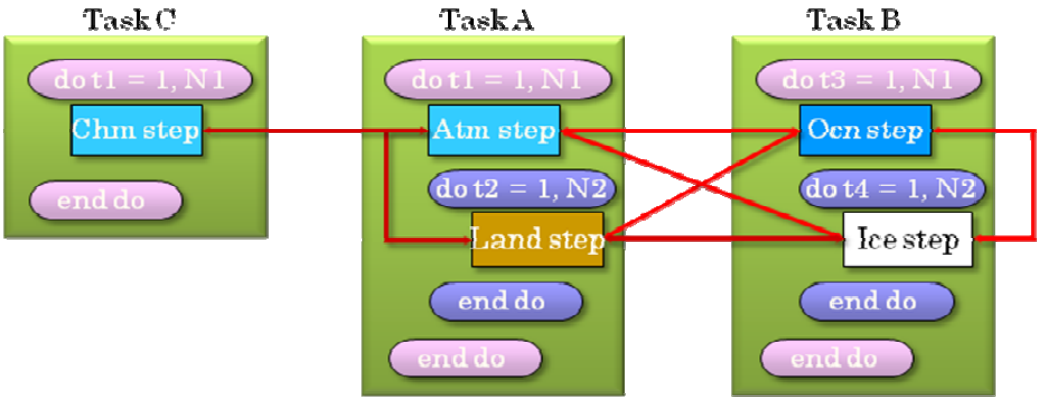



図6：テスト計算における各簡易モデルの実行方法とデータ交換パターン。

各モデルのΔTとデータ交換タイプおよびデータ交換時間間隔は表1と表2に示されるとおりである。データ交換タイプ serial は、2モデルが交互に時間積分を行う場合を、parallel は 2 モデルが並列に時間積分を行う場合を意味する。immediate は時間積分のパターンによらず直ちにデータを送信／受信する場合を意味する。

表1：各簡易モデルのΔT

| Component | ΔT |
|---|---|
| Atm | 60 |
| Land | 30 |
| Ocn | 180 |
| Ice | 30 |
| Chm | 120 |

表2：テスト計算におけるデータ交換タイプと交換間隔

| Components | Exchange Type | Interval |
|---|---|---|
| Atm-Chm | serial | 120 |
| Atm-Ocn | parallel | 180 |
| Atm-Ice | parallel | 60 |
| Atm-Land | parallel | 60 |
| Land-Ice | parallel | 60 |
| Ocn-Land | parallel | 180 |
| Ocn-Ice | immediate | 180 |

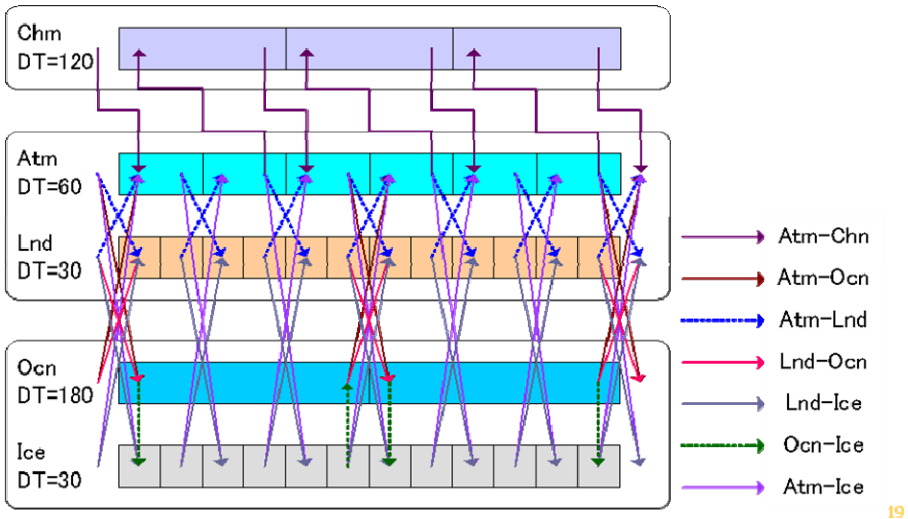



図7：テスト計算の結果。実際には、Atm と Chm は交互にデータを交換しているので各時間ステップで相手モデルの計算待ちが発生している。

図7がテスト計算におけるデータ交換パターンである。図のような複雑なデータ交換も問題なく実行されており、Jcup の妥当性が検証された。

(5) その他の改良

Jcup は国内の複数の研究機関で用いられる日本標準カップラーとなることを目標に開発されている。このように気候シミュレーションの基盤ソフトウェアとして広く利用される場合、ログ出力やエラー処理が適切に行われる事が極めて重要であり、また利用マニュアルも不可欠である。そこで今年度は、ログ出力プログラムを改良し、利用マニュアルを整備した。Jcup のログ出力はファイルに対しての出力と標準エラー出力の 2 つの出力先がある。またログの詳しさについては、ログを出力しない、標準的なログを出力する、詳細なログを出力する、の 3 通りがある。昨年度までは、これらの設定は Jcup のコンパイル時にプリプロセッサで指示するようになっていた。これを修正し、設定ファイルで動的に切り替えられるようにした。また、エラー時にはログの指定によらずログファイルと標準エラー出力にエラーログを出力するようにした。

f.1.5　考察

本年度は，Tripolar 海洋モデルを結合し、長期積分試験を実施するとともに、カップラーの機能を拡張し、対応格子系の一般化、およびコンポーネント組み合わせの一般化を行った。この機能拡張により、当初目標としていた仕様を満たす結合プログラムが完成した。更に、広範囲に利用されることを想定し、ログ出力やエラー処理の機能を充実させ、利用マニュアルを作成した。

今後は、利用実績を重ねることで安定性を向上させ、必要に応じて機能を拡張してゆくことになる。平行して、サポート体制の構築や利用に伴うライセンスの整備も行ってゆく予定である。

g.1.5　引用文献

Hill, C., et al. (2004), the Architecture of the Earth System Modeling Framework, Comp. in Science and Engineering, 6, 12-28.

Valche, S., et al. (2006), PRISM and ENES: A European approach to Earth System Modeling, Concurrency Computat: PractExper, 18, 231-245.

Redler, R., et al. (2009), OASIS4 – a Coupling Software for Next Generation Earth System Modeling, Geoscientific Model Development Discussion, 2, 797-843

荒川隆,吉村裕正(2009): 気候モデルを対象とした結合ソフトウェアの性能評価，情報処理学会誌 コンピューティングシステム，2, 95-110

荒川隆, 吉村裕正(2010):気候モデル MIROC における物理プロセスの結合と性能評価, Transactions of JSCES, vol.2010, No.201000006

Adcroft, A., et al. (2004), Implementation of an Atmosphere-Ocean General Circulatio Model on the Expanded Spherical Cube, Monthly Weather Review, 132, 2845-2863

Tomita, H., et al. (2008), A new approach to atmospheric general circulation model: global cloud resolving model NICAM and its computational performance, J. Scientific Computing, 30, 2755-2776.

h.1.5　成果の発表

❖　論文

1. Arakawa, T., H. Yoshimura, F. Saito, K. Ogochi (2011), Data exchange algorithm and software design of KAKUSHI coupler Jcup, Procedia Computer Science 4, 1516-1525, doi:10.1016/j-procs.2011.04.164

❖　口頭発表

1. Arakawa, T. (2011), Design and implementation of KAKUSHIN Coupler Jcup, The 13th International Workshop on Next Generation Climate Models for Advanced High Performance Computing Facilities, 2011/3/29
2. 荒川隆, 吉村裕正, 齋藤冬樹, 大越智幸司(2011), 21 世紀気候変動予測革新プログラムにおけるカップラー開発(最終報), 日本気象学会秋季大会, 名古屋, 2011/11/16

## e.1.6 モデルアンサンブルによる地球システムモデルの不確実性定量化

担当機関:電力中央研究所・環境科学研究所
研究者名:仲敷　憲和、野原　大輔、大庭　雅道、吉田　義勝、三角　和弘、津旨　大輔、西澤　慶一

**要旨**

米国大気研究センター(NCAR)の最新の地球システムモデル CESM1 を用い、長期気候安定化を目的に設計された Z650 シナリオと RCP2.6 シナリオに基づいた長期気候予測実験を実施した。両シナリオの $CO_2$ 排出量は 2020 年頃ピークに達した後、減少傾向に転じ、Z650 シナリオの場合はゼロ排出、RCP2.6 シナリオの場合は負の排出に至る。Z650 (RCP2.6) シナリオでは、2090 (2050) 年に 522 (472) ppm の大気中 $CO_2$ 濃度の最大値となり、昇温量については 2110 (2060) 年に 2.5 (2.1) 度のピーク値に達した。その後、Z650 シナリオに基づき予測された気温は、RCP2.6 シナリオと同様に徐々に低下していく。この結果は、Z650 シナリオによる長期的な気候安定化が、気候-炭素循環システムの科学的観点から成立し得るものであることを示している。また、気候や炭素循環の長期的な変化の不確実性を把握するため、CESM1 と海洋研究開発機構の地球システムモデルである MIROC-ESM による $CO_2$ 漸増実験の結果を比較した。CESM1 における気温の昇温量は MIROC-ESM と比較して小さく、海氷面積の減少の程度も少なかった。海洋の炭素循環は、両モデルでほぼ一致しているが、陸域炭素循環の長期的な変動には大きな違いが見られた。

### (1) はじめに

大気海洋結合モデルに加えて炭素循環等の生物化学過程を含めた地球システムモデルが、様々な研究機関で開発されている。しかし、地球システムを構成する生物化学過程の中には、まだ科学的に不確実な部分が多い。従って、地球システムモデルによる長期気候変動予測の信頼性を向上させるには不確実性の把握・低減が必要となる。本課題では、地球システムモデルを構成する個々のサブモデルである陸域や海洋の生物化学モデルのモデル間相互比較を実施してきた。これらの結果、動的植生モデルの気候変化に対する感度の違いが陸域炭素循環に影響することや、海洋の鉄循環の表現が海洋炭素循環に影響を及ぼすことが示されている。

本報告では、モデル間相互比較のまとめとして、地球システムモデルによる現在気候や温暖化予測の不確実性について検討する。比較に用いたモデルは、米国大気研究センター(NCAR)が開発した CESM1 (Gent et al. 2011)、海洋開発研究機構が開発した MIROC-ESM (Watanabe et al. 2011)、インパルス応答に基づく気候変化・炭素循環の簡易モデルである SEEPLUS (Tsutsui 2011)の 3 つである。また、将来の気候安定化を見据えた温室効果ガス排出シナリオとして提唱されているゼロ排出気候安定化シナリオ(Z650 シナリオ; Matsuno et al. 2012)に基づき、CESM1 と SEEPLUS を用いた長期気候予測実験を実施し、気候および炭素循環に生じる長期的な変化を明らかにする。

### (2) モデルと実験設定

本研究に用いられる CESM1 は、大気海洋結合モデルに炭素循環を考慮した生物化学過程が結合されて構成されている。CESM1 は、以前のバージョンの大気海洋結合モデルと比較して、炭素循環過程の導入や様々な物理過程の改良が行われており、気候再現性も大きく向上している。平衡気候感度は約 3.2 度(Bitz et al. 2011)であり、IPCC AR4 において評価されたモデル群と比較して平均的な値となってい

る。一方、SEEPLUS は、大気中の $CO_2$ 濃度に対して気温や炭素収支をインパルス応答で計算する簡易気候モデルである。ここでは、モデル間の比較を容易にするために、平衡気候感度が CESM1 と同じになるように調整した SEEPLUS を用いる。

長期気候予測実験として、ゼロ排出シナリオ Z650 および低排出シナリオ RCP2.6 の $CO_2$ 排出量を入力条件とした温暖化実験を実施する。Z650 シナリオは、近い将来の排出増を許容しつつも長期的な気候リスクを避けることを目的として、従来の気候安定化の概念である $CO_2$ 濃度一定という考え方とは異なり、炭素ゼロ排出安定化を目標とした排出シナリオである（図 1）。Z650 シナリオでは、炭素排出量は 2020 年頃にピーク（年当たり 11 GtC）を迎える。その後、排出量は徐々に減少し、2160 年以降はゼロ排出となる。この Z650 シナリオの炭素排出経路は、SEEPLUS を用いて設計されたものである。炭素排出経路以外の条件は、RCP2.6 シナリオに準拠しているが、土地利用には 2005 年以降変化が生じないものとした。

次に、CESM1、MIROC-ESM、SEEPLUS のモデル間相互比較のため、工業化前の状態を初期値として $CO_2$ 濃度を年率 1%で増加させる 1%漸増実験を実施した。これにより、モデル間の物理気候過程や炭素循環過程の差異を評価する。

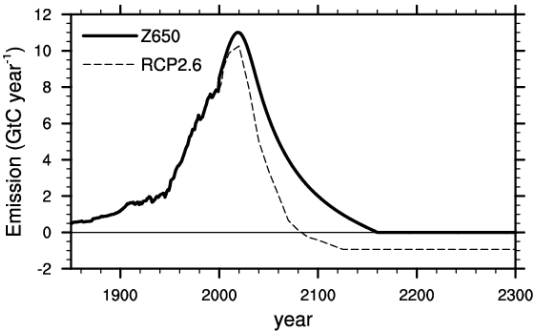



図 1：Z650 シナリオ（実線）、RCP2.6 シナリオ（点線）の $CO_2$ 排出量の時間変化。

(3) 長期気候予測実験

図 2 に大気中 $CO_2$ 濃度の時間変化を示す。CESM1 と SEEPLUS の予測結果は、20 世紀後半以降、観測と比較してやや高く、2005 年時点では、観測の約 380 ppm に対し CESM1 は約 400 ppm と 20 ppm 程度高い値を示している。CESM1 を用いた 21 世紀以降の予測では、Z650 シナリオの場合、2090 年頃に 522 ppm のピーク濃度となり、2300 年時点には 450 ppm 近くまで減少する。一方、RCP2.6 シナリオの場合、2050 年頃に 472 ppm のピーク濃度となった後、2300 年時点で約 360 ppm まで減少する。Z650、RCP2.6 シナリオともに、排出量のピークは 2020 年であるが（図 1）、RCP2.6 シナリオの排出量は、ピーク後急激に減少するため、濃度のピークは Z650 シナリオより早く訪れる。また、SEEPLUS の結果は、CESM1 と比較して大気中 $CO_2$ 濃度のピークが早く、ピーク値は低い。

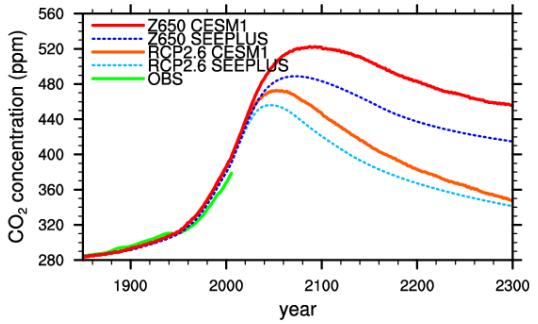



図 2：各シナリオに基づく予測と観測の大気中 $CO_2$ 濃度の時間変化。

図 3 に全球平均地上気温の時間変化を示す。CESM1 と SEEPLUS は、20 世紀後半から観測と比較して昇温量をやや過大に評価しており、2005 年の時点で観測では 0.8 度の昇温に対し、CESM1 では 1.2 度の

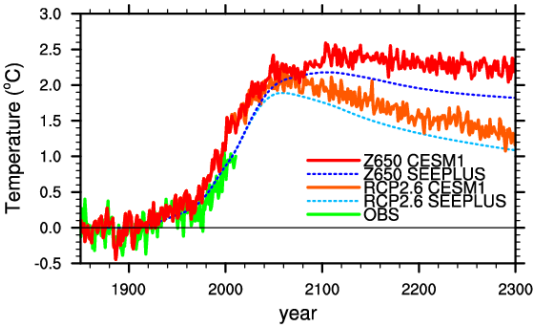



図 3：各シナリオに基づく予測と観測の全球平均地上気温の時間変化。

昇温となっている。この過大評価の原因の一つは、大気中 $CO_2$ 濃度を過大に評価していることである（図2）。CESM1 の予測による昇温のピークは、Z650 シナリオでは 2110 年頃の 2.5 度、RCP2.6 シナリオでは 2060 年頃の 2.1 度となっている。Z650、RCP2.6 シナリオともに、昇温のピークに達した後は、長期的な気温低下を示している。2100 年から 2300 年までの 200 年間に Z650 シナリオでは 0.2 度の低下、RCP2.6 シナリオでは 0.6 度の低下が見られる。この結果は、ゼロ排出であっても気候の回復が期待できることを示している。一方、SEEPLUS では、ピークの時期は CESM1 の予測とほぼ一致しているが、昇温量は相対的に低く、長期的な気温低下傾向も強い。このような SEEPLUS と CESM1 の差は、大気中 $CO_2$ 濃度の差（図2）に加えて、$CO_2$ 以外の放射強制力や海洋の熱慣性の取り扱いの差によると考えられる。

図 4 に、Z650 シナリオに基づき CESM1 で予測された、気温と降水量の変化傾向の地域分布を示す。21 世紀中は高緯度地域や陸域で昇温傾向が顕著である（図 4a）。22 世紀に入ると、全球平均気温は長期的な低下傾向となる（図 3）が、低下傾向は陸域と北極海周辺が中心で、南半球高緯度地域と北大西洋北部では、逆に昇温傾向が継続している（図 4c）。このように、気候の回復過程においては非対称的な応答が見られた。一方、21 世紀中の降水量は熱帯地域や高緯度地域で増加し、ヨーロッパや南アメリカ北東部や中緯度の海洋上で減少している（図 4b）。22 世紀に入ると降水量も回復傾向が見られ、ヨーロッパや南アメリカ北東部の降水量は増加に転じている（図 4d）。21 世紀末までの気温や降水量の変化傾向のパターンは、IPCC で報告されている地理的分布(IPCC 2007)とほぼ一致している。

CESM1 による南北両半球における夏季の海氷面積の長期変化を図 5 に示す。北半球では 9 月に、南半球では 3 月に海氷面積が極小となる。海氷面積の縮小は、20 世紀後半から始まっているが、2000 年以降、海氷面積の縮小速度は低下している。Z650 シナリオの場合、北半球では 2120 年頃に面積が最小の $2.1\times10^6$ km$^2$ となり、以降、面積は徐々に拡大する。南半球の海氷面積は 2100 年頃に $5.0\times10^6$ km$^2$ まで減少し、以降、海氷面積はほぼ維持される。この南北間の長期変化傾向の差は、図 4 に示した 22 世紀中の北極海周辺の気温の低下、南極海周辺の気温の上昇と関連していると考えられる。以上のように、

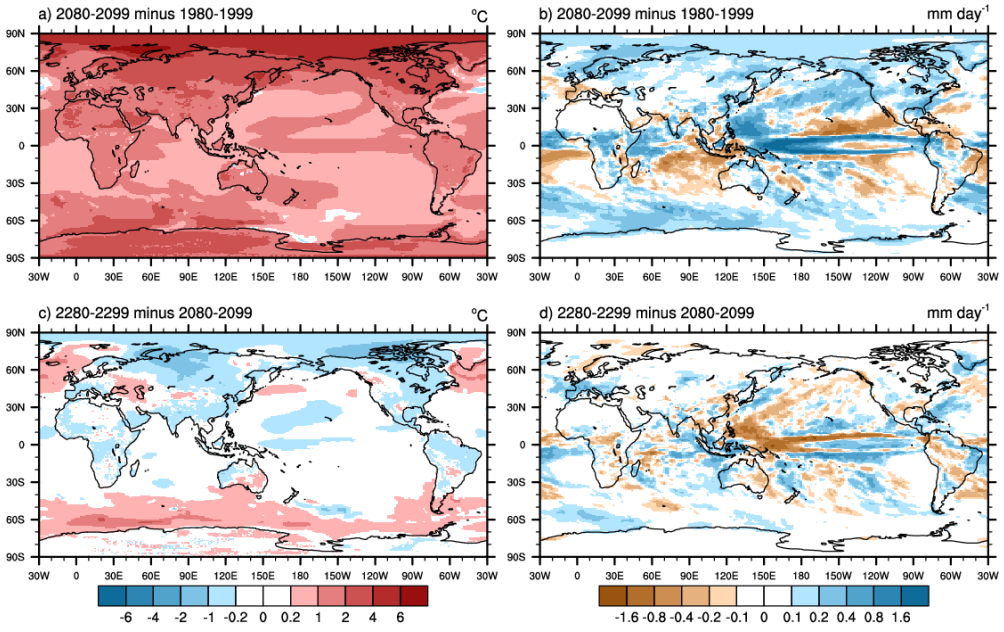



図 4：Z650 シナリオに基づき CESM1 を用いて予測した年平均（左）気温と（右）降水量の変化（20 年気候平均場の差）の分布。（上段） 20 世紀末から 21 世紀末、（下段）21 世紀末から 23 世紀末にかけての変化を示す。

CESM1 の予測では、Z650 シナリオの場合も海氷の消滅には至らないという結果が得られた。なお、RCP2.6 シナリオの場合は、両半球ともに 2070 年頃に最小面積を迎えた後、全球気温の低下とともに（図 3）、海氷面積は徐々に回復する。

次に、炭素循環に着目する。海洋の $CO_2$ 吸収量（図 6）は、2000 年以前は CESM1 と SEEPLUS で類似した変動を示しているが、2000 年以降は、シナリオに依らず SEEPLUS の $CO_2$ 吸収量が 0.2～0.4 GtC 年$^{-1}$ 程度高くなっている。CESM1 の結果に基づき、海洋表層と深層の炭素収支を確認すると、排出量がゼロまたは負に至る前に、海洋表層の炭素収支量は負になっていた。これは、大気中 $CO_2$ 濃度の低下と海洋表層の飽和によって、海洋表面から取り込まれる $CO_2$ 量が低下したためである。生物ポンプによる海洋表層から深層への炭素の輸送量は、温暖化前の 20 世紀前半が約 5.4 GtC 年$^{-1}$ であったのに対し、温暖化後の 2100 年頃には Z650、RCP2.6 シナリオともに 5.2 GtC 年$^{-1}$ であり、顕著な変化は生じていなかった。Z650 シナリオの場合、CESM1 と SEEPLUS の両モデルとも、2300 年までの計算期間を通じて、海洋の $CO_2$ 吸収量は正であった。一方、RCP2.6 シナリオの場合には、両モデルとも、2300 年までに海洋は $CO_2$ 放出に転じた。

一方、陸域による $CO_2$ 吸収量も 2020 年頃までは両モデルとも類似した変動を示している。しかし、CESM1 による陸域吸収のピークは SEEPLUS よりも 10～20 年程度早く、2100 年頃迄は CESM1 の方が吸収量の少ない状態で推移する。2100 年頃には、SEEPLUS の $CO_2$ 吸収量は CESM1 を下回るようになり、Z650 シナリオの場合には 2180 年頃、RCP2.6 シナリオの場合には 2120 年頃から、SEEPLUS では陸域が $CO_2$ の放出源に転じている。一方、CESM1 における陸域の炭素収支は、23 世紀後半に至っても、ほぼ均衡しており、SEEPLUS とは異なる挙動を示している。

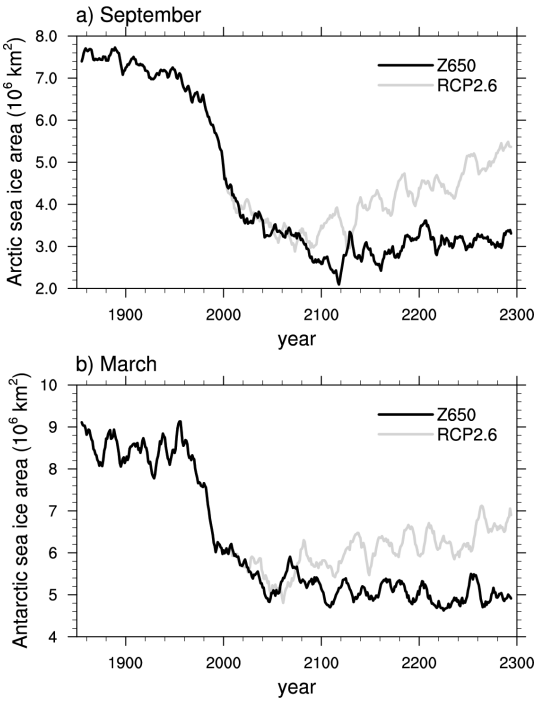



図 5：Z650 シナリオに基づいた温暖化予測実験における a)北極海と b)南極海の夏季の海氷面積の時間変化。

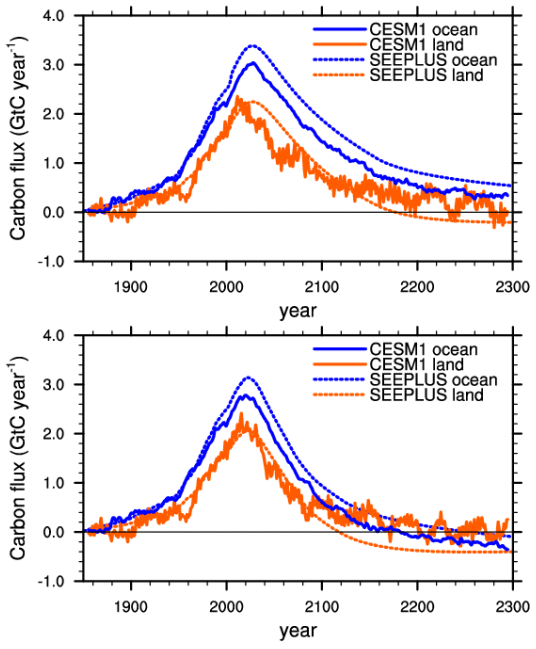



図 6：Z650 シナリオ（上段）および RCP2.6 シナリオ（下段）に基づいた温暖化予測における、海洋（青）と陸域（赤）の $CO_2$ 吸収量の時間変化。実線（点線）は CESM1（SEEPLUS）の予測結果を示す。

気候-炭素循環フィードバックに関しては、Z650 シナリオとは異なる積算排出量 2000 GtC の排出経路に基づいて CESM1 による温暖化実験を行い、気候-炭素循環フィードバック解析(Friedlingstein et al. 2006)を実施した。これにより、CESM1 ではフィードバックにより大気中 $CO_2$ 濃度が 2～10 %程度上昇するという結果が得られている（図省略）。また、CESM1 では、陸域よりも海洋の炭素循環の方が、気温変化の影響を受けやすいという結果も得れらた。

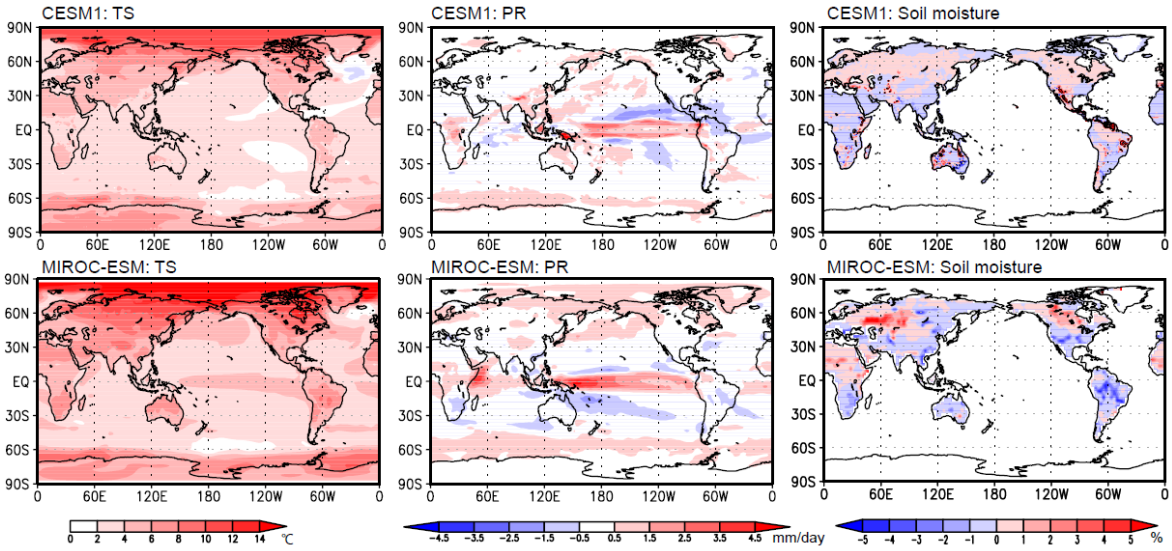



図 7: （上段）CESM1 と（下段）MIROC-ESM の漸増実験における（左）地上気温、（中）降水量、（右）土壌水分量の変化の地域分布。120～139 年の 20 年気候平均場と 1～20 年の気候平均場との差を示す。

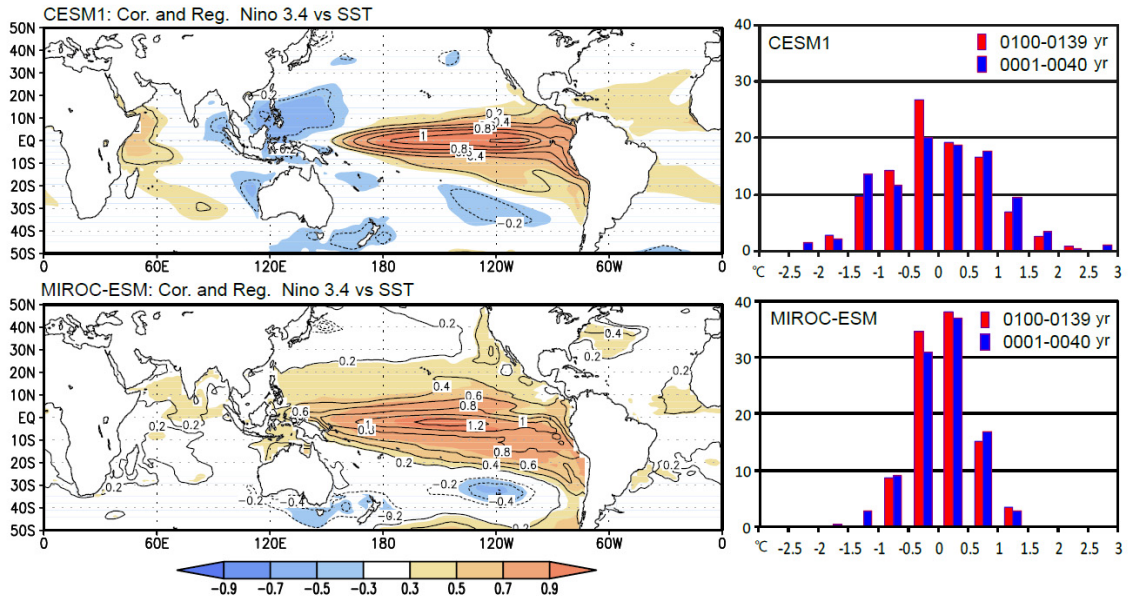



図 8: （左）Nino-3.4 指数に対する海面水温分布の相関（陰影）、回帰係数（等値線）と、（右）Nino-3.4 指数の頻度分布。上段に CESM1、下段に MIROC-ESM を示す。

(4) 複数の地球システムモデルの比較

地球システムモデルの不確実性を把握するため、CESM1、MIROC-ESM、SEEPLUS による 1%漸増実験の結果を比較する。まず、図 7 に CESM1 と MIROC を用いて予測された物理気候場の変化の地域分布を示す。両モデルの気温の変化パターンは、北半球高緯度や陸域で昇温傾向が顕著に表れているが、その強度は MIROC-ESM の方が大きい。過渡的な気候応答は CESM1 が約 1.7 度、MIROC-ESM が約 2.2 度となっている。両モデルの降水量の変化パターンはおおまかに一致し、熱帯地域や高緯度地域で増加傾向が、南北 20° ～30° では減少傾向が見られる。土壌水分量の変化は基本的には降水量の変化と類似しているが、気温の上昇に伴う蒸発散量の増加の影響で、多くの地域で減少傾向となる。MIROC-ESM の土壌水分量の変化幅は CESM1 より大きく、特に南アメリカやアジアなどで大幅な低下が見られる。ただし、これらの気候場の変化の地域分布は、IPCC で報告されている地理的分布とほぼ一致している。

海洋の変動パターンとして現れる ENSO と炭素循環は密接に関係していることが知られている(Le Quéré et al. 2009)。図 8 に、Nino-3.4 指数に対する海面水温分布の相関と Nino-3.4 指数の頻度分布を示す。Nino-3.4 指数は、5°S-5°N、170°-120°W における海面水温偏差として定義される。両モデルが再現する ENSO に伴う海面水温変動は比較的観測とよく似ている。また、どちらのモデルにおいても、温暖化にともなって強い ENSO の発生が抑えられており、Nino-3.4 指数の標準偏差は、約 100 年後には 15%程度抑制されるという結果を示した。

一方、温暖化後の海氷面積には両モデルに大きな差が見られる(図 9)。北極の夏季の海氷面積は、MIROC-ESM では 50 年目頃から消滅するが、CESM1 では 140 年目でも完全な消滅までは至らない。同様に南極の夏季の海氷の減少傾向も、MIROC-ESM で顕著に見られる。

次に、炭素循環過程のモデル間比較を行う。図 10 に、CESM1、MIROC-ESM、SEEPLUS による陸域と海洋の $CO_2$ 吸収量の時間変化を示す。陸域の炭素吸収量は、CESM1 では 50 年以降はほぼ 2GtC 年$^{-1}$程度の吸収量が持続しているのに対し、MIROC-ESM では、初期の数十年は 4 GtC 年$^{-1}$を超

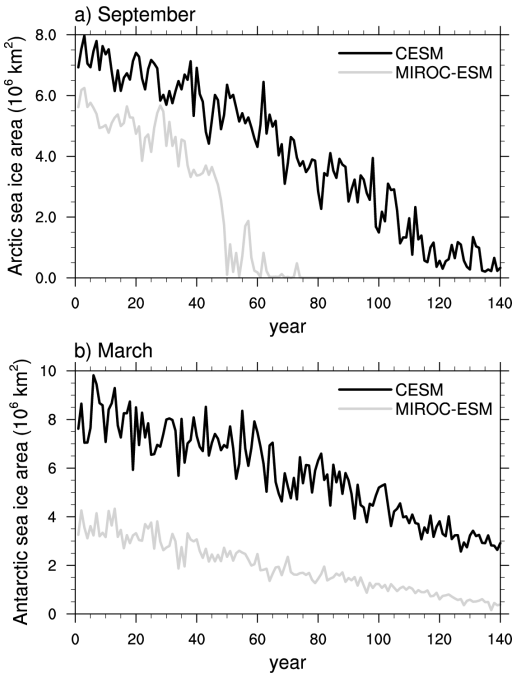



図 9：漸増実験における a)北極海と b)南極海における夏季の海氷面積の時間変化。

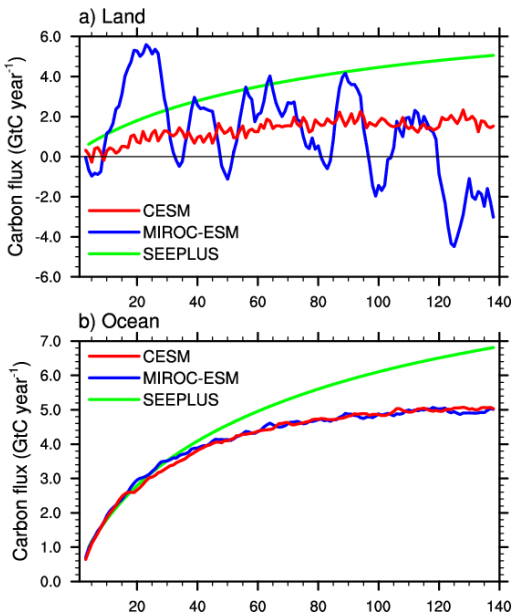



図 10：漸増実験における a)陸域、b)海洋の $CO_2$ 吸収量の時間変化(5 年移動平均)。

える吸収量が見られるが、長期的には減少し、120 年を過ぎるあたりから放出に転じている。また、数十年スケールの変動も非常に大きい。SEEPLUS では、陸域の炭素吸収量は予測期間中は常に増加している。海洋の炭素吸収量は、CESM1 とMIROC-ESM でほぼ一致する変化を示している。一方、SEEPLUS では、40 年頃までは CESM1 や MIROC-ESM とほぼ同量の吸収量となっているが、以降は吸収量が多くなっている。モデルごとに気候-炭素循環フィードバックの効果も異なると推測されるため、フィードバック効果の相互比較も必要である。

f. 1. 6　考察

Z650 シナリオは、大気中 $CO_2$ 濃度の安定化による気候安定化の概念とは異なり、将来の人為的な $CO_2$ 排出をゼロとする新しい概念に基づいて提案されたシナリオである。$CO_2$ 排出をゼロとすることで、自然の $CO_2$ の吸収により濃度を徐々に下げ、海面上昇等の長期的な気候リスク回避を避けることを目標としている。Z650 シナリオは、簡易気候モデルである SEEPLUS で設計されており、長期的な気候や炭素循環の変化を詳細に評価するためには、大気海洋大循環モデルに基づく複雑な地球システムモデルを用いた数値実験による検証が必要とされていた。Z650 シナリオに基づいた CESM1 を用いた長期予測から、2100 年頃に大気中 $CO_2$ 濃度や気温の上昇のピークが見られるが、その後は徐々に回復することが確認された。この結果は、長期的な気候リスクを回避するという Z650 シナリオの目的が、科学的な観点からは成立し得るものであることを示している。

CESM1 と MIROC-ESM を用いて炭素循環の比較に関しては、海洋による $CO_2$ 吸収の効果よりも、陸域による $CO_2$ 吸収量の差が顕著であり、陸域炭素循環にモデル間で大きな不確実性があることが改めて確認された。さらに、気候-炭素循環フィードバックによる長期的な陸域炭素循環の変化傾向にも不確実性が存在する。今後、両モデル以外の CMIP5 モデルの結果についても検討を行い、気候-炭素循環フィードバックも含めて、生物地球化学過程に由来する地球システムモデルの不確実性をより定量的に把握する必要がある。

g. 1. 6　引用文献

Bitz, C., and Coauthors, (2012), Climate sensitivity of the Community Climate Model Version 4. J. Climate, in press.

Friedlingstein, P., and Coauthors, (2006), Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. J. Climate, 19, 3337-3353.

Gent, P., and Coauthors, (2011), The Community Climate System Model version 4. J. Climate, 24, 4973-4991.

Le Quéré, C., M. R. Raupach, J. G. Canadell, and G. Marland, (2009), Trends in the sources and sinks of carbon dioxide. Nature Geosci. 2, 831-836.

Matsuno, T., K. Maruyama, and J. Tsutsui, (2012), Equilibrium stabilization of the atmospheric carbon dioxide via zero emissions - an alternative way to stable global environment part 1: examination of traditional stabilization concept. Proc. Japan Acad., Ser. B, (submitted).

Tsutsui, J., (2011), SEEPLUS: a simple online climate model. J. Japan Soc. Civ. Eng. Ser. G., 67, 134-149.

Watanabe, S., and Coauthors, (2011), MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geosci. Model Dev., 4, 845-872.

h.1.6　成果の発表

❖　口頭発表

1. 野原大輔, 大庭雅道, 吉田義勝 (2011), 平衡気候感度に対する放射強制力と気候フィードバックのバランス変化, 日本気象学会春季大会, 東京, 2011/5/21.
2. Nohara, D., M. Ohba, and Y. Yoshida (2011), Variable Balance among Radiative forcing, Ocean Heat Uptake, and Climate Feedback for Equilibrium Climate Sensitivity, American Geophysical Union fall meeting 2011, 2011/12/8.
3. Misumi, K., F.O. Bryan, K. Lindsay, J.K. Moore (2011), Oceanic Iron Cycle Change Simulated by CESM1, 16th Annual CESM Workshop, 2011/06/20.

## e.1.7 気候変化シミュレーションにおける雲-放射フィードバック不確実性評価

担当機関:東京大学、国立環境研究所
研究者名:渡部 雅浩、塩竈 秀夫

**要旨**

CMIP5 に提出する新版気候モデル(GCM)である MIROC5 を用いて、理想的な温暖化実験における地表気温上昇およびそれに寄与する気候フィードバックのメカニズムについて調べた。具体的には、平衡気候感度が前バージョンである MIROC3.2 よりも低くなった理由が、雲短波放射フィードバックの符号の変化によるものであることを明らかにし、さらにバージョン間(敷衍すればモデル間)のフィードバックの相違を、2 種類の異なるモデルアンサンブルを作成して調べ、今後の研究に対して発展性のある成果を得た。

(1) はじめに

昨年度までの報告書で述べてきたとおり、第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト(CMIP5)および IPCC 第 5 次評価報告書(AR5)に向けて開発された MIROC グループの次期主力モデルである MIROC5 を用いて、さまざまな成果が得られている。今年度は、気候変化シナリオにおいて最も困難な課題である、気候感度および雲フィードバックのモデル不確実性に切り込んで研究を展開した。MIROC5 における雲の平均場については、既に CMIP5 の他モデルとの比較をすすめており、また前バージョンの MIROC3.2 との間のフィードバックの相違についても詳細に調べている(成果の 1、4)。雲の平均場は MIROC5 で改善されているが、よく知られている通り、平均状態が観測に近いモデルが「正しい」フィードバックを示す保証はないため、複数の GCM において雲フィードバックにばらつきが生じる要因を理解することが重要である。しかし、CMIP 参画モデルは(パラメタリゼーションや解像度など)相互に違いが大きいため、マルチモデルアンサンブル(MME)のみの解析から有益な知見を得ることは困難である。そこで、MIROC をベースとした異なる種類のアンサンブルを作成して、上記の問題にあたることにした。

(2) MIROC5 物理摂動アンサンブル

MME の構造的な違いとは別に、単一モデル内で不確実性のあるパラメータに摂動を与え、複数のわずかに異なるモデル群を用いてアンサンブルを作成する方法を、一般に物理摂動アンサンブル(PPE)と呼ぶ。PPE は既に複数のモデルセンターで行われており、我々も以前に MIROC3.2 を用いた PPE を作成している。ここでは、MIROC5 の PPE を以下のような方法で作成した(成果の 2)。

まず、MIROC5 大気部分(AGCM)のみで、積雲対流、雲物理、境界層、エアロゾル、地表面過程から 21 のパラメータを選び、それぞれを上下限の値に変更して 5 年程度の積分を行った。これにより、単一パラメータに対する大気上端(TOA)放射収支の依存性を推定できる。このデータから、21 次元パラメータ空間で摂動の組を求めるエミュレータと呼ばれる統計手法を用いて、5000 組のパラメータ摂動を生成する。このうち、TOA 放射収支の標準実験からのずれ(すなわち気候ドリフト)が最も小さい 35 メンバーで、結合モデルを用いて積分を行う。PPE では、コントロール実験(産業革命前の放射境界条件)および $CO_2$ 濃度瞬時 4 倍増実験をそれぞれ 20 年行い、それらの差からフィードバックを見積もる。

上記の方法で作成されたアンサンブルで、$CO_2$ 濃度 4 倍増時の放射フィードバックへの各成分の寄与を見たのが図 1 である。過去の研究で指摘されているように、MIROC5 PPE でも雲域の短波放射の変化

が全フィードバックのメンバー間のばらつきに最も寄与していることが分かる。

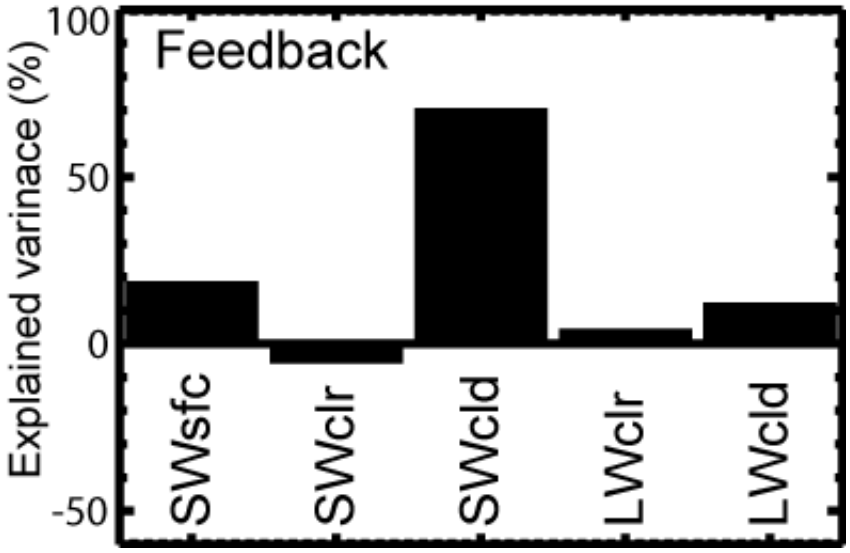



図 1：MIROC5 PPE 実験から得られた全球放射フィードバックのばらつきに対する各成分の寄与(%)。SWsfc, SWclr, SWcld, LWclr, LWcld は各々、地表面短波放射、大気上端晴天短波、大気上端雲天短波、大気上端晴天長波、大気上端雲天長波。

雲域短波放射フィードバックには低緯度の下層雲変化が重要であると言われるが、実際には大気循環場のレジームによって異なる高度の雲の変化が TOA の放射に影響する（成果 1）。MIROC5 PPE の計算はまだ途中であり、現在は初期の結果が得られている段階だが、少なくとも雲域短波放射フィードバックが複数のパラメータに依存すること、またフィードバックの強さはコントロール実験における自然変動の再現性に関係していることなどが分かっている。後者の例を図 2 に示す。散布図は、$CO_2$ 濃度 4 倍増時の雲域短波放射フィードバックを、コントロール実験における Nino 3.4 領域の海面水温(SST)偏差の分散に対してプロットしたものである。SST 分散はエルニーニョ・南方振動(ENSO)の指標であり、図 2 はモデル内の ENSO が強いほど負の雲域短波放射フィードバックが大きくなるという関係を示している。このメカニズムは成果 2 で議論しているが、英国ハドレーセンターの作成した PPE でも同様の関係が見られており、現在気候の自然変動で雲フィードバックを律することができるかもしれない。

(3) MIROC5 マルチ物理アンサンブル

上記の PPE は、MIROC3.2 PPE と比較することでさらにいろいろな知見を与えてくれる。しかし、一方で単一モデルのパラメータ不確実性は、MME の構造的不確実性とは性質が異なるものであり、PPE と MME を繋ぐアプローチが求められる。そこで、MME の相互の違いのうち、異なるパラメタリゼーションを用いている部分に着目して、2 つのモデル間で大気物理過程のスキームを差し替えてアンサンブルを作成する。これをマルチ物理アンサンブル(MPE)と呼ぶことにする。具体的には、モデルコードの共通性がないと容易ではないため、MIROC3.2 と MIROC5 の間で積雲対流、雲物理と大規模凝結、および境界層スキームを相互に入れ替えて、MIROC5 標準モデルと他に 7 つのハイブリッドモデルを作成した。PPE と異なり、スキームを入れ替えると TOA 放射収支のずれが大きくなるため、今回は AGCM で実験を行う。結合モデルのコントロール実験から気候値の SST などを用意し、AGCM でコントロール実験の他に SST

を上昇させる、あるいは$CO_2$濃度を4倍にする実験（いわゆるHansen、Cess実験）を各々行い、放射強制と気候フィードバックを見積もった（成果の3）。

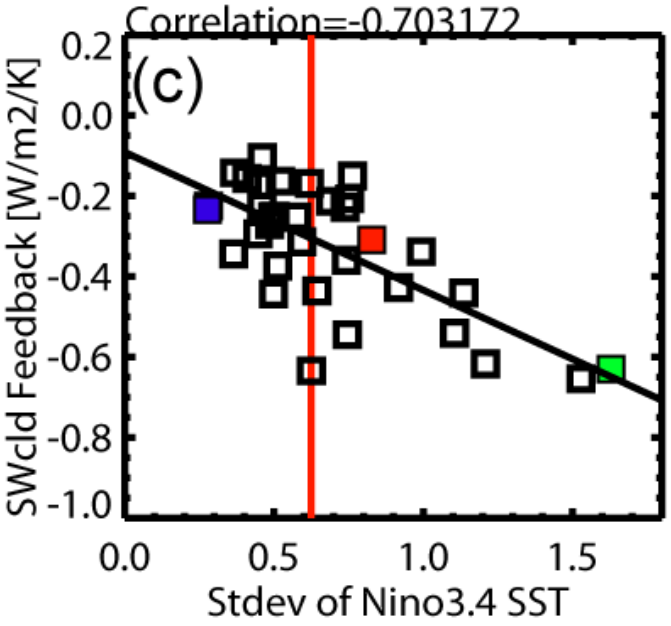



図 2：MIROC5 PPE の CO2 倍増実験における、雲域短波フィードバック($W/m^2/K$) とコントロール実験のENSO振幅（Nino3.4 SST偏差の標準偏差）の散布図。赤線は観測推定値を表す。赤四角が標準モデル、青と緑の四角はENSOが最も弱い/強いモデルを示す。

図3に、2つのPPEとMPE、ついでにCMIP3 MMEの結果を用いた放射強制と気候フィードバックの比較をまとめる。全て全球平均値なので、エネルギー収支式が適用でき、平衡気候感度は放射強制と気候フィードバックの比として定義できる（図中の等値線）。MIROC3.2およびMIROC5のPPEはそれぞれ気候感度が4.5-9.6 K、2.3-3.1Kの範囲にあり、アンサンブル同士は重なっていない。これは前述のとおり、PPEのベースとしたモデルの構造的な違いがパラメータ不確実性よりも大きいことを意味する。MPEは、ちょうどこれらの間の気候感度を示しており、さらにモデル間でばらついている。これは期待された通りの結果であり、さらに個々のモデルにおけるフィードバックを調べた結果、やはり低緯度の雲域短波放射フィードバックがばらつきの主要因であり、これは単一スキームによるものではなく2種類のスキーム（積雲と雲、雲と境界層）の結合により生じたものであることが分かった。

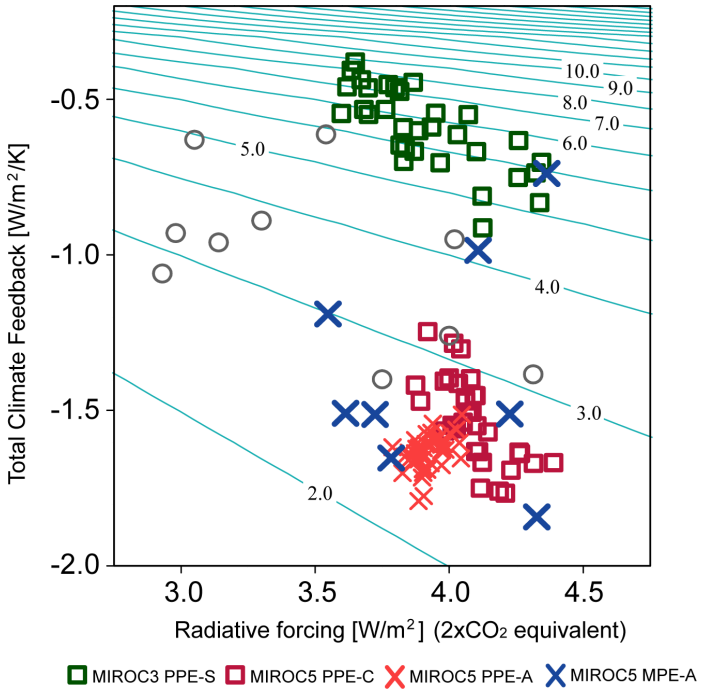



図 3：MIROC3 PPE（緑）、MIROC5 PPE（赤）、CMIP3（灰色）、および MIROC MPE（青）における放射強制と全気候フィードバックをまとめたもの。平衡気候感度の等値線を図中に示す。放射強制は、CO2 濃度倍増時の値にスケールしてある。

f.1.7　まとめと今後

MIROC5 の CMIP5 実験および付加的に作成したアンサンブル実験から、MIROC5 における $CO_2$ 濃度倍増時の雲の応答および放射へのフィードバックメカニズムはだいぶ明らかになってきた。また、モデル開発によって MIROC3.2 との間で生じたふるまいの違いが何に起因するかについても手掛かりが多く得られた。これらの知見は、今後 CMIP5 の他のモデルとあわせて解析をすすめる際に、より一般化された不確実性の理解および、その現実に対する有効性の評価に活かされることになろう。また、他のモデルグループとの情報交換も鋭意進めており、PPE の相互比較や CMIP5 以降の比較実験のコーディネートなどで上記の成果が役に立ちそうである。

h.1.7　成果の発表

❖　論文（投稿中を含む）

1. Watanabe, M., H. Shiogama, M. Yoshimori, T. Yokohata, T. Ogura, H. Okamoto, S. Emori, and M. Kimoto, 2012: Fast and slow timescales in the tropical low-cloud response to increasing CO2 in two climate models. Clim. Dyn., in press.
2. Shiogama, H., M. Watanabe, and Coauthors, 2012: Physics parameter uncertainty and observational constraints of climate feedback: An ensemble coupled atmosphere-ocean GCM without flux corrections. Clim. Dyn., submitted.
3. Watanabe, M., H. Shiogama, and Coauthors, 2012: Using a multi-physics ensemble for exploring diversity in cloud shortwave feedback in GCMs. J. Climate, accepted.

4. Jiang, J. H., H. Su, C. Zhai, V. S. Perun, A. Del Genio, L. S. Nazarenko, L. J. Donner, L. Horowitz, C. Seman, J. Cole, A. Gttelman, M. Ringer, L. Rotstayn, S. Jeffrey, T. Wu, F. Brient, J.-L. Dufresne, H. Kawai, T. Koshiro, M. Watanabe, T. Lecuyer, W. G. Read, J. W. Waters, B. Tian, J. P. Teixeira, and G. L. Stephens, 2012: Evaluation of cloud and water vapor simulations in IPCC AR5 climate models using NASA "A-Train" satellite observations. J. Geophys. Res., submitted.

❖ 口頭発表（招待講演のみ）

1. Watanabe, M., 2011: Constraints to the tropical low-cloud response to increasing CO2 in climate models. Joint Yonsei CTL-AORI-Hanyang-KORDI workshop on climate change and variability, Gangwondo, 20-22 February, 2011.
2. Watanabe, M., 2011: Comprehensive climate modeling linking structural and parametric uncertainties. Workshop on "Hierarchical modeling of climate", Trieste, July 18-22, 2011.
3. Yokohata, T., et al. 2011: Understanding and validation of cloud response to CO2 increase using state-of-the-art climate. AGU annual meeting, San Fransisco, December 5-9, 2011.
4. Watanabe, M., et al. 2011: Development, verification, and natural variability in MIROC5. GMAO seminar at Goddard Space Flight Center, Washington DC, November 15, 2011.
5. Watanabe, M., et al. 2011: Development, verification, and natural variability in MIROC5. EMC seminar at NCEP, Washington DC, November 16, 2011.

## e.1.8 地球システム統合モデルを用いた古気候実験

担当機関:海洋研究開発機構
研究者名:末吉 哲雄, 大垣内 るみ, 吉森 正和, 近本 めぐみ, 羽島 知洋, 齋藤 冬樹, 渡邉 真吾, 河宮 未知生, 阿部 彩子

**要旨**

地球システム統合モデルを用いた古気候実験について、実施した3実験の設定と結果について述べる。CMIP5/PMIP3 実験プロトコルには 3 つの古気候実験が含まれている。21,000 年前の最終氷期最盛期(LGM)、6,000 年前の完新世中期(6ka)、そして西暦 850 年から 1850 年の過去千年実験(Last Millennium)である。各実験は原則として CMIP5/PMIP に従って実行されたが、初期値の準備には実験毎に個別の作業を要した。実験により、LGM の寒冷な気候、6ka の温暖な気候、過去 1000 年の気温変動トレンドがこれまでの古気候研究の結果と整合的な形で再現された。これはモデルの検証材料の一つとして有効な結果であるといえる。今後、さらに細かい解析を進めることで、過去の自然要因による気候変動の幅や、そのような変動に伴う炭素循環の変化などについて新たな知見が得られるものと期待できる。

(1) はじめに

本節では、次期 IPCC 報告書(第 5 次評価報告書:AR5)への貢献を目指し、CMIP5 の実験プロトコルに従って実施された地球システム統合モデルによる数値実験のうち、特に過去の気候(以後、「古気候」とする)の変動を再現する実験として行われた3つの実験について報告する。CMIP5 に含まれる古気候数値実験の設定は、PMIP3(Paleoclimate Modelling Intercomparison Project phase 3:PMIP3)という国際プロジェクトによって共通の実験プロトコルが策定されている。以下、まず実験の目的と共通の実験設定について整理した後で、実験ごとに各実験固有の設定と得られた結果について述べる。

(2) 古気候実験の目的

地球システム統合モデルを用いた古気候実験の目的は、大きく分けて 1) 過去に起きた気候変動のメカニズムの理解、2) 気候システムにおける各フィードバックの評価、3) 気候モデルの気候再現能力の評価、にある。特に 3) の一例としては、最終氷期のような現在と大きく異なる気候環境の再現実験を行うことで、「現存の気候モデルは異なる気候を扱うことが出来るのか」という根本的な問いに対して直接示唆を与えるものであり、気候の将来予測という文脈の中でも重要な課題であると位置づけられる。

IPCC AR5 に向けた実験としては、CMIP5/PMIP3 で定められた仕様に従い、Tier 1 に分類される実験 3.4 Mid-Holocene(6ka)と実験 3.5 Last Glacial Maximum(21ka)、Tier 2 に分類される実験 3.6 Last Millennium(850AD～1850AD)の3つの古気候実験を実施した。まず実験 3.4 では、現在から約 6000 年前、完新世中期(Mid-Holocene)の気候の再現実験を行う。この時代は北半球夏季の日射量が現在よりも多く、北半球高緯度で現在よりも温暖な気候が実現されていた。古気候記録によれば、約 1 万年前から続く後氷期の温暖気候の中でも最も温暖な時期であり、特にアジアおよびアフリカのモンスーンが現在よりも活発であったこと、そしてそれに伴って現在は砂漠の広がる北アフリカにも植生が広がっていたことが知られている。次に実験3.5では、現在から約2万1000年前の最終氷期最盛期(Last Glacial Maximum、LGM)の再現実験を行う。この時代の気温は地球全体の平均で 5℃から 10℃も低くなっており、氷床分布・植生は現在とは大きく異なっていた。比較的最近の、地形や環境がよく分かっている時代の中では、

現在と最も大きく異なる気候状態が実現された時代であり、与えた境界条件から妥当な氷期の気候が再現できるかどうかはモデルの性能を確かめる上で良いテストとなる。また、この時代の二酸化炭素濃度は約185ppmであったことが氷床コアの解析などから判明しているが、産業革命前の280ppmとの約100ppmの違いをどのように説明するかは未解決の課題となっている。炭素循環過程を考慮した地球システム統合モデルでの実験から、この点についても新たな知見を得ることも気候・生態系システムの理解の上では重要な課題となる。最後に実験 3.6 では、過去 1000 年（Last Millennium）の気候変動を再現する数値実験を行う。この実験は先に述べた2実験が一定の境界条件に対する準定常状態を求めたのとは異なり、時間変化する境界条件を与えて実施する時間発展問題である。与える境界条件としては温室効果ガスのほかに太陽の日射量変動や火山活動の影響が含まれる。この実験で扱う西暦 850 年から 1850 年の間には、ヨーロッパ地域が中世にやや温暖だったとされる「中世温暖期」や、ほぼ全地球的に寒冷な気候が続いたとされる「小氷期」が含まれており、これらの自然要因がどの程度まで気候変動を説明しうるかを解析することが目的となる。いずれの時代についても、アイスコアや海底堆積物コア、年輪、花粉などの古気候指標を用いた気候の復元研究が比較的進んでいるため、復元データとモデル結果の比較を行う上では適した時代であるといえる。

(3) 共通の実験設定

基本的な実験設定は他の MIROC-ESM を用いた実験と共通である。古気候実験では化学過程（CHASER）を含まないバージョンを用いることとし、大気は水平解像度 T42、鉛直 80 層、海洋は約 1°の解像度、陸面は 6 層 14m の 1 次元の土壌に、動態植生モデル（SEIB-DGVM）が結合されている。それぞれの実験に固有の設定は、原則として CMIP5/PMIP3 によって定められた実験設定に従う。表1に、実施した3つの古気候実験に加えて、比較対象とする産業革命前（"Preindustrial"：PI）との境界条件設定を一覧で示した。

| 実験省略名 | **PI** | **6ka** | **LGM** | **LM** |
|---|---|---|---|---|
| 想定している時代 | 産業革命前<br>1850 A.D. | 完新世中期<br>6,000 年前 | 最終氷期最盛期<br>21,000 年前 | 過去 1000 年<br>850-1850 A.D. |
| 実験タイプ | time slice | time slice | time slice | Transient |
| 地形条件 | pre-industrial | pre-industrial | LGM topography | pre-industrial |
| GHG: CO2 (ppm) | 285.0 | 280.0 | 185.0 | モデル予測値 |
| GHG: N2O (ppm) | 0.31 | 0.27 | 0.20 | 時系列データ |
| GHG:CH4 (ppm) | 1.7414 | 0.65 | 0.35 | 時系列データ |
| 軌道：離心率（°） | 0.01672 | 0.018682 | 0.018994 | 時系列データ |
| 軌道：軌道傾斜角（°） | 23.45 | 24.105 | 22.949 | 時系列データ |
| 軌道：春分点歳差 (°) | 102.04 | 0.87 | 114.42 | 時系列データ |

表 1：各実験の境界条件一覧

古気候再現実験として行われた実験のうち、実験 3.4 Mid-Holocene、実験 3.5 Last Glacial Maximum についてはタイムスライス実験、実験 3.6 Last Millennium はトランジェント実験である。ここで、タイムスライス実験とは、過去のある時期の固定された境界条件に対して平衡となった気候状態を求める平衡問題として行う実験を、トランジェント実験とは、復元された境界条件の時系列を与えながら、その応答を求める時間発展問題として行う実験を指す。気候変動はあらゆる時代においてトランジェントな問題となるはずであるが、実験 3.4 と 3.5 でタイムスライス実験を行って古気候情報と比較を行うのは、これらの時代の気候が統計的に準定常な状態にあり、それぞれの状態と現在の気候との差が基本的には境界条件に対する応答であると考えられるためである。

(4) 各実験固有の設定と初期的な結果

A. 実験 3.4 Mid-Holocene（6ka）

**概略**

PMIP3 の実験仕様に従った境界条件（Table 1）を与えた平衡実験を行う。地形や河川流路、土壌条件などは産業革命前の西暦 1850 年（PI）の条件と変更せず、地球の軌道要素と温室効果ガスの濃度のみ変更する。火山エアロゾルについては無視する。CO2 濃度についても、280ppm とほぼ PI 条件と変わらないため、実質的には軌道要素の変更によって生じる季節進行の変化に対する応答を見る感度実験としての位置づけになる。軌道要素の変更によって変化する下向き短波放射量を図1に示したが、6000 年前の軌道要素に従って計算された日射量は北半球夏季に 30W/m$^2$ 前後大きくなり、同冬季に同程度小さくなる。この放射の従って北半球夏季がより暑く、冬季がより寒くなる傾向を生じる。

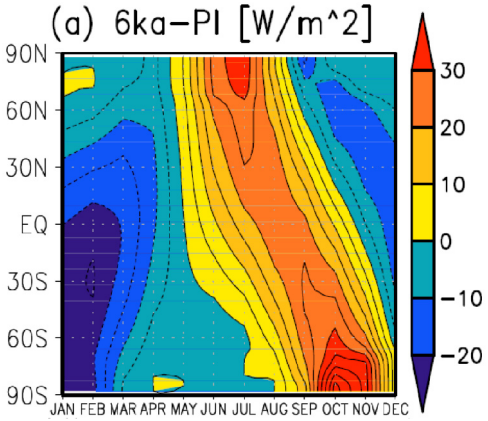



図 1：6ka の下向き短波放射量。緯度別に PI での偏差で示している。縦軸は緯度、横軸は時間（月）を表す。北半球の夏季に正の偏差が、冬季には負の偏差が現れている。

**初期値とスピンアップ**

初期値としては、大気海洋陸面とも、Preindustrial Control（PI）、すなわち 1850 年条件での積分結果を利用する。6ka と産業革命前の境界条件の違いはわずかであるため、PI 条件から計算を開始し、準定常状態に達した初期値を用いる。6ka 条件下での実験として気候場のスピンアップを 100 年間実施した後、陸面の動態植生過程についてオフラインのスピンアップを実施し、炭素循環が定常に達した後に再度結合して本実験を実施した。300 年積分したうちの最後 100 年分を用いて解析を行った。

**[陸面のオフラインスピンアップ]**

陸面過程についてオフラインのスピンアップを行った理由は、人為的な土地利用の条件を変更するためである。上述したように本実験の初期値には PI 条件の結果を用いているが、動態植生コンポーネント（SEIB-DGVM）内部での人為土地利用についても PI 条件が引き継がれ、少数ながら耕作地グリッドが存在してしまうという問題を生じた。このため、耕作地となっているグリッドがゼロになるよう、土地利用の値をクリアし、その上で陸上植生・炭素循環をオフラインでスピンアップのうえ、初期値に再度マージするという作業を行った。この再度の結合に伴うショックは大きくなく、100 年以内に準定常状態に達している。

**結果と初期的な解析**

2m 気温と降水量の結果を図3に示す。いずれも PI との差で示し、夏季（JJAS：6～9 月平均）と冬季（DJF：12～2 月平均）に分けて示した。まず 2m 気温を見ると陸面を中心に北半球で夏季に 1～3℃の温暖化応答、冬季に同程度の寒冷化応答が見られる。これは境界条件の変更によって期待される通りの結果であり、他の気候モデルの結果とも調和的である。古気候データからは、この時期に亜寒帯林の北限が北上したことを示唆するデータもあり、そのような結果とも附合する。

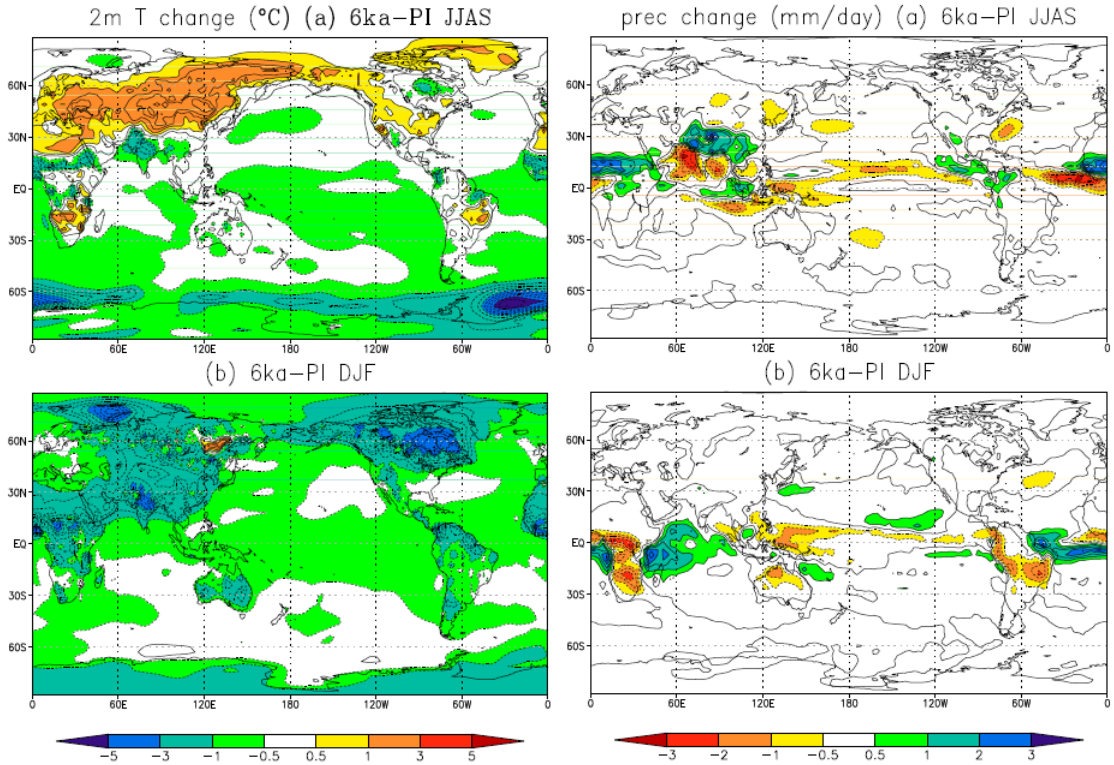



図2：計算された 6ka の 2m 気温と降水量。PI との偏差で示してあり、上段が夏季平均（6 月～9 月）、下段が冬季平均（12 月～2 月）。

降水量については、アジア・アフリカのモンスーンが強化されている様子が図から明瞭である。特にこの時代の植生の応答として特徴的なアフリカサヘル地域に注目すると、現在のサハラ砂漠南限付近で降水量の増加が見られる傾向を生じている。IPCC の第四次報告書（AR4）に提出した、MIROC3 を用いた実験（PMIP2）との比較解析を行ったところ、降水変化ではサハラの広域で ESM のほうが降水が増加した。ただし、定常の植生変化では 1 グリッド北上したのみである。植生か（通年ではなく）時々草原化するグリッドをカウントすると、より広範囲で増えている。

B. 実験 3.5 Last Glacial Maximum（21ka）

**概略**

LGM 実験では、PMIP3 の実験仕様に従った境界条件（表1）を与えた平衡実験を行う。地形はグリーンランド、ローレンタイド、フェノスカンジア、南極の各氷床の当時の分布を、古気候データによる復元に基づいて与え、理論的に求めた当時の地球の軌道要素と、氷床コアからの復元に基づく大気 CO2 濃度を与えている。最終氷期は現在に比べて海水準が低くかったため、モデル中でも当時の海陸分布に従っている。実験は約 150 年分、物理場のスピンアップを行った後に、海洋と陸面の炭素循環について別途オフラインでのスピンアップを実施し、再度結合してから約 300 年分の実験を行った。解析には終わりの約 100 年分を用いた。

**境界条件**

上述したように、LGM 実験では軌道要素と温室効果ガス濃度に加えて、地形条件（氷床分布と海水準変化）を変更する。LGM 実験で用いた地形を、PI 実験との差で示したのが図4である。北米と北欧にそれぞれローレンタイド氷床とフェノスカンジナビア氷床が分布し、南極氷床も現在と比べて大きい。これらの氷床の分布（範囲と標高）は計算される LGM 気候場に大きな影響を与えるが、本実験では複数の氷床復元研究を平均した、LGM の氷床分布モデルを準備し、これが PMIP3 の標準設定として用いられた。

海水準は現在と比べて約 90m 低下させ、この結果ベーリング海峡が閉じているほか、インドネシア海洋大陸も陸化している。北半球に分布する二つの大陸氷床はその高いアルベドによって強い寒冷化をもたらすだけでなく、大気大循環のパターンを変化させる効果を持ち、これらが合成された効果として LGM の気候が計算されている。

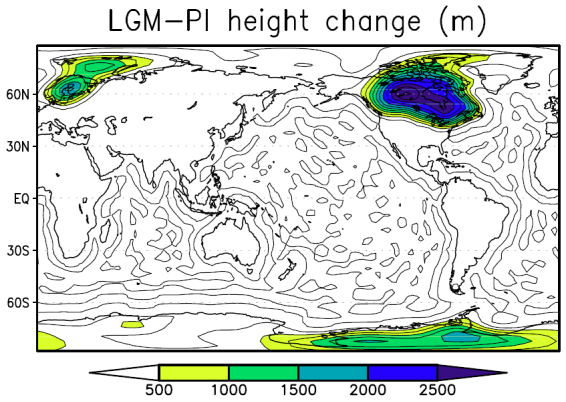



図 3：LGM の地形条件。PI との標高の偏差で示す。北米と北欧に見られる大きな正の偏差は大陸氷床。南極氷床にも正の偏差が見られ、現在よりも大きくなっていることが分かる。

**初期値とスピンアップ**

現在気候と条件が異なる古気候実験、特に海洋の物理場が大きく異なる最終氷期のような実験においては、初期値のスピンアップに数千年スケールの時間が必要となる。限られた資源で現実的な最終氷期実験を行うために、本実験では、海洋研究開発機構の地球温暖化予測研究プログラム・古気候研究チームが MIROC4 を用いてこれまでに行って来た LGM 実験の海洋・陸面の物理場を用い、必要に応じてオフラインモデルを用いた結果と組み合わせて初期値を準備した。MIROC4 での LGM 実験では、復元さ

れた2万1000年前の海岸線に従い、地形と海盆、河川分布、土壌タイプ、LAI、アルベド、地球の軌道要素について、モデルの許す範囲で現実的に設定したものである。CO2 濃度は 185ppm としている。この条件で 4300 年積分した海洋物理場を、本実験での海洋物理場として用いている。

大気の初期値に関しては、MIROC-ESM では大気層が 80 層になって以前のモデルとは鉛直構造が異なるため流用できず、他の実験と同様に PI 条件で計算された大気初期値（Preindustrial Control）をそのまま用いた。大気は応答時間が短く、異なる条件にすばやく馴染むため、気温などの物理気候場のスピンアップには特に問題を生じない。ただし、現在の条件では存在しない標高 3〜4000m の氷床が北半球に存在するため、計算開始時に強い重力波を生じて計算が破綻する。これを軽減して大気の気圧、風速場をなじませるため、タイムステップを短くし、水平拡散を一時的に強化した状態での積分を行った後、その後標準の設定に戻すという作業を行った。こうして大気得られた大気と上述した海洋を合わせて 150 年間のスピンアップを実施し、物理場の初期値を準備した。

これに加えて、以下に述べるように海洋生態系と陸面の動態植生についても別途オフラインでスピンアップを実施した。これによって炭素循環についてもLGM条件で準定常状態の初期値を得て、物理場と結合して初期値とした。

**［海洋生態系のオフラインスピンアップ］**

海洋生態系（物質循環）については、MIROC3.2 の LGM 実験には生態系モデルが含まれていなかったため、以前の結果を流用することはできない。しかし海洋生態系が平衡に達するにはやはり数千年オーダーの時間を要するため、海洋生態系のオフライン実験を別途行った。このオフライン実験では、本実験で初期値として用いるMIROC3.2の海洋物理場を用いて海洋生態系モデルを駆動し、必要な変数（海洋の全炭酸、溶存炭素、プランクトンなど）を求める。

オフライン実験は 5000 年間の積分を行い、平衡となった状態を求めた。この際、海洋の持つ全炭素量は保存させつつ、海洋表層のガス交換係数としては大気 CO2 濃度 185ppm と平衡にさせることで、表層の CO2 分圧を下げ、結合した際に非現実的な CO2 放出が起きないようにしている。

**［陸面のオフラインスピンアップ］**

大気モデルと結合されている動態植生コンポーネント（SEIB-DGVM）が LGM 条件に順応するためには千年単位の時間がかかるため、オンライン実験でスピンアップを行うことは現実的ではない。動態植生モデルについてもオフラインでのスピンアップを行い、組み合わせた初期値を作ることとした。LGM に合わせて変更された海陸分布に応じた境界条件を準備し、あらたに陸化したぐりっどについては初期植生を仮定してオフライン計算を約 1000 年分積分し、平衡となった陸上植生および炭素分布を求めた。

**結果と初期的な解析**

上述したように、現在気候の初期値にLGM条件の海洋とオフラインスピンアップしたいくつかの変数を貼り合わせた初期値から計算開始とするため、開始直後の出力には相応のショックとドリフトを生じることが想定される。妥当な平衡解を得るためには相応のスピンアップが必須である。本実験では結合から 120 年の積分を行い、順調に解が収束することを確認した。今後スピンアップを終えて本実験へと移行するが、おおまかなスピンアップ中の挙動として、以下の特徴を挙げることができる。

全球での平均気温は約6度前後に落ち着きつつある。この値は他のモデルによる古気候計算と比較しても大きく異なるものではないが、どちらかと言うとやや低めの値であると言える。海洋 SST の全球平均は、14 度弱くらいの値に収束しつつある。深層循環の強さは最初に結合のショックでやや大きな値をとった後、

徐々に低下して現在の値近くで落ち着いた。古気候データによる復元では、現在よりも小さい値になるとされているが、この違いは他の多くのモデルでも解消されていない問題であり、今後の解析と検討が必要な課題である。

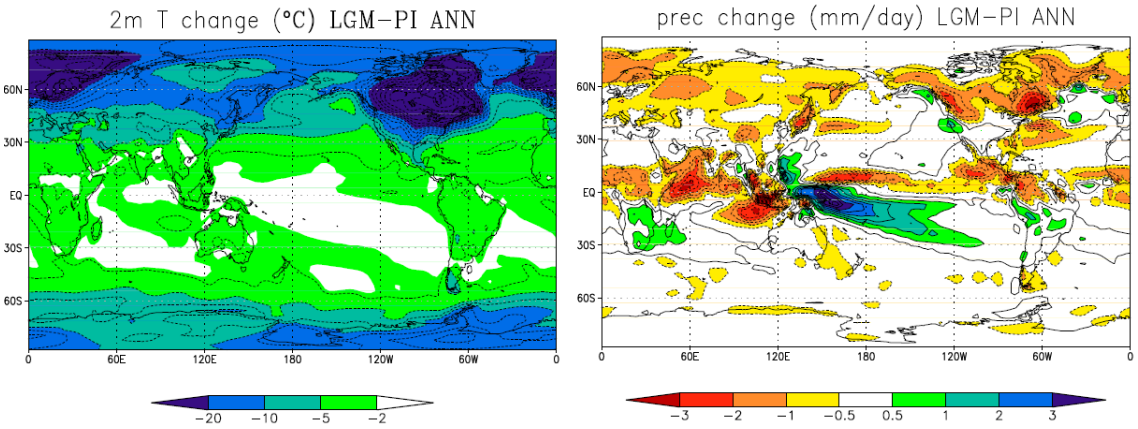



図4:計算された LGM の 2m 気温と降水量。PI との偏差で示す。気温で場所によって大きな違いを生じているが、これには氷床の 1000～3000m の標高差による分も含まれる。降水量は赤道太平洋の一部を除き減少し、乾燥傾向が見られる。

C. 実験 3.6 Last Millennium（850AD～1850AD）

**概略**

Last Millennium（過去千年）のトランジェント実験では、PMIP3 の実験仕様に従い（表1）、太陽放射スペクトルと火山エアロゾル、地球の軌道要素の時系列復元データをヒストリカルに与えて西暦 850 年から 1850 年までの 1000 年間、積分を行う。一般には温室効果ガスも氷床コアからの復元に基づいて時系列データを強制条件として与えるが、本実験では大気 CO2 濃度については強制条件として与えることはせず、炭素循環コンポーネントが計算した値を次のタイムステップの大気 CO2 濃度とすることとする。N2O と CH4 については、他の要素と同じように復元データに従うものとする。これにより、実験としては CO2 濃度予測実験として実施したことになる。

**太陽放射・火山フォーシング**

太陽放射スペクトルと火山エアロゾルの復元データとして PMIP3 では複数の選択肢が用意されているが、本実験では以下のデータセットを用いた。

**［太陽放射スペクトル］**

850 年から 1600 年代までの値として Delaygue and Bard (2009)、1600 年代以降の値として Wang, Lean and Sheeley (2005) を接続したものを用いる。Delaygue and Bard は南極のアイスコアから得られた 10Be のデータに基づき、Wang, Lean and Sheeley は太陽の flux transport モデルを用いて、太陽黒点データを入力に計算した結果に基づく。AR4 で用いられた Lean (1995)と比べて太陽放射の変化が小さくなっており、マウンダー極小期と現在との放射量の違いは目立たなくなっている。

**［火山エアロゾル］**

南極のアイスコアデータと、近年の衛星観測に基づく Crowley et al (2008)による復元を用いた。もう一方の選択肢である Gao, Robock and Ammann (2008)と比較すると、全体に放射強制力は弱めとなっており、火山による寒冷化イベントは弱く現れる。

### 初期値とスピンアップ

初期値としては、大気海洋陸面とも、6ka 実験（実験 3.4）と同様に Preindustrial Control（PI）、すなわち 1850 年条件で約 680 年積分された初期値を用いる。地形などの境界条件に変更はないため、forcing として与える太陽放射スペクトルと地球の軌道要素、火山エアロゾル量、温室効果ガスのみを850年条件に変更し、これらを固定したまま 60 年積分した。大気 CO2 の初期値の準備については古気候炭素循環モデル相互比較プロジェクト（PCMIP）のプロトコルで採用されている方式に習い、スピンアップの間に予報された大気 CO2 量を 850 年値にリセットし、予報実験の開始時点で西暦 850 年大気 CO2 復元値と矛盾しないようにする。このリセットによって厳密には炭素の総量が保存しないが、その差は僅かであり、この点が問題になることはないと考えて良い。

### 結果と初期的な解析

西暦 1850 年までの積分が完了した後に、その結果を用いての 20 世紀実験を実施し、西暦 2000 年までの 1150 年分の時系列を得た。図5には、本実験で用いた火山と太陽の Forcing データと合わせて、北半球平均の2m気温の時系列を示す。これまでの解析で、初期値に用いたPI実験に残っていた僅かなドリフト（0.1° C/100 年）が長期的な温暖化ドリフトを残していることが確認されたため、図 5 ではトレンドを除去した結果を用いて、1960 年からの 30 年平均値に対する差を示している。太陽放射と火山エアロゾルの強制データとして変動の小さめのデータセットを選択したこともあり、北半球平均気温で見るかぎり中世温暖期と小氷期は明瞭には現れておらず、また 13 世紀の大規模火山噴火の影響も小さめである。古気候指標による復元データと比較すると、化石燃料の消費によってCO2のエミッションが増加する産業革命以後についてはよく一致した結果になるが、それ以前については合う部分と合わない部分がある。10 世紀に温暖で 12 世紀に寒冷になる傾向や、16 世紀の寒冷な傾向は計算結果には現れておらず、これらの時期の自然要因の気候変動がどのようにして生じたのか、より検討を進める必要がある。今後は特に地域的な影響についても古気候指標との対比を行い、解析を進める方針である。

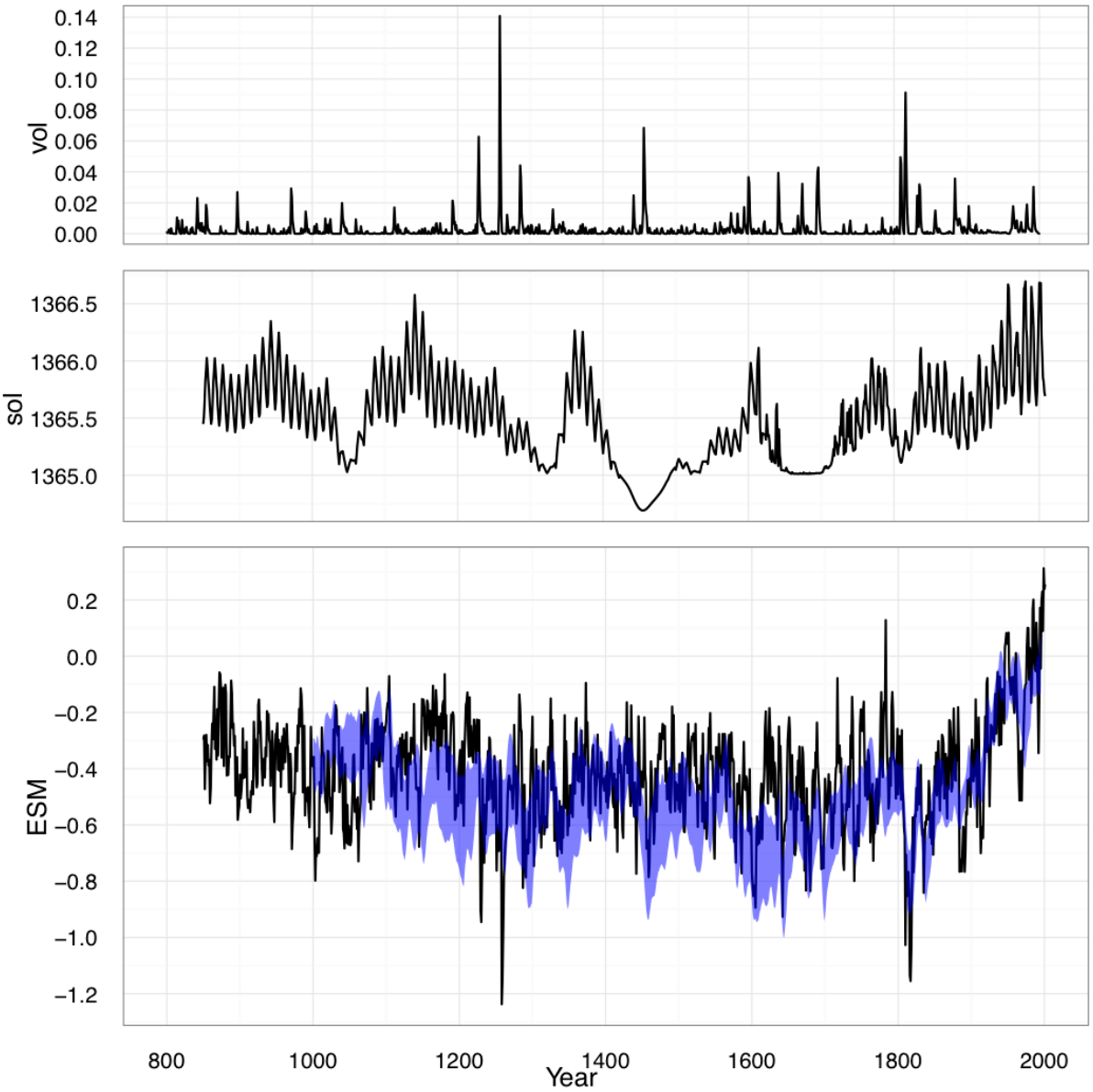



図5：Last Millennium 実験の Forcing データと求められた北半球平均気温の時系列。上パネルは火山の Forcing データ、中パネルは日射量の Forcing データを示し、下パネルが北半球平均の 2m 気温を示す。西暦 850 年から 2000 年までの時系列を、1960 年からの 30 年平均値との差で示す。PI 実験のドリフトに伴うトレンドは除去してある。

### f.1.8　考察

一連の古気候実験により、LGM の寒冷な気候、6ka の温暖な気候、過去 1000 年の気温変動トレンドがこれまでの古気候復元研究の結果と整合的な形で再現された。他のモデルとも定性的には同様の結果になっており、これはモデルの検証材料の一つとして有効な結果であるといえる。

定量的には、境界条件として用いるデータに依存する部分も大きいため、古環境指標による復元研究の進展によって結果がある程度までは変わってくるものと思われる。特に過去 1000 年の実験については、火山・太陽の Forcing データが持つ不確定性のとり扱いを検討する必要があると考えられる。

また、今回の実験では、古気候実験に地球システム統合モデルを利用することで、植生や炭素循環の応答を陽に計算することが出来た。過去 1000 年実験で二酸化炭素濃度にモデル予測値を用いてこれまでと整合的な結果を得たことも進展の一例であると言える。今後の植生・炭素循環の応答を含めたモデルの高度化により、さらに古気候・古環境の再現性が高まり、過去の環境変動のメカニズムが明らかになることが期待できる。一例として、6ka 実験でのいわゆるグリーンサハラの再現について言及しておく。今回の 6ka 実験では、降水量の増加見られても植生の応答としては僅かなものであったが、これは現状のモデルでは動態植生モデルによって推定される植生タイプを気候物理場の計算にフィードバックさせていないためであると考えられる。別の感度実験として、サハラ砂漠の地表面条件を予め草原に変更して実験を行うと、サヘル地域の降水量が大きく増加し、草原植生を維持する事ができるという結果が見られた。このことから、今後の実験で植生のフィードバックを陽に考慮した気候実験を行うことで、より自然な 6ka 気候の再現が可能になる可能性がある。また、このような植生ー気候フィードバックが将来予測の結果にもたらす幅についても定量的に検証すべきであろう。今後、同様の細かい解析を進めることで、過去の自然要因による気候変動の幅や、そのような変動に伴う炭素循環の変化などについて新たな知見が得られるものと期待できる。

g.1.8　引用文献

Crowley, T. J., G. Zielinski, B. Vinther, R. Udisti, K. KreutZ, J. Coledai and E. Castellano (2008), Volcanism and the Little Ice Age. PAGES Newsletter, 16, 22-23

Delaygue, G and E. Bard, (2009), Solar forcing based on Be-10 in Antarctica ice over the past millennium and beyond, EGU 2009 General Assembly

Gao, C., A. Robock, and C. Ammann: Volcanic forcing of climate over the last 1500 years: An improved ice-core based index for climate models. J. Geophys. Res., 113, D2311

Lean, J., J. Beer and R. Bradley (1995), Reconstruction of solar irradiance since 1610: Implications for climate change. Geophys. Res. Lett. 22, 3195-3198.

Sato, M., J. E. Hansen, M. P. McCormick and J. B. Pollack (1993), Stratospheric aerosol optical depths, 1850-1990, J. Geophys. Res., 98(D12), 22987–22994.

Wang, Y.-M., J. L. Lean and N. R. Sheeley Jr. (2005), Modeling the Sun’s magnetic field and irradiance since 1713, Astrophys. J., 625, 522–538.

h.1.8　成果の発表

❖　論文（準備中）

1. Sueyoshi, T., M. Yoshimori, S. Watanabe, T. Hajima, R. Ohgaito, A. Abe-Ouchi, F. Saito, R. O’ishi, M. Kawamiya, 2012: Description of the implementations of the PMIP3 paleoclimate experiments using an Earth System Model, MIROC-ESM, in preparation.
2. Ohgaito, R., T. Sueyoshi, S. Watanabe, T. Hajima, A. Abe-Ouchi, M. Kawamiya, 2012: Climate changes in mid-Holocene simulated using an Earth System Model MIROC-ESM, in preparation

❖　口頭発表

1. Sueyoshi, T., A. Abe-Ouchi, S. Watanabe, T. Hajima, R. Ohgaito, M. Chikamoto, M. Kawamiya:

Transient climate simulation of Last Millennium using integrated Earth System Model. INQUA Congress 2011 Bern, Switzerland, July 2011.

2. Ogaito, R., A. Yamamoto, T. Hajima, A. Abe-Ouchi, T. Sueyoshi, S. Watanabe, M. Kawamiya: Mid-Holocene simulation using an earth system model, MIROC-ESM, IUGG 2011 General Assembly, June 2011
3. 末吉哲雄, 阿部彩子, 羽島知洋, 大垣内るみ, 近本めぐみ, 齋藤冬樹, 渡邉真吾, 河宮未知生: 地球システムモデルを用いた過去千年の気候シミュレーション. 日本地球惑星科学連合2011 年大会, 幕張メッセ国際会議場, 2011 年 5 月.
4. 末吉哲雄, 阿部彩子, 羽島知洋, 近本めぐみ, 大垣内るみ, 齋藤冬樹, 渡邉真吾, 河宮未知生:地球システムモデルを用いた最終氷期の気候再現シミュレーション(II). 雪氷研究大会（2011・長岡）, 2011 年 9 月, ハイブ長岡
5. 大垣内るみ, 末吉哲雄, 阿部彩子, 羽島知洋, 渡辺真吾, 山本彬友, 河宮未知生: MIROC-ESM を用いた完新世中期シミュレーションにおけるアフリカモンスーン変動. 日本気象学会2011年度秋季大会, 2011 年 11 月, 名古屋大学

## e.1.9 北極海における急速な海氷減少が表層の海洋酸性化に与える影響

担当機関:独立行政法人 海洋研究開発機構
研究者名:山本 彬友

**要旨**

海洋は大気中に放出された人為起源二酸化炭素の約 1/4 を吸収し温暖化を緩和する一方、海水へ溶けた $CO_2$ は pH や炭酸カルシウム($CaCO_3$)の飽和度(Ω)を低下させる。北極海は海洋酸性化が最も進むと予測されている海域であるため、気候変動に対して北極海の海洋酸性化がどのように進むのかを理解することは重要である。昨年度の研究では急速な海氷減少が起きた場合、これまで考えられてきたよりも早く pH とアラゴナイトの飽和度(Ωarag)の減少が起きることを示唆した。本年度は急速な海氷減少によって pH, Ωarag が低くなるメカニズムについてそれぞれ解析した。その結果、海氷が溶けることで海の $CO_2$ 吸収と淡水流入が増加することにより Ωarag が低下し、$CO_2$ 吸収の増加と水温上昇により pH の低下が引き起こされることが示された。また Ωarag の季節変動についても解析を行い、海氷が早く溶けると季節変動の位相が逆になることが分かった。

(1) はじめに

人為起源二酸化炭素の影響として地球温暖化等の物理気候場の変化だけではなく、二酸化炭素が海洋に溶け込むことによって引き起こされる「海洋酸性化」が近年注目されている(Orr et al., 2005; Cao and Caldeira, 2008)。北極海表層は今世紀中の pH の減少が最も大きく、生物に影響があると考えられる未飽和(Ωarag<1)な海水が最初に現れる海域で、大気二酸化炭素濃度の上昇と海氷減少によって海洋酸性化が進行する(Steinacher et al., 2009; Frolicher et al., 2010)。IPCC AR4 に提出された気候モデルの大部分は夏の海氷が 21 世紀末でも残っていると予測しており、これまで北極海の海洋酸性化についてもこの様な特徴を持ったモデルを用いて予測が行われてきた。しかし最近の観測ではモデルを上回る速さで夏の海氷は減少しており、2007 年の観測値とモデルの結果を用いた解析では約 30 年以内になくなる可能性が指摘されている (Stroeve et al., 2007; Wang and Overland , 2009)。そのため昨年度は北極海における夏の海氷が 2040 年と 2090 年になくなる 2 つのモデルを用いて酸性化の予測を比較し、海氷が早く溶けるモデルでは遅く溶けるモデルに比べて最大で pH が 0.1, Ωarag が 0.2 低くなることを示した(Fig. 1)。本年度ではどのメカニズムによって北極海表層の pH と Ωarag が減少するのか、これらの予測の差がどのメカニズムによるのかについて定量的に解析を行った。また、海氷減少に伴って季節変化がどのように変化するのかについても解析した。

比較したモデルは昨年度と同様に人･自然･地球共生プロジェクト課題 2 開発の地球システム統合モデル(Kawamiya et al., 2005; Yoshikawa et al., 2008)と、本プログラムで開発された地球システム統合モデル(Watanabe et al., 2011)で、与えた CO2 シナリオはそれぞれ SRES A2 と RCP8.5 である(以下共生プロジェクトのモデルを旧モデル、本プログラムのモデルを新モデルと呼ぶ)。新(旧)モデルでは夏の海氷が 2040 年(2090 年)になくなると予測されている。pH, Ωarag の計算方法、対象海域等は去年度の成果報告書の内容と同様である。

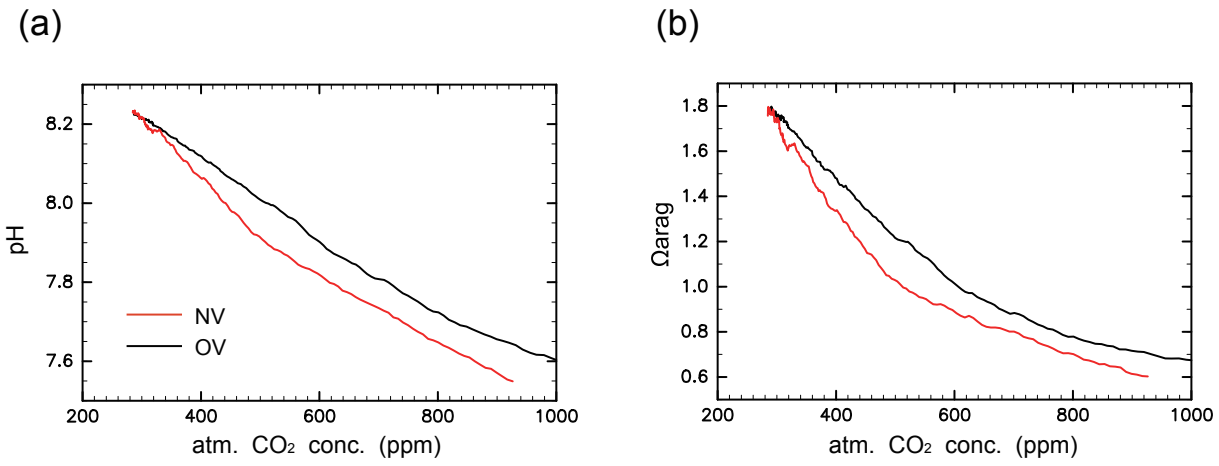



図 1: モデルで計算された北極海表層の年平均の pH(a)とΩarag(b) 黒線: 旧モデル 赤線: 新モデル。ここでは、それぞれ観測値とのバイアスを引いた値を示している。

(2) pH とΩarag の予測の差はどのメカニズムによるものか?

Ωarag に影響を及ぼす要因は温度(T)、塩分(S)、大気とのガス交換による海洋の $CO_2$ 吸収(Gas)、淡水フラックス(Fw)、生物活動(Bio)、海水交換による炭素の輸送(Trans)の 6 つである。各メカニズムについて、表層 50m のΩarag の変化に対する寄与を以下のように分けた。

$$\Delta\Omega\mathrm{arag}=\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial T}\Delta T+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial S}\Delta S+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{DIC}}\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Gas}}+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{Alk}}\Delta\mathrm{Alk}_{\mathrm{Fw}}+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{DIC}}\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Fw}}$$
$$+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{Alk}}\Delta\mathrm{Alk}_{\mathrm{Bio}}+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{DIC}}\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Bio}}+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{Alk}}\Delta\mathrm{Alk}_{\mathrm{Trans}}+\frac{\partial\Omega\mathrm{arag}}{\partial \mathrm{DIC}}\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Trans}}$$

$\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Gas}}$ は $CO_2$ フラックスの積分から、$\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Fw}}$ と $\Delta\mathrm{Alk}_{\mathrm{Fw}}$ は淡水フラックスの積分から計算した。同様に $\Delta\mathrm{DIC}_{\mathrm{Bio}}$ と $\Delta\mathrm{Alk}_{\mathrm{Bio}}$ は植物プランクトンの光合成、呼吸、動物プランクトンの排泄、デトリタスの再無機化、炭酸カルシウムの生成量の積分から求めた。

右辺の第1項は

$$\frac{\partial\Omega_{\mathrm{arag}}}{\partial T}\Delta T\cong\{\Omega_{\mathrm{arag}}(T_{(\mathrm{yr})},S_{(\mathrm{yr}-1)},\mathrm{DIC}_{(\mathrm{yr}-1)},\mathrm{Alk}_{(\mathrm{yr}-1)})-\Omega_{\mathrm{arag}}(T_{(\mathrm{yr}\text{-}1)},S_{(\mathrm{yr}-1)},\mathrm{DIC}_{(\mathrm{yr}-1)},\mathrm{Alk}_{(\mathrm{yr}-1)})$$
$$+\Omega_{arag}(T_{(\mathrm{yr})},S_{(\mathrm{yr})},\mathrm{DIC}_{(\mathrm{yr})},\mathrm{Alk}_{(\mathrm{yr})})-\Omega_{arag}(T_{(\mathrm{yr}\text{-}1)},S_{(\mathrm{yr})},\mathrm{DIC}_{(\mathrm{yr})},\mathrm{Alk}_{(\mathrm{yr})})\}\times\frac{1}{2}$$

とし、yr は対象の年を示す。他の項も同様の方法で計算し、輸送の効果は残差とした。それぞれのモデルの 1850 年から 2045 年のΩarag の変化について各メカニズムの寄与を示したのが図 2 である。ここで表層 50m に吸収された CO2 の効果を見る為にガス交換の項と輸送の項の差を Storage として定義した。

2 つのモデルとも、北極海表層の Ωarag の低下は主に CO2 吸収によるもので、淡水流入の効果はΩarag の変動の約 10%程度の寄与ということが示された。また、Ωarag を増加させる効果としては生物の効果が最も大きいことが示され、これまでの研究と整合的であることが示された(Steinacher et al., 2009)。また pH についても同様の解析を行い CO2 吸収が pH を減少させるメカニズムであることが分かった。

次に新モデルと旧モデルの予測の差がどの効果によるのかを調べる為に、2045 年(CO2≈520ppm)と

2090 年(CO2≈900ppm)についてモデル間の各効果の差を表 1 に示した。Ωarag については CO2 吸収と淡水流入の効果が主に予測の差に寄与しており、海氷減少の差が Ωarag の予測に影響を及ぼしていることが示された。2090 年の 2 つのモデル間の差が 2045 年に比べて小さいのは、CO2 吸収の効果が減少しているからである。これはモデル間の pCO2 の差が少なくなったことと、高い pCO2 濃度では低い pCO2 濃度に比べて、pCO2 の増加による Ωarag の減少が少ない為である。一方、pH については CO2 吸収と淡水流入に加えて水温の影響が大きい。2090 年の CO2 吸収の効果の減少は Ωarag と同じだが、水温の効果によってこれが打ち消されている。pH の予測は海氷減少の速度に加え、水温が将来どの程度上昇するかにも影響を受けることが示された。

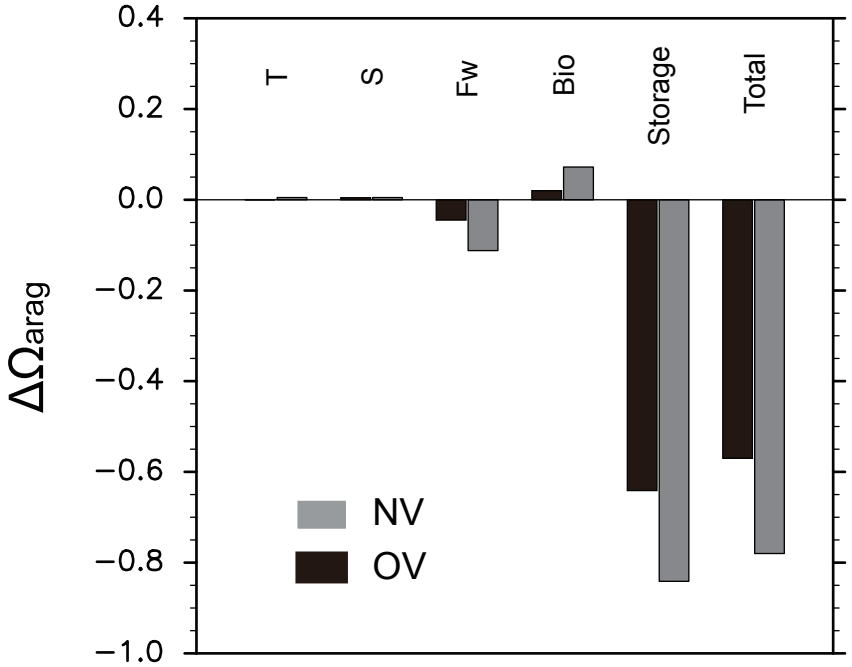



図 2: 各モデルおける 1850 年から 2045 年の北極海表層 50m の Ωarag の変化。黒: 旧モデル 灰: 新モデル。Ωarag の変化を温度(T)、塩分(S)、大気とのガス交換による海洋の $CO_2$ 吸収(Gas)、淡水フラックス(Fw)、生物活動(Bio)、海水交換による炭素の輸送(Trans)の 6 つの寄与に分け、$CO_2$ 吸収と輸送の差を Storage として示した。

(a)

| | T | S | Bio | Fw | Storage | Δ Ωarag(NV−OV) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2045 年 | +0.005 | +0.0005 | +0.002 | −0.047 | −0.17 | −0.21 |
| 2090 年 | +0.016 | −0.003 | +0.005 | −0.061 | −0.057 | −0.1 |

(b)

| | T | S | Bio | Fw | Storage | Δ pH(NV−OV) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2045 年 | −0.02 | +0.005 | +0.002 | −0.013 | −0.083 | −0.11 |
| 2090 年 | −0.056 | +0.015 | +0.005 | −0.017 | −0.03 | −0.09 |

表 1: 2045 年と 2090 年におけるモデル間の Ωarag(a)と pH(b)の差と 6 つのメカニズムの差。

(3) 海氷減少と季節変動の関係

北極海表層のΩaragの季節変化も海氷減少の影響を受けることが分かった（図3）。1990年代の季節変化は夏にΩaragが低くなり、冬に高くなる。夏期に値が低くなるのは海氷融解によってCO2の吸収と淡水フラックスが増加する為である。北極海以外の海域では、逆に冬にΩaragが低く、夏に高い。これは水温・気温の低い冬期にCO2吸収が多くなることや、混合が強くなること、春、夏期に生物活動が活発になる為である。北極海表層の Ωarag の季節変動の振幅は 0.1 以下であり、これまでの研究と調和的である(Steinacher et al., 2009)。

海氷が減少していくに従って、季節変動の振幅は弱くなっていく。夏期の海氷減少により淡水フラックスが減る一方、水温上昇と生物活動が活発化する為にΩaragの減少は抑えられる。その為、新（旧）モデルでは 2060(2090)年には季節変動の振幅が 0.04 にまで減少する。さらに冬期の海氷が大きく減少する新モデルではガス交換の季節変化が逆転し、冬期にCO2吸収が多くなる為にΩaragも減少するようになる。新モデルの2090年代の季節変化は1990年代の季節変化の逆位相となり、他の海域と同じような季節変動になった。また振幅は0.1以下であった。季節変化の逆転が見られた新モデルでは2100年の冬期の海氷面積が現在の30%程度まで減少すると予測している。一方2100年でも70%程度残ると予測している旧モデルでは、新モデルで見られたような季節変化の逆転は見られなかった。

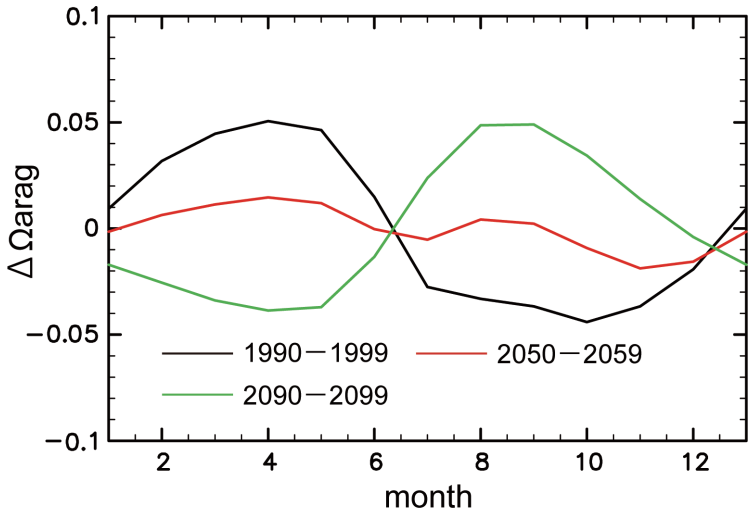



図3: 新モデルにおける北極海表層Ωaragの年平均値からの偏差。黒線: 1990年代、赤線: 2050年代、緑線: 2090年代

(4) 考察

去年度に引き続き、本年度も北極海表層の海洋酸性化が海氷減少速度の違いによってどのような影響を受けるのかについて解析を行った。本年度はまず、急激な海氷減少がおきると海洋のCO2吸収と淡水流入が増加する為にΩaragが減少し、pHについてはCO2吸収と淡水流入の他にも水温上昇の影響があることを示唆した。また冬期の海氷減少が進むと、冬期のCO2吸収が増加することからΩaragの季節変動が逆転することを示した。これらの結果は、IPCC AR5に提出される気候モデルにおいて北極海の海氷減少予測に違いがある場合に、北極海の海洋酸性化がどのように進むのかを理解をする上で重要な結果になると考えられる。

引用文献

Cao, L., and K. Caldeira (2008), Atmospheric CO2 stabilization and ocean acidification, Geophys. Res. Lett., 35, L19609, doi10.1029/2008GL035072

Frolicher, T. L., and F. Joos (2010), Reversible and irreversible impacts of greenhouse gas emissions in multi-century projections with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model Climate Dyn. 35, 7-8, 1439-1459, doi: 10.1007/s00382-009-0727-0.

Kawamiya, M., et al. (2005), Development of an Integrated Earth System Model on the Earth Simulator, J. Earth Simulator, 4, 18-30.

Orr, J. C., et al. (2005), Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, Nature, 437(7059), 681-686, doi:10.1038/nature04095.

Steinacher, M., et al. (2009), Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model, Biogeosciences., 6, 515-533

Stroeve, J., et al. (2007), Arctic sea ice decline: Faster than forecast, Geophys. Res. Lett., 34, L09501, doi:10.1029/2007GL029703.

Wang, M., and J. E. Overland (2009), A sea ice free summer Arctic within 30 years? Geophys. Res. Lett., 36, L07502, doi:10.1029/2009GL037820.

Yoshikawa, C., et al. (2008), Geographical distribution of the feedback between future climate change and the carbon cycle. J. Geophys. Res., 113(G3), G03002, doi:10.1029/2007jg000570.

Watanabe, S., et al (2011), MIROC-ESM: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments, Geosci. Model Dev., 4, 845-872, doi:10.5194/gmd-4-845-2011.

成果の発表

論文

Yamamoto A., M. Kawamiya., A. Ishida., Y. Yamanaka and S. Watanabe (2011), Impact of rapid sea-ice reduction in the Arctic Ocean on the rate of ocean acidification. Biogeosciences Discussions, 8, 10617-10644.

発表

Yamamoto, A., M. Kawamiya., A. Ishida., Y. Yamanaka and S. Watanabe (2011), Effect of sea ice decline in the Arctic Ocean on the rate of Ocean acidification, International Union of Geodesy and Geophysics General Assembly, Melbourne, 2011/7/2 (Oral)

山本彬友，河宮未知生，石田明生 (2011)，北極海における急激な海氷減少がアラゴナイト飽和どの将来予測に与える影響，日本海洋学会 2011 年度秋季大会，福岡, 2011/9/29（口頭発表）

山本彬友，河宮未知生，石田明生，山中康裕，渡辺真吾 (2012)，北極海における海洋酸性化の将来予測，国立極地研究所　共同利用研究集会 「北極海における環境変動・海洋現象のスケーリングに注目して」，東京, 2012/2/7（口頭発表）

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, Ocean Science Meeting, Salt Lake

City, 2012/2/23 (Poster)

Yamamoto, A., M. Kawamiya., A. Ishida., Y. Yamanaka and S. Watanabe (2012), Impact of sea ice decline in the Arctic Ocean on the rate of ocean acidification, Planet under pressure, London, 2012/3/26 (Poster)

# e.2 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

## e.2.1 Modelling Uncertainty in Climate Forecasts

FY2011-2012, February 2012.

**Summary**

Ever since the first general circulation models (GCMs) were developed in the late 1970s, it has been apparent that models created by different scientists produce quite different forecasts of the future, even when forced with the same scenario of future greenhouse gas concentrations. Of course the model results have many things in common, and all show persistent warming under increasing carbon dioxide concentrations. However the difference in the amount of warming on century and longer timescales between the different models remains significant, and seems likely to remain so. The most cursory comparison between models and data at the present day makes it clear that none of the models are perfect, and how to convincingly evaluate the relative worth of each model remains an open problem. The reason it is so difficult to validate the long-term forecast ability of the models is because the future climate is known to be unlike the climate in the recent past, and also to bear only partial resemblance to climates previously experienced by the earth.

Over the last few years there has been considerable debate over the nature of the differences between the models. Many have attempted to devise “metrics” which can be used to weight the models, or discard some from the ensemble. Others have argued quite the opposite, that the ensemble formed by putting all the models together is actually too narrow, and that more diversity between models is required. We have been involved in this debate, and in the last year have published several papers on this topic. We find that on broad spatial scales the spread of the GCMs is roughly commensurate with our uncertainty about the climate system for both modern and past climates. Thus there does not seem to be evidence that the ensemble should be considered either too broad nor too narrow when considered on these large scales.

We have arrived at this conclusion through a number of means. We have devised methods for efficient creation of ensembles from single models (Tachiiri et al 2012a, 2012b), including both relatively large ensembles of simple models, and smaller ensembles of very complex and computationally expensive GCMs such as MIROC5 (Shiogama et al (2012), Watanabe et al (2012)). Due to the problem mentioned above of the future being unlike the present day climate, we have used paleoclimates in order to update our confidence in the reliability of model ensembles (Hargreaves et al 2011). The results obtained suggest that the multi-model ensembles are reliable at least on broad temporal and spatial scales.

The understanding gained by these efforts provides the theoretical underpinnings for the work with the lightweight MIROC-based “loosely coupled model”, aimed at quantifying uncertainty due to the terrestrial carbon cycle. Given our result that the multi-model ensembles are reliable on broad scales, in this work we used the C4MIP and CMIP3 ensembles as a guide to the appropriate spread of our model ensembles for the present day climate. This ensemble was then further constrained by historical data and projected forwards 300 years into the future. The result obtained is that, to maintain carbon dioxide levels even to the moderate scenario, only very low emission are permissible beyond 2100.

**Understanding the CMIP ensemble**

The CMIP3 multi-model ensemble has been widely utilised for climate research and prediction, but the properties and behavior of the ensemble are not yet fully understood. We have presented some investigations into various aspects of the ensemble’s behaviour, in particular focussing on the performance of the multi-model mean (Annan and Hargreaves, 2011). We presented an explanation of this phenomenon in the context of the statistically indistinguishable paradigm, and also provided a quantitative analysis of the main factors which which control how likely the mean is to out-perform the models in the ensemble, both individually and collectively. Our analyses lend further support to the usage of the paradigm of a statistically indistinguishable ensemble, and indicate that the current ensemble size is too small to adequately sample the space from which the models are drawn. Figure 1 illustrates the main result, that the probability of a single model being better than the multi-model mean depends on the effective dimension of the ensemble.

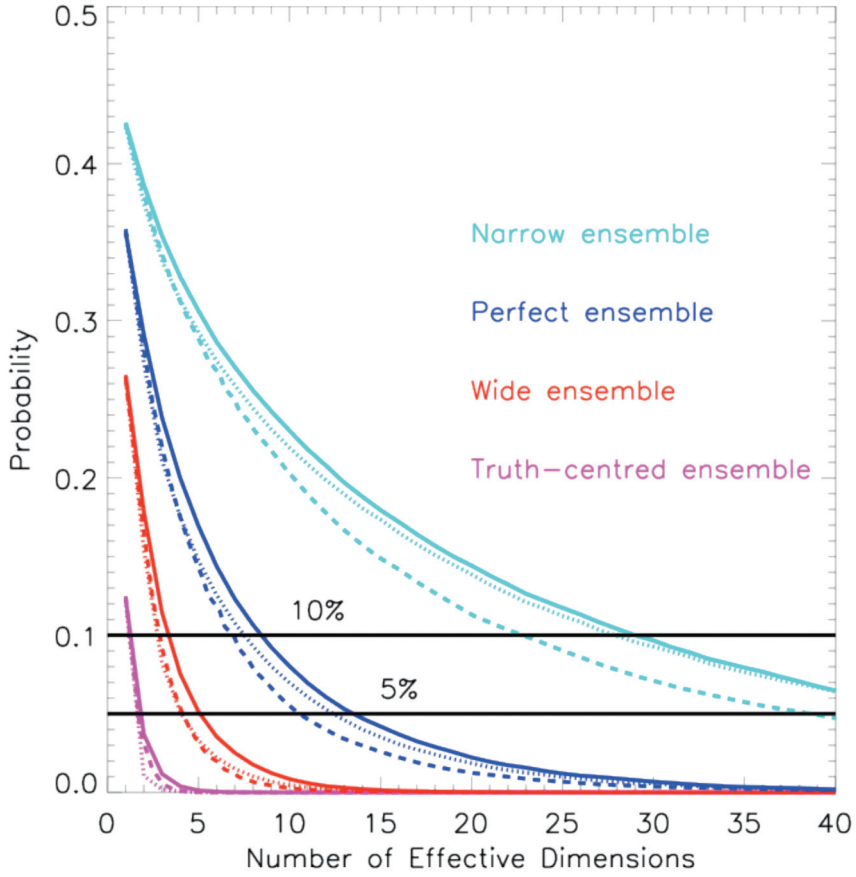



Figure 1: The probability that a single model is better than the multi-model mean, as a function of effective dimension. An ensemble of 25 models are drawn from the same distribution as the observations (dark blue line), or one that is narrower or wider by a factor of two (cyan and red respectively). Magenta indicates the truth-centred case. 5% and 10% thresholds are indicated for convenience. Solid lines indicate isotropic distributions, dotted lines indicate geometrically-decaying eigenvalues and dashed lines indicate eigenvalues that decrease as 1/i.

**Reliability of the CMIP ensembles for modern climate**

The reliability of several state-of-the-art climate model ensembles with respect to modern climate has been investigated. Our analysis reveals that CMIP3 is broadly reliable on the global scale, with a tendency towards over-dispersion. On the other hand, we found that single model ensembles are less reliable (Yokohata et al 2011). A single model ensemble of the new computationally expensive model MIROC5 is being developed, and similarly analysed (Shiogama et al 2012, Watanabe et al 2012). We devised the method for creating the ensemble without use of flux correction.

**Reliability of the PMIP ensembles for past climate**

Future climate is expected to be quite different from modern climatology, so reliable climate projections are not guaranteed from an ensemble validated only for the modern climate. Climate changes must also be investigated. We performed the first reliability analysis for the Last Glacial Maximum (Hargeaves et al 2011). Consistent with the reliability analysis for the modern climate, we found that the multi-model ensembles, created through the Paleoclimate Model Intercomparison Projects pass our tests of reliability, but a single model ensemble does not.

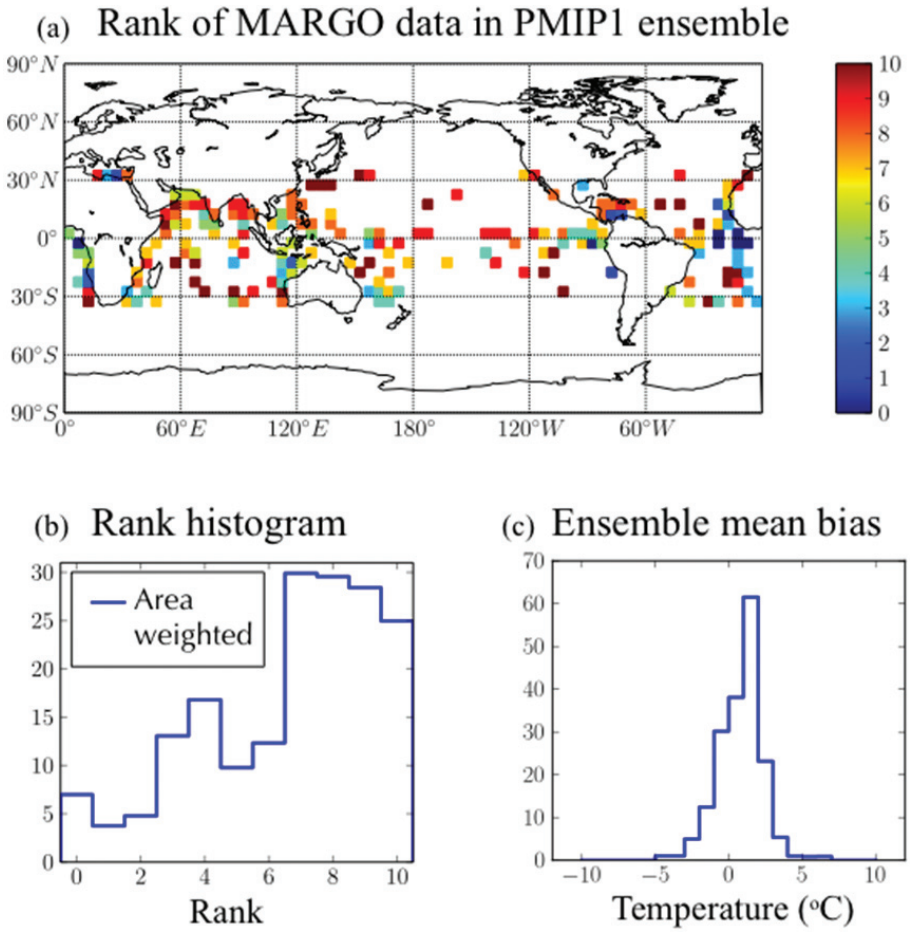



Figure 2: (a) The rank of the MARGO data in the PMIP1 air temperature for the range 35S to 35N. High rank (red on the colour scale) indicates that MARGO is warmer at the LGM than the ensemble. (b) Area-weighted rank histogram of the ranks in plot (a), shows the ensemble to be reliable. (c) The histogram of the difference between the PMIP1 air temperature ensemble mean and the MARGO data for each data point in plot (a).

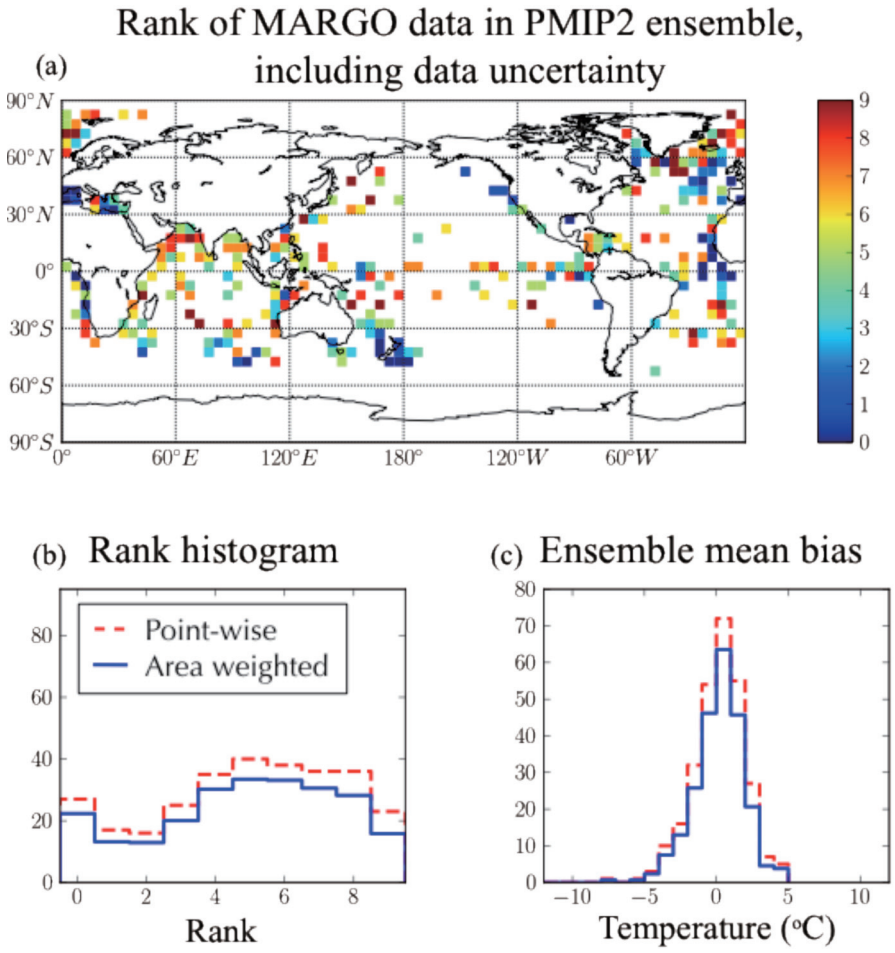



Figure 3: (a) The rank of the MARGO data in the PMIP2 SST for the whole globe. High rank (red on the colour scale) indicates that MARGO is warmer at the LGM than the ensemble. (b) Area-weighted rank histogram of the ranks in plot (a), indicate that the ensemble is reliable. (c) The histogram of the difference between the PMIP2 SST ensemble mean and the MARGO data for each data point in plot (a). Both area-weighted and point-wise rank histograms are shown. Uncertainty in the MARGO data is included in the analysis.

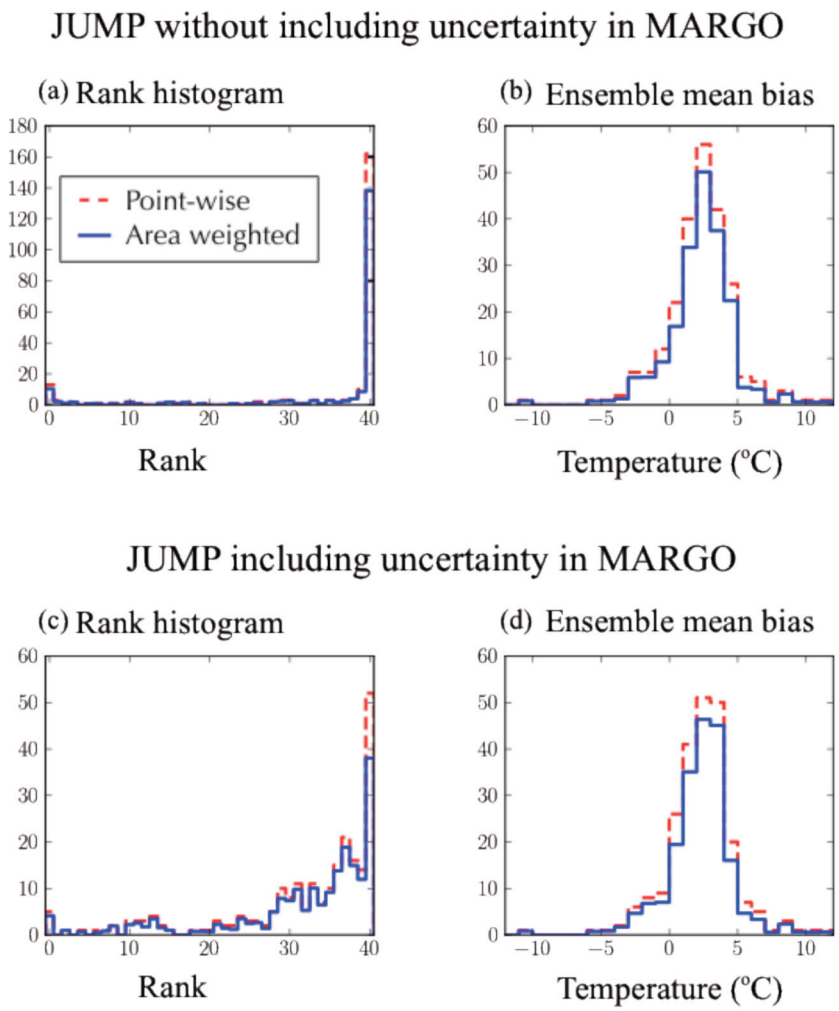



Figure 4: Rank histogram analysis for the JUMP single-model ensemble with (c-d) and without (a-b) inclusion of MARGO data uncertainty. (a),(c) Area-weighted, and point-wise rank histograms. High rank indicates that MARGO is warmer at the LGM than the ensemble. (b),(d) Histograms of the difference between the JUMP ensemble mean and the MARGO data. In both cases the ensembles are not reliable.

We have analysed the reliability of two PMIP ensembles (PMIP1 and PMIP2) and one single-model ensemble (JUMP) using the MARGO sea surface temperature data synthesis for the Last Glacial Maximum. Within the constraint that for PMIP1 only air temperature data can be analysed and this only for the lower latitudes, due to the unavailability of sea surface temperature data, we find that neither ensemble is shown to give unreliable predictions of the MARGO data (Figures 2 and 3). The PMIP2 ensemble is somewhat narrower than that of PMIP1, but once the uncertainty in the MARGO data is taken into account, there is no indication that it is too narrow. Rather it seems that model development including the addition of the coupled dynamical oceans in PMIP2 have caused the ensemble to be improved. This work indicates the vital importance of including uncertainty estimates along-side paleoclimate data. If we had not had the error estimate, we might have falsely concluded that the PMIP2 ensemble is too narrow. Further work to better model the data uncertainty estimate would be valuable for analyses such as these.

The JUMP ensemble is found to be extremely unreliable, even when the MARGO data uncertainty is included in the analysis (Figure 4). This result is consistent with ongoing work analysing several single model ensembles for the present day Yokohata et al 2012}. It would appear that, in order to sample as wide a range as the multi-model ensembles, a much broader range of parametric changes would need to be varied, which would be computationally problematical. Comparing the JUMP and PMIP2 ensembles supports our previous conclusion, that the JUMP climate sensitivities of greater than 4C are less consistent with the data than the generally lower climate sensitivities of the PMIP2 models.

Comparison of the PMIP2 and PMIP1 ensembles reveals that the addition of the coupled ocean models in PMIP2 have caused systematic differences in the modelled LGM state. It can be inferred from the surface air temperatures that the PMIP2 ensemble is probably more consistent with the data in the high latitudes than PMIP1. There is a less southward extension of sea-ice with the PMIP2 models; the dynamical

oceans are causing northward heat transport to be increased at least as far as 30N. Despite these systematic differences, and a general narrowing of the ensemble, there is a wide range in the strength of the Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) in the PMIP2 models. Stronger AMOC LGM anomaly correlates with stronger Atlantic northward heat transport LGM anomaly. There is also weak evidence for the PMIP2 models with lower AMOC (and NHT) LGM anomaly being more consistent with the data, which would also be consistent with the observationally derived estimates of the AMOC LGM anomaly. The ensemble size is not, however, sufficiently large to draw confident conclusions, and so it is important that this is increased to enable robust characterisation of the climate system behaviour. The ensemble size for the LGM is expected to increase considerably over the next few years, as the PMIP3/CMIP5 runs become available. Increasing the robustness of these result would also be helped by having available data representative of a range of variables including in the ocean at depth rather than only the surface, and initiatives are underway to increase the scope of ocean data syntheses. Research continues on this topic including more data, new model results and other paleoclimates.

**Feedback analysis for the Last Glacial Maximum**

Full feedback analysis of the MIROC3.2 single model ensemble, run for modern, future and paleoclimates, revealed that the feedback and climate sensitivity parameters depend on the nature of the forcing and background climate state, which must be taken into consideration when using past climates to estimate future changes (Yoshimori et al 2011).

**Observational assessment of climate model performance**

Comparison of model outputs with observations of the climate system forms an essential component of model assessment and is crucial for building our confidence in model predictions. We have shown that the popular approach (in IPCC AR4) of comparing the ensemble spread to a so-called “observationally-constrained pdf” can be misleading, resulting in inappropriate rejection of the ensemble. We have presented a more theoretically justified approach, and shown how it may lead to more optimistic conclusions.

The results from our observational analysis are presented in the left hand panel of Figure 5, together with 50 samples from a`CMIP3' proxy ensemble of energy balance models. It is clear that the posterior of this analysis has a far greater spread than the ensemble, with a 90\% probability range of 1.82-7.62 K (range of 5.80 K) for equilibrium sensitivity. The equivalent ranges for the ensemble are 1.77-4.23 K (range of 2.46K) for sensitivity. Thus, the posterior pdf has a substantially greater range than the ensemble, just as in much of the published literature. It might appear to some that our ensemble ``may not cover the full range of uncertainty''. However, the right hand panel of Figure 5 shows the outputs of the CMIP3 ensemble of GCMs, calculated from the 20th century simulations. The models represent a broader spectrum of behaviours than can be represented by the energy balance model, possibly due to forcing differences, as well as more sophisticated dynamical behaviour. The observations of climate change fall well within the ensemble spread, and there is no reason to reject the ensemble.

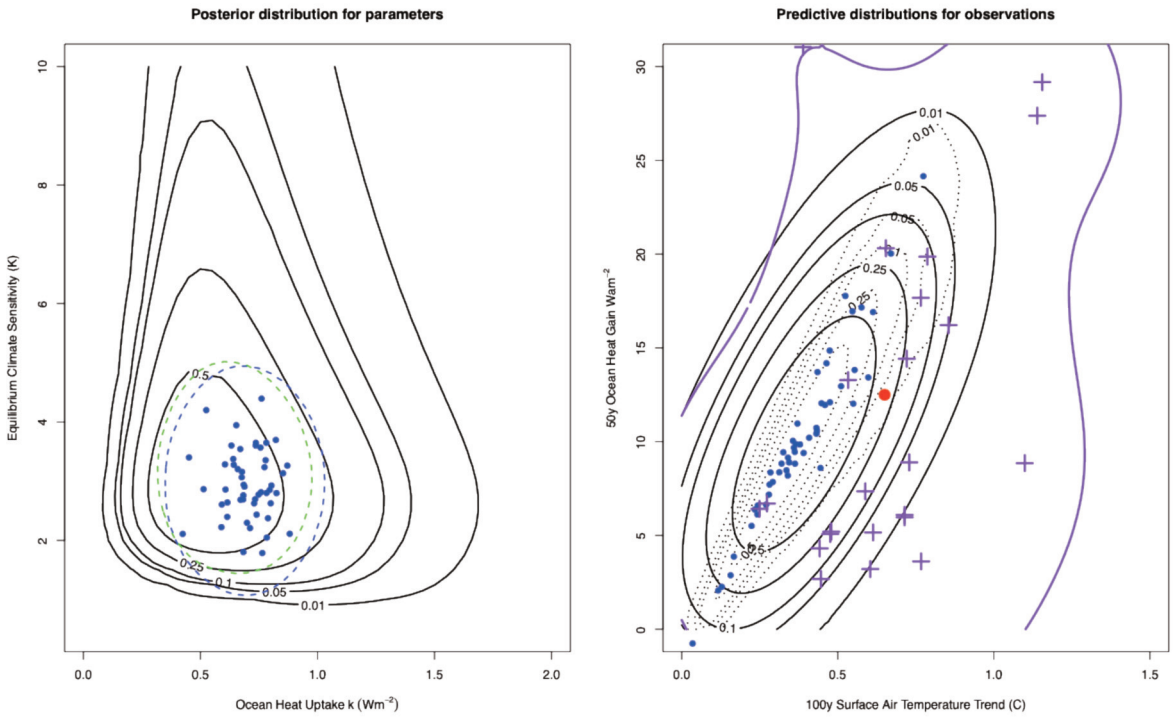



Figure 5: Left panel: Posterior joint pdf for equilibrium sensitivity and ocean heat uptake parameter, conditioned on observations of 100y temperature trend and 50y oceanic warming. Black contours indicate probability levels as labelled. Blue dots represent energy balance models with parameters sampled from the CMIP3-inspired distribution, and blue dashed line indicates 90\% probability contours of this distributions. Green dashed line indicates 90\% probability contour of the posterior after updating with observational likelihood. Right panel: Predictive distributions from energy balance model based on CMIP3 parameters. Solid lines indicate predictive pdf for observations, when accounting for their uncertainty. Dotted contours indicate probability distribution without accounting for observational uncertainty. Red dot indicates observation. Purple crosses indicate outputs of the CMIP3 simulations, and purple line marks their 90% probability level.

We have shown that the popular evaluation of ensemble spread, based on a direct comparison with a pdf based on observational constraints, can be highly misleading. Disagreement between these two pdfs is virtually certain, but such an analysis does not directly address the fundamental question of whether the ensemble provides reliable predictions. Therefore, we recommend that researchers should avoid presenting such unhelpful comparisons in future. An alternative approach (Figure 5), which directly addresses the question of predictive performance, enables us to evaluate to what extent the observations support or contradict the ensemble. In many cases, we expect that this approach will result in the conclusion that observations actually enhance our confidence in the models. We have demonstrated that an ensemble can only be meaningfully challenged by observations which are both distant from it, and precise.

**Investigating uncertainty in the carbon cycle.**

We have used an earth system model of intermediate complexity within a probabilistic framework to estimate the range of future temperature change and allowable emissions corresponding to a medium CO2 concentration pathway (RCP4.5). Uncertainty is initially estimated by allowing the equilibrium climate sensitivity, aerosol forcing and intrinsic physical and biogeochemical processes to vary within the widely accepted ranges. The results are then further constrained by extensive use of contemporary measurements. The resulting range of temperatures corresponding to RCP4.5 remains large. By year 2300, the predicted global temperature increase from pre-industrial has ± 2 standard deviation range of 1.4K, either side of a mean of 3.0K with 91% probability for increase over 2K. This result has major implications for future planning, as the difference between the upper and lower levels of warming may be expected to be enormous in terms of impacts, and quite possibly could differentiate between what is deemed "dangerous change" or otherwise. After constraint using contemporary data, the ensemble mean of the experiment allows similar emissions to the standard RCP4.5 emission scenario. The allowable emission for the peak emission period is projected as 11.5±2.0 PgC yr-1. Our ensemble demonstrates that, with high probability, drastic cuts in emissions will be required and that there is a probability of around 2% that there will need to

be an extended period of time with global negative emissions. (see Tachiiri et al 2012b and the report by Kaoru Tachiiri for further details on this topic)

Considerable uncertainty remains about the combined effects of multiple limiting factors on the growth and nutrient uptake of oceanic phytoplankton, which constitute the base of the marine food web and mediate biogeochemical cycles of carbon and nutrients. We used Bayesian statistical analysis to disentangle the combined effects of temperature and concentration on uptake of the important nutrient nitrate as measured by oceanic field experiments. Compared to the Michealis-Menten uptake kinetics as applied in most large-scale models, accounting for a physiological trade-off between maximum uptake rate and affinity for nutrient yields a more consistent model, which agrees better with the data and implies a significantly greater inferred temperature sensitivity. These findings impact our understanding of how marine ecosystems and biogeochemical cycles will respond to climate change and anthropogenic nutrient inputs, both of which are expected to alter the relationship between nutrient concentrations and temperature in the near- surface ocean (Smith, 2011).

**Papers**

**Submitted:**

H. Shiogama, M. Watanabe, M. Yoshimori, T. Yokohata, T. Ogura, J.D. Annan, J.C. Hargreaves, M. Abe, Y. Kamae, R. O'ishi, R. Nobui, S. Emori, T. Nozawa, A. Abe-Ouchi and M. Kimoto. Physics Parameter Uncertainty and Observational Constraints of Climate Feedback: An Ensemble of Coupled Atmosphere Ocean GCM without Flux Corrections. Submitted to Climate Dynamics, 2012.

M. Watanabe, H. Shiogama, T. Yokohata, Y. Kamae, M. Yoshimori, T. Ogura, J.D. Annan, J.C. Hargreaves, S. Emori, and M. Kimoto. Using a Multi-Physics Ensemble for Exploring Diversity in Cloud Shortwave Feedback in GCMs. Submitted to Journal of Climate, 2012.

K. Tachiiri, J.C. Hargreaves, J.D. Annan, C. Huntingford, and M. Kawamiya, Allowable carbon emissions for a medium mitigation scenario, submitted to Nature Climate Change, 2012b.

**In Press/Published online:**

K. Tachiiri, A. Ito, T. Hajima, J.C. Hargreaves, J. D. Annan, and M. Kawamiya, Contribution of parametric uncertainty in a process-based vegetation model to climate- and concentration-carbon cycle feedbacks, JMSJ, 2012a.

M. Yoshimori, J. C. Hargreaves, J. D. Annan, T. Yokohata, and A. Abe-Ouchi,Dependency of Feedbacks on Forcing and Climate State in Physics Parameter Ensembles, Journal of Climate, draft online 2011.

Yokohata, J.D. Annan, M. Collins, C.S. Jackson, M. Tobis, M.J. Webb, J.C. Hargreaves, Reliability of multi-model and structurally different single-model ensembles, Climate Dynamics, DOI 10.1007/s00382-011-1203-1, Online first 2011.

**Published:**

S. Lan Smith. Consistently modeling the combined effects of temperature and concentration on nitrate uptake by phytoplankton in the ocean. Journal of Geophysical Research --Biogeosciences 116: G04020, doi:10.1029/2011JG001681, 2011

J.D. Annan, J.C. Hargreaves and K. Tachiiiri, On the observational assessment of climate model performance, GRL, VOL. 38, L24702, 5 pages, doi:10.1029/2011GL049812,2011.

J.C. Hargreaves, A. Paul, R. Ohgaito, A. Abe-Ouchi, J. D. Annan, Are paleoclimate model ensembles consistent with the MARGO data synthesis? Climate of the Past 7, 917–933, doi:10.5194/cp-7-917-2011, 2011.

J.D. Annan and J.C. Hargreaves, Reply to Henriksson et al.'s comment on "Using multiple observationally-based constraints to estimate climate sensitivity" by Annan and Hargreaves, CP, 7, 587-589. 2011

J. D. Annan and J. C. Hargreaves, Understanding the CMIP3 multi-model ensemble, Journal of Climate, 24, 4529–4538. doi: 10.1175/2011JCLI3873.1, 2011.

J.D. Annan and J.C. Hargreaves. On the generation and interpretation of probabilistic estimates of climate sensitivity. Climatic Change, Volume 104, Numbers 3-4, 423-436, 2011 DOI:10.1007/s10584-009-9715-y

## e.2.2 簡略化モデルを用いた長期気候変動・許容排出量の不確実性評価

担当機関:海洋研究開発機構
研究者名:立入 郁

**要旨(a.)**

世界の気候研究センターにより、代表的な濃度経路シナリオ(RCP)に基づいた地球システムモデル実験が進んでいる。大気中の温室効果ガス濃度の将来経路に基づいて予測されるもののうち、最も重要な量は気温上昇であるが、それとともに社会経済学的に重要なものとして許容排出量がある。ここでは、確率的なフレームワークを使用して穏健な $CO_2$ 濃度経路(RCP4.5)に対する将来の気温変化と許容炭素排出量の範囲を推定した。不確実性は、平衡気候感度、エアロゾルフォーシング、重要な物理的および生物地球化学的プロセスを広く受け入れられている範囲内で変化させることによって考慮した。計算結果は、現在気候についての観測データによって制約した。RCP4.5 に対応する気温変化の不確実性は制約後も大きいままであり、2300 年における産業革命前からの予測気温上昇は、3.0±1.4K(2×標準偏差)であった。この結果は、地球温暖化の予測幅の上限と下限に大きな差があることを示しており、将来の排出量抑制計画を策定する上で重要な意味を持っている。現在気候のデータを使用して制約した後の許容排出量のアンサンブル平均は RCP4.5 の標準排出量シナリオに近く、排出量がピークになる時期の許容排出量は 11.5±2.0 PgC yr-1 であった。

(1) はじめに

経済活動用のエネルギーに対する社会的要求と化石燃料の燃焼が非常に緊密にリンクされている現在では、温室効果ガス濃度の将来経路実現の困難さの評価が必要である。これは特に、非化石燃料代替エネルギー源の利用や脱炭素化を仮定した経路で重要になる。$CO_2$ 排出量とその結果の大気中 $CO_2$ 濃度を関係づけることは複雑な作業であり、温度上昇のみならず陸域・海洋が大気から二酸化炭素をどれぐらい吸収できるかに大きく依存する。例えば陸域生態系の炭素吸収量は、高 $CO_2$ 濃度条件で増加する光合成量と気温上昇に伴って増える植物・土壌呼吸のバランスで決まる。気候感度が現在の推定幅の高い方の端に近い場合、近い将来陸域は炭素を吸収する側から放出する側へと変化する可能性も指摘されている(Cox et al., 2000)。このような場合、与えられた濃度経路を満たすための許容排出量は非常に小さいものになる。

IPCC 専門家会議(Taylor et al., 2009)は、21 世紀について気候モデルのフォーシングとして使用される代表的な濃度経路(RCPs)を策定した。RCPs には温暖化ガスの大気中濃度の変化によって起こる 2100 年の目標放射強制力の値に基づいて名付けられた 4 つのシナリオがあり、これらは IPCC 第 5 次評価報告書で参照される結合モデル相互比較プロジェクト･フェーズ 5(CMIP5)で使用されている。我々は、穏健なシナリオである RCP4.5(とその 2300 年までの延長シナリオ、Moss et al., 2010, Meinshausen et al., 2011a)を用いて解析を行なった。このシナリオは、2 つのコア RCP シナリオの一つであり、他方は RCP8.5 と呼ばれる高排出シナリオである。RCP4.5 は 2100 年時点で大気中 $CO_2$ 濃度約 550 ppm に相当する約 4.5 Wm-2 の増加を仮定しており、その後、その値を維持するような人為的温暖化ガス排出を想定している。

各 RCP 濃度シナリオに対応する標準的な排出シナリオでは、約 3K の気候感度を持つ単一のモデル(MAGICC、Meinshausen et al., 2010a)が用いられている。様々な RCPs についての地球システムモデル

による許容排出量の推定結果はいくつか公表されており（Arora et al., 2011, Hajima et al., submitted）、これらによる見積りは当然、MAGICC によって求められた許容排出量（排出量シナリオ）とは異なる。それぞれのモデルは異なった気候感度を持っており、全球スケールの炭素循環の特質も異なっているため、複数モデルにより広い範囲の結果が生まれる。したがって、そのような不確実性を考慮し、さらにそれらを観測データによって制約する必要がある。ここでは、IPCC 第 4 次評価報告書で提示された科学的なコンセンサスと一致するパラメータ範囲に対応する、気候変動に関連した重要な量の不確実性の範囲を評価することができるモデリングシステムを用いた。

**手法**

本研究は、陸域生態系モデル Sim-CYCLE（Ito and Oikawa, 2002）と MIROC-lite（Oka et al., 2010）を緩やかに結合した JUMP-LCM（Tachiiri et al., 2010）を使用した。MIROC-lite は海洋生態系を含む簡略化大気海洋結合モデルであり、Sim-CYCLE は GCM（MIROC3.2 中解像度版、K-1 model developers, 2004）の気象出力アーカイブによって駆動される。JUMP-LCM の現在のバージョンでは、炭素収支に及ぼす影響としては、気候システムによる生態系炭素量へのフィードバックのみを考慮しており、これによって大規模なアンサンブルを可能にする。実験に先立ち、産業革命前の条件を用いた十分長いスピンアップ（MIROC-lite は 3000 年、Sim-CYCLE は 2000 年）を行った。本実験では、RCP4.5 濃度シナリオ（Moss et al., 2010; Meishausen et al., 2011a）を用いて JUMP-LCM モデリングシステムを走らせた。このシナリオは、約 550 ppm で大気中の $CO_2$ 濃度を安定化させるものであり、シナリオの名前は、2100 年時点で想定される 4.5 Wm-2 程度の放射強制力（$CO_2$ 及び非 $CO_2$ の合計）に基づいている。ここでは、1850 年（産業革命前）から 2300 年までのアンサンブルシミュレーションを行った。$CO_2$ 以外の温室効果ガスの影響、成層圏/対流圏のエアロゾル、太陽活動などは、RCP シナリオ（http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/）の放射強制力データを用いた。

摂動パラメータとその範囲を表 1 に示す。JUMP-LCM モデリングフレームワークのパラメータ値の範囲は、Tachirii et al. (2010; 2012)から最初の範囲を決め、C4MIP（Friedlingstein et al., 2006）のモデル不確実性をカバーするためにシフトさせた。C4MIP シミュレーションでは、フィードバックに関する 5 つのパラメータを用いてモデルの挙動を表現する。それらは、線形過渡気候感度（α）、陸域・海洋の炭素貯蔵量の大気 $CO_2$ 濃度変化に対する感度（$\beta_L$ と $\beta_O$）および全球平均気温変化に対する感度（$\gamma_L$ と $\gamma_O$）である。平衡気候感度と表 1 に示すように固定されたエアロゾルフォーシングを除いて、JUMP-LCM の α、β、γ の値を C4MIP に近づけるために、パラメータ摂動レンジのチューニングを行った（このプロセスは 20 のメンバーの小規模アンサンブルを用いて行った）結果、本研究におけるアンサンブルは、これらについて C4MIP に近い値を実現している（表 1 下部）。本実験のアンサンブルには、全部で 512 のメンバーが含まれており、各々のパラメータセットは表 1 のパラメータレンジに基づいてラテンハイパーキューブを使用して生成された。全てのパラメータの摂動（表 1）を一様分布とした。気候感度については現実的ではないが、棄却サンプリング（選択したメンバーの間では重みの差なし）を用いてさまざまな確率分布に対応できる設定とした。本研究では、気候感度について現実的な確率分布関数を考慮するために、ベータ関数を使用してサンプリングした。これは、約 3K で最大値をとる非対称の確率分布である。

表 1 摂動パラメータとその範囲（上）及び C4MIP モデルとのフィードバックパラメータ比較（下）
α、β、γ の意味は本文参照。 l,o は陸と海を示す。 *および**：深さおよびバイオーム依存。 †：一様分布による摂動後ベータ関数で棄却サンプリング。

| Parameter | Component | Default | Perturbation range |
|---|---|---|---|
| Climate sensitivity | Atmosphere | 4.7 | 1-6 K† |
| Vertical diffusivity | Ocean | 0.1-3.0 cm2sec-1* | 0.3-3.0 x default |
| Horizontal diffusivity | Ocean | 1x107 cm2sec-1 | 0.5-5.0 x default |
| Gent-McWilliams thickness parameter | Ocean | 7x106 cm2sec-1 | 1-20 x 106 cm2sec-1 |
| Magnitude of freshwater flux adjustment | Ocean | 1.0 (ratio to the ref. 25) values | 0.5-2.0 |
| Wind speed used in marine CO2 uptake | Marine carbon | 3.3ms-1 | 2.0-8.0 ms-1 |
| Maximum photosynthetic rate | Land carbon | 8.0-13.5 μmolCO2m-2s-1** | 0.8-3.0 x default |
| Specific leaf area | Land carbon | 110-170 cm2(g drymatter) -1** | 0.5-2.5 x default |
| Minimum temperature for photosynthesis | Land carbon | -5.0-11.0 °C | -4.5-+3.0 °C of default |
| Coefficient for temperature dependency of plant's respiration | Land carbon | 2.0 (dimensionless) | 1.5-3.0 |
| A parameter of temperature dependency of soil respiration | Land carbon | 46.02 K | 35-55 K |
| Total direct aerosol forcing | Forcing | (RCP4.5) | 0.0-2.0 x RCP4.5 |

| | Unit | This study | C4MIP |
|---|---|---|---|
| $\alpha$ | K/ppm | 0.0054±0.0013 | 0.0061±0.0012 |
| $\beta_L$ | PgC/ppm | 1.1±0.3 | 1.3±0.6 |
| $\beta_O$ | PgC/ppm | 1.2±0.3 | 1.1±0.2 |
| $\gamma_L$ | PgC/K | -97±75 | -79±44 |
| $\gamma_O$ | PgC/K | -33±11 | -31±16 |

制約に利用した観測データセットを表 2 に示す。確率関数は、全球平均地上気温と海洋の熱容量の変化については t-分布、大西洋の子午面循環については閾値、他についてはガウス分布を仮定した。二次元データについては、Murphy et al. (2007)で使用されている重みと同様の考え方で計算された重みを使用した。すなわち、最初に全球の空間的な分散に対する各アンサンブルメンバーの平均二乗誤差の比を計算し（Murphy et al (2007) の Climate Prediction Index への類似性のためにここでは CPI'と呼ぶ）、これを使用して重み（W）を W = exp [-CPI '/ 2]のように計算し、さらにウェイトの合計が 1 になるように標準化した。三次元の海水温と塩分濃度については、4 層の重みの積として重みを計算した。

表 2 シミュレーションの制約に使用した観測データ
†：値は 0-50/50-600/600-2000/2000-5500m の値。

| No. | Variables | (Average ±) SD | Assumed distribution |
|---|---|---|---|
| 1 | Trend of global mean air surface temperature (1906-2005) | 0.74±0.11 (K 100y-1) | T |
| 2 | Trend of ocean heat content for 0-700m depth (1969-2003) | 0.32±0.05 ($10^{22}$ J y-1) | T |
| 3 | Historical emission (1959-2005) | 7.0±0.76 for 1980s, 8.0±0.81 for 1990s, 9.1± 0.86 for 2000-8 (PgC y-1) | Gaussian |
| 4 | Net Primary Production (1961-90, spatial (2D)) | 363 (gC m-2 yr-1) | Gaussian |
| 5 | Atlantic meridional overturning circulation (after spinup for 1850) | 10 Sv | Threshold |
| 6 | Present air surface temperature (mean for 1968-96, spatial (2D)) | 21.8 (K) | Gaussian |
| 7 | Present sea temperature (mean for 1990-97, spatial (3D)) | 11.1†/5.9†/1.9†/1.1† (K) | Product of Gaussian based weights for 4 layers |
| 8 | Present sea salinity (mean for 1990-97, spatial (3D)) | 1.5†/0.58†/0.27†/0.17† (psu) | Product of Gaussian based weights for 4 layers |
| 9 | All variables | -- | Product of 1-8 |

制約の際には次のような注意を要する。例えば、モデルパラメータの中には、現在気候とはよく対応しても、将来気候（あるいはモデルが改良された場合）にもよい予測に結びつくとは限らない場合がある。気候モデルの一部のプロセスまたはパラメータの中には、地球温暖化がさらに進んだ場合に顕在化するものもありえ、これらは現在気候では重要なものとして認識されないことがあるためである。一方、現代の測定値に基づいて評価した場合には評価が低いアンサンブルメンバーでも、将来気候の予測には優れた性能を示す場合もありうる。また、全ての重みは、いくらかの恣意性を含んでいる。

これらの問題について、Knutti et al. (2010) は、重みの利用が最も効果的になるのは、重みが比較的単純だが統計的にロバストであり、かつ結果が外部のデータ（例えば、forcing）や重み自体の細かい設定に強く依存しておらず、さらに結果が既知のプロセスで説明可能な場合であると指摘している。

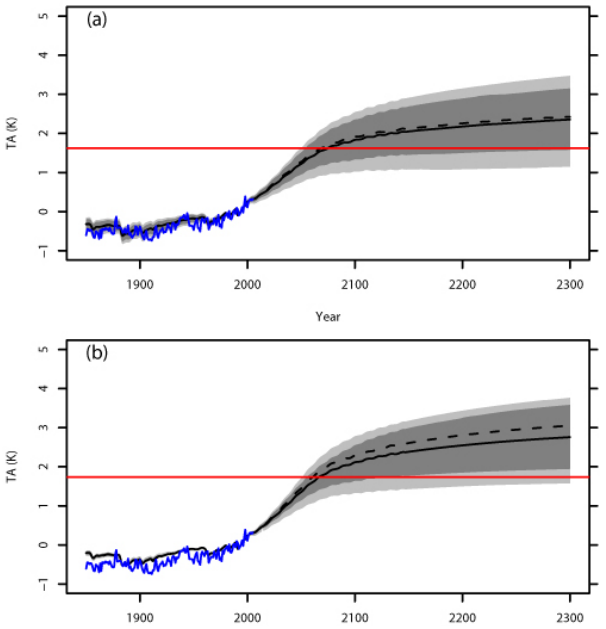



図 1 1850～2300 年の全球平均地表面気温変化
（a）制約前、（b）制約後。黒：アンサンブル平均（点線は中間値）、濃・淡グレー：68%（16～84 percentile）、90%（5～95 percentile）の範囲。青：HadCRU データ。1980-1999 の平均値からの変化を示す。赤いラインは産業革命以前から 2K の増加を示す。

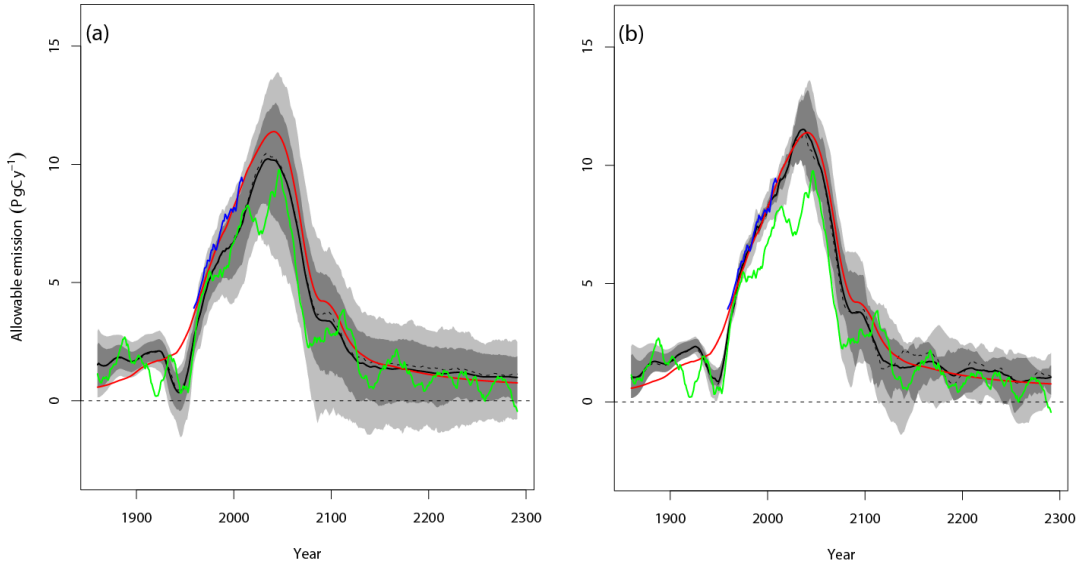



図 2 1850～2300 年の許容排出量（20 年平均値）
制約前（a）、制約後（b）における化石燃料起源と土地利用の合計許容排出量。黒：アンサンブル平均（点線は中間値）、濃・淡グレー：68（16～84 percentile）、90（5～95 percentile）％の範囲。赤：RCP4.5 排出量シナリオ、緑：MIROC-ESM モデル、青：排出量の見積りデータ（CO2now.org）。

**結果**

本実験で得られた全球平均気温の時系列を図 1 に示す。制約しない場合（図 1a）では、2300 年（1980 年から 1999 年の平均値からの変化）までの気温変化は 2.4±1.5 K（2 標準偏差（SD））であり、これは産業革命前のレベル（1850 年から 1869 年の平均）からの変化で言えば 2.8±1.4 K に相当する。観測データによる制約後は、上昇幅が少し大きくなってそれぞれ 2.8±1.4 K と 3.0±1.4 K となる（図 1b）。これらは、MAGICC による結果（Meinshausen et al., 2011b）よりも少し大きな値になっている。

観測データによる制約は、与えられた大気 $CO_2$ 濃度経路のための大気・海洋・陸域の炭素量の変化の和である許容排出量（図 2）についても影響を与える。図 2 では、土地利用や化石燃料の $CO_2$ 排出量を区別せず、合計の許容炭素排出量を示している。RCP4.5 シナリオの大気 $CO_2$ 濃度を実現するためには、排出量は今世紀の半ばにほぼピークに達した後、その後急速に低減させる必要がある。ピーク排出量期間における許容排出量は 11.5±2.0 PGC yr-1 であり、これは RCP 排出量シナリオの値（11.4 PgC）と近く、地球システムモデル MIROC-ESM（9.8 PgC yr-1）を上回る。また、22 世紀後半では、アンサンブル平均でわずか 1 PgC yr-1 の低い年平均炭素排出量が要求される。制約前は、2000～2150 年のほとんどで、アンサンブル平均は RCP 排出量シナリオ（図 2a の赤い線）よりも低い許容排出量を持っており、我々のアンサンブル平均－0.6×標準偏差に近い。図 2b は、観測データを用いて制約した後の許容排出量を示している。この場合は、本研究のアンサンブル平均（黒実線）は RCP 排出量シナリオの値（赤線）に近い。歴史的な排出量データ（青線）は RCP4.5 排出シナリオに近く、また本研究のアンサンブルの不確実性の範囲に含まれる。MIROC-ESM のシミュレーション（緑線）は、制約のない場合には本実験のアンサンブルに近いが、制約後は低くなっている。全体的に、制約後（図 2b）には、許容排出量は、制約のない場合（図 2a）よりも高くなった。制約に際しては、海洋の熱含有量と炭素排出量が、最も強く許容排出量を制約した。図 2a および 2b の両方に見られる顕著な特徴は、RCP4.5 濃度シナリオを達成するためには、約 2100 年以降の世界全体の排出量を負の値にする必要があることを示しているということである。これは、人為的または自然から排出される炭素量を上回る速度で大気中から $CO_2$ を取り除く技術の必要性を意味する。食料や水安全保障を維持するためいくらかの化石燃料燃焼が必要とされ、完全に将来の人為的排出を排除することはできないという議論があり（Bowerman et al., 2010）、この場合、排出量が負にならないアンサンブルメンバーでも、22 世紀以降低い値を取る場合は $CO_2$ 固定の工学的解決の必要性を示唆する。

図 3 に、ピーク排出量時期、およびその後の安定化時期についての許容排出量と各パラメータの値の関係を示す。図に見られるように、気候感度、大気―海洋 $CO_2$ 交換量計算に使われる風速、最大光合成速度、植物呼吸量の温度感度などが許容排出量に大きな影響を及ぼしていた。

本研究では、中程度に複雑な地球システムモデルを使用することにより、全球平均気温と許容排出量の確率的予測を行なった。現在の計算機資源でこのような分析を行うために簡略化されたことから必然的に、気候システム内のいくつかのフィードバック（アルベドフィードバック、蒸発散など）が明示的にモデル化されていないことを意味している。今後、より計算機の能力が向上されれば、より複雑なモデルを使用して同様の手法を用いた解析が可能になる。

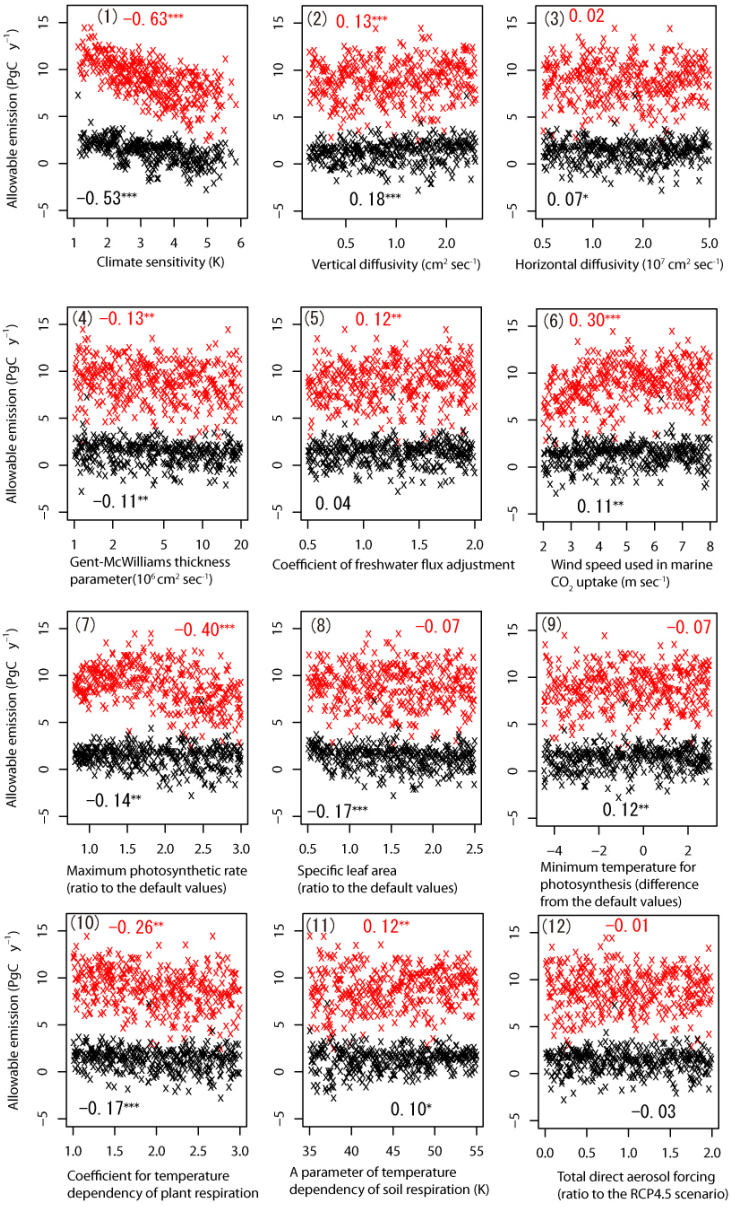



図 3 ピーク排出量期間（2025 年から 2074 年、赤）および安定期（2151 年から 2200 年、黒）の平均許容排出量とパラメータ値の関係。

(1)～(12)は表 1 と同じ順序である。棄却サンプリング後の 358 メンバーについて図示する。各プロットエリア内の数値は相関係数であり、*/ **/ ***は 90/95/99%準で統計的に有意であることを示す。

参考文献

Arora, V. K. et al. (2011), Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, Geophys. Res. Lett., 38, L05805, doi:10.1029/2010GL046270.

Bowerman, N. H. A., Frame, D. J., Huntingford, C., Lowe, J. A. and Allen, M. R. (2011), Cumulative carbon emissions, emissions floors and short-term rates of warming: implications for policy. Phil. Trans. R. Soc. A, 369, 45–66, doi:10.1098/rsta.2010.0288 (doi:10.1098/rsta.2010.0288).

Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. and Totterdell, I., J. (2000), Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, Nature, 408, 184-187.

Friedlingstein et al. (2006), Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4MIP model intercomparison, Journal of Climate, 19, 3337-3353.

Hajima, T., Ise, T., Tachiiri, K., Katoh, E., Watabnabe, S. and Kawamiya, M. Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios (submitted to

JMSJ).

Ito, A. and Oikawa, T. (2002), A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry‐matter production theory and plot‐scale validation, Ecological Modelling, 151, 143–176.

K-1 model developers (2004), K-1 Coupled GCM (MIROC) Description, K-1 Technical Report No.1. Available at: http://www.ccsr.u-tokyo.ac.jp/kyosei/hasumi/MIROC/tech-repo.pdf (last access: 5 August 2010).

Knutti, R. et al. (2010), Good practice guidance paper on assessing and combining multi model climate projections. In: Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland. Avaiable at www.ipcc-wg2.gov/meetings/EMs/IPCC EM MME GoodPracticeGuidancePaper.pdf.

Meinshausen, M. et al. (2011a), The RCP greenhouse gas concentrations and their extension from 1765 to 2300. Climatic Change, 109, 213-241, DOI: 10.1007/s10584-011-0156-z.

Meinshausen, M, Wigley, T. M. L. and Raper, S. C. B. (2011b), Emulating atmosphere-ocean and carbon cycle models with a simpler model, MAGICC6—Part 2: applications. Atmos. Chem. Phys.,11, 1457–1471.

Moss, R. et al. (2010), The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature, 463, 747–756.

Murphy, J. M. et al. (2004), Quantifying uncertainties in climate change from a large ensemble of general circulation model predictions. Nature, 430, 768-772.

Oka, A., Tajika, E., Abe-Ouchi, A. and Kubota, L. (2010), Role of the ocean in controlling atmospheric $CO_2$ concentration in the course of global glaciations. Clim. Dyn., DOI 10.1007/s00382–010–0959–z.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J. and Meehl, G. A. (2009), A summary of the CMIP5 experimental design. Available on-line [http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/docs/ Taylor_CMIP5_22Jan11_marked.pdf].

Tachiiri, K. et al. (2010), Development of a system emulating the global carbon cycle in earth system models. Geosci. Model Dev., 3, 365–376.

Tachiiri, K. et al. (2012, in press) Nonlinearity of land carbon sensitivities in climate change simulations, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90A, 261-276.

h.2.2　結果の発表

❖　論文

1. Tachiiri, K., Ito, A., Hajima, T., Hargreaves, J. C., Annan, J. D. and Kawamiya, M (in press) Nonlinearity of land carbon sensitivities in climate change simulations, Journal of the Meteorological Society of Japan, 90A, 261-276.
2. Tachiiri, K., Hargreaves, J. C., Annan, J. D., Huntingford, C. and Kawamiya, M (in revision) Allowable carbon emissions for a medium mitigation scenario, Nature Climate Change.

❖ 著書･報文等

なし

❖ 口頭発表

1. （ポスター）Tachiiri, K., Hargreaves, A., Annan, J. D. and Kawamiya, M. (2011): Parametric uncertainty in allowable carbon emission for RCP4.5 concentration scenario, World Climate Research Programme Open Science Conference, Oct 24-28, Denver, Co, USA, C34 W246A.
2. 立入 郁(2011): 全球植生モデルの LAI をどう評価するか,ユーラシア･アジアモンスーン地域の気候―陸域相互作用研究会, 11/15, 名古屋大学.
3. 立入 郁、Julia C. Hargreaves, James D. Annan, 河宮未知生 (2011): RCP4.5 シナリオに対する許容炭素排出量の不確実性, 日本気象学会秋季大会, 11/16-18, 名古屋大学, A109.
4. （ポスター）Tachiiri, K., Hargreaves, J. C., Annan, J. D. and Kawamiya, M. (2011): Allowable carbon emission for RCP4.5 concentration scenario, the 2011 American Geophysical Union Fall Meeting, Dec. 5-9.
5. （ポスター）Tachiiri K., Hargreaves J., Annan J., Huntingford C., Kawamiya M. (accepted): Allowable carbon emissions for the RCP4.5 concentration scenario, Planet Under Pressure 2012, Mar 25-29, London.

## e.2.3 大気を通して海洋へ供給される可溶性鉄に関する全球化学輸送モデル解析

担当機関:海洋研究開発機構
研究者名:伊藤　彰記

**要旨**

本研究では、シベリア森林火災による発生量を新たに算出し、全球大気化学輸送モデルに導入した数値実験を行った。そのモデル計算結果は一酸化炭素の衛星観測値と良い一致を示した。このようにして算出した大規模な森林火災の可溶性鉄発生速度を全球エアロゾル化学輸送モデルに導入し、数値実験を行った。大気汚染物質の発生量が抑制されることによって酸による鉄の溶解は起こらないと考えた場合と比較して、東シベリアにおける大規模な森林火災時に発生した可溶性鉄が西北太平洋への可溶性鉄の主要な供給源となり得ることがモデル計算により初めて示された。さらに、全球エアロゾル化学輸送モデルを用いて、粒径分割された粒子中の鉄変質過程が海洋への可溶性鉄供給量に与える影響を調べた。その計算結果によると、北半球の太平洋と大西洋では酸変質過程により微小粒子が可溶性鉄の主要な供給源 (70–100%) であった。対照的に南大洋の広い範囲では、大気汚染の影響が少なく、微小粒子中の鉄は酸による変質を受けにくい。結果として、南米のパタゴニア砂漠の風下に当たる南大西洋では粗大粒子が可溶性鉄の重要な供給源 (40–60%) となった。鉄溶解度に対する感度実験の結果、鉱物起源と比較して、大規模な植生燃焼は海洋への可溶性鉄にとって重要な供給源となる可能性が示唆された。

(1) はじめに

鉄は海洋の植物プランクトンにとって必須元素である。外洋では、土壌構成鉱物由来の微小粒子が植物プランクトンにとって有用な可溶性鉄の主要な供給源の候補として考えられる。炭素循環過程に海洋植物プランクトンの影響を含む地球システム統合モデルを用いた研究では、しばしば、鉱物起源のエアロゾル中の鉄成分に対して一定の割合(1–2%)で可溶性鉄が存在すると仮定して、海洋生態系による大気中二酸化炭素の吸収量を算出している。しかし、エアロゾル中の鉄溶解度(鉄の全質量に対する可溶性鉄量の割合)は 0.01%から 80%までと幅広い範囲で観測されている。そして、エアロゾル中の可溶性鉄濃度の見積もりに関わる不確かさは数値モデルによる大気中二酸化炭素濃度の算出に多大な不確実性をもたらす。従って、大気中エアロゾルの海洋生態系へ与える影響を数値モデルでより正確に予測するためには、大気を通して海洋へ供給される可溶性鉄の時空間分布をより正確に予測することが重要となる。

大規模な森林火災時に、土壌粒子中の鉄は火災により生じた熱風により大気中に巻き上げられることが観測されている。その際、大気中における粒子中の可溶性鉄の割合が、土壌粒子そのものより高く観測される。地球温暖化にともない、大規模な森林火災の頻度が増加すると懸念されている。また、地球温暖化の影響により海水表面が成層化し、栄養塩としてのエアロゾル供給量の重要性が増すと考えられる。さらに、大気汚染物質の発生量が抑制されることによって酸による鉄の溶解は起こらなくなると考えられる。そこで、黄砂粒子と比較して、東シベリア森林火災が西北太平洋への可溶性鉄供給に与える影響を評価する。さらに、全球エアロゾル化学輸送モデルを用いて、大気を通して海洋へ供給される土壌鉱物および燃焼由来の可溶性鉄に関して議論した。

(2) 手法

Fig. 1 に示すように、我々の全球大気化学輸送モデルは主要なエアロゾル粒子および前駆気体の発生、化学、輸送、そして沈着過程を取り扱う（Rotman, et al. 2004, Liu, et al. 2005, Feng and Penner, 2007, Ito et al. 2007, Ito and Feng, 2010）。我々のモデルでは、土壌粒子が乾燥地で強風に巻き上げられて、大気中で鉱物エアロゾルとなり、大気汚染などの影響により生成される酸性物質と化学反応するという一連の過程を表現している。長距離輸送中に、ダストに含まれる比較的不溶な鉄が大気汚染由来の酸性物質と反応し、溶解する化学反応過程は Meskhidze et al. （2005）に基づいている。我々のモデルでは観測事実（Sullivan et al. 2007）に基づいて、鉄を含んだ土壌粒子とアルカリ性土壌粒子との混合状態を粒径別に考慮していることが特徴的な改善点である。また、植生と化石燃料起源のエアロゾル観測（Chuang et al., 2005, Bowie et al. 2009）及び室内実験（Schroth et al., 2009, Chang-Graham et al., 2011）による結果をもとに、燃焼起源鉄は土壌起源鉄よりも溶存しやすい化学形態の鉄を含むことを考慮に入れている。我々のモデルでは、燃焼起源の鉄はエアロゾルの溶液中で、一定の鉄溶解度に仮定されて、直ちに溶解する。

本研究ではシベリア森林火災による発生量を新たに算出し、大気化学輸送モデルに導入した数値実験を行った（Ito, 2011）。そして、本研究で算出した大規模な森林火災の可溶性鉄発生速度をエアロゾル化学輸送モデルにも導入し、数値実験を行った（Ito, 2011）。

本研究ではアジア域を対象として開発されたエアロゾル化学輸送モデル（Ito and Feng, 2010）を全球に拡張して、数値実験を行った（Ito, 2012）。その際、土壌粒子の観測結果（Meskhidze et al. 2005, Journet et al. 2008）に基づいて、シルト（砂よりは細かいが粘土よりは粗い沈積土）よりクレイ（粘土）に鉄含有量が多いことを考慮に入れるなどの改善を行った。

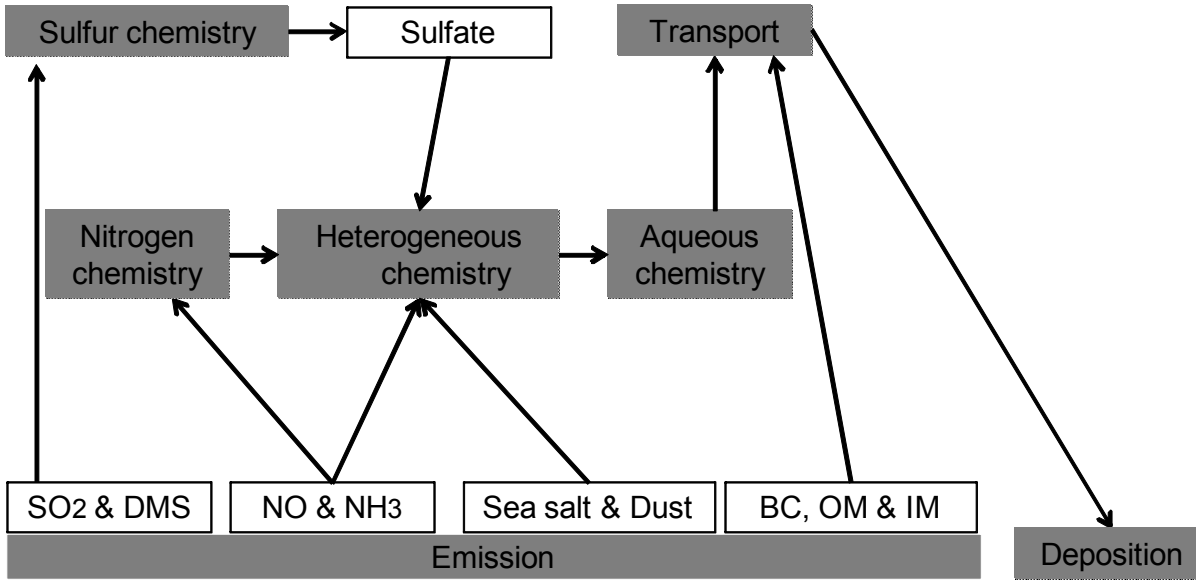



Fig. 1. Schematic diagram of the aerosol chemistry transport model. DMS, dimethyl sulfide; BC, black carbon; OM, organic matter; IM, inorganic matter (e.g., iron) from combustion sources.

(3) 結果

Fig. 2 に示すように、我々のモデル計算結果は一酸化炭素の衛星観測値と良い一致を示した。

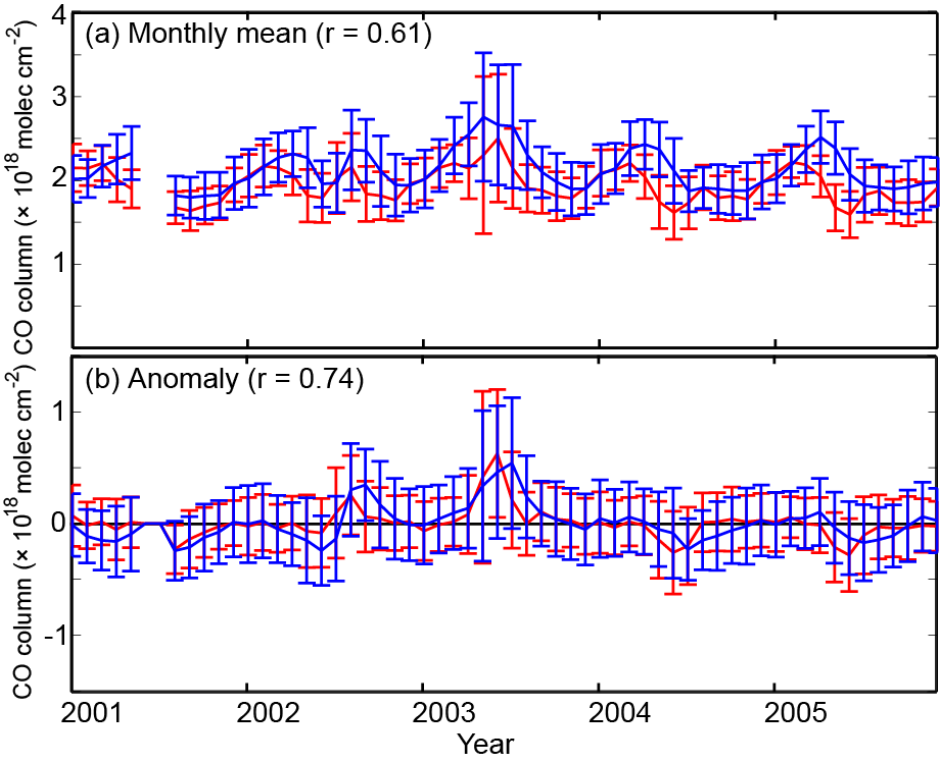



Fig. 2. Monthly averaged CO column (× $10^{18}$ molecules $cm^{-2}$) in the standard simulation (red) vs. observation (blue) over eastern Siberian region (40˚–70˚ N; 100˚–140˚ E) during 2001–2005. (a) The plot shows monthly averaged total column of CO. (b) Anomalies from 5-year mean are also shown.

Fig. 3 に示すように、大気汚染物質の発生量が抑制されることによって酸による鉄の溶解は起こらないと考えた場合と比較して、東シベリアにおける大規模な森林火災時に発生した可溶性鉄が西北太平洋への可溶性鉄の主要な供給源となり得ることがモデル計算により初めて示された。

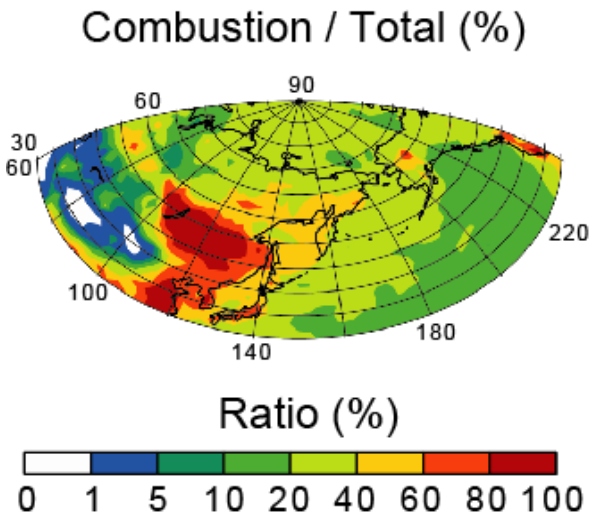



Fig. 3. Ratios of the deposited soluble iron from combustion to total depositions, which are the sum of combustion and dust sources with no atmospheric processing by acidic species.

Fig. 4 に示すように、モデル計算結果によると、北半球の太平洋と大西洋では酸変質過程により微小粒子が可溶性鉄の主要な供給源 (70–100%) であった。対照的に南大洋の広い範囲では、大気汚染の影響が少なく、微小粒子中の鉄は酸による変質を受けにくい。結果として、南米のパタゴニア砂漠の風下に当たる南大西洋では粗大粒子が可溶性鉄の重要な供給源 (40–60%) となった。

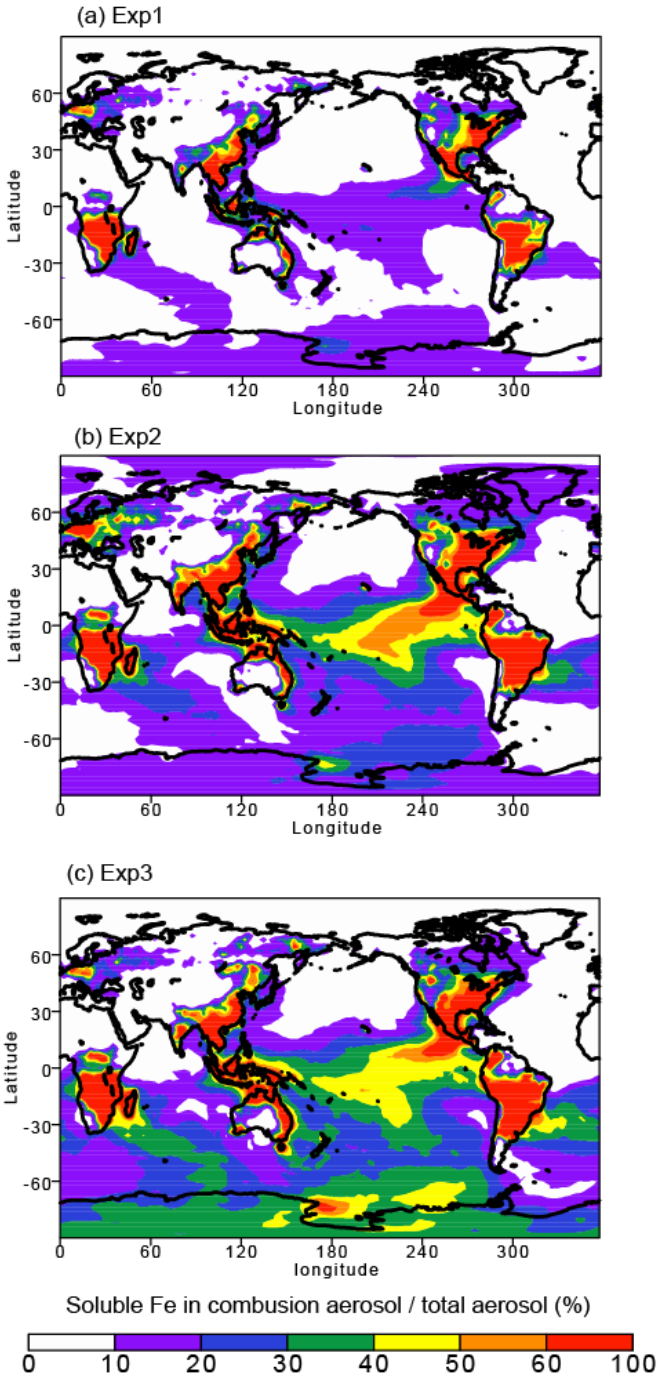



Fig. 4. Ratio of annually averaged deposition of soluble iron in the combustion aerosols to that in the sum of dust and combustion aerosols. (a) Standard simulation results with the explicit iron dissolution scheme for dust aerosol (Exp1). (b) Sensitivity simulation results with no atmospheric processing for dust aerosol (Exp2). (c) Sensitivity simulation results with the higher iron solubility (17.7%) for biomass burning aerosols (Exp3).

Fig. 5 に示すように、鉄溶解度に対する感度実験の結果、鉱物起源と比較して、大規模な植生燃焼は海洋への可溶性鉄にとって重要な供給源となる可能性が示唆された。

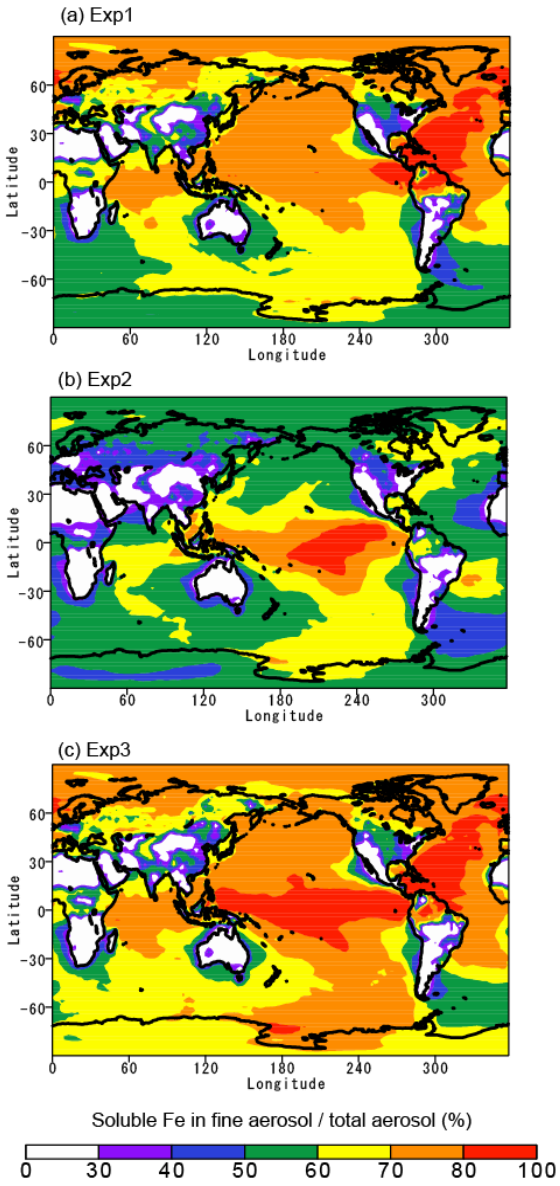



Fig. 5. Ratio of annually averaged deposition of soluble iron in the fine aerosols to that in the total aerosols. (a) Standard simulation results with the explicit iron dissolution scheme for dust aerosol (Exp1). (b) Sensitivity simulation results with no atmospheric processing for dust aerosol (Exp2). (c) Sensitivity simulation results with the higher iron solubility (17.7%) for biomass burning aerosols (Exp3).

### f.2.3 考察

大気汚染物質の発生量が抑制されることによって酸による鉄の溶解は阻害されると考えられる。一方、将来予測される温暖化によって東シベリアにおける大規模な森林火災の頻度が増加すると考えられる。両者を比較すると、森林火災起源の溶存鉄は西北太平洋への重要な供給源となり得ることがモデル計算により初めて示された。それにより、植物プランクトンの成長がもたらされ、大気中の二酸化炭素濃度が減少すること、海洋生物由来のエアロゾルが増加することが考えられる。そのことは、森林火災が海洋生物への施肥効果をもたらすことにより、温暖化に関して負のフィードバックとして働く可能性を示唆している。

しかし、溶存鉄に関してはダストを対象として研究されてきており、森林火災を対象とした観測は極めて少ない。今後、数値計算によって示唆された仮説を実証するためには、現場観測と室内実験、さらにはモデルの結果を統合的に検討することが必要である。

大気汚染の影響を強く受ける地域において、微小粒子中の鉄が酸による変質を受けやすい。そのため、微小粒子が粗大粒子と比べて可溶性鉄の主要な供給源となった。一方、南米砂漠の風下に当たる南大西洋では粗大粒子が微小粒子と比べて可溶性鉄の主要な供給源となった。外洋への可溶性鉄供給量の燃焼起源の寄与率は 20%以下と小さかった。植生燃焼由来のエアロゾル中の鉄溶解度に観測最大値（17.7%）を適用した感度実験を行った結果、これらの燃焼由来のエアロゾル中可溶性鉄は大規模な植生火災の風下に当たる海洋への可溶性鉄供給量へ与える寄与率が 30%を超えた。今後、モデルの高度化を図るためには、特に植生燃焼由来のエアロゾル中可溶性鉄を対象として、現場観測と室内実験、さらには数値モデルの結果を統合的に検討することが重要である。

g.2.3　引用文献

Bowie, A. R., D. Lannuzel, T. A. Remenyi, T. Wagener, P. J. Lam, P. W. Boyd, C. Guieu, A. T. Townsend, and T. W. Trull (2009), Biogeochemical iron budgets of the Southern Ocean south of Australia: Decoupling of iron and nutrient cycles in the subantarctic zone by the summertime supply, Global Biogeochem. Cycles, 23, GB4034, doi:10.1029/2009GB003500.

Chang-Graham, A. L., L. T. M. Profeta, T. J. Johnson, R. J. Yokelson, A. Laskin, and J. Laskin (2011), Case study of water-soluble metal containing organic constituents of biomass burning aerosol, Environ. Sci. Technol., 45, 1257, doi:10.1021/es103010j.

Chuang, P. Y., R. M. Duvall, M. M. Shafer, and J. J. Schauer (2005), The origin of water soluble particulate iron in the Asian atmospheric outflow, Geophys. Res. Lett., 32, L07813, doi:10.1029/2004GL021946.

Feng, Y. and Penner, J. E. (2007), Global modeling of nitrate and ammonium: Interaction of aerosols and tropospheric chemistry, J. Geophys. Res., 112, D01304, doi:10.1029/2005JD006404.

Ito, A., S. Sillman, and J. E. Penner (2007), Effects of additional nonmethane volatile organic compounds, organic nitrates, and direct emissions of oxygenated organic species on global tropospheric chemistry, *J. Geophys. Res.*, *112*, D06309, doi:10.1029/2005JD006556.

Ito, A. and Feng, Y. (2010), Role of dust alkalinity in acid mobilization of iron, Atmos. Chem. Phys., 10, 9237–9250.

Journet, E., Desboeufs, K. V., Caquineau, S. and Colin, J.-L. (2008), Mineralogy as a critical factor of dust iron solubility, Geophys. Res. Lett., 35, L07805, doi:10.1029/2007GL031589.

Liu, X., Penner, J. E. and Herzog, M. (2005), Global modeling of aerosol dynamics: Model description, evaluation and interactions between sulfate and non-sulfate aerosols, J. Geophys. Res., 110, D18206, doi:10.1029/2004JD005674.

Meskhidze, N., Chameides, W. L. and Nenes, A. (2005), Dust and pollution: A recipe for enhanced ocean fertilization?, J. Geophys. Res., 110, D03301, doi:10.1029/2004JD005082.

Rotman, D.A., C. S. Atherton, D. J. Bergmann, P. J. Cameron-Smith, C. C. Chuang, P. S. Connell, J. E. Dignon, A. Franz, K. E. Grant, D. E. Kinnison, C. R. Molenkamp, D. D. Proctor and J. R. Tannahill

(2004), IMPACT, the LLNL 3-D global atmospheric chemical transport model for the combined troposphere and stratosphere: Model description and analysis of ozone and other trace gases. J. Geophys. Res., 109, D04303, doi:10.1029/2002JD003155.

Schroth, A. W., J. Crusius, E. R. Sholkovitz, and B. C. Bostick (2009), Iron solubility driven by speciation in dust sources to the ocean. Nat. Geosci., 2, 337-340.

Sullivan, R. C., Guazzotti, S. A., Sodeman, D. A. and Prather, K. A. (2007), Direct observations of the atmospheric processing of Asian mineral dust, Atmos. Chem. Phys., 7, 1213–1226.

h.2.3　成果の発表

❖ 論文

1. Ito, A. (2011) Mega fire emissions in Siberia: Potential supply of bioavailable iron from forests to the ocean, Biogeosciences, 8, 1679-1697.
2. Ito, A. (2012) Contrasting the effect of iron mobilization on soluble iron deposition to the ocean in the Northern and Southern Hemispheres, Journal of the Meteorological Society of Japan, in press.

❖ 口頭発表

1. 伊藤彰記 (2011) 東シベリア森林火災起源の溶存鉄の西北太平洋への供給に関するエアロゾルモデル解析、日本気象学会 2011 年度春季大会、2011 年 5 月、東京.
2. Ito, A. (2011) Role of acid mobilization in association of smaller particle size with higher iron solubility, Goldschmidt 2011, August 2011, Prague, Czech Republic.
3. 伊藤彰記 (2011) 大気を通して海洋へ供給される可溶性鉄に関する全球エアロゾル化学輸送モデル解析、日本気象学会 2011 年度秋季大会、2011 年 11 月、愛知.

❖ ポスター発表

1. Ito, A. (2011) Role of air pollutant in bio-available iron input to the ocean, 3rd iLEAPS Science Conference, September 2011, Garmisch-Partenkirchen, Germany.
2. Ito, A (2011) Geographical differences in bio-available iron supply between Northern and Southern Oceans, WCRP Open Science Conference, October 2011, Denver, USA.
3. Ito, A. (2011) Role of Acid Mobilization in Iron Solubility of Smaller Mineral Dust Aerosols, 2011 AGU Fall Meeting, December 2011, California, USA.

# e.3 気候変化に伴う自然災害が世界の主要穀物生産の安定性に及ぼす影響評価

担当機関: (独)農業環境技術研究所
研究者名: 横沢　正幸・櫻井　玄・飯泉　仁之直

**要旨**

ダイズについては、これまでに開発した生産性環境応答モデルを改良するとともに開放系大気 $CO_2$ 増加実験結果を取り込んで大気$CO_2$濃度の上昇に対する植物生理的応答を高度化した。地域の作物生産の不均一性を考慮するために、ダイズおよびトウモロコシの生産性環境応答モデルのパラメータを、アメリカ、ブラジル、中国の主要生産地帯を中心として緯度・経度方向約 1 度グリッドごとに、新たなキャリブレーション手法を援用してベイズ推定を行った。そのモデルにMIROC-ESMの出力結果を入力し、3ヵ国の生産性変動を推計した結果、トウモロコシについては、RCP2.6およびRCP4.5では収量の変化はあまり見られないが、RCP6.0で各国において収量の減少トレンドが若干現れ、RCP8.5では3ヵ国ともに明確な減少トレンドが現れた。ダイズでは、RCP2.6 と RCP4.5 で、2030 年頃まではわずかな収量の増加トレンドが見られるが、それ以降は減少トレンドに転じることが示された。RCP6.0 ではアメリカで強い減少トレンドが見られた。RCP8.5 では、アメリカおよびブラジルにおいて特に強い減少トレンドが見られた。生産性の安定性を評価する同時不作確率は、トウモロコシでは、特にRCP2.6およびRCP8.5において顕著に表れると推計された。ダイズでは、RCP2.6からRCP8.5にかけて徐々に将来の同時不作が高くなると推計された。特にRCP8.5での同時不作確率の増加は著しい。以上の影響を引き起こす要因を解析した結果、どの地域でも気温要因が最も大きな影響を与えていることが示唆された。大気 $CO_2$ 濃度上昇に伴う施肥効果に対して、気温上昇に伴う呼吸量の増加によるバイオマス減少が勝るとともに、気温上昇により生育期間の短縮とともに積算日射量が小さくなる。これらの差引により収量の減少トレンドならびに 3 ヵ国の同時不作確率の増大が見通された。

(1) はじめに

本研究は、世界の食料供給システムにおいて重要であるが、生産地域が局在している穀物(トウモロコシおよびダイズ)を対象として、高温や干ばつが引き起こす生産性変動を評価する手法を開発し、将来の気候変化に伴う気象災害の発生が生産の安定性に及ぼす影響について解析ならびに評価を行うことを目的とする。対象地域は、アメリカ、中国、ブラジルの 3 ヵ国である。本年度は最終年度として、最新の気候変化シナリオデータをダイズおよびトウモロコシの生産性環境応答モデルに入力し、中国、アメリカならびにブラジルにおける生産性変動を推計する。その結果に基づいて各国内および国間の生産性変動の要因と安定性を不確実性も含めて解析する。とくに 3 カ国の同時減収確率などが気候変化によって今後どのように変化するかを示すことにより、各国内および国間の生産性変動の要因と安定性を不確実性も含めて解析する。

(2) トウモロコシの生産性環境応答モデルとキャリブレーション

本研究では、トウモロコシに対する生産性の気象環境応答モデルとして、土壌の炭素、窒素および水循環過程に作物の生育過程ならびに温度・水ストレス影響を取り込んだプロセスベースモデルである SWAT

(Neitsch et al., 2005) をベースとし、施肥に対する葉群の形成過程や高温・低温・乾燥ストレスによる収量低下効果を取り込んだ拡張モデルを作成した。モデルを各地域で最適化するために、各国におけるトウモロコシの郡（県）レベルの過去の農業統計データを用いて、モデル内の水分ストレスや窒素ストレス、高温・低温ストレス、作物生育過程、葉の形成過程、ならびに技術革新のトレンドに関わる 9 個のパラメータについてキャリブレーションを行った。

昨年度まで、キャリブレーションは通常の Markov chain Monte Carlo (MCMC) 法を利用してきたが、モデルの改良に合わせてより効率的なアルゴリズムに変更した。今年度は DiffeRential Evolution Adaptive Metropolis (DREAM) (Vrugt et al., 2009) を利用して行った。この方法は MCMC の発展版で、極めて短時間で多次元・多峰のパラメータ事後分布をベイズ推定することができる。この方法によって、パラメータ空間における尤度分布を正確に評価したパラメータの事後分布を得ることができる。つまり、作物生産性モデルのパラメータを各地域について、最適なものに近づけると同時に、モデルのパラメータの不確実性を正確に評価することができ、モデルの不確実性情報を付加した将来予測を行うことができる。

キャリブレーションに利用したデータは、アメリカ、中国およびブラジルの行政単位別のデータを各国の統計局などから入手し、それを気象データグリッドに割り付けた。また栽培面積比率が 5%以上のグリッドについては、衛星による面積指数 (LAI) の時系列データ (Los et al., 2000) も準備した。過去の気象データは、モデルが要求する気象要素を全球で均質にカバーするデータセットとして、気象庁の JRA25 客観解析データを利用した。また、肥料及び灌漑水量についてのデータは FAO (2010) から入手し、栽培面積比率 (Monfreda, 2008) や灌漑率 (Siebert, 2005) のデータに基づいて気象データグリッドに割り付けた。キャリブレーションの期間は 1980 年から 2006 年までの 27 年間とし、栽培面積比率が 1%以上であるグリッド（3 ヵ国で 501 グリッド）についてキャリブレーションを行った。

(3) ダイズの生産性環境応答モデルとキャリブレーション

ダイズは C3 植物に属し、C4 植物であるトウモロコシよりも、光合成速度が大気中 $CO_2$ 濃度（以後、$[CO_2]$ と略する）に強く応答する（$CO_2$ 施肥効果）。そこでダイズについては、光合成の詳細な反応過程を記述し、かつパラメータのキャリブレーションにおける計算量を勘案して、昨年度までに作成したモデルの構造を改良、簡略化した新たな生産性環境応答モデルを作成した(Semi-Process-based Model for Soybean: SPM-Soybean)。また、高$[CO_2]$に対する応答を正確に見積もるために、近年の開放系大気 $CO_2$ 増加実験 (Free Air $CO_2$ Enrichment: FACE)の知見をモデルに取り込んだ。FACE 実験では、ダイズに限らず、植物に対する $CO_2$ 施肥効果が理論値よりも低い（ダウンレギュレーション効果）ことが示唆されているが、そのメカニズムは未だよく分かっていないため、これまでの作物生産性環境応答モデルには明示的に組み込まれていない過程である。本研究では、SPM-Soybean にダウンレギュレーション効果を表現する簡便な経験モデルを組み込み、そのパラメータをダイズの FACE 実験データ (Morgan et al., 2005) に基づいて、階層ベイズ法により推定した。モデル選択の結果、炭酸同化過程における最大カルボキシレーション速度が$[CO_2]$により次第に低減する過程をモデルに組み込んだ。

SPM-Soybean の生育・生長過程、温度・水ストレス過程および収量の年増加トレンドに関する 6 つのパラメータについて、トウモロコシと同様に、各国の農業統計データに基づいて DREAM 法を用いてキャリブレーションを行った。栽培面積比率が 1%以上の 411 のグリッドについて、キャリブレーションを行った。

(4) 生産性環境応答モデルによる収量変動の推定精度

図 1a と図 2a は国別収量の経年変化に対する再現性を示している。ここでは、グリッドごとにモデルで推定された収量の値を各グリッドの栽培面積比率で重みづけして国平均の収量としている。トウモロコ、ダイズともに、モデルは過去の統計収量の経年変動を良好に推定している。図 1b と図 2b は、各グリッドにおける観測値とモデル推定値の RMSE（推定値と統計値との残差自乗和の平方根を推定平均値で割った値：%）を示す。ほとんどの地域でモデル推定誤差を 20%以内に抑えることができている。アメリカのいくつかの地域とブラジルの北東部でトウモロコシの推定精度が低いが、これらの地域は生産量が少なく、収量統計値の誤差が大きいことが原因と考えられる。いずれにせよ、昨年度までのモデルを改良し、キャリブレーション手法を改めたことで、モデルの精度を大きく向上させることができた。

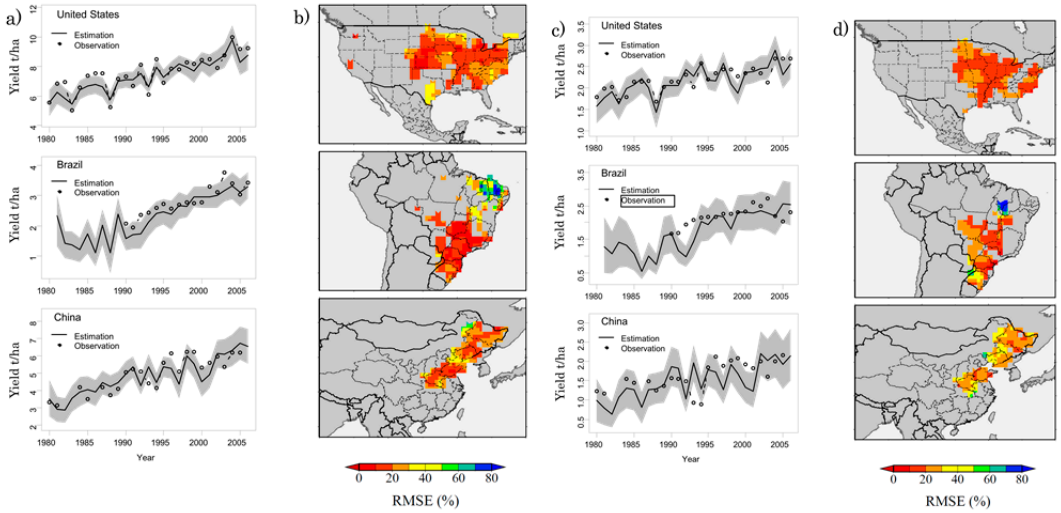



図 1： 各国の平均収量時系列に対するモデル推定値と統計値との比較。a, b はトウモロコシ、c, d はダイズを表す。実線が推定値、プロットが統計値を表す。シェード域の上端と下端は 95%信頼区間のグリッド平均を示す。b, d は各グリッドにおける推定値と統計値との残差自乗和の平方根(RMSE)を推定収量で規格化して表している。

(5) 気候変化が作物生産性の安定性に与える影響

各地域において、過去の生産性の気象環境変動応答（収量の年変動）を最適化した作物生産性モデルに、MIROC-ESM (Watanabe et al. 2011) による最新の長期気候変動予測データを入力して、将来におけるトウモロコシとダイズの対象 3 ヵ国における収量変動の推計とその安定性を解析した。推計では、将来における窒素投入量や灌漑水投入量は 2006 年時の値に固定した。また、将来の技術革新などによる収量トレンドは考慮していない。すなわち、現行の品種、栽培地域、栽培条件の下で作物を栽培した場合に、将来の気候変化環境下で得られる収量を推計した。図 2 はトウモロコシに対する 2010 年から 2070 年までの収量変動の推計結果である。図より、RCP2.6 および RCP4.5 では収量の変化はあまり見られないが、RCP6.0 で、各国において収量の減少トレンドが見え始め、RCP8.5 では 3 か国ともに明確な減少トレンドが現れた。

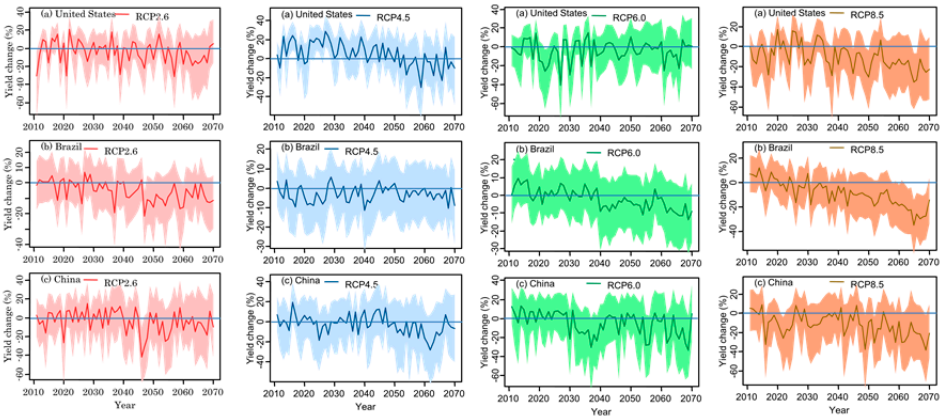



図 2: MIROC-ESM による将来気候値（2010-2070 年）におけるトウモロコシ収量の変化。1981-2010 年の平均値からの差を表している。実線は平均推定値、シェードの上端と下端は 95%信頼区間のグリッド平均を示す。国別収量は各グリッドの値を栽培面積比率で重みづけ平均して集計した。

図 3 は、ダイズに対する 2010 年から 2070 年までの収量変動の推計結果である。RCP2.6 と RCP4.5 では、2030 年頃まではわずかな増加トレンドが見られるが、それ以降、収量は減少トレンドに転じる。RCP6.0 では、アメリカで強い減少トレンドが見られる。RCP8.5 では、アメリカ及びブラジルにおいて特に強い減少トレンドが見られる。全体を通して、中国ではあまりトレンドの変化が見られない。

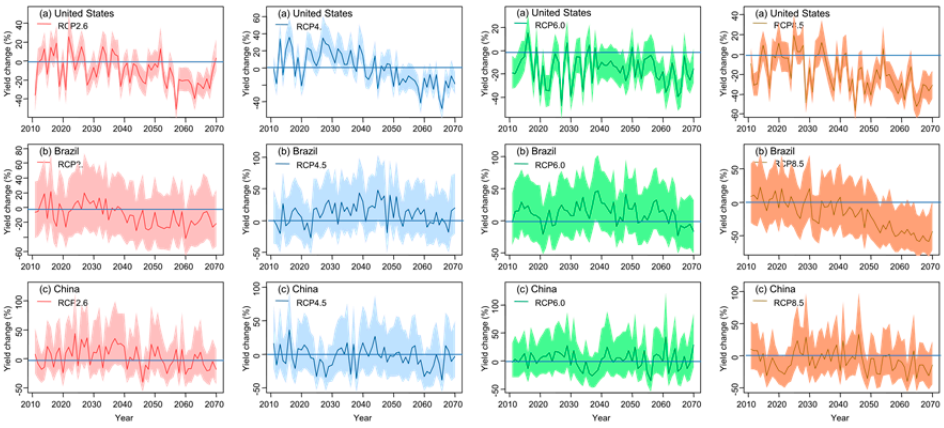



図 3: 2010-2070 年におけるダイズ収量の時系列。凡例は図 2 と同じ。

図 4 と図 5 は、それぞれ現在（1981 年-2010 年）ならびに将来（2040 年-2070 年）における 3 ヵ国の同時不作確率を表す。トウモロコシでは、同時不作確率が将来、高くなる傾向があり、特に RCP2.6 および RCP8.5 においてそれが顕著に表れると推計された。ダイズでは、RCP2.6 から RCP8.5 にかけて徐々に将来の同時不作が高くなると推計された。特に RCP8.5 における同時不作確率の増加は著しい。将来の方が現在よりも同時不作確率が高くなる一つの要因は、将来の収量が気候変化による減少トレンドを持つためである（図 3）。一般に、同時不作確率の絶対値は、技術革新などによる収量トレンドの変化によって変わるが、上述したように本解析では、技術トレンドは過去も将来も除いているので、ここで示した同時確率は気候変動のみによるものである。

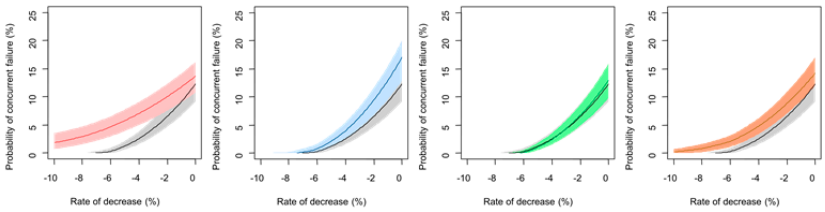



図 4: トウモロコシの 3 か国同時不作確率の変化。左から RCP2.6、RCP4.5、RCP6.0 および RCP8.5 のケースを示す。横軸は過去 3 年間の平均収量に比べて減収する割合(%)を示す。縦軸はその減収割合以下の事象が 3 か国で同時に起こる確率を示す。黒線は過去(1981-2010 年)の同時不作確率を示し、色つきの線は将来(2041-2070 年)の同時不作確率を示す。シェードは生産性応答モデルの不確実性(パラメータの不確定性)を表す。

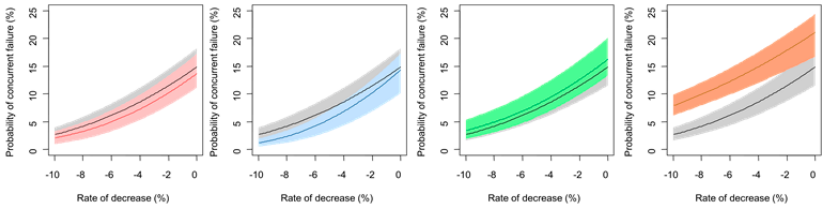



図 5: ダイズの 3 か国同時不作確率の変化。横軸、縦軸は図 4 と同じ。

f. 考察

気候変化による生産性変動の推計結果を解釈するために、過去と将来における栽培期間の気象環境の変化とそれに対する生産性応答を調べた。図 6 は、RCP6.0 でのダイズ(トウモロコシ)の平均的な生育期間における将来気候値(2041-2070 年)と過去気候値(1981-2010 年)の偏差を示す。特に、アメリカと中国で大きく気温が増加し、また 3 ヵ国とも、栽培地域の降水量が減少するとともに日射量が増加している。

図 7 は、トウモロコシについて、気温、降水量ならびに日射量の気候変化による長期トレンドを除去した環境データを生産性応答モデルに入力した場合の結果とトレンドを除去しない場合の結果とを比較することにより、各要因による収量変化を調べた結果を表す。図より、どの地域でも気温要因が最も大きな影響を与えていることが示唆された。また、気温上昇によって生産性が正の影響(生産性の増加)を得るか負の影響(生産性の減少)を得るかの境界が北緯 40 度付近に存在すると示唆された。この結果は、過去の収量変動と気象環境との関係を統計解析した結果とも一致している (Sakurai et al. 2011)。他の RCP シナリオでも同様に気温上昇が生産性変動の主要因であると示唆された。ダイズについても同様である。

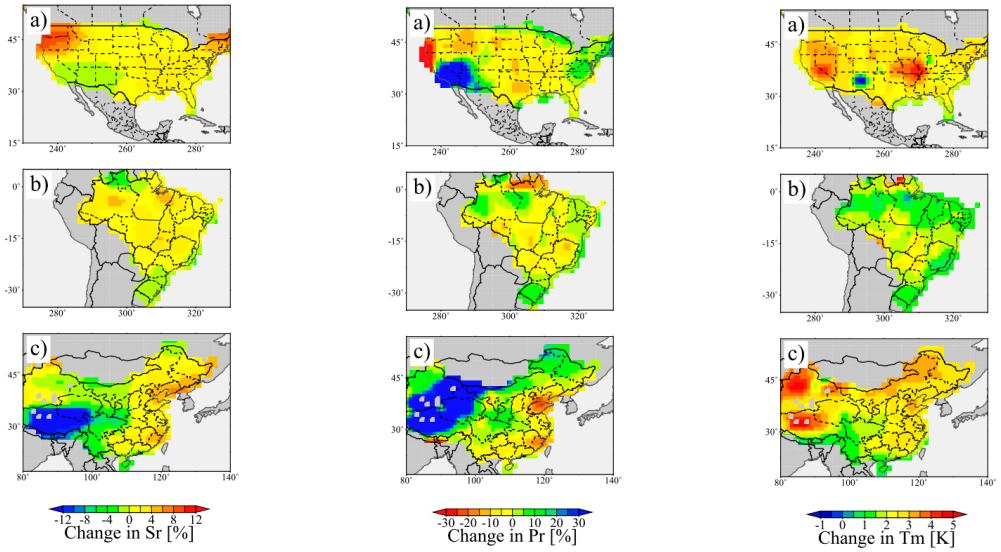



図 6:トウモロコシ、ダイズの生育期間における気象環境の偏差 (RCP6.0)。将来（2041-2070 年）と過去（1981-2010 年）との差をグリッドごとにプロットした。左から積算日射量、積算降水量、平均気温を示す。

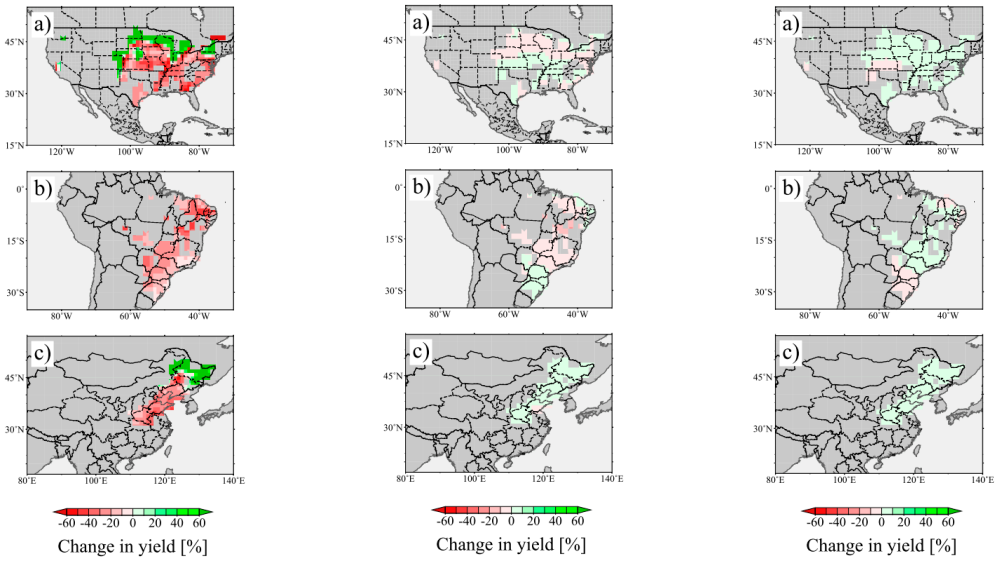



図 7: MIROC-ESM で予測される将来の気候環境下（2041-2070）でのトウモロコシの収量分布と気候変化による気象要素のトレンドを除去したデータを生産性応答モデルに入力した場合の収量分布との偏差。（左）気温、（中）降水量、（右）日射量のトレンドをそれぞれ除去した場合を示す。a)アメリカ、b)ブラジル、c)中国での分布を表す。

図 8 はダイズの生産性に対する $CO_2$ の施肥効果、昼間の呼吸量、夜間の呼吸量および積算日射量の経年変化を示す。[$CO_2$]の増加に伴い、$CO_2$ 施肥効果が増加するとともに、気温上昇に伴い呼吸量も増加している。また、気温上昇により作物の生育が速くなり生育期間の短縮とともに積算日射量が小さくなる。これらの差し引きによって、[$CO_2$]の施肥効果による増収効果よりも気温上昇による減収効果が勝ると推察された。他の RCP シナリオでも同様の傾向がみられる。

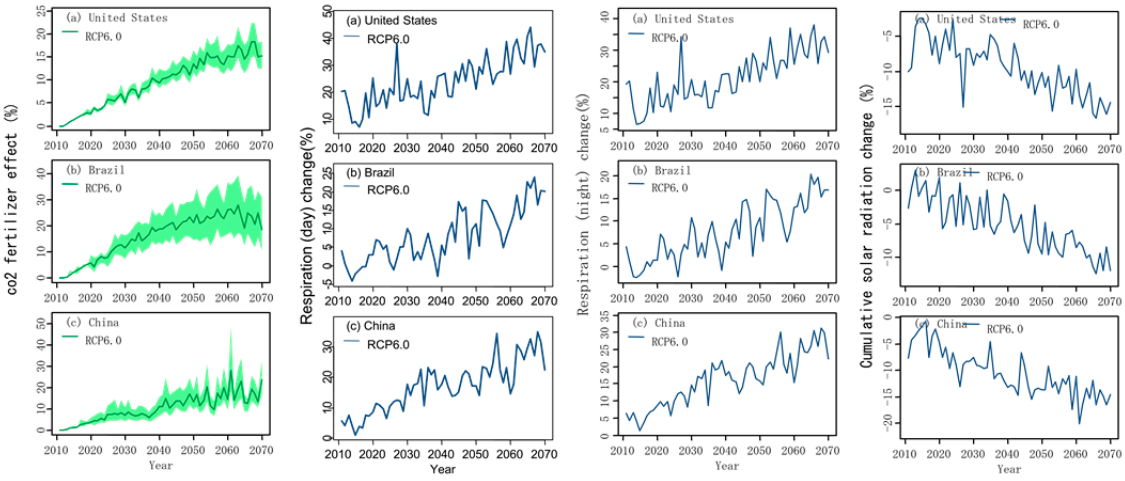



図8: 気候変化（RCP6.5）に対するダイズの応答の経年変化。左から$CO_2$施肥効果、昼間の呼吸量、夜間の呼吸量および生育期間の積算日射量の変化を表す。実線は推定値の平均を示す。シェードは 95%信頼区間を示す。a)アメリカ、b)ブラジル、c)中国を表す。

本研究では、作物の生産性環境応答モデルのパラメータを各地域においてベイズ推定することによって、モデルを最適化するとともに、モデルの不確実性を考慮した上で将来の変化推計を行った。各地域では、品種や栽培管理などが異なるため、このような精緻なモデル最適化による将来予測が重要であり、結果として、過去の収量の変動を高い精度で再現することが可能になった。本研究で用いたベイズ的アプローチは、これまでの結果を事前分布にしながら、つねに最新の観測および実験結果をパラメータ分布に反映することができるため、今後より効率的・論理的にモデルを更新していくことができる。本研究で得られた結果ならびに手法は、気候変化環境下における世界スケールでの食料の安定供給に向けた影響評価、適応・緩和策の策定に資すると考える。

g. 参考文献

Neitsch, S. L., et al. (2005), Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation (Version 2005). Grassland Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture (USDA), Temple, TX. U. S. A., 476 pp..

Vrugt, J. A., et al. (2009), Accelerating Markov chain Monte Carlo simulation by differential evolution with self-adaptive randomized subspace sampling. Int. J. Nonlin. Sci. Num., 10, 271-288.

Los, S.O., Collatz, G.J., Sellers, P.J. et al. (2000), A global 9-yr biophysical land surface dataset from NOAA AVHRR data. J. Hydrometeorol., 1, 183-199.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), (2010), FAOSTAT. http://faostat.fao.org/default.aspx.

Monfreda, C., et al. (2008), Farming the planet: 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Global Biogeochem.Cycles, 22, GB1022, doi:10.1029/2007GB002947.

Siebert, S., et al. (2005), Development and validation of the global map of irrigation areas. Hydrol. Earth Sys. Sci., 9, 535-547, doi:10.5194/hess-9-535-2005.

Morgan, P.B., Bollero, G.A., Nelson, R.L., Dohleman, F.G., Long, S.P. (2005), Smallerthan predicted increase in aboveground net primary production and yield of field-grown soybean under fully open-air [CO2] elevation. Glob. Chage Biol., 11, 1856-1865.

Baldocchi, D. (1994) An analytical solution for coupled leaf photosynthesis and stomatal conductance models. Tree Physiol., 14, 1069-1079.

Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., et al., (2011) MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. Geosci Model. Devel., 4, 845-872.

h. 成果の発表

論文

1. Sakurai, G., Iizumi, T., Yokozawa, M., (2011) Varying temporal and spatial effects of climate on maze and soybean affect yield prediction. Clim. Res. 49, 143-154.
2. Sakurai, G., Iizumi, T., Yokozawa, M., (2012) Inversely estimating temperature sensitivity of soil carbon decomposition by assimilating a turnover model and long-term field dat. Soil Biol. Biochem. 46, 191-199.
3. Sakurai, G., Iizumi, T., Yokozawa, M., A Semi-process-based Model for Soybean Growth under Climate Change that Accounts for Down-regulation Effects based on Free Air [CO2] Enrichment Data, PlosONE, in review.

ポスター発表

1. Yokozawa, M., Sakurai G., Ono, K., Mano, M., Miyata, A., (2011) A model-data fusion analysis for examining the response of carbon exchange to environmental variation in crop field. AGU Fall Meeting, San Francisco, U. S. A., 2011/12/6
2. Sakurai, G., Iizumi, T., Yokozawa, M., (2011) Examining the effect of down regulation under high [CO2] on the growth of soybean assimilating a semi process-based model and FACE data. AGU Fall Meeting, San Francisco, U. S. A., 2011/12/5
3. Iizumi, T., (2011) Climate and management contributions to recent trends in U.S. maize yield derived from a large-area crop model and data assimilation. AGU Fall Meeting, San Francisco, U. S. A., 2011/12/5

# e.4 長期的気候変動を視野に入れた沿岸域リスクの世界評価

## e.4.1 世界水没リスク

担当機関:茨城大学
研究者名:横木 裕宗・桑原 祐史

**要旨**

平成 23 年度の検討では、単一の潮位偏差データを使用し、観測方法の異なる2種類の数値表層モデル(DSM:Digital Surface Model)を対象とした水没域推定処理を行った。水没域の推定は、①市街地および樹林の分布域に対する標高を補正した、②探索処理の効率化を目的として、標高データの平滑化処理を施した、以上の2つの補正処理を施した DSM データを用い、全球の代表的な低平地が分布するアジア地域を中心に領域の推定を行った。結論として、国別およびアジア・オセアニア等地域毎に水没域を集計するとともに、領域に含まれる代表的な都市が受ける社会基盤の影響量を整理した。

(1) はじめに

水没の可能性のある地域を推定し、具体的な対策について検討する際に用いる数値表層モデル(**DSM**:**D**igital **S**urface **M**odel)は、低解像度ではあるものの全球を網羅する GTOPO30[1)]に代表される数値地形モデル(**DTM**:**D**igital **T**errain **M**odel)とは異なり、合成開口レーダやステレオ観測の衛星画像といった地球観測データより構築・作成されている[2),3)]。そのため、DSM は構造物を有する市街地や森林に代表される、高さ成分が大きい被覆に覆われた領域においては、実際の標高値よりも過大と推定される標高値を生じる傾向があることが報告されている[4)]。また、全球規模における水没域の推定シミュレーションには GTOPO30 を用いることが主流であるが、このデータは世界各国が協力して作成した DTM であるため、DSM に見られるような誤差の発生は報告されてはいないものの、空間分解能 1000m と決して高分解能と呼ぶことは出来ない標高データである。そこで本研究では、DSM が示す標高値の過大と推定される値に注目し、土地被覆項目毎にその誤差を分析することで、DSM が示す標高値を実際の標高値に近づける標高補正値の案を提案し、茨城大学水圏環境研究室で報告された全球潮位データを用いることで[5)]、標高値を補正した高精度 DSM を使用した海面上昇による水没域の推定を行い、得られた検討結果を整理し、沿岸国への影響について分析することを目的として研究を進めた。この目的を実現するための解析目標は以下の2点である。

①茨城大学水圏環境研究室で報告された全球潮位データを用いて、標高値を補正した高精度 DSM を使用した海面上昇による水没域の推定を行う。
②推定された水没域について、その結果を国別・地域別に整理するとともに、沿岸国に与える影響について分析する。

(2) GDEM と SRTM を用いたシミュレーションの実施

標高補正・平滑化の両処理を施した DSM と全球潮位データを用いて、水没域の推定計算を行った。この潮位データは、潮位偏差だけでなく、海面上昇予測値 59cm を加味したデータとなっている。よって本研究では、「潮位量+海面上昇量 59cm の海水面より低くなる土地のうち、海域から連続する陸域」を水没域と定義した。また、計算方法はレベル湛水法を用いて行った。その計算の流れを**図-1** に、その結果

の一例を**図-2**、**図-3**、**図-4** に示す。

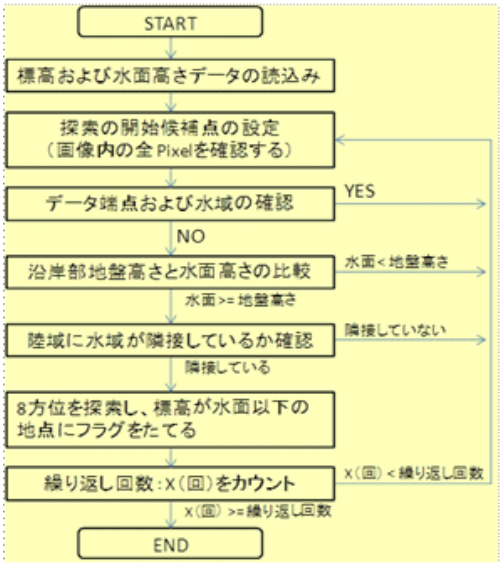



**図-1** 水没域の推定計算の流れ

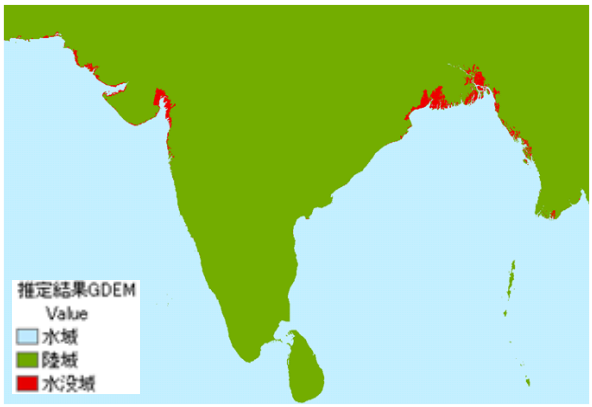



**図-2** 推定結果の一例（GDEM インド周辺）

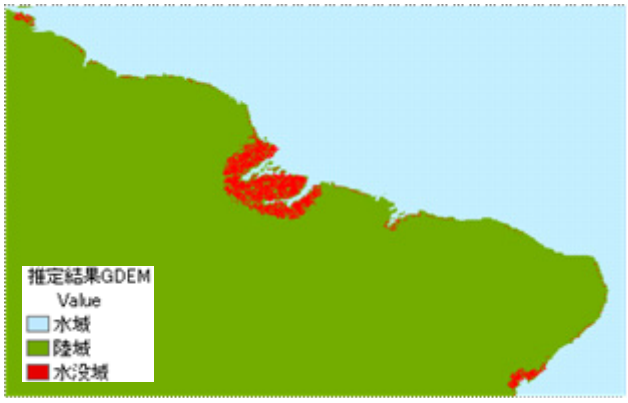



**図-3** 推定結果の一例（GDEM ブラジル周辺）

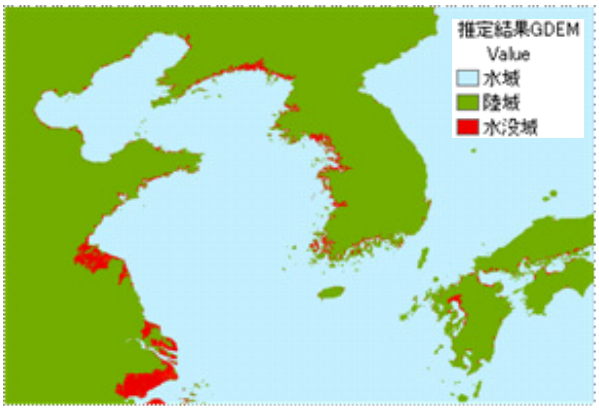



**図-4** 推定結果の一例（SRTM 韓国周辺）

(3) 水没域推定結果の集計

水没域と推定された地域の主要都市について、人口、道路・鉄道網、空港への影響を整理し、その都市の背景とも言える土地被覆を調査した。各国を代表する大都市は、その交通の便の良さや他国との交流の利便性から沿岸部に集中しており、海面上昇による影響人口は甚大なものであると考えられる。また、海面上昇により被害を受ける交通網の総距離について算出したが、海面が 59cm 上昇するだけで、これだけの道路・鉄道網が機能しなくなることが分かった。被害対策には、これらの交通機能の停止を前提に取り掛かる必要があると言える。これらの大都市には空港もいくつか存在し、水没による空港の封鎖が心配される。また、これらの大都市は大河川沿いやデルタ地帯に存在することが多く、海面上昇と合わせて、洪水等の水害への警戒も必要である。

**表-1** 推定結果のまとめ(国毎 一部)

| 地域 | 国名 | 国土面積($km^2$) | 使用データ | 水没面積($km^2$) | 国土水没率(%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Asia | Bangladesh | 136,305 | GDEM | 8132.19 | 5.96617 |
| | | | SRTM | 8254.67 | 6.05603 |
| | Cambodia | 179,492 | GDEM | 26.38 | 0.0146975 |
| | | | SRTM | 27.24 | 0.0151762 |
| | China | 9,198,103 | GDEM | 26399.21 | 0.287007 |
| | | | SRTM | 26715.22 | 0.290442 |
| | India | 3,209,716 | GDEM | 20054.81 | 0.624816 |
| | | | SRTM | 20449.59 | 0.637112 |
| | Indonesia | 1,898,776 | GDEM | 196078.05 | 10.32655 |
| | | | SRTM | 198098.73 | 10.43297 |
| | Japan | 371,705 | GDEM | 3488.89 | 0.938618 |
| | | | SRTM | 3540.96 | 0.952626 |
| | Korea | 98,977 | GDEM | 2363.27 | 2.38769 |
| | | | SRTM | 2393.57 | 2.41831 |

**表-2** 推定結果のまとめ(地域毎)

| 地域 | 国土面積($km^2$) | 使用データ | 水没面積($km^2$) | 国土水没率(%) |
|---|---|---|---|---|
| Asia | 18,959,682 | GDEM | 294984.94 | 1.55585 |
| | | SRTM | 298037.35 | 1.57195 |
| Oceania | 8,364,025 | GDEM | 19066.13 | 0.227954 |
| | | SRTM | 18562.48 | 0.221932 |
| Africa | 14,313,204 | GDEM | 6306.08 | 0.0440578 |
| | | SRTM | 6315.48 | 0.0441235 |
| North America | 11,521,943 | GDEM | 58399.08 | 0.506719 |
| | | SRTM | 58018.44 | 0.503547 |
| South America | 15,701,303 | GDEM | 173608.39 | 1.10569 |
| | | SRTM | 177422.69 | 1.12999 |
| Other | 2,772,699 | GDEM | 13175.71 | 0.475194 |
| | | SRTM | 13340.58 | 0.481141 |
| All Area | 71,632,856 | GDEM | 565540.33 | 0.789499 |
| | | SRTM | 571697.02 | 0.798093 |

**注)**ここでの水没率(%)は, 沿岸国の総面積に対する水没面積の率を示す。

g.4.1 引用文献


1) GTOPO30(http://www1.gsi.go.jp/geowww/globalmap-gsi/gtopo30/gtopo30.html)
2) GDEM プロジェクト(http://www.ersdac.or.jp/GDEM/J/index.html)
3) SRTM ダウンロードページ(http://dds.cr.usgs.gov/srtm/)
4) 朝香智仁・山本義幸・藤井壽生・西川肇:ALOS/PRISM データから作成した DSM のフィルタリング手法に関する考察,第 64 回土木学会全国大会年次学術講演会概要集,Ⅳ-173,2009.
5) 福原直樹:地理情報システムによるデータ統合と気候変動の地球規模脆弱性評価,茨城大学修士学位論文,2004


h.4.1 成果の発表

❖ 論文(準備中)

❖ 著書・報文等

❖ 口頭発表

## e.4.2 高潮氾濫リスクの世界評価

担当機関:茨城大学
研究者名:信岡　尚道

**要旨**

本年度は RCP シナリオにもとづく気候モデル出力結果を用い、2300 年(RCP4.5 シナリオ)までの影響評価とぜい弱性評価を全球で実施し、高潮氾濫リスク域マップ、氾濫面積の拡大量や影響人口率を示した.これらの結果は、2100 年以降も勢いが衰えず影響・ぜい弱性が増加するものとなった。沿岸域の適応策を考える上で 2100 年を最終年と認識するのではなく、中間年として捉える必要性を指摘した。

(1) はじめに

本課題の目標は気候モデル出力結果による海面上昇、熱帯低気圧や大規模季節風を用いて、全球の高潮解析を行い、21 世紀から 2300 年に及ぶ世界高潮氾濫リスクマップを提示すること、また年代推移によるリスクの拡大、地域や国ごとの危険区域とその時期の一覧を提示することである。本年度は RCP シナリオによる気候モデル出力結果を用いて解析をおこなった長期の評価結果を報告する。

(2) 気候モデル出力結果の整理と高潮浸水計算方法

サブテーマ1では RCP4.5 シナリオについて 2300 年までの長期予測がなされている。海面水位上昇には、熱膨張、氷河や氷床の融解がある。入手できたデータを吟味して、熱膨張に、AR4 で示された熱膨張と全海面水位量の関係を示す係数をもとめ、その係数を乗じたものを海面水位上昇量とした。Yoshimori et. al.(2011) らの手法で RCP4.5 シナリオの結果を解析すると、南極の降雪が大きくそれは海面水位上昇を抑えるとの指摘(吉森正和, 私信)がされていることに留意する必要はあるが、この効果を取り入れていない水位量である。この水位に前年度までに数値計算で求めた高潮、潮位を加えたものを海岸線での外力とし、影響・ぜい弱性評価としてレベル堪水法により浸水域と浸水域人口を求めた。

季節風による高潮の解析のために用いた海上風については、気候モデル出力結果を補間して 0.5 度緯度経度弧の間隔にした。高潮の計算は、海岸か水深 100m までの海底勾配とその域内での風速が一定との単純場仮定のもとで、海面水位変化による非線形効果を除外した準理論的経験式で求めた。この値を用いて上と同様に影響評価を実施した。

(3) 世界の高潮氾濫リスク

RCP4.5 シナリオの 2300 年における高潮氾濫マップを図-1 に示す。外力のうち、潮位はさく望平均満潮位、高潮は現在気候の熱帯低気圧によるもので、海面水位上昇は 2300 年のもので約 1m である。ミシシッピーデルタ、長江デルタ、メコンデルタ、ガンジスデルタなど現在でもリスクが高い場所で氾濫域の拡大が顕著である。2300 年までの海面水位上昇による氾濫リスクの面積の拡大が大きい国はカナダ、ロシア、アメリカやインドネシアであった。モルディブやキリバスでは国土の約 70%が新たに氾濫リスク域になり、全氾濫リスク域はほぼそれぞれの国の国土全体に及ぶこととなった。

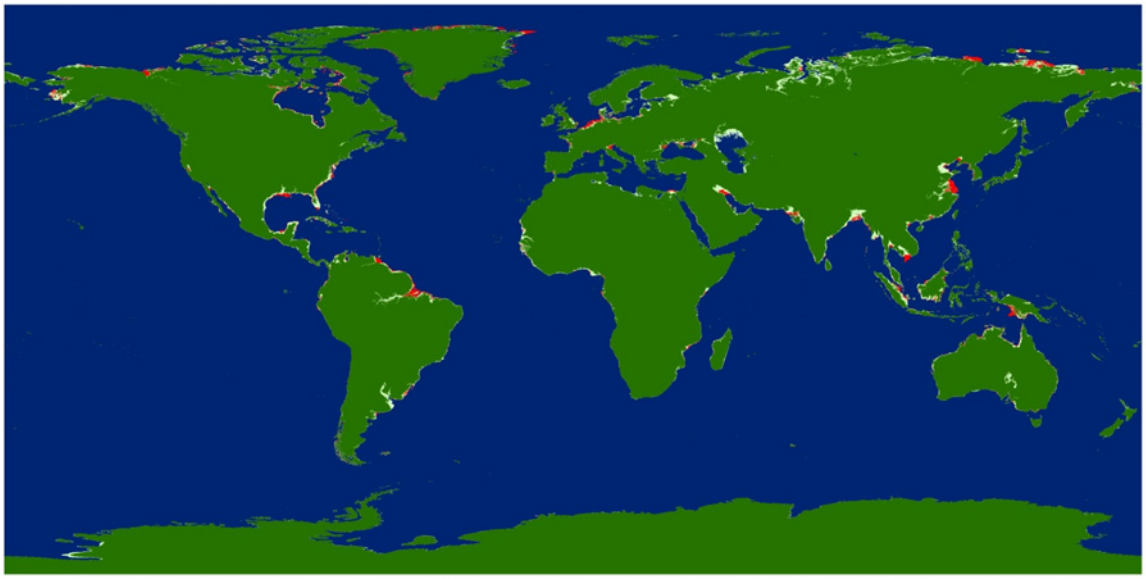


図 1: 熱帯低気圧による 2300 年の潜在的な高潮氾濫域。氾濫域を赤色で塗りつぶしている。海面上昇は RCP4.5 シナリオに基づく。潮位にさく望平均満潮位。外力の一つ高潮は現在気候の熱帯低気圧によるもの。

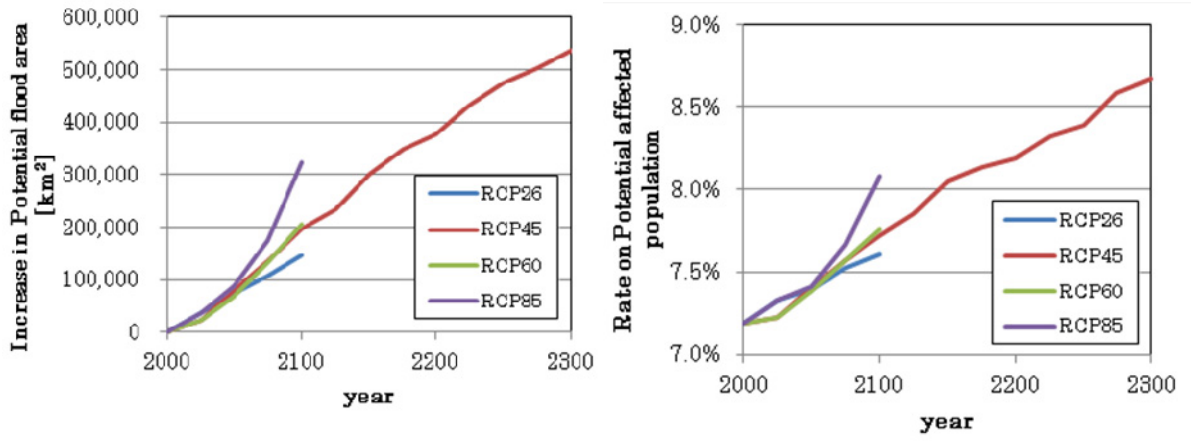



図 2: 全球における潜在的な高潮による氾濫面積の拡大（左）と被災人口割合（右）の推移。RCP4.5 は 2300 年まで、RCP2.6, RCP6.0 と RCP8.5 は 2100 年までの予測である。2100 年までだと RCP8.5 シナリオでともに大きな値となっている。他方，相対的に 2100 年の値が小さい RCP4.5 シナリオでも 2100 年以降 2300 年まで拡大および増加することがわかる。

全球での氾濫リスク面積の拡大と、氾濫リスク域の人口の全人口に対する率を2300年まで求めたものを図-2 に示す。なおシナリオ RCP2.6, RCP6.0 と RCP8.5 は 2100 年までの予測である。温室効果ガスの排出シナリオによる影響の違いは 2050 年頃から現われ始める。氾濫域の拡大は 2100 年以降も 2300 年まで同じスピードで継続することがわかる。とくに北米とアジアで顕著な氾濫域拡大がみられた。熱帯低気

圧の強大化の効果を入れればさらに拡大する可能性は SRES シナリオによる結果（信岡, 2011）から類推できる。被災人口も継続して増加する。被災人口の割合でみればオセアニアで特に顕著な上昇が見られた。熱帯低気圧のみならず沿岸域への移住も考慮すればさらに増加することになる。

全球の海上風の変化による高潮も 2300 年まで推定したが、氾濫リスク域および同域人口割合とも現気候に比べ有意な変化はあらわれなかった。

f.4.2　考察

RCP シナリオに対しては社会シナリオがまだ公開されていないため、限られた項目についてのぜい弱評価しかできなかった。前年度までの解析結果から判断するに一般の人口成長の変化が浸水リスク域人口にも大きく影響するので（たとえば、Nichols (2004), Nobuoka and Murakami (2011)）、間もなく公開されるであろう社会シナリオを用いたぜい弱評価を行う必要がある。2100 年以降の社会シナリオは開発が難しいため公表されるかは不明であるが、仮定などを用いた単純な条件付きシナリオでもっても、ぜい弱評価を行うことには大いに価値がある。その理由の一つに、図 2 の左図の氾濫拡大面積でみると 2100 年の時点で、RCP4.5 で約 20 万 $km^2$ で RCP8.5 で約 30 万 $km^2$ と大きな差があるが、RCP4.5 でも 22 世紀後半にはその 30 万 km2 に到達する。対策（適応策）への時間が半世紀ほどあるが、いづれ等しいレベルの対策が必要になるためである。2100 年頃の対策を考える上でも長期の推定は重要である。同様に 2100 年以降の地球温暖化に伴う極端現象の変化の気候モデルによる予測も同評価に重要になる。

g.4.2　引用文献

Yoshimori, M. and A. Abe-Ouchi (2011): Sources of spread in multi-model projections of the Greenland ice-sheet surface mass balance. *J. Climate*, doi: 10.1175/2011JCLI4011.1 (early online).

Robert J. Nicholls(2004) : Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios, Global Environmental Change, 14, 69–86.

Nobuoka H. and Murakami S., 2011(Jan.). *Vulnerability of coastal zones in the 21st century*, Climate Change and Global Sustainability: A Holistic Approach (Edt. by Akimasa Sumi, Nobuo Mimura and Toshihiko Masui), UNU Press (ISBN: 978-92-808-1181-0).

信岡尚道(2011), 気候変動下の熱帯性低気圧による全球高潮の基礎的予測, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.67 , No.2, pp.I_1166-I_1170.

h.4.2　成果の発表

❖　論文

1. Hisamichi Nobuoka, Mai Van Cong, 2011. Vulnerability change in coastal zones of Vietnam and Japan, 6th Asia Pasiphic Coastal engineering
2. 信岡尚道(2011), 気候変動下の熱帯性低気圧による全球高潮の基礎的予測, 土木学会論文集 B2（海岸工学）, Vol.67 , No.2, pp.I_1166-I_1170.

❖　著書・報文等

なし

❖ 口頭発表

1. Hisamichi Nobuoka1 and Nobuo Mimura. 2011. Assessments of Early Adaptations due to Sea-Level Rises and Storm Surges in Asian and Oceanic Coastal Zones, Coastal Structure 2011, , A3-9, Yokohama.2011/9/6..

## e.4.3 アジア・メガデルタへの影響

担当機関:茨城大学
研究者名:村上　哲

### 要旨

海水面の変動に起因するメガデルタの地下水塩水化マップを作成する手法を提案した。対象地域はチャオプラヤデルタであり、現地の観測結果との比較により提案した手法の有効性を示した。提案手法は、地下水水頭分布図から流線網を作成する簡易な手法であり、他地域への適用性も高い。

(1) はじめに

本課題の目標は気候モデル出力結果による海面上昇、熱帯低気圧や大規模季節風を用いて、全球の高潮解析を行い、21 世紀から 2300 年に及ぶ世界高潮氾濫リスクマップを提示すること、また年代推移によるリスクの拡大、地域や国ごとの危険区域とその時期の一覧を提示することである。本年度は RCP シナリオによる気候モデル出力結果を用いて解析をおこなった長期の評価結果を報告する。

(2) 流線網による地下水塩水化域把握手法の提案

流線網は、流線、およびこれと直交する等ポテンシャル線の二組の曲線群から成る。高い等ポテンシャル線から低い等ポテンシャル線に向かって地下水の流れが生じる。したがって、海岸線から流線が始まり、内陸へ流れの方向が生じているエリアは海水が侵入していると考えることができる。チャオプラヤデルタのように地下水位が観測されている場合、帯水層ごとに流線網を作成し、海岸線からの流線を追跡することにより塩水化域を把握することができる。図-1 は、流線網から塩水化域を作図により求める方法を示している。

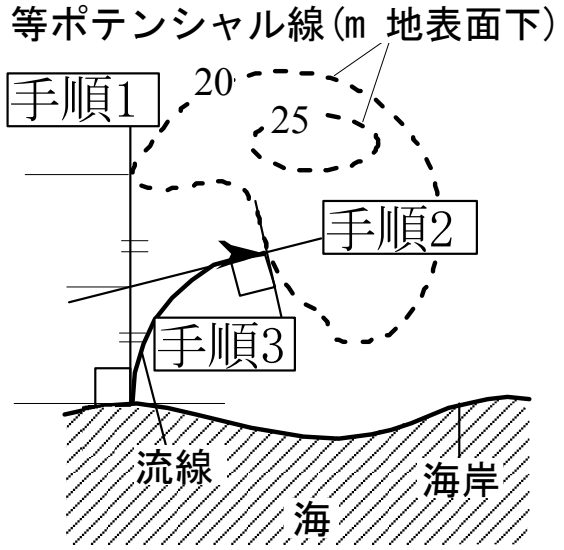



図-1　流線網作図手順

流線を描く条件として、海岸でのピエゾ水頭を 0m とする。また、流線の始点間隔は海岸に沿って 5km とした。手順 1 として任意の海岸の地点をとり、海岸から垂直に等ポテンシャル線まで直線を描き、その中

心に点をとる。次に手順2として中心の点から等ポテンシャル線へ垂直に直線を描く。これによって、流線と等ポテンシャル線が直交する、という流線網の条件を満たす事となる。最後に手順3として、描いた二直線に沿うように曲線を描く。描いた流線を通り、海岸側から海水が侵入するため、海岸側からの流線網の内側は海水が侵入する可能性のある地域であり、海水の影響を受ける塩水化域であると考える事ができる。

(3) チャオプラヤデルタへの適用

図-2 にチャオプラヤデルタの帯水層の一つである Phra Pradaeng 帯水層の 1993 年 1 月のピエゾ水頭の分布である等ポテンシャル線図を示す。

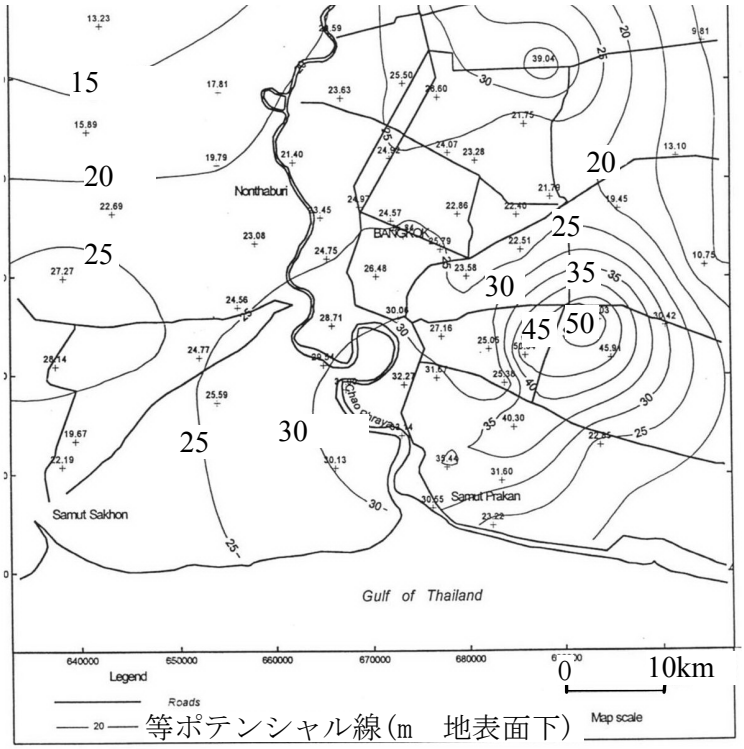



図-2　Phra Pradaeng 帯水層の 1993 年 1 月のピエゾ水頭の分布（Mana 2005）

先に提案した手法を図-2 で示した等ポテンシャル線に適用した結果を図-3 に示す。図-3 から沿岸域左岸において、塩化物イオン濃度は海岸線に近い程高く、遠い程低くなる傾向を示している事が分かる。塩化物イオン濃度等値線の分布は、ピエゾ水頭の分布図に描いた流線網の軌跡に近い形を示しており、流線の内側は海水侵入の影響を受けている事が考えられる。したがって、ピエゾ水頭の分布から流線網を描く、本塩水化域の把握手法は妥当であると考える。また、右岸側沿岸域においても、同様の考察を行う事が可能であるが、右岸側の内陸部においても塩化物イオン濃度が高い地域が見られる。これは、粘土層に残留した塩化物イオン濃度の高い化石塩水の影響であると考えられる。辻和毅(2009)が示した 1993 年の Phra Pradaeng 帯水層の塩化物イオン濃度の分布であるとを比較したものを図-4 に示す。図-4 から沿岸域左岸において、塩化物イオン濃度は海岸線に近い程高く、遠い程低くなる傾向を示している事が分かる。塩化物イオン濃度等値線の分布は、ピエゾ水頭の分布図に描いた流線網の軌跡に近い形を示しており、流線の内側は海水侵入の影響を受けている事が考えられる。したがって、ピエゾ水頭の分布から流線網を描く、本塩水化域の把握手法は妥当であると考える。また、本研究で対象にしているのは

海面上昇を受ける沿岸域地盤であり、海水の侵入とは異なる塩化物イオン濃度上昇となる要因は考慮しない。流線網により塩水化域を把握する事が可能なため、水頭の変動に影響を与えると考えられる、海面上昇や地下水揚水を考慮した水頭予測解析を行う事により、将来の塩水化域を把握する事が可能となる。

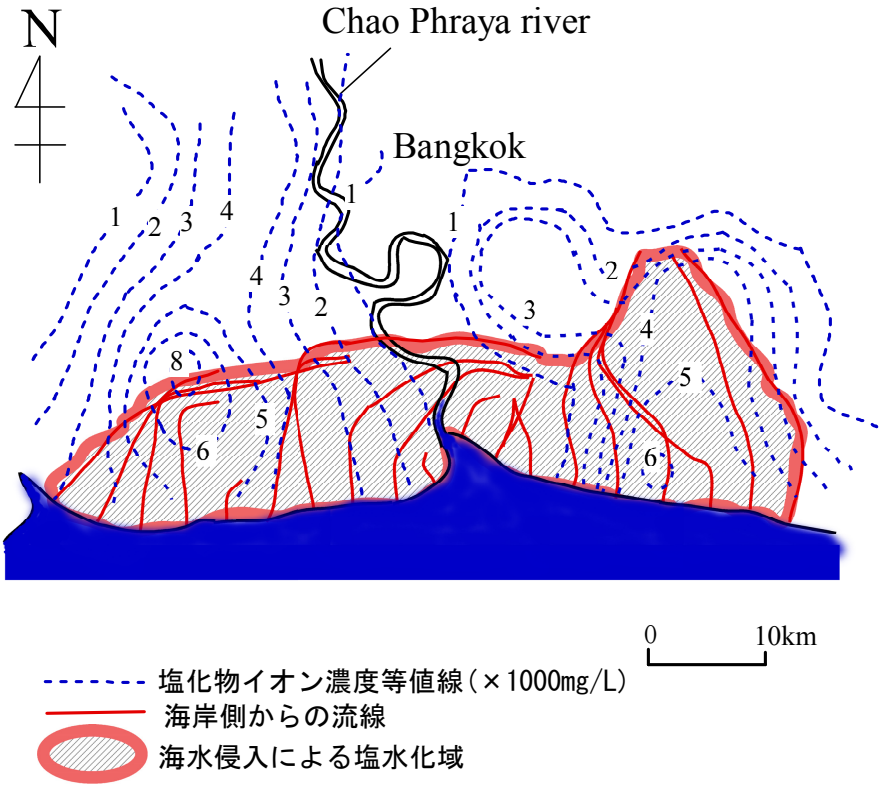



図-3 1993 年 PhraPradaeng 帯水層の塩化物イオン濃度の分布と流線網の比較

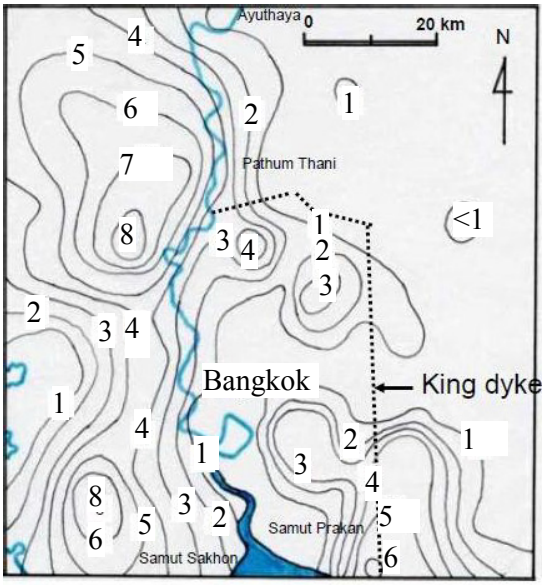



図-4 1993 年 PhraPradaeng 帯水層の塩化物イオン濃度の分布（濃度は図中の数字×1000mg/L）（辻和毅、2009）

f.4.3　考察

本研究で提案した流線網による塩水化域の把握手法は、ピエゾ水頭の分布図を用いた流線網を描く事で、三次元的な地下水流動を表現したものであり、塩水化域を視覚的に表現する事が可能である。

・ 流線網による塩水化域把握手法は、帯水層内の深度方向の塩水濃度の分布は考慮できないが、ピエゾ水頭の分布のみを用いるため、海面上昇や地下水揚水などの水頭に影響を与える因子を考慮した水頭予測を行う事により、塩水化域の将来予測をする事が可能である。
・ 実測値と、流線網による塩水化域把握手法をチャオプラヤデルタに適用した結果を比較する事により、本研究で提案した塩水化域把握手法の妥当性を示した。

g.4.3　引用文献

Mana Kitirat：Sustainable Groundwater Resources Management For The Bangkok Aquifer System, Master thesis of Asian Institute of Technology, pp126-154, 2005.

辻和毅：モンスーンアジアの大都市圏における地下水保全政策の実証的比較研究, pp. 61-63, 2009.

h.4.3　成果の発表

❖　論文

なし

❖　著書・報文等

なし

❖　口頭発表

なし

# e.5 全球雲解像モデルによる雲降水システムの気候予測精度向上

佐藤正樹(海洋研究開発機構 IPCC 貢献地球環境予測プロジェクト)

## 1. 研究目的

本研究では、全球雲解像モデルを地球シミュレータ上で稼動し、気候状態を得るための長時間実験を行い、大気の雲降水システムの気候予測精度の不確実性低減を図る。雲・降水の時空間的分布を、衛星データ等の高分解能データにより検証し、雲物理や境界層過程などの物理スキームの改良・高度化を行い、モデルのさらなる改良を図る。従来の気候予測で用いられている大気大循環モデルと比べ、予測精度の定量的な向上を目標とする。特に、熱帯の重要な気象現象であるモンスーン、季節内変動、台風の発生過程の再現の向上を通じて、気候予測モデルとしての信頼性の向上を図る。

## 2. 年次計画

－研究1年目:3ヶ月以上の全球雲解像モデルによる数値積分を行い、気候的な特性を得るとともに雲降水の時間空間変動を解析する。得られた全球雲解像データを解析し、高解像の衛星データ等の観測データと比較する。モデルの物理過程、特に、雲物理過程、境界層過程の改良をはかる。

－研究2年目:エルニーニョ、ラニーニャ等の異なる環境場のケースをとりいれて、それぞれ3ヶ月程度の実験を行う。全球雲解像データを解析し、衛星データ等と比較する。引き続き、物理過程の改良をはかる。海洋混合層モデルを導入し、海洋とのカップリングの有無についての効果を検討する。

－研究 3 年目:異なる環境場のケースの事例実験を行う。この時点までに改良を進めたモデルで、気候感度実験を開始する。得られた数値データの雲降水過程の再現性について定量的に解析する。物理過程の改良を通じて、再現性の向上をはかる。

－研究4年目:改良した全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した実験を行い、気候感度を調べる。雲降水システムの特性の変化、モンスーンや台風の挙動の変化について結果を得る。引き続き、衛星データ等によるモデルの検証、物理過程の改良を行う。

－研究 5 年目:改良した全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した実験結果の追加的な実験を行い、結果についてまとめる。全球雲解像モデルを、次代の計算機環境のもとでの日本気候モデル群のラインアップとして整備する。

## 3. 平成 23 年度の研究成果

### 3.1 成果の概略

昨年度までに改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、温暖化時を想定した追加的な実験を行い、結果についてまとめた。

- 全球雲解像モデルの実験・解析:改良を進めた全球雲解像モデルを用いて、現在気候実験および温暖化時を想定した実験を行った。雲降水システムの特性の変化、台風の挙動や熱帯循環の変化について結果を得た。
- 物理過程の改良:引き続き物理過程の改良を行い、モデルのバイアスを低減するための感度実験を行った。境界層過程、雲微物理過程(single-moment スキーム、two-moment スキーム)、陸面・海面過程(MATSIRO、 slab-ocean モデル)、サブグリッド対流の改良について引き続き検討した。
- 衛星観測データによる検証:得られた全球雲解像データを解析し、衛星データ等と比較した。衛星

センサーシミュレータを利用し、モデルの出力結果を全球にわたって解析した。特に、アクティブセンサーデータを用いて、雲の鉛直構造の検証を行った。

### 3.2 温暖化想定実験における熱帯低気圧

(1) 目的

積雲対流スキームを用いた従来の気候モデルでは、現在気候はもとより、温暖化を想定した気候実験における大気擾乱や循環場、雲や対流を介した放射の変化に不確定性がはいりこむ。熱帯低気圧の気候研究では水平解像度 10km の静力学モデルも用いられるようになり、より低い解像度のモデルと比べて、たとえば強度の表現が改善される点が報告されているが、依然として課題は残されている（Manganello et al. 2011）。全球雲解像モデルでは、雲や対流にかかわる不確定性を排除することで、従来型気候モデルより信頼性の高い温暖化予測を行うことができる。今年度は、昨年度に実施した温暖化想定実験の解析をさらに進めて、温暖化に伴う、熱帯低気圧の経路、頻度、強度などの特徴的な変化、および強度と雲頂高度の関係の変化を議論する。

(2) 実験設定

水平格子解像度 14km を用い、温暖化タイムスライス実験（Bengtsson et al., 1996）を行った。温暖化時の境界条件（海面温度と海氷分布）は、Mizuta et al.(2008)にならい、IPCC 第 4 次報告の CMIP3（A1B シナリオ）から 18 種のモデルの現在（1979~2003）および将来（2075~2099）各 25 年分の各月のアンサンブル平均偏差データを作成し、昨年度より行っている2004 年夏季季節変化実験の気候値境界条件に加算して与えた。積分期間はコントロールケースが 2004 年 6 月～10 月、温暖化想定実験が約 100 年後の 5 月～10 月とした。温暖化想定実験の 5 月はスピンアップ期間として解析から除外した。温室効果ガスの濃度は A1B シナリオに基づき、CO2 濃度（現在の約 2 倍）一定値、$N_2O$ と $CH_4$ の濃度は現在と同程度とした。温暖化放射スキームは従来用いた MSTRNX の改良版 (Sekiguchi and Nakajika, 2008)を組みこみ、精度を高めた。

(3) 温暖化による熱帯低気圧の構造変化

NICAM を用いた温暖化した将来実験における熱帯低気圧予測研究を行った（Yamada et al. 2010）。その中で強度の強い熱帯低気圧はその壁雲の雲頂高度が高くなる傾向があることを定量的に示した。さらに将来実験と現在実験で発生した同じ程度の強度に発達した熱帯低気圧の壁雲の雲頂高度を比較すると、将来実験で発生したケースにおいて、現在実験より雲頂高度が高くなる傾向が示された。熱帯低気圧の最大接線風速半径の大きさや暖気核に注目して温暖化による熱帯低気圧の構造変化を議論する。

熱帯低気圧の大きさはその強度に依存して異なるため、表 1 に示すように最盛期の中心気圧によって 5 つのカテゴリーに分類して解析を実施した。ただし、カテゴリー1 は構造がはっきりしていないため、カテゴリー2 は将来実験において熱帯低気圧が発生していなかったため解析から除外している。中心気圧で分類した発生数に関して観測と現在実験を比較すると共にカテゴリー2、3 の発生数が大きいことがわかり、強度分布

| カテゴリー | 最盛期の中心気圧 | 観測 | 現在実験 | 将来実験 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 980hPa 以上 | 21 | 20 | 15 |
| 2 | 965-979hPa | 3 | 7 | 0 |
| 3 | 945-964hPa | 10 | 11 | 3 |
| 4 | 920-944hPa | 10 | 11 | 5 |
| 5 | 920hPa 未満 | 3 | 6 | 11 |

表 1:熱帯低気圧のカテゴリー分類と観測と現在・将来実験における個数. 観測は IBTrACS.

を良く再現していることがわかる。

図 1 には NICAM により計算された熱帯低気圧の暖気核の分布をカテゴリー別に示した。暖気核の既往の研究において温暖化時、$CO_2$ 倍増実験における熱帯低気圧の暖気核の存在高度はコントロールケースよりも高くなることが報告されている(Knutson and Tuleya 1999)。本実験においても暖気核の高度はカテゴリー別に比較しても、現在実験より将来実験の方が上層に存在している様子がわかる。また温度偏差のピークの値も将来実験の方が現在実験よりも大きな偏差を示している。今後、上述の差が生まれた原因について、理論的な解釈を進める必要がある。

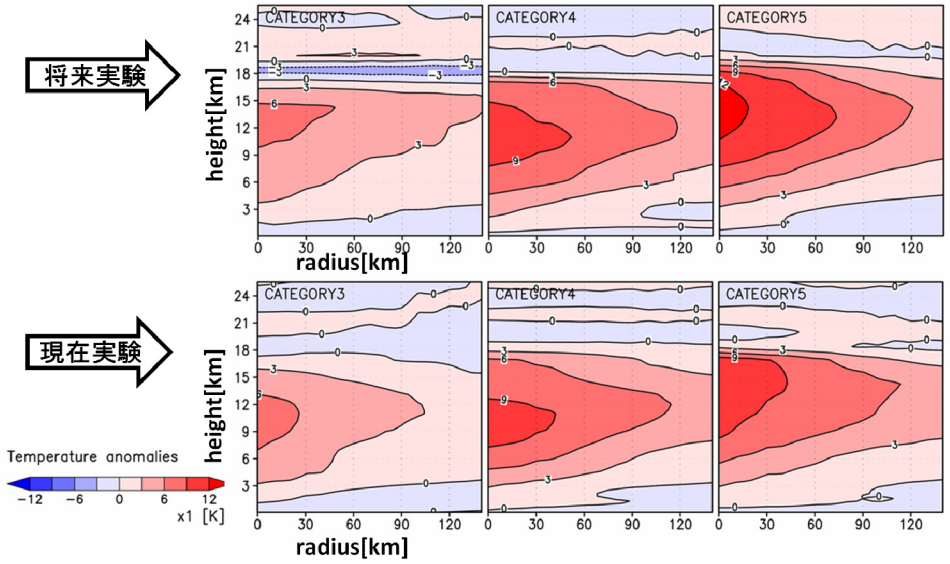



図 1: NICAM で計算された熱帯低気圧のカテゴリー別の暖気核の分布(上:将来実験、下:現在実験)。熱帯低気圧の動径方向に平均した温度偏差を、中心から半径・高さ断面に示す。ここで熱帯低気圧の中心から 500－1000km を環境場と定義して、環境場からの偏差を暖気核と定義している。赤が正偏差、青が負偏差を示す。

### 3.3 NICAM で計算された温暖化に伴う雲、熱帯循環の将来変化

(1) 温暖化に伴う雲の変化

これまで改良されてきた NICAM を用いて、温暖化気候を想定した 14km メッシュの 5 ヶ月実験を行った。図 2 は6～8月で平均した上・中・下層雲量の現在気候・将来変化である。温暖化によって全球平均した上層雲量は増加、下層雲量は減少しており、NICAM を用いたこれまでの温暖化実験の結果(Collins and Satoh, 2009)と整合的である。上層雲は海洋大陸周辺と南半球中緯度での増加が顕著である。下層雲はカリフォルニア沖、ペルー沖での減少が目立つ。

図 3 は雲頂高度と光学的厚さで分類した全球平均 ISCCP 雲量である。光学的に薄い上層雲(cirrus)は増加するとともに雲頂が高くなる。cirrus の増加は可視に近い不可視雲が温暖化によって厚みを増したと理解できる。光学的厚さが中～大の上・中層雲も増加しており、北半球高緯度と南半球中緯度で顕著である(図省略)。下層雲は全ての光学的厚さの分類で減少している。

図 4 は雲放射強制力(CRF)である。CRF は大気上端における正味放射から晴天放射を差し引いたもので、下向きが正である。長波(LW)と短波(SW)に分けた時、現在気候では LW による加熱効果に比べて SW による冷却効果が大きいため、雲は気候系にとって冷却の効果がある。温暖化によって、雲の冷却効果は減少、つまり雲は温暖化を加速するという結果が得られた(全球平均で +2.23 $W/m^2$)。この結果は LW-CRF の増加(全球平均で +4.26 $W/m^2$)が寄与しており、海洋大陸周辺と南半球中緯度で大きい

ことから上層雲の増加と整合的である。雲頂高度の上昇も LW-CRF を増加させる効果がある。一方、SW-CRF については変化の絶対値は小さいが、LW-CRF の変化を打ち消す方向に変化している（全球平均で -2.03 W/m$^2$）。この変化は主に北半球高緯度で起きており、光学的な厚さが中～大の雲の増加、および海氷減少に伴う地表面アルベド低下の見かけの効果で説明できる。

上層雲・下層雲の定性的な将来変化は、これまで行ってきた雲物理過程の変更によらずロバストである。しかしながら、14km というメッシュサイズは雲を表現する上で十分ではない上、気候実験としては 10 年以上の積分が必要である。今後は次世代スパコンなどを用いて高解像度の長期気候実験を行うことで、より信頼性の高い雲の温暖化応答を得ることが望ましい。同時に、モデルの再現性の検証とスキームの改良を引き続き行っていく必要がある。

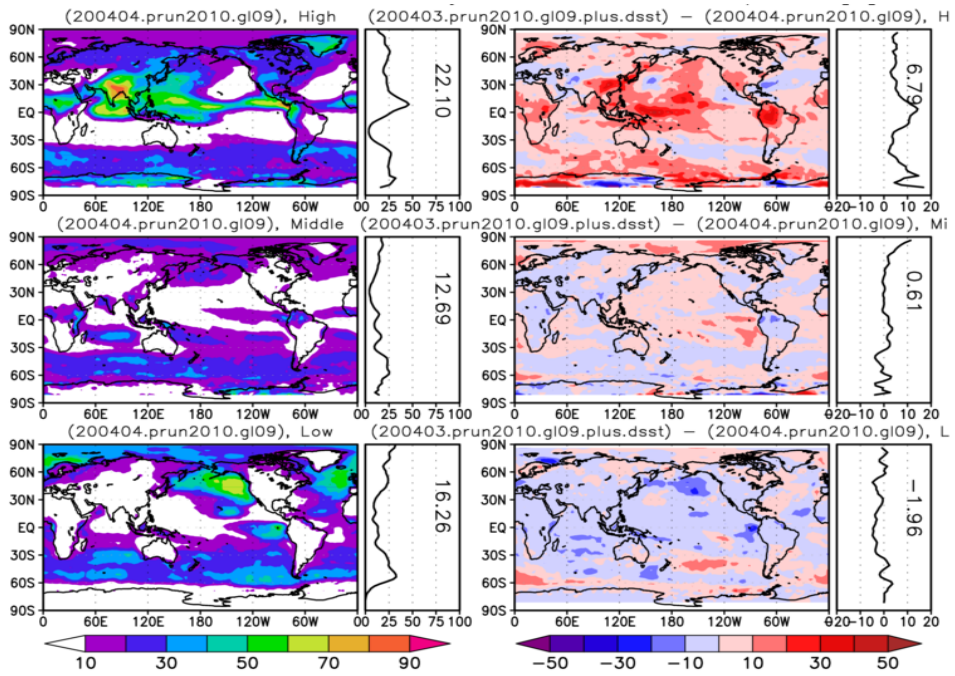



図 2：（上中下）上・中・下層における ISCCP 雲量[%]。（左）現在気候、（右）将来変化。各図右の折れ線と数値はそれぞれ東西平均と全球平均。6～8月平均。

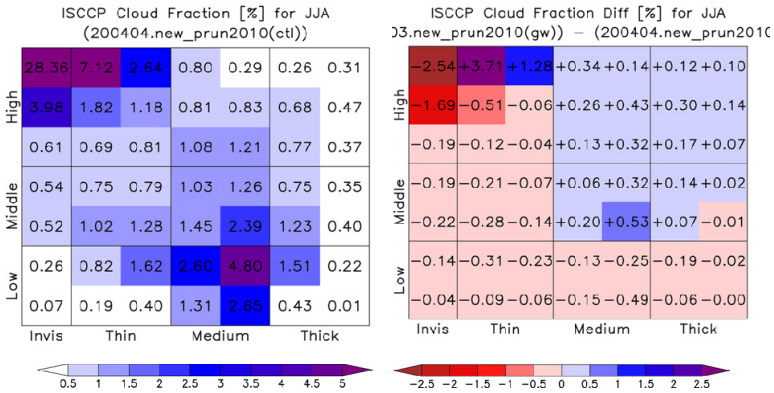



図 3：光学的厚さ・雲頂気圧毎の ISCCP 雲量[%]。（左）現在気候、（右）将来変化。6～8月の全球平均値。

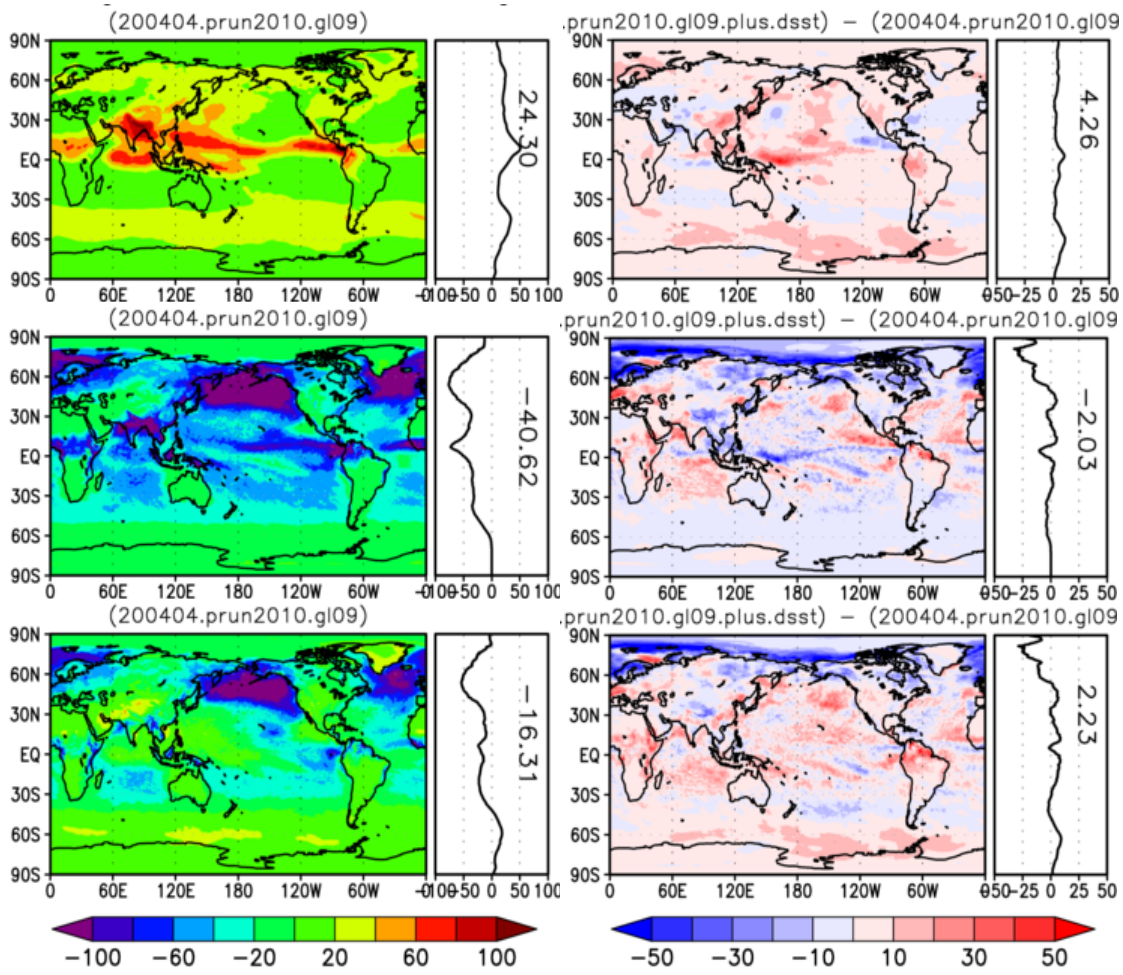



図 4: 6 月～8 月における雲放射強制力 [W m$^{-2}$]（左）現在気候、（右）将来気候。上から順に、長波、短波、正味の値。折れ線は東西平均、数値は全球平均。

(2) 熱帯東西鉛直循環の変化

将来実験（Yamada et al. 2010）におけるMJOの変化の解析に着手した。ここでは背景となる熱帯東西循環と降水変化の概要を述べる。図5は、現在実験(a,c,e)および将来実験(b,d,f)について、降水ホフメラー図(a,b左パネル)、ウォーカー循環インデックス(Wang 2002)（a,b右パネル，黒）を示す。両実験とも、暖水域（60° E-180)において東進する降水パターンが存在するものの、降水の集中化は、現在実験ではインド洋および西太平洋、将来実験では西太平洋東部の日付変更線付近で起こっている。これは、将来実験においてエルニーニョ型の海面水温偏差を与えたことに起因する。(c),(d)から、やや強い降水事象の活動域は将来実験では期間を通じて東側に移動していることがわかる。

この降水分布の変化に関連した循環の変化は、ウォーカー循環インデックスの変化と整合的である。東西循環の流線(e,f)から変化の詳細がわかる。上昇域の中心は現在実験ではインド洋から西太平洋域、将来実験では西太平洋東部にある。速度場の振幅変化（色）として、1）この上昇流が下-中層において現在実験よりもむしろ弱まるのに対し、中-上層において強まること、2）この上昇域に寄与する対流圏下-中層の西風強化が海洋大陸から西太平洋において顕著であること、3）同領域では上層東風も強化され、鉛直シアーが強まること、などが明らかになった。

2）と3）の変化は、海洋大陸から西太平洋における夏季のモンスーン循環の強化、および、西太平洋における台風活動の変化と関連づけて理解できると興味深い。(c), (d)の下部に各海域における台風発生

数を記した。現在実験における西太平洋の個数(22個)は、将来実験でも変わらない。鉛直シアーが強まるにもかかわらず、下層西風強化による渦度強化や水蒸気輸送の効果がきいて活動が維持されている可能性も考えられる。

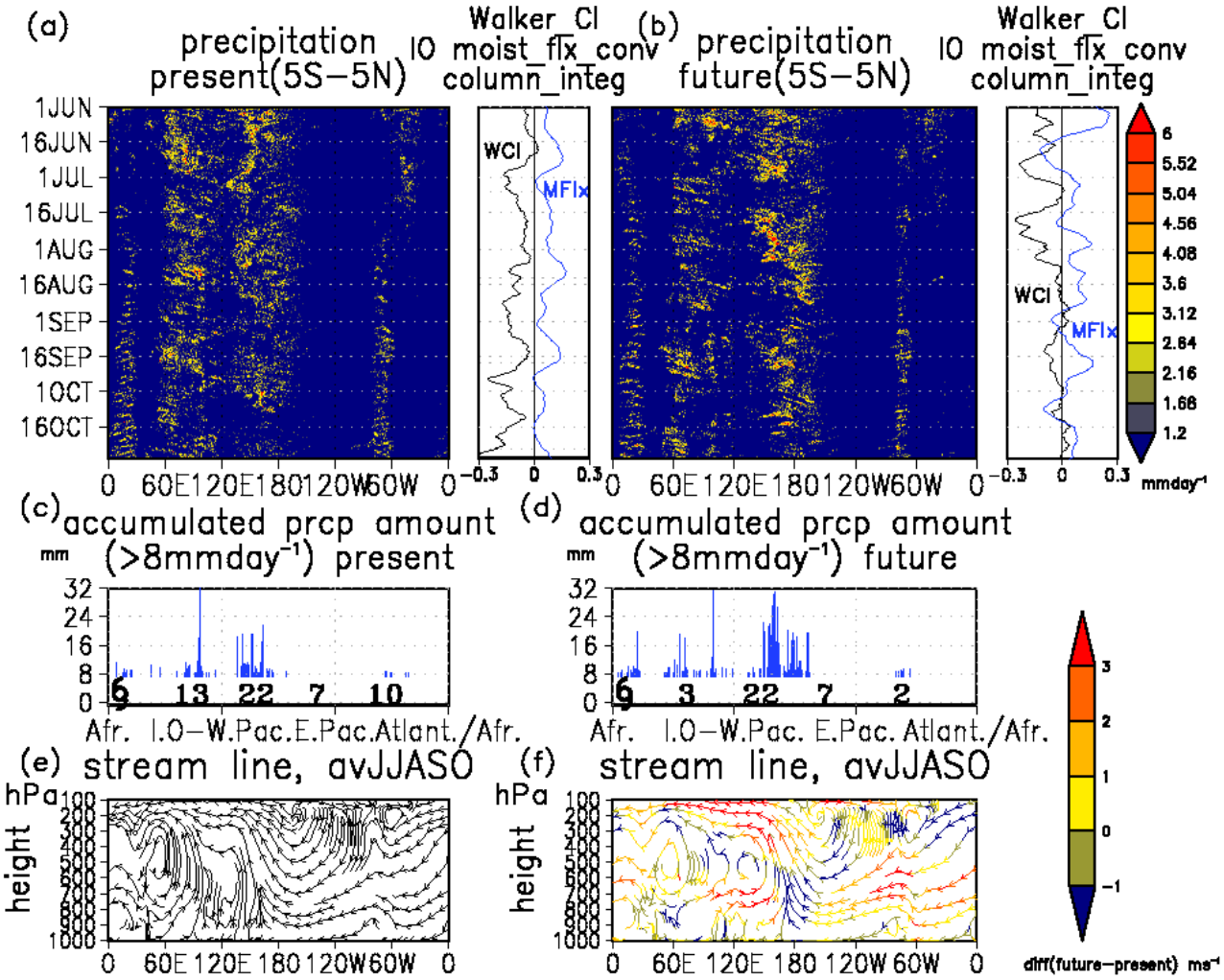



図5:(a) 現在気候実験、左:地上降水量[mm/day]のホフメラー図(5° S-5° N平均)、右: ウォーカー循環インデックス[黒](Wang 2002)およびインド洋における鉛直積算(1000-100hPa)水蒸気フラックス収束[kg/m$^2$/s,青]、(b) (a)に同じ、ただし将来実験、(c) 現在気候実験のやや強い降水事象(8mmday超)の同期間積算降水量(5° S-5° N)および台風発生数(インド洋、西太平洋、東太平洋、大西洋)。海域区分はYamada et al. (2010)に準じる、(d) (c)に同じ、ただし将来実験、(e) 現在気候実験の同期間平均の東西鉛直循環流線(5° S-5° N平均)[ベクトルの鉛直速度成分(x100)]、(f) (e)に同じ、ただし将来実験。色づけは速度絶対値の差(将来-現在)[m/s]。

### 3.4 雲微物理モデルの開発と雲・エアロゾル相互作用過程の精緻化

前年度までに two-moment 法 bulk 雲微物理スキームの開発を行ってきた。これにより、雲の成長段階に応じて雲粒子の平均的な大きさの情報を診断する事が出来、従来の雲微物理スキームと比べて雲の成長速度や降水の強弱をより現実的に表現出来るようになった。しかしながら、雲微物理モデルでは背景場のエアロゾルを仮定して雲粒の核形成を計算しており、大気汚染の強度によって雲底での雲粒生成

に大きな差が生じ、結果として雲の成長速度にも差が生じる事が分かっている（Seiki and Nakajima, 2012, 再投稿準備中）。

図 6 に MODIS 衛星センサーによって観測された 2000 年から 2008 年までの平均的なエアロゾル光学的厚さを示す。特に大陸沿岸の都市域からエアロゾルが流れ出しており、北部太平洋、インド洋において高濃度の人為起源エアロゾルを含む空気塊が存在する事が分かる。また、インドネシア、南米、アフリカ中部では森林火災起源のエアロゾル濃度が高く、アフリカ北部、アラビア半島、ユーラシア大陸内陸部では砂漠から舞い上がる土壌性ダストエアロゾル濃度が高い事が分かる。

本年度は、これら地域によるエアロゾルの量や種類の違いを考慮して雲の成長過程を計算するために、two-moment 法 bulk 雲微物理モデルとエアロゾル輸送モデルの結合を行った。母体とするエアロゾル輸送モデルは Suzuki et al. (2008)によって NICAM に結合された SPRINTARS とし、海塩、土壌性ダスト、硫酸塩、炭素性エアロゾルの四種類を予報する。SPRINTARS は長期積分用の低解像度 GCM を念頭に開発されてきた経緯が有り、雲によるエアロゾルの除去を始めとした雲とエアロゾルの相互作用が簡略化されて取り入れられている。本研究では NICAM を用いた全球雲解像実験を想定し、雲とエアロゾルの相互作用をより詳細に取り入れる為に、大気中の各種エアロゾルに加えて雲粒内に溶け込んだエアロゾル(in-cloud aerosol)をも予報する事を行った。これによって、従来の GCM では議論されてこなかった以下の微物理過程が詳細に取り入れられるようになった（図 7 に微物理相互作用の模式図示す）。

1) 雲粒核形成によるエアロゾルの除去
2) 雲粒子とエアロゾルの衝突による除去
3) 降水に伴う雲粒子内のエアロゾル重力落下
4) 雲粒の蒸発によるエアロゾルの再放出
5) 雲粒子内の非水溶性エアロゾルによる過冷却水滴の Immersion Freezing（浸漬凍結）

雲・降水によるエアロゾルの除去はエアロゾルの長距離輸送に対して重要な微物理過程であり、エアロゾル輸送モデル間相互比較プロジェクト AEROCOM において最も不確定性の高い過程の一つである事が分かってきた(Textor et al., 2007)。今回の1）、2）、3）、4）の精緻化によって雲・降水によるエアロゾルの除去過程の改善が予期される。また、従来の雲微物理モデルでは過冷却水滴の凍結(Immersion Freezing)は温度の関数として簡易的に表現される事が多かったが(Bigg, 1953)、本研究では5）によって非水溶性エアロゾルに依存する理論的な定式化(Khvorostyanov and Curry, 2004; 2009)を採用した。これによって、対流性の雲システムにおいてあられの生成や凍結に伴う潜熱の鉛直分布に明瞭な地域性が現れる事が予期される。特にあられの生成は効率的に雲水を降水として除去していく為に、雲システムの衰退と Anvil cloud の広がりに大きな影響を及ぼす事が知られている(Satoh and Matsuda, 2009)。現在の NICAM が抱える上層の雲の広がりに関してバイアスを抱えており、本研究によって開発された雲微物理モデルによって物理的な側面から改善の情報を示唆できる事が期待される。上記微物理過程の詳細化の加え、エアロゾルによる雲凝結核形成(Abdul-Razzak and Ghan, 2000; 2002; 2004)、エアロゾルによる不均一氷晶核形成(Condensational Freezing Ice Nucleation; Khvorostyanov and Curry, 2000; 2004a; 2004b; 2009)、エアロゾルによる均一氷晶核形成(Homogeneous Freezing Ice Nucleation; Khvorostyanov and Curry 1998; 2004a; 2004b; 2009)の組み込みを行った。

新しく導入した in-cloud aerosol の効果を確認する為に Seiki and Nakajima (2012)と同様の条件で数値実験を行った。数値実験対象は熱帯海洋上のスコールラインを想定した理想化実験であり、条件付き不安定な初期条件の下層に冷却擾乱を与える事で計算開始後1時間程度で雲頂高度が圏界面に達する

深い対流雲が成長する。ここでは海塩エアロゾルのみを考慮し、水面からは Monahan et al. (1986)に基づいて風速の関数としてエアロゾルを射出させている。図 8 に cloud water, cloud ice, in-cloud aerosol, aerosol の混合比の鉛直分布を示す。Cloud water, cloud ice が存在する領域の多くの in-cloud aerosol が存在しており、逆に aerosol のほとんどが除去されている事が分かる。In-cloud aerosol の質量混合比は境界層内部の aerosol の混合比と概ね一致しており、in-cloud aerosol が雲の成長に伴う上昇気流によって、雲底から対流圏上部まで効率的に輸送されている様子が見られる。また、雲頂付近や対流圏中部の雲の側面境界付近では周囲に比べて多くの Aerosol が存在している事が分かる。これは、雲粒子の蒸発に伴ってエアロゾルが雲粒子内から大気へと再放出している様子が分かる。このように、in-cloud aerosol を扱う事で雲の成長に伴うエアロゾルの輸送が微物理過程を通して自然に表現されている事が分かった。

現段階では in-cloud aerosol の取り扱いと、雲微物理モデルへの過冷却水滴の浸漬凍結、雲凝結核形成、雲氷晶核形成の導入が完了している。今後は本研究で開発したモデルの検証を行うとともに、エアロゾルの間接効果の評価を行う。

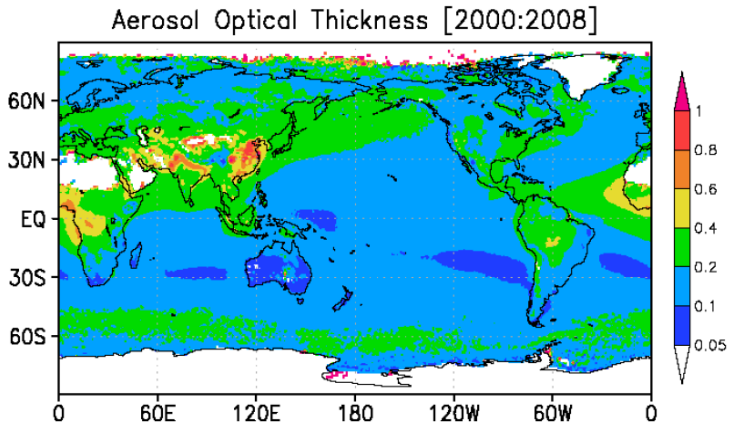



図 6: 2000 年から 2008 年まで平均したエアロゾルの光学的厚さの水平分布。MODIS-LEVEL3 Product より作成。

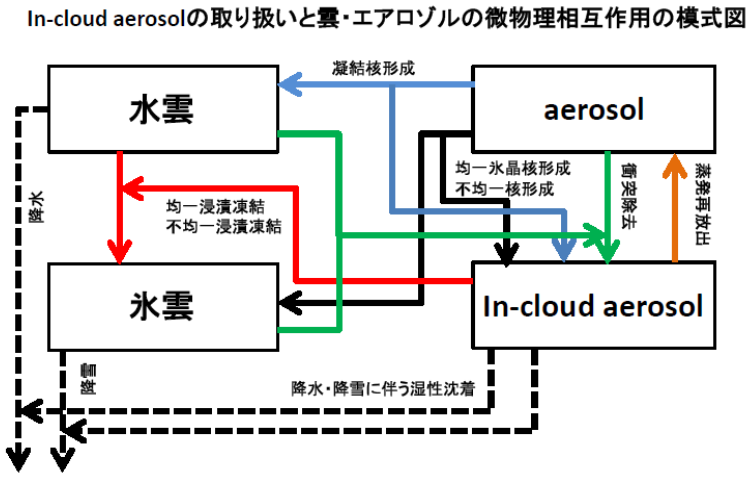



図 7: In-cloud aerosol の予報とそれに伴う雲・エアロゾルの微物理相互作用の模式図。

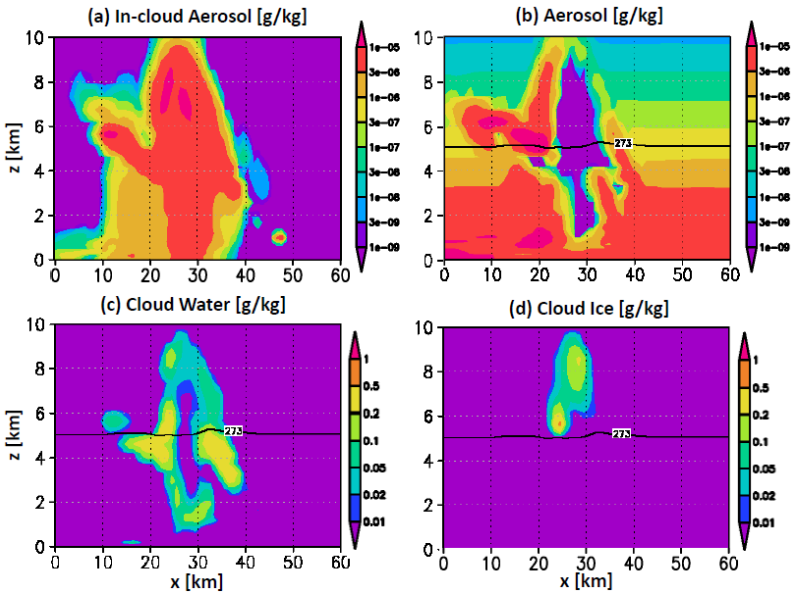



図 8: 計算開始3時間後の(a)in-cloud aerosol, (b)aerosol, (c)cloud Water, (d)cloud Ice の質量混合比[g kg-1]の x-z 断面図（色は混合比、黒線は 273[K]の等温線を示す）。

参考文献


- Abdul-Razzak, G., S. Ghan, 2000: A parameterization of aerosol activation 2. Multiple aerosol types, *J., Geophys., Res.*, 105, 6837-6844.
- Abdul-Razzak, G., S. Ghan, 2002: A parameterization of aerosol activation 2. Sectional representation, *J., Geophys., Res.*, 107, D34026, doi:10.1029/2001JD000483.
- Abdul-Razzak, G., S. Ghan, 2004: Parameterization of the influence of organic surfactants on aerosol activation, *J. Geophys., Res.*, 109, D03205, doi:10.1029/2003JD004043.
- Atkinson, G. D. and C. R. Holiday, 1977: Tropical Cyclone Minimum Sea Level Pressure / Maximum Sustained Wind Relationship for the Western North Pacific. Mon. Weath. Rev. ,105. 421-427.
- Bengtsson, L., M. Botzet, and M. Esch, 1996 : Will greenhouse-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes? Tellus, 48A, 57-73.
- Bigg, E. K., 1953: The formation of atmospheric ice crystals by the freezing of droplets, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc*, 79, 510–519.
- Cess, R. D., and G. L. Potter, 1988: A methodology for understanding and intercomparing atmospheric climate feedback processes in general circulation models. *J. Geophys. Res.* **93**, 8305-8314.
- Chepfer, H., S. Bony, D. Winker, M. Chiriaco, J.-L. Dufresne, and G. Sèze , 2008: Use of CALIPSO lidar observations to evaluate the cloudiness simulated by a climate model, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L15704, doi:10.1029/2008GL034207.
- Chepfer, H., S. Bony, D. Winker, G. Cesana, J. L. Dufresne, P. Minnis, C. J. Stubenrauch, and S. Zeng, 2010: The GCM-Oriented CALIPSO Cloud Product (CALIPSO-GOCCP), *J. Geophys. Res.*, 115, D00H16, doi:10.1029/2009JD012251.
- Collins, W. D., and M. Satoh, 2009: Simulating global clouds: past, present, and future. Chap. 20 of “Heintzenberg, J., and R. J. Charlson, eds. Clouds in the perturbed climate system: their relationship to

energy balance, atmospheric dynamics, and precipitation", Struengmann Forum Report, The MIT Press, 2, 469-486.

- Iga, S., H. Tomita, Y. Tsushima, M. Satoh, 2007: Climatology of a nonhydrostatic global model with explicit cloud processes, *Geophys. Res. Lett*., 34, L22814, doi:10.1029/2007GL031048.
- K-1 model developers, 2004: K-1 coupled model (MIROC) description. *K-1 tech. rep.* **1**, (eds. H. Hasumi and S. Emori) 34pp Center for Climate System Research. University of Tokyo.
- Khvorostyanov, V. I., and K. Sassen, 1998: Towards the theory of homogeneous nucleation and its parameterization for cloud models, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 3155-3158.
- Khvorostyanov, V. I., and J. A. Curry, 2000: A new theory of heterogeneous nucleation for application in cloud and climate models, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 4081-4084.
- Khvorostyanov, V. I., and J. A. Curry, 2004a: The theory of ice nucleation by heterogeneous freezing of deliquescent mixed CCN. Part I: critical radius, free energy, and nucleation rate, *J. Atmos. Sci.*, 61, 2676-2691.
- Khvorostyanov, V. I., and J. A. Curry, 2004b: Thermodynamic theory of freezing and melting of water and aqueous solutions, *J. Phys. Chem. A*, 108, 11073-11085.
- Khvorostyanov, V. I., and J. A. Curry, 2009: Critical humidities of homogeneous and heterogeneous ice nucleation: Inferences from extended classical nucleation theory, *J. Geophys. Res.*, 116, D04207, doi:10.1029/2008JD011197.
- Knutson, T. R., and R. E. Tuleya, 1999: Increased hurricane intensities with CO2-induced warming as simulated using the GFDL hurricane prediction systema, *Climate Dynamics,* 15, 503-519, DOI: 10.1007/s003820050296.
- Manganello, J. V., K. I. Hodges, J. L. Kinter III, B. A. Cash, L. Marx, T. Jung, D. Achuthavarier, J. M. Adams, E. L. Altshuler, B. Huang, E. K. Jin, C. Stan, P. Towers and N. Wedi, 2012: Tropical Cyclone Climatology in a 10-km Global Atmospheric GCM: Toward Weather-Resolving Climate Modeling. J. Climate doi: http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00346.1.
- Mizuta, R. Mizuta, R., Y. Adachi, S. Yukimoto, and K. Kusunoki, 2008: Estimation of the Future Distribution of Sea Surface Temperature and Sea Ice Using the CMIP3 Multi-model Ensemble Mean, *Technical Report of the MRI*, NO. **56.**
- Monahan, E.C., 1986: The ocean as a source of atmospheric particles, the role of air-sea exchange in geochemical cycling, 129–163.
- Rossow, W. B., and R. A. Schiffer, 1999: Advances in understanding clouds from ISCCP. Bull. Amer. Meteorol. Soc., 80, 2261-2287.
- Satoh, M., and Y. Matsuda, 2009: Statistics on High-Cloud Areas and Their Sensitivities to Cloud Microphysics Using Single-Cloud Experiments, *J. Atmos. Sci.*, 66, 2659-2677.
- Satoh, M., Oouchi, K., Nasuno, T., Taniguchi, H., Yamada, Y., Tomita,H., Kodama, C., Kinter, J., Achuthavarier, D. Manganello, J, Cash, B., Jung, T., Palmer, T., and Wedi, N., 2011: The Intra-Seasonal Oscillation and its control of tropical cyclones simulated by high-resolution global atmospheric models. Clim. Dyn., accepted. DOI10.1007/s00382-011-1235-6.
- Seiki, T. and T. Nakajima, 2012: Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud

simulation. Part I: Cloud microphysical aspects, *J.Atmos. Sci.* submitted.

- Sekiguchi, M., Nakajima, T., 2008: A k-distribution-based radiation code and its computational optimization for an atmospheric general circulation model. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 109, Issues 17-18, 2779-2793, doi:10.1016/j.jqsrt.2008.07.013.
- Suzuki, K., T. Nakajima, M. Satoh, H. Tomita, T. Takemura, T. Y. Nakajima, and G. L. Stephens, 2008: Global cloud-system-resolving model simulation of aerosol effect on warm clouds, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
- Textor, C., M. Schulz, S. Guibert, S. Kinne, Y. Balkanski, S. Bauer, T. Berntsen, T. Berglen, O. Boucher, M. Chin, F. Dentener, T. Diehl, R. Easter, H. Feichter, D. Fillmore, S. Ghan, P. Ginoux, S. Gong, A. Grini, J. Hendricks, L. Horowitz, P. Huang, I. Isaksen, T. Iversen, S. Kloster, D. Koch, A. Kirkevag, J. E. Krstjansson, M. Krol, A. Lauer, J. F. Lamarque, X. Liu, V. Montanaro, G. Myhre, J. Penner, G. Pitari, S. Reddy, O. Seland, P. Stier, T. Takemura, and X. Tie, 2006: Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1777-1813.
- Vecchi, G. A., and B. J. Soden, 2007: Increased tropical Atlantic wind shear in model projections of global warming, Geophys. Res. Lett., 34, L08702, doi:10.1029/2006GL028905,2007.
- Wang, C., 2002: Atmospheric circulation cells associated with the El Nino-Southern Oscillation. *J. Clim.*, **15**, 399-419.
- Webb, M.J., C. A. Senior, S. Bony, and J.-J. Morcrette, 2001: Combining ERBE and ISCCP data to assess clouds in the Hadley Centre, ECMWF and LMD atmospheric climate models. *Clim. Dyn.* **17**, 905-922.
- Winker, D. M., J. Pelon, and M. P. McCormick, 2003: The CALIPSO mission: Spaceborne lidar for observation of aerosols and clouds, *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2893, 1—11.
- Yamada, Y., Oouchi, K., Satoh, M., Tomita, H. and Yanase W., 2010: Projection of changes in tropical cyclone activity and cloud height due to greenhouse warming: Global cloud-system-resolving approach, Geophys. Res. Lett., 37, L07709.

成果発表

＜論文(受理・印刷済み)＞

1. Iga, S., Tomita, H., Tsushima, Y., Satoh, M., 2011: Sensitivity of upper tropospheric ice clouds and their impacts on the Hadley circulation using a global cloud-system resolving model. J. Clim., 24, 2666-2679. doi: 10.1175/2010JCLI3472.1
2. Nasuno, T. and M. Satoh, 2011: Statistical relation between maximum vertical velocity and surface precipitation of convective clouds in a global nonhydrostatic aquaplanet experiment. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 553-561.
3. Nasuno, T and M. Satoh, 2011: Properties of precipitation and in-cloud vertical motion in a global nonhydrostatic aquaplanet experiment. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 413-439.
4. Matsuno, T., Satoh, M., Tomita, H., Nasuno, T., Iga, S., Miura, H., Noda, A. T., Oouchi, K., Sato, T., Fudeyasu, H., Yanase, W., 2011: Cloud-cluster-resolving global atmosphere modeling - A challenge

for the new age of tropical meteorology. In "The Global Monsoon System, Research and Forecast", 2nd Edition, edited by Chih-Pei Chang, Yihui Ding, Ngar-Cheung Lau, Richard H Johnson, Bin Wang, and Tetsuzo Yasunari, World Scientific Pub Co Inc, pp. 455-473.

5. Satoh, M., Oouchi, K., Nasuno, T., Taniguchi, H., Yamada, Y., Tomita,H., Kodama, C., Kinter, J., Achuthavarier, D. Manganello, J, Cash, B., Jung, T., Palmer, T., and Wedi, N., 2011: The Intra-Seasonal Oscillation and its control of tropical cyclones simulated by high-resolution global atmospheric models. Clim. Dyn., accepted. DOI10.1007/s00382-011-1235-6.
6. Dirmeyer, P. A., Cash, B. A.,Kinter III, J. L., Jung, T., Marx, L., Satoh, M., Stan, C., Tomita, H., Towers, P., Wedi, N., Achuthavarier, D., Adams, J. M., Altshuler, E. L., Huang, B., Jin, E. K., and Manganello, J., 2011: Simulating the diurnal cycle of rainfall in global climate models: Resolution versus parameterization. Clim. Dyn., accepted, DOI10.1007/s00382-011-1127-9.
7. Satoh, M., Iga, S., Tomita, H., Tsushima, Y., Noda, A.T., 2011: Response of upper clouds due to global warming tested by a global atmospheric model with explicit cloud processes. J. Climate, accepted.
8. Yamada, Y., Oouchi, K., Satoh, M., Noda, A. T., Tomita, H., 2011: Sensitivity of tropical cyclones to large- scale environment in a global non-hydrostatic model with explicit cloud microphysics. Nova Science Publishers, Inc., accepted.
9. Oouchi, K., Hiroshi Taniguchi, Tomoe Nasuno, Masaki Satoh, Hirofumi Tomita, Yohei Yamada, Mikiko Ikeda, Ryuichi Shirooka, Hiroyuki Yamada, Kunio Yoneyama, 2011: A prototype quasi real-time intra-seasonal forecasting of tropical convection over the warm pool region: a new challenge of global cloud-system-resolving model for a field campaign. Nova Science Publishers, Inc., accepted.
10. Yanase, W., Satoh, M., Iga, S., Chan, J. C. L., Fudeyasu, H., Wang, Y., 2011: Multi-scale dynamics of tropical cyclone formations in an equilibrium simulation using a global cloud-system resolving model. Nova Science Publishers, Inc., accepted.
11. Yanase, W., Satoh, M., Taniguchi, H., Fujinami, H., 2011: Seasonal and intra-seasonal modulation of tropical cyclogenesis environment over the Bay of Bengal during the extended summer monsoon. J. Clim., accepted.
12. 吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012: 気候感度 Part 1：気候フィードバックの概念と理解の現状, 天気, 59, 受理.
13. 吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012: 気候感度 Part 2：不確実性の低減への努力, 天気, 59, 受理.
14. 吉森正和, 横畠徳太, 小倉知夫, 大石龍太, 河宮未知生, 塩竈秀夫, 對馬洋子, 小玉知央, 野田暁, 千喜良稔, 竹村俊彦, 佐藤正樹, 阿部彩子, 渡部雅浩, 木本昌秀, 2012: 気候感度 Part 3：古環境からの検証, 天気, 59, 受理.
15. 佐藤正樹, 2011: 全球雲解像大気モデルの熱帯気象予測への実利用化に関する研究, 日本計算工学会誌 Vol.16 No.3, 2594-2597.
16. Tomita, H., M. Satoh, H. Miura and Y. Niwa, 2011: Current status of nonhydrostatic modeling at NICAM, ECMWF Workshop on Non-hydrostatic Modelling, ECMWF, pp171-182.

＜論文（投稿中）＞

1. 佐藤正樹, 2011: 国立環境研究所地球環境研究センター地球温暖化事典「大気大循環」の項目、投稿中.
2. 大内和良、佐藤正樹、益子渉, 2011: モデル研究現状と将来の展望. 気象研究ノート, 投稿中.
3. Yoshizaki, M., Yasunaga, K., Iga, S., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A.T., Tomita, H. and Fujita, M., 2011: Why do super clusters and Madden Julian Oscillation coexist over the equatorial region? SOLA, submitted.
4. Yoshizaki, M., Iga, S., Satoh, M., 2011: Eastward-propagating property of large-scale precipitation systems simulated in the coarse-resolution NICAM and an explanation of its formation. SOLA, submitted.
5. Noda, A. T., K. Oouchi, M. Satoh, and H. Tomita, 2011: Quantitative assessment of diurnal variations of tropical convections simulated by a global nonhydrostatic model without cumulus parameterization. submitted.
6. Kodama, C., Noda, A. T., Satoh, M., 2011: An Assessment of the Cloud Signals Simulated by NICAM using ISCCP, CALIPSO, and CloudSat Satellite Simulators. J. Geophys. Res. submitted.
7. Seiki, T. and T. Nakajima, 2012: Aerosol effects of the condensation process on a convective cloud simulation. Part I: Cloud microphysical aspects, *J.Atmos. Sci.* submitted.

＜学会発表＞

1. Satoh, M., 2011: Overview of the Nonhydrostaic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). IS-ENES 2nd General Assembly, Lecce, Italy, 14-16 December 2011 (invited).
2. Satoh, M., 2011: Overview of the Nonhydrostaic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM). Int'l Symposium on the 20th Anniversary of Operational Numerical Weather Prediction, Seoul, Korea, 6 December 2011 (invited).
3. Satoh, M., 2011: Global Cloud Resolving Simulations. The 1st International Symposium on Large-scale Computational Science and Engineering -local disaster, global earth and space problems, Nihon-Gakujutsu-Kaigi, Roppongi, Japan, 17 October 2011 (invited).
4. Satoh, M., Nasuno, T., Yamada, H., Hashino, T., Miyakawa, T., Takayabu, Y., 2011: Global Cloud-system Resolving Modeling. YOTC International Science Symposium & 8th AMY International Workshop, 16-19 May, 2011, Beijing, China (invited).
5. Satoh, M., 2011: Modeling and Prediction (NICAM). YOTC International Science Symposium & 8th AMY International Workshop, 16-19 May, 2011, Beijing, China (invited).
6. Satoh, M. and Oouchi, K., 2011: Global Cloud Resolving Modeling. THE MICHIO YANAI SYMPOSIUM, 91st AMS Annual Meeting, Seattle, WA, 23-27 January 2011. (invited)
7. Satoh, M., Iga. S., Tomita, H., Tsushima, Y., 2011: Response of upper clouds in global warming experiments obtained using a global non-hydrostatic model with explicit cloud processes. CFMIP/GCSS/EUCLIPSE Meeting on Cloud Processes and Climate Feedbacks. The Met Office, Exeter, United Kingdom, 6-10 June, 2011.

8. Satoh, M., 2011: Overview of simulations and development of NICAM. The 13th International Specialist Meeting on the Next Generation Models of Climate Change and Sustainability for advanced high performance computing facilities. Hawaii, US, 28-30 March 2011.
9. Satoh, M., Nasuno, T., Yamada, H., Hashino, T., 2011: Global 3.5km-mesh NICAM experiment: cloud evaluation using J-simulator and TCgenesis analysis of Fengshen (2008) comparing PALAU field experiment. WCRP Open Science Conference. Climate Research in Service to Society, Denver, USA, 24-28 October 2011.
10. 大内和良, 2011: 気候科学からの挑戦: 京コンピュータでシミュレートされる未来の台風, 第17回ビジュアリゼーションカンファランス, お台場、東京.2011年11月4日,(invited).
11. 大内和良, 佐藤正樹, 富田浩文, 那須野智江, 谷口博, 山田洋平, 小玉知央, Jim Kinter, Athena チーム, 2011: 高解像度全球大気モデルにおける熱帯低気圧と季節内変動－Athenaプロジェクト・北半球夏季実験－日本気象学会春季大会, 代々木, 2011年5月21日.
12. 大内和良,野田暁,佐藤正樹,富田浩文,那須野智江,三浦裕亮, 宮川知巳, 2011: マッデン・ジュリアン振動の起源再考 その1: 東進対流群 -熱帯暖水域に卓越する巨大なスコールライン, 日本気象学会春季大会, 名古屋, 2011年11月16日.
13. Oouchi, K., M. Satoh,T. Nasuno, H. Taniguchi, Y. Yamada, H. Tomita, C. Kodama, J. Kinter,D. Achuthavarier, J. Manganello, 2011: Intra-seasonal oscillation and its control over tropical cyclones in the high resolution global atmospheric models. Denver, CO. U.S., 24-28 October 2011.
14. 那須野 智江, 2011: 全球非静力学モデル NICAM による計算データ. 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 東京, 2011/5/22-27.
15. Taniguchi, H., M. Satoh, M., K. Oouchi, T. Nasuno, Y. Yamada, H. Tomita, C. Kodama, B. Wang, J. Kinter, D. Achuthavarier, J. Manganello, B. Cash, T. Jung, T. Palmer, and N. Wedi, 2011: Global statistics of MJO and its relationship to tropical cyclone in Athena project. 2011 AGU Fall meeting, San Francisco, U.S.A., 2011/12/5-9.
16. 山田洋平・大内和良・佐藤 正樹・宮本佳明・那須野智江・富田浩文, 2011: NICAMを用いた温暖化実験における熱帯低気圧の warm core の変化. 日本気象学会 2011 年秋季大会, 名古屋, 2011/11/16-18.
17. Noda, A.T. , Y. Yamada, C. Kodama, and M. Satoh, 2011: Changes of cloud statistics due to greenhouse warming in global nonhydrostatic simulations with explicit cloud processes. International meeting on World Climate Research Programme. Denver, CO, U.S., 24-28 Octorber 2011.
18. 野田暁, 大内和良, 佐藤正樹, 富田浩文, 2011: 全球非静力学シミュレーションによる熱帯域降水の日変化特性とその水平解像度依存性. 第 13 回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集, 2011 年 10 月 13 日-14 日, 新潟県長岡市, 非静力数値モデル研究連絡会, 1-2.
19. Kodama, C. , A. T. Noda, and M. Satoh, 2011: An Assessment of the Cloud Properties Simulated by NICAM Using ISCCP, CALIPSO and CloudSat Satellite Simulators, WCRP Open Science Conference, Sheraton Denver Downtown Hotel, Denver, U.S.A., 24 Oct 2011.
20. Kodama, C. , A. T. Noda, and M. Satoh, 2011: Assessment of the Global Clouds Simulated by the Global Cloud-System Resolving Model Using ISCCP, CALIPSO and CloudSat Satellite Simulators, AOGS 8th Annual Meeting 2011, Taipei International Convention Center, Taipei, 9 Aug 2011.

21. Kodama, C. , A. T. Noda, and M. Satoh, 2011: An assesment of cloud properties simulated by NICAM using ISCCP, CALIPSO and CloudSat satellite simulators, CFMIP/GCSS/EUCLIPSE Meeting on Cloud Processes and Climate Feedbacks, The Met Office, Exeter, United Kingdom, 8 Jun 2011.
22. Kodama, C., 2011: Climatology of the NICAM Runs: Precipitation, Radiation, Cloud, Land, etc., Athena mini-workshop, Kobe, Japan, 14 Mar 2011.
23. 宮本佳明, 佐藤正樹, 富田浩文, 大内和良, 山田洋平, 小玉知央, J. Kinter, 2011: 全球非静力学モデルによって再現された熱帯低気圧の傾度風平衡度合, 日本気象学会 2011 年秋季大会, B161, 名古屋, 2011 年 11 月 16 日.
24. 宮本佳明, 佐藤正樹, 富田浩文, 大内和良, 山田洋平, 小玉知央, J. Kinter, 2011: 全球非静力学モデルによって計算された熱帯低気圧の傾度風平衡度合, 第 13 回非静力学モデルに関するワークショップ, 長岡, 2011 年 10 月 13 日.
25. Tomita, H., 2011: Recent outcomes from NICAM, 6th EU-Japan Workshop on Climate Change Research, Brussels, 10-11 Oct. 2011
26. Tomita, H., 2011: The current NICAM dynamical core and future plan for its improvement, Computing in Atmospheric Sciences 2011 (CAS2K11), Annecy, Sep. 11-14, 2011 (invited).
27. 三浦裕亮, 2011: 気象・気候分野における数値モデリングの現状と将来展望, RIMS 研究集会「科学技術計算における理論と応用の新展開」, 2011-10-27, 京都
28. 三浦裕亮, 2011: 数値気候モデル研究の現状と将来展望,「地球環境流体研究と数理科学」ワークショップ, 2011-06-09, 札幌
29. 清木 達也・佐藤 正樹・中島 映至, 2011: 熱帯スコールラインに与えるエアロゾルの影響. 第 13 回非静力学モデルに関するワークショップ, 長岡, 2011/10/13-14.
30. 清木 達也・佐藤 正樹・中島 映至, 2011: 熱帯スコールラインに対するエアロゾル凝結成長効果. 日本気象学会 2011 年秋季大会, 名古屋, 2011/11/16-18.

＜アウトリーチ活動（講演・新聞・雑誌・テレビ・ラジオ）＞

1. 2011 年気象集誌論文賞: Niwa,Y., Tomita,H., Satoh,M., Imasu,R. (2011) A Three-Dimensional Icosahedral Grid Advection Scheme Preserving monotonicity and Consistency with Continuity for Atmospheric Tracer Transport. J. Meteor. Soc. Japan, 89, 255-269.
2. 大内和良.「温暖化によって強力になる台風」, 朝日小学生新聞, 2011 年 8 月 16 日.
3. 大内和良.将来の台風 「お天気バラエティー 気象転結」, NHK 総合, コメント, 撮影. 2011 年 9 月.

# e.6 GCM と結合される全球植生動態モデルの高度化と検証

実施機関 :独立行政法人海洋研究開発機構 地球環境変動領域
代表者 :原 登志彦
副代表者 :伊藤 昭彦
担当者 :羽島 知洋、伊勢 武史

**要旨**

陸域生態系は気候と強い相互作用を持つため、その正確なシミュレーションによる将来予測は気候変動研究の重要な研究テーマである。本課題では、(1)地球システム統合モデルを用いた気候と陸域生態系のフィードバックの定量評価、(2)陸域生態系モデル VISIT(Sim-CYCLE)を用いた温室効果ガスのシミュレーション、および(3)土壌炭素循環モデルと土壌物理モデルの結合による土壌内の物理環境および炭素の垂直構造の再現と、環境変動下での土壌炭素ダイナミクスの予測研究を行った。これらの研究により、温暖化時の陸域生態系の挙動をこれまで以上に正確に再現することで、気候変動研究の進歩に貢献した。

(1) 地球システム統合モデルを用いた陸域生態系と気候の間のフィードバック解析

1a. 地球システム統合モデルを用いた陸域炭素循環から気候へのフィードバック解析

ここでは地球システム統合モデル MIROC-ESM を用いた炭素循環の感度実験とそこから得られた炭素循環フィードバックについて示す。

人為 $CO_2$ 排出は大気 $CO_2$ 濃度を上昇させ、その温室効果により全球を暖めて気候変動を引き起こす。海や陸の生態系では、まず大気の $CO_2$ 分圧が上がることにより、$CO_2$ 施肥効果等を通して正味の $CO_2$ 吸収速度が速くなる。一方、気候の変化は、生態系からの呼吸速度を上昇させることにより正味の $CO_2$ 吸収を下げると言われている。このような $CO_2$ 濃度上昇に関わる 2 つの炭素循環フィードバックが、海陸炭素循環の正味の $CO_2$ 吸収速度に影響しているのである。そこで、地球システム統合モデルを用いて大気 $CO_2$ の濃度を毎年 1%漸増させる数値実験を行い、海陸炭素循環フィードバックの挙動を調べた。

実験は 3 種類実施した。1 つは、Fully coupled (FULL)実験である。この実験では、毎年 1%で増加する大気 $CO_2$ 濃度をフォーシングとして与える実験である。2 つ目の実験は、Biogeochemically coupled(BGC)実験である。この実験では FULL 実験と同様に $CO_2$ 濃度を増加させるが、大気放射プロセスはこの濃度を感知せず、炭素循環のみがその $CO_2$ 濃度変化の影響を受ける実験である。したがって $CO_2$ 濃度上昇に伴う気候変動は生じない。この実験により、$CO_2$ 濃度と炭素循環の間に存在するフィードバック(Concentration-carbon feedback)がわかる。3 つ目は、Radiatively coupled (RAD)実験である。この実験では BGC 実験とは異なり、大気放射プロセスが $CO_2$ 濃度の上昇を感知する。一方、海陸炭素循環プロセスは $CO_2$ 濃度上昇に対して反応せず、気候変動に対してのみ応答する実験となっている。この実験により、気候変化と炭素循環の間に存在するフィードバック(Climate-carbon feedback)がわかる。このような 3 つの実験を、前近代の状態を初期値として 140 年間数値積分し、解析を行った。ただし、FULL 実験は平成 22 年度に実施済みであり、この実験結果を利用した。また FULL 実験の解析結果は昨年度の成果報告書に一部記載がある。

BGC 実験では $CO_2$ 濃度の上昇に従い、海陸生態系の炭素蓄積量も増加する(図1左)。陸域生態系における炭素蓄積量の増加は 140 年でおよそ 660PgC、海洋の炭素蓄積量の増加は約 650PgC と、同程度である。また両者合わせると、人為排出された $CO_2$ に含まれる炭素のおよそ 73%が吸収されたことになる。RAD 実験では気候変化のみが海陸生態系に伝わっており、海陸ともに炭素蓄積量は減少する(図1右)。陸域生態系では 140 年間で 490PgC 減少しており、海洋の約 60PgC に比べて 8 倍以上も炭素が失

われている。これは、特に北極圏付近の気温上昇が激しい地域において、土壌温度の上昇が有機物の分解を促進し、全球での炭素収支に大きな影響を及ぼしていたことによる。同時に、温帯や熱帯において高温ストレスや生産効率の低下等により一部が枯死し、植生炭素もまた減少していた。FULL 実験も合わせ、同様の実験・解析を地球システムモデル HadCM3LC を用いて実施した Gregory et al. (2009) の結果と比較したところ、MIROC-ESM と HadCM3LC における Concentration-carbon および Climate-carbon feedback の強さはおおよそ同程度であった。過去に行われたモデル比較プロジェクト C4MIP (Friedlingstein et al., 2006)では、HadCM3LC で予測される $CO_2$ 濃度および気温上昇は高めであったことを踏まえると、MIROC-ESM もまた気候変動予測において”悲観的な”モデルである可能性が示唆された。

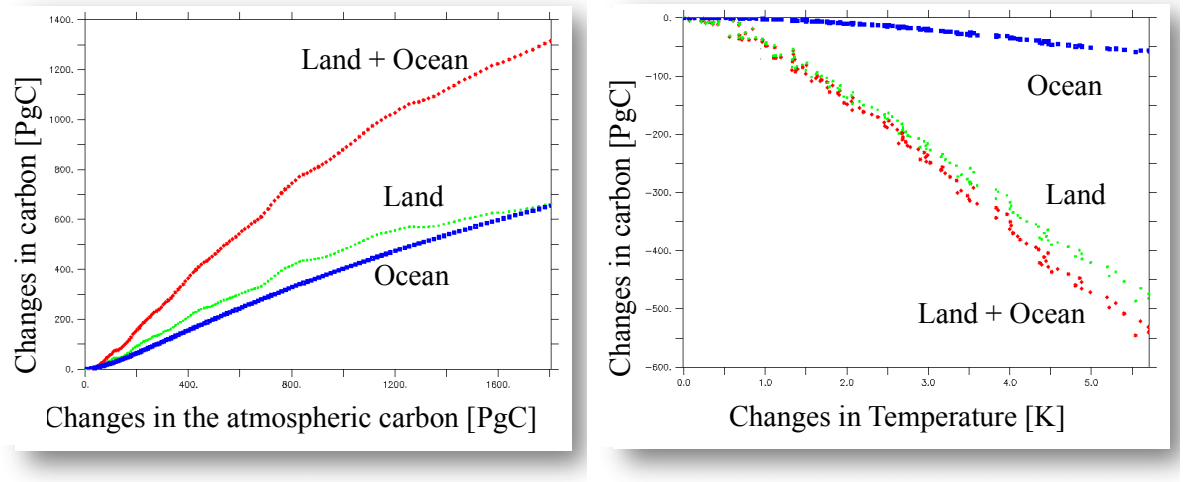



図1 地球システム統合モデルを用いた 1%$CO_2$ 漸増実験（140 年間）の結果。$CO_2$ 濃度は増加するものの、海陸の物質（炭素）循環過程のみがその増加を感知する BGC 実験（左側）と、大気放射過程だけがその増加を感知する RAD 実験（右側）。線はそれぞれ、陸域炭素蓄積量の変化（緑）、海洋炭素蓄積量の変化（青）、海陸炭素蓄積量の変化（赤）を表す。

1b. 地球システム統合モデルの実験結果を使用した陸域炭素循環への人為影響の解析

ここでは MIROC-ESM を用いたシナリオ実験の結果を用いて、人為影響が陸域炭素循環、特に植生の分布にどのような影響を及ぼすのかについて分析した結果を示す。

気候は陸域の植生分布を強く規定すると同時に、陸域生態系の変化は気候へとフィードバックする。このような気候-陸域生態系の相互作用を通して現在の気候と生態系の分布が決まっていると考えられる。ケッペンの気候区分に代表されるように、地表面状態や生態系分布に着目した気候区分はこのような関係を表しており、準定常的な状態であれば、気候区分と生態系分布の対応関係は良いはずである。しかし、今後予想される急激な気候変動は、この気候と植生分布の対応関係を一時的に崩す可能性がある。そこで、地球システム統合モデルの気候変動予測実験の結果を解析することにより、気候の変化と植生の分布変化の両者の対応が今後どのように変化してゆくのかを調べた。

気候および植生分布の対応を見るため、ここでは上述のケッペンの気候区分を用い、地球システム統合モデルで予測された気候場（地表付近気温と降水量）の 10 年平均値にこの気候区分を適用し、全球気候区分図を作成した（一部閾値は変更）。また植生分布は、地球システム統合モデルで予測される各

グリッドの植生の割合（純一次生産力の比として算出）としてその全球分布図を求めた。用いた実験結果は 1850 年から現代までの歴史実験、および 2300 年までの RCP4.5 シナリオ実験のものである。

まず、MIROC-ESM で再現される 20 世紀の気候から作成した気候区分図と、NCEP/NCAR・CMAP 再解析データから作成した気候区分図を比較したところ（図2）、温帯気候の細目が一致していない点や、砂漠・ステップ気候の分布面積が過小評価されている点を除くと、MIROC-ESM は気候区分の分布を良く再現していた。21 世紀以降の予測実験については、ユーラシアおよび北米に絞って解析の一部を紹介する。ユーラシア大陸では 21 世紀末になると、特に極域付近で見られる強い温暖化により、ツンドラ-亜寒帯気候の境界線が 20 世紀に比べて高緯度側に位置するようになる（図3）。2100 年以降、この境界線の位置はほぼ一定である。一方、モデル内で予測される植生分布はこの気候の変化に遅れて応答しており、22 世紀末では両者の北縁が一致している。また 2200 年以降、北方林の分布は大きく変化していないものの、その生産力の割合はゆるやかに変動していた。また北米では、アメリカ大陸中央において徐々に温暖・湿潤化する傾向が見られるものの、植生の分布は気候の動きにあまり追随しない（図4）。これは、この地域において、人間の土地利用が植生分布を大きく規定しているのが原因であると考えられる。地球システム統合モデルでは温室効果ガスやエアロゾル排出以外にも、土地利用変化がシナリオとしてモデルに与えられており、このような人間活動が将来の植生分布にも大きく影響していることが明らかになった。

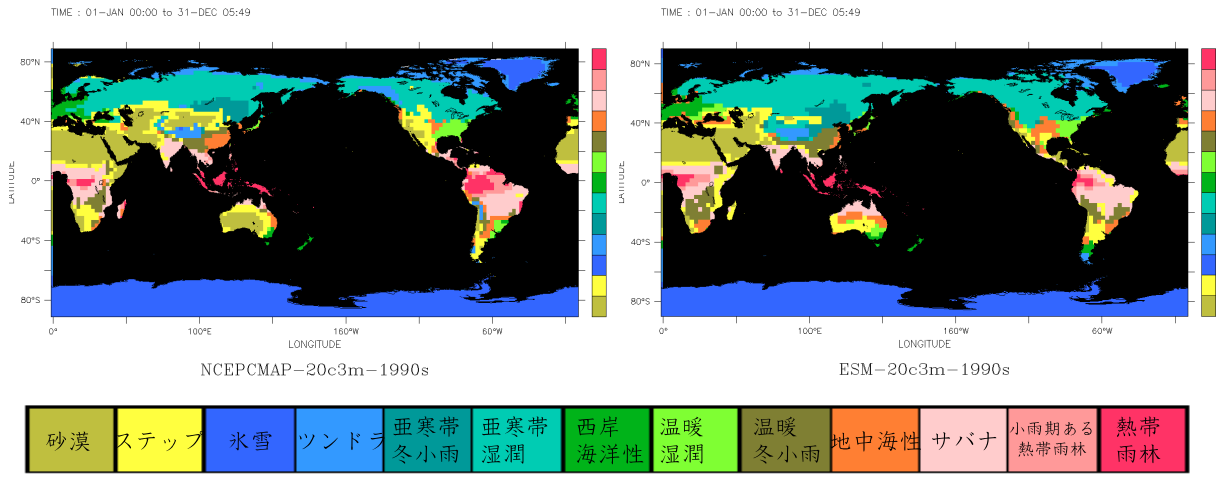



図2　NCEP/NCAR・CMAP 再解析データを用いたケッペン気候区分図（左）と地球システム統合モデルで再現された 20 世紀気候場による同区分図（右）。

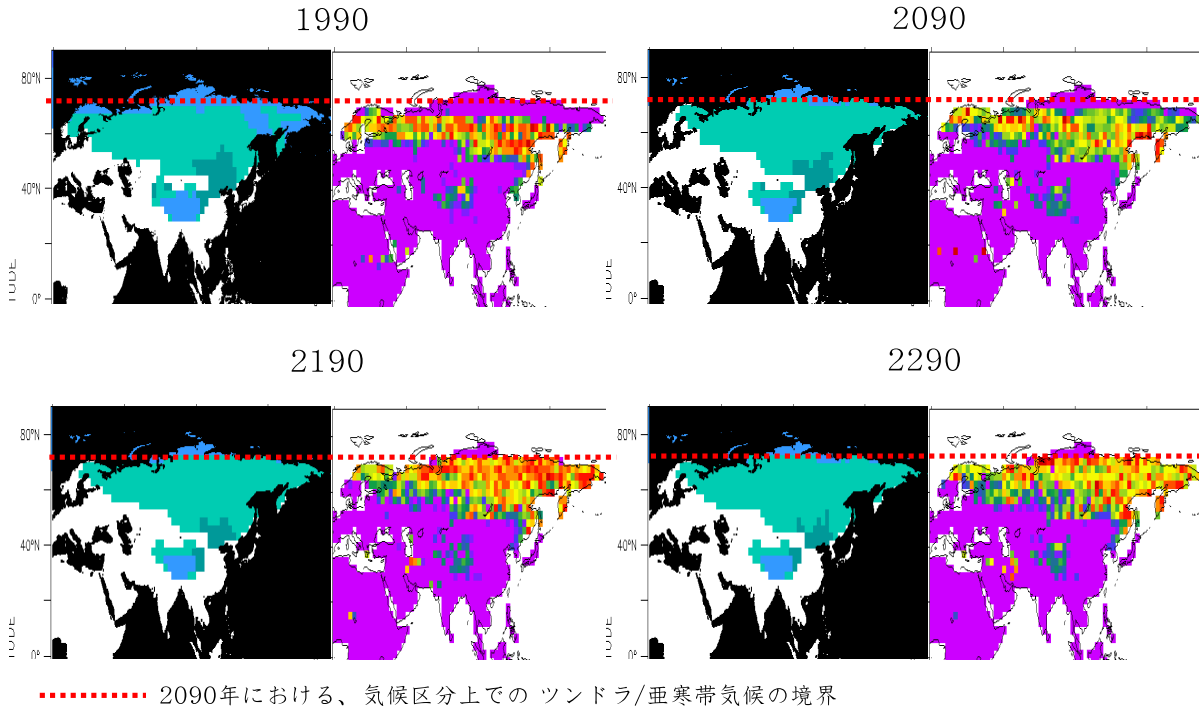



図3　地球システム統合モデルで予測される 2000 年から 2300 年（各 90 年代平均）における気候帯（各図左；水色はツンドラ気候、緑は亜寒帯気候）および各グリッド内における北方林の生産力の割合（各図右；赤いほど割合が大きく、北方林が存在しないエリアは紫色）の変化。用いたシナリオは RCP4.5 シナリオ。赤点線は、2090 年における、気候区分上でのツンドラ-亜寒帯気候の境界線を表している。

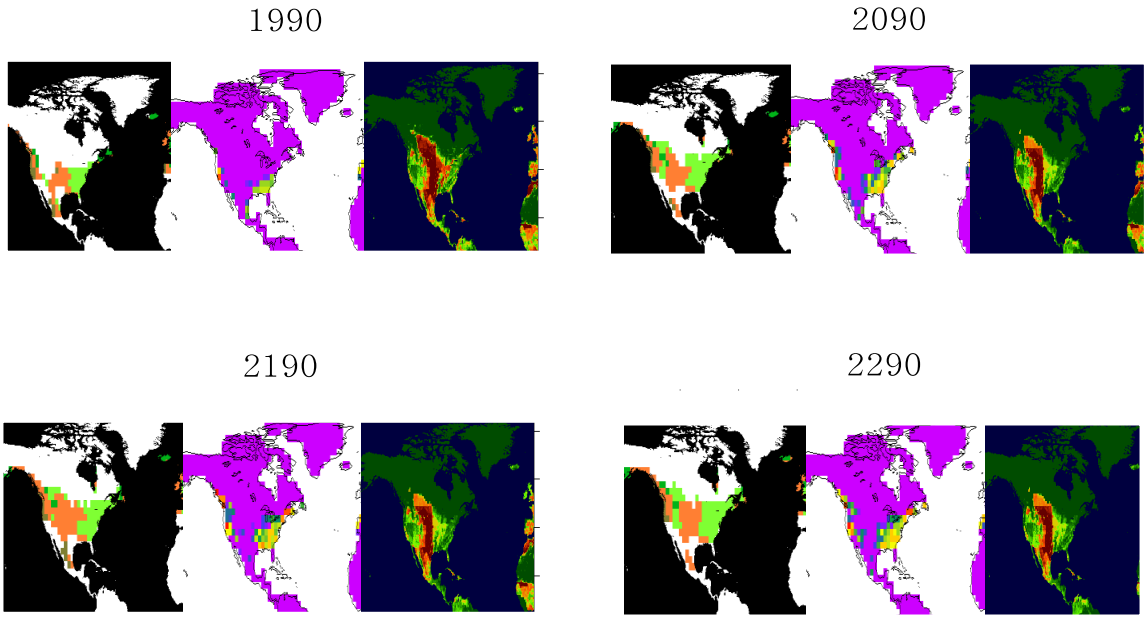



図4　地球システム統合モデルで予測される 2000 年から 2300 年（各 90 年代平均）における気候帯（各年代左；緑色は温暖湿潤気候、橙色は地中海性気候を表す）、各グリッド内の温帯林の生産力の割合（各年代中；色は図3と同様）の変化、各グリッド内の農業用地の面積割合（各年代右；赤いほど割合が大きく、濃緑は農業用地が存在しない）。ただし、現気候における温帯気候の細目の再現性にはバイアスが含まれていることに注意が必要である。

(2) 陸域生態系モデル VISIT（Sim-CYCLE）による温室効果ガス収支推定の高度化

陸域起源の温室効果ガスのうち、近年、湿原・水田や永久凍土融解から放出されるメタンが大きな注目を集めている。メタン（$CH_4$）は1分子あたりで $CO_2$ の約 25 倍の放射強制力を持つため、産業革命以降の温度上昇に $CO_2$ に次ぐ寄与があったとされる。しかし、シンク・ソースが多岐にわたることと、大気中オキシダントとの反応や対流圏-成層圏交換を考慮する必要があることから、グローバルな収支には大きな不確実性が残されている。これは、将来の気候変動予測においても不確定要因となり得ることを示している。

本研究では、グローバルな陸域生態系モデル VISIT にメタン交換スキームを導入し、過去の気候変動・大気組成変化・土地利用変化を考慮したシミュレーションを実施して、グローバルな収支とその推定不確実性幅の検討を行った。ここでは、メタン放出源として自然湿原、水田、火災、反芻動物、シロアリ、植生を、吸収源として乾燥土壌のメタン酸化菌による消費を考慮した。全球 0.5 度分解能で 1901～2009 年の計算を行い、シンク・ソースの空間分布、季節変化・経年変化を検討した。その際、異なる入力データやメタンフラックス推定法を組み合わせることで 1152 通りの推定結果を得て、その分布から推定不確実性の検討も実施した。

シミュレーション結果より、陸域は全体として 308.3 ± 20.7 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$ の放出源（西暦 2000 年前後）となっていることが示された。ただし、この値には化石燃料の採掘に伴う漏出や工業起源の排出は含まれていない。最も大きな放出源は自然湿原（約 170 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$）であり、次いで反芻動物（約 80 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$）と水田（約 40 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$）の寄与が大きかった。経年的には、過去の水田面積や放牧地における反芻動物の増加により、正味放出量は増加していた（図5）。大気 $CH_4$ 濃度の増加により、メタン酸化の量も増えていたが、全体の収支に与える寄与は小さかった。植生からの $CH_4$ 放出は、Keppler et al. 2006 によって

報告され、その放出量は湿原に匹敵する規模であると示唆されていたが、近年の追加データによる検討では数 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$ と結論づける研究が多く、本研究でも 9～15 Tg $CH_4$ $yr^{-1}$ という結果であった。これらの結果は、既往の観測・モデル研究と整合的であるが、不十分な点も明らかとなった。例えば、大気濃度観測からは、1990 年代以降の大気 $CH_4$ 濃度上昇鈍化と、2000 年代後半の大幅な上昇速度が示されているが、今回の結果からは陸域収支が原因となっていることを指示する結果は得られなかった。特に、北方湿原や永久凍土の凍結・融解時のメタン動態についてはモデル中での扱いが極めて簡略化されており、実態を再現できていない可能性がある。今後は、温暖化に感度が高いと予想されるこれらのプロセスの精緻化を進める必要がある。

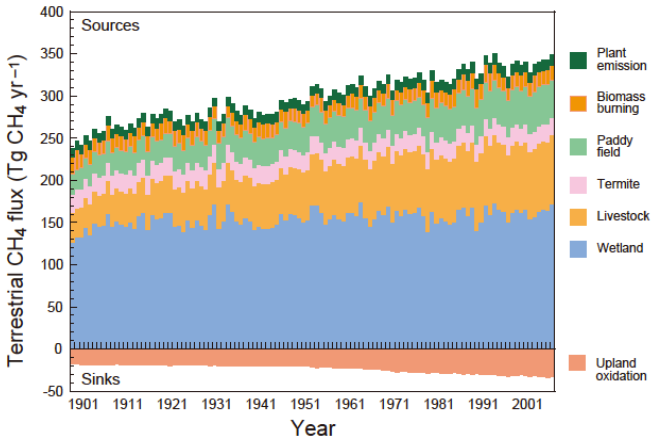



図5：陸域モデル VISIT で推定された陸域 $CH_4$ 収支の経年変化。

文献: Ito, A., and M. Inatomi, in press: Use and uncertainty evaluation of a process-based model for assessing the methane budget of global terrestrial ecosystems. Biogeosciences.

(3) 土壌物理プロセス過程の導入による土壌炭素動態モデルの改良

高緯度圏の土壌は低温かつ水飽和による還元的な環境にある場合が多いため、有機物の分解が遅く大量の土壌炭素が分解されないまま地表面付近に存在している。その量は現在大気中にある炭素量の50%以上に相当すると言われ、気候変動下での高緯度圏の土壌炭素の蓄積・分解のダイナミクスは温暖化に対して強い正のフィードバックのポテンシャルを持つと考えられている。

これら高緯度圏の土壌では、土壌炭素が蓄積することで土壌中の水容量が増加し、これによる水飽和の増大がさらなる還元的環境の生成を進めることで、土壌炭素の蓄積がさらに進むという正のフィードバックが起こっている。しかし、これまでの土壌炭素分解過程のモデルではこの相互作用が明示的に扱われてこなかった。そこで本課題では、この相互作用を再現するため、土壌物理モデルの Noah Land Surface Model (LSM: Livneh et al., 2010) と土壌炭素分解モデルの ED2.0-peat (SDM: Ise et al., 2008)を統合した、Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM)を開発した。このモデルでは、土壌炭素の分解速度を土壌物理モデルで引き出されたそれぞれの地中の深さごとの温度や水分量から算定し、それによって起こる土壌炭素の蓄積・分解による土壌の深さの変化が、さらに次の時間ステップの土壌分解速度に影響を与えるという相互作用を再現した。

LSM では、気候のデータを元に土壌の温度や水分量などを深さによる層ごとに計算する。LSM には 8 層の土壌が考慮されており、有機土壌層の蓄積や分解に伴い上 4 層の厚みが変化する。SDM では、年ごとのリターからの土壌炭素の加入を明示的に再現するため、前年の有機土壌層の上に当年の層が形成されるというプロセスが毎年繰り返される。各層の土壌炭素は、それぞれの深さごとの物理条件に応じて算出される分解速度に応じて徐々に分解されていく。これにより、シミュレーション年数に応じた数の有機土壌層が形成され、古い層ほど土壌下部に存在し、また分解が進んでいるというリアルな垂直構造を

再現することができた（図6）。また本モデルでは、各層に土壌炭素の易分解性・難分解性の画分プールを持っている。そのため新しい層は易分解性の画分が主体で、古い層では難分解性の画分が主体の腐植を多く含むという状態を再現することが出来た。

完成したPB-SDMを用い、アラスカ州フェアバンクス付近の北方林における気象データと土壌データを使用したシミュレーションを行った。モデルを定常状態にするための 2000 年間のシミュレーション（スピンアップ）の後、2003 年から 2010 年までの気象データを用いたシミュレーションを行った。シミュレーション結果の検証により、PB-SDM は土壌の物理環境および土壌炭素の蓄積を適切に再現できることが分かった。PB-SDM の物理モジュールによる永久凍土の深さの推定値は 29.4cm であり、これは観測値である 29cm にきわめて近かった。土壌炭素分解が盛んに行われる夏季の土壌温度の変化と、春先の雪解けのタイミングは観測結果とよく一致した（図7）。永久凍土より上に存在する層に蓄積された土壌炭素量は観測によると 25.06kgCm$^{-2}$ と推定されたのに対し、PB-SDM は 28.470kgCm$^{-2}$ であった。

次に、土壌物理プロセスと土壌炭素動態の相互作用の大きさを定量化するため、本課題で開発されたPB-SDM を Dynamic モデル（相互作用を含んだモデル）とし、これに対して、PB-SDM を改造し土壌物理プロセスと土壌炭素動態の相互作用を持たないようにしたモデルを Static モデルとし、両者の挙動を比較した。なお、Dynamic モデル内の有機土壌層の厚さはリター加入量と分解量のバランスによって決定され、環境の変化に応じて増減するのに対し、Static モデルでは有機土壌層の厚さを初期条件として与える必要がある。そこで、有機土壌層の厚さを地表から 10cm に固定したモデル(Static1)と、30cm に固定したモデル(Static2)の 2 種類を用いることにした。

比較の結果、Dynamic モデルと Static モデルでは土壌炭素動態に大きな違いがあることが分かった（図8）。Static1 による土壌炭素蓄積量は Dynamic の 50%ほどであったのに対し、Static2 の蓄積量は 120%を超えていた。まったく同じ気象条件下での実験であったにもかかわらず、土壌の深さを初期条件として与える従来型の Static モデルでは、シミュレーション結果は初期条件に大きく左右されることが分かった。これにより、従来型のモデルの問題点が明らかにされたとともに、有機土壌層の厚さを客観的かつダイナミックに決定する PB-SDM の優越性が強調されることとなった。

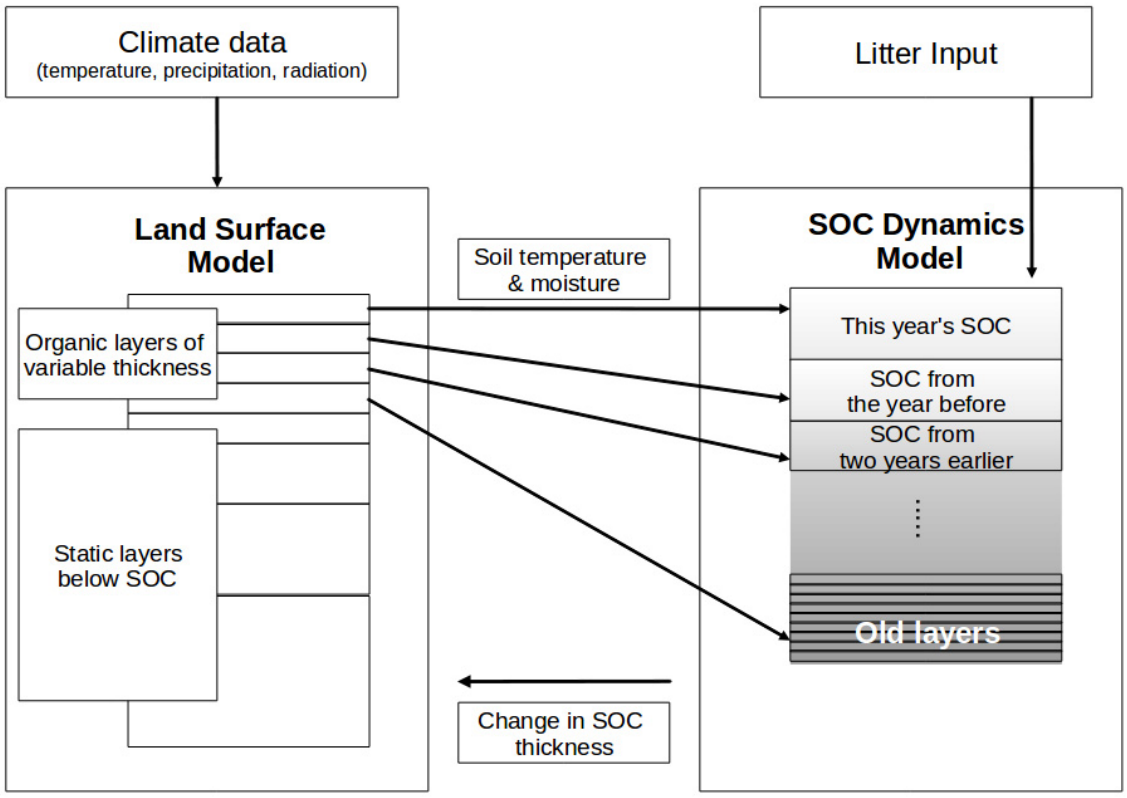



図6. Physical and Biogeochemical Soil Dynamics Model (PB-SDM)のモデル構成。PB-SDM は、土壌物理モジュール(LSM)と炭素循環モジュール(SDM)によって構成される。SDM 内での土壌炭素分解速度は、LSM によって算出される深さごとの土壌温度と水分量によって推定される。SDM の土壌炭素蓄積量は、炭素の質量率および土壌密度によって有機土壌の厚みに変換され、それは LSM で用いられる土壌プロパティに反映される。図中の SOC は soil organic carbon（土壌炭素）の略。

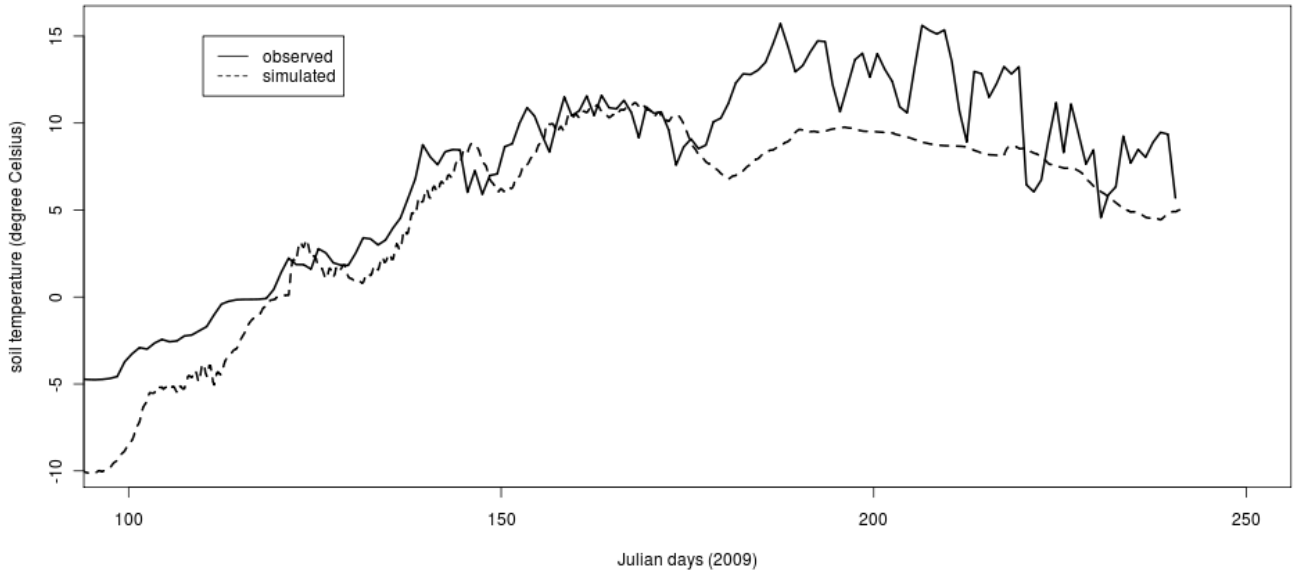



図7. 2009 年の春から夏にかけての土壌温度のシミュレーション結果（破線）と観測データ（実線）の比較。

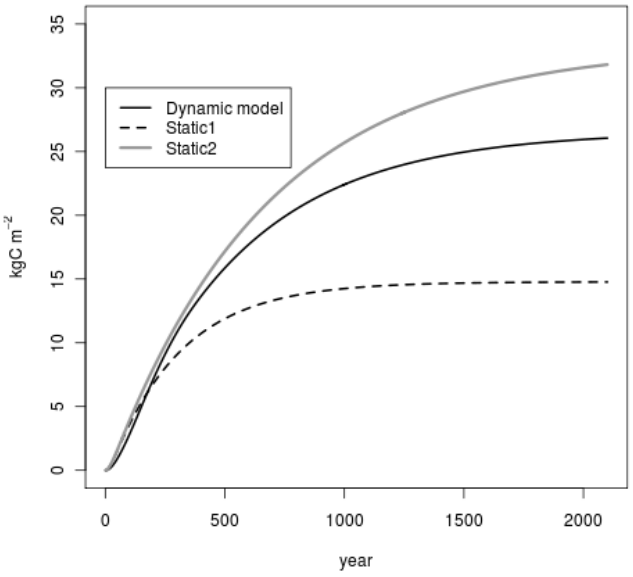



図8. Dynamic モデルと Static モデルによる土壌炭素蓄積動態の比較。

本課題で新たに開発した PB-SDM は、高緯度圏における(1)土壌物理過程、(2)炭素循環動態、(3)土壌物理と炭素循環のフィードバックのそれぞれを良好に再現することができた。土壌物理モジュールでは、永久凍土の深さや春の雪解けなど土壌炭素の分解に重要な物理状態のシミュレーションに成功した。炭素循環モジュールによって算出された土壌炭素蓄積量も、フィールドにおける観測結果と近いものが得られた。このような土壌炭素の垂直分布を明示的に考慮するモデルは画期的であり、今後さらなるモデル改良やチューニングなどを行うことによって、気候変動研究の進展に大きく貢献できると思われる。

f.6　考察

年度当初の計画通りの研究の進捗が見られた。特に気候システムモデル内での陸域生態系に起因するフィードバックを詳細に解析したことで、気候変動のメカニズムの総合的解明に貢献することができた。また、メタンなど$CO_2$以外の温室効果ガス収支や、土壌内部の物理環境と炭素循環の関連を明示的にモデル化することで、気候変動に陸域生態系が与える影響についてさらなる研究が進んだ。

g.6　参考文献

Frank Keppler, John T. G. Hamilton, Marc Bra and Thomas Röckmann, 2006, Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions, Nature 439, 187-191.

Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. Weaver, C. Yoshikawa, , and N. Zeng, 2006, Climate-carbon cycle feedback analysis, results from the c4mip model intercomparison, Journal of Climate, 19, 3337–3353.

Gregory, J. M., C. D. Jones, P. Cadule, and P. Friedlingstein, 2009, Quantifying Carbon Cycle Feedbacks, Journal of Climate, 22, 5232–5250.

Ise, T., A. L. Dunn, S. C. Wofsy, and P. R. Moorcroft, 2008, High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback, Nature Geoscience,, 1, 763-766.

Livneh, B., Y. Xia, K. E. Mitchell, M.B. Ek, and E.PP. Lettenmaier, 2010, Noah LSM snow model diagnostics and enhancements, Journal of Hydrometeorology, 11, 721–738.

h.6　成果発表

論文

Hajima T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe, and M. Kawamiya, submitted, Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios, Journal of the Meteorological Society of Japan.

Mori, K., T. Ise, M. Kondo , Y. Kim, H. Enomoto, and M. Uchida, submitted, The effect of the feedback cycle between the soil organic carbon and the soil hydrologic and thermal dynamics, Open Journal of Ecology.

著書・その他の論文等

Kawamiya M., T. Hajima, and T. Tokioka, in press, Vegetation dynamics in an earth system model, Forests for People: UNFFS publication for ‘Forests 2011.’

口頭発表

羽島知洋, 地球システム統合モデルMIROC-ESMにおけるRCPsシナリオ下での陸域炭素循環・土地利用変化の影響解析, 日本気象学会2011年度春季大会, 東京, 2011/5/21.

羽島知洋, IPCC 第 5 次報告書にむけた地球システムモデルによる長期気候変動予測実験, 平成 23 年度農業農村工学会大会講演会企画セッション「水資源・水環境管理と情報技術 -健全な水環境と水利用」, 福岡, 2011/9/8.

羽島知洋, 地球システムモデル（気候－炭素循環モデル）における大気－陸域相互作用, 日本気象学会2011年度秋季大会研究会「ユーラシア・アジアモンスーン地域の気候―陸域相互作用研究会」, 名古屋, 2011/11/15.

伊勢武史, 物質循環シミュレーションモデルにおける土壌生態系： 新たなフロンティアとその課題, 第59回日本生態学会, 大津, 2011/3/18.

ポスター発表

Hajima, T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe, and M. Kawamiya, Climate change and carbon dynamics using RCP scenarios by MIROC-ESM, World Climate Research Programme Open Science Conference, Denver, 2011/10/26.

Ise, T., N. Kato, H. Enomoto, M. Kondo, and M. Uchida, Constructing a depth-Stratified Model for Soil Organic Carbon: Dynamics of Past, Current, and Future Accumulation and Decomposition, The 4th East Asia AMS Symposium, Tokyo, 2011/12/15.

アウトリーチ活動（講演・新聞・雑誌・テレビ・ラジオ）

伊勢武史,「地球温暖化ー研究の最前線ー分かってきたこと・まだ分かっていないこと」, 月刊理科の探検, 2012年2月号.

伊勢武史,「地球温暖化は事実なのか？ -- よくある誤解と分かりやすい答え」, 月刊パリティ, 2012年3月号.


KAKUSHIN