

## 研究課題名：流域環境管理に関する国際共同研究

課題代表者：国立環境研究所アジア自然共生研究グループ 村上正吾  
 共同研究者：国立環境研究所水圏環境研究領域 林 誠二・中嶋恵子  
 国立環境研究所アジア自然共生研究グループ 東 博紀  
 実施年度：平成 19 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

陸域～沿岸域～海洋を含む領域で定義される広義の流域圏における多種多様な生態系機能及び水・物質循環機構の解明と、流域の土地改変や社会経済活動変化に伴う負荷発生構造の変化、沿岸域の貧酸素水塊の形成、沿岸域・海洋生態系変化に伴う生物生産への影響等を定量的に評価することを目的として、流域圏環境・生態系機能評価モデルの開発を行う。

### 2. 研究計画

平成 19 年度は、陸域生態系が流域の水・物質循環に及ぼす影響を評価するための陸域生態系機能評価モデルの開発・高精度化を行った。米合衆国環境保護局（EPA）によって開発された分布型流域水文モデル Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF) を長江流域の地理特性を考慮して改良するとともに、それを活用して、中国長江流域の洞庭湖周辺における退田還湖（干拓農地の再湿地化・復元）による洪水防御効果の定量評価、及び三峡ダムの放流量調節や長江本流から洞庭湖への分洪操作による効果的な洪水防御手法の検討を行った。

平成 20 年度は、陸域起源の環境負荷物質が沿岸・海洋生態系に及ぼす影響を評価するための流動・水質・一次生産モデルの開発を行った。開発したモデルを伊勢湾に適用して流動・水質場の再現精度を検証するとともに、伊勢湾に見られる湾内水質の長期トレンドとその周辺域の気候変動の関係を数値シミュレーションで検討した。

平成 21 年度は、海域の生態系サービスを定量的に評価する数理モデルの構築を目指し、その一研究として海域のアサリ資源量予測モデルを開発した。アサリの浮遊幼生の回遊と底生貝の個体成長・個体群動態を組み合わせたアサリ生活史モデルを構築し、前年度開発した流動・水質・一次生産モデルに組み込んだ。それを用いて伊勢湾におけるアサリ漁獲量減少の原因に関する検討を行った。

### 3. 成果概要

#### 3.1 陸域生態系機能評価モデルによる「退田還湖」が長江中流域の洪水抑制に及ぼす影響評価

「退田還湖」は、湖を干拓して作られた水田を元の湖に戻し、洪水時に遊水池として機能させるものであり、2009 年に完成した三峡ダムの運用と併せて現在進められている中国の洪水防御政策である。本研究では、1998 年を対象に分布型流域水文モデルによる降雨流出計算を実施し、洞庭湖周辺での退田還湖による長江中流域での洪水防御効果の定量的評価を行った。

洞庭湖の貯水量は、退田還湖により 1998 年当時の推定結果と比べて、湖平均水位 35.0 m で 115 億 m<sup>3</sup> 増加することが推定されたが、1998 年を想定した場合には洞庭湖と長江の合流点付近の洪水防御水位（34.4 m）を日平均水位で超過し、退田還湖のみでは洪水の防御が不可能であることが示唆された（図 1）。これに対して、1950 年代の分洪操作を想定し、本流の荊江（洞庭湖合流部上流）区間で分流し洞庭湖への流入量を増加させたところ、退田還湖の実施後においても、ダム放流操作と分洪量の増加操作を組み合わせることで、初めて全期間において上記防御水位を下回る結果を得た（図 1）。この計算結果は、洞庭湖を対象とした退田還湖政策が荊江区間での長江本流水位の制御に用いられる場合に最も洞庭湖周辺の洪水防御に効果的であることを示唆していると考えられた。

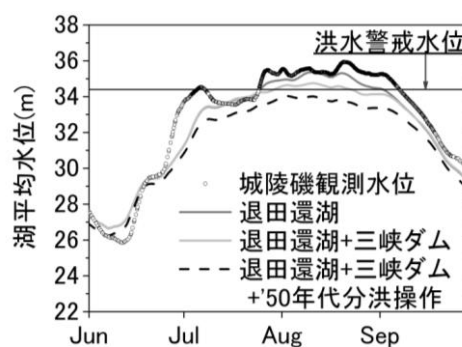


図 1 1998 年洪水期の洞庭湖日平均水位の計算値と観測値、及び洪水対策（退田還湖・三峡ダム・分洪）による水位の変化。

#### 3.2 湾内流動・水質・一次生産モデルによる伊勢湾の水質トレンドと風向・風速の経年変化の関係

伊勢湾は毎年のように赤潮・貧酸素水塊が発生している我が国の代表的な閉鎖性海域である。1981～2004

年において環境省が実施した広域総合水質調査の底層 COD データを統計解析したところ、伊勢湾では愛知県側で増加、三重県側で減少トレンドとなる空間分布が見られた(図 2a)。また、同期間の気象データを調べたところ、気温は 24 年間で約 1.4°C の昇温傾向、伊吹おろしと呼ばれる冬季の北西風が弱まっている傾向が明らかになった。一級河川の流量には特に有意なトレンドは見出せなかった。

気象の経年変化が湾内流動・底層水質に及ぼす影響を流動・水質・一次生産モデルを用いて検討した。2003 年の再現計算結果と気温、風のみ 1988 年の時系列データに変えて得られた結果を比較したところ、(1) 気温の上昇傾向は流動・水質にほとんど影響を及ぼさないが、伊吹おろしの弱風化は南北方向のエスチュアリー循環を減速・時計回りの循環流を加速させること、(2) 底層 COD のトレンドの空間分布は風の経年変化が重要な要因である可能性が高いこと(図 2b)、(3) 愛知県側の増加傾向はエスチュアリー循環の減速による海水交換速度の低下、三重県側の減少傾向は時計回り循環流の加速による湾奥からの栄養塩輸送量の減少・内部生産量の減少が原因であることなどが明らかになった。

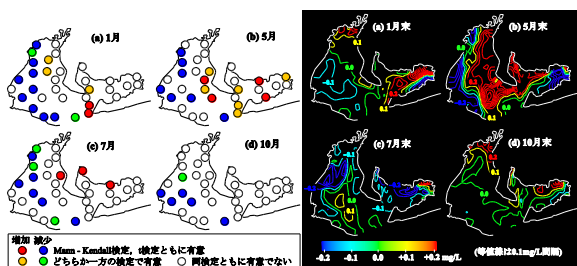


図 2 (a) 広域総合水質調査結果の底層 COD トレンド。(b) 風向・風速の変化が底層 TOC に及ぼす影響。等値線は 2003 年再現計算(W03)と風向・風速のみ 1988 年の時系列に代えて行った数値シミュレーション(W88)の底層 TOC の差(W03-W88)。

### 3.3 湾内流動・水質・一次生産・アサリ生活史モデルによる伊勢湾のアサリ資源量減少原因に関する考察(平成 21 年度)

近年、全国各地でアサリ漁獲量が減少し、生態系サービスの劣化が問題となっている。本研究では、前年度の結果を踏まえて風向・風速の変化が伊勢湾伊勢・松阪地区のアサリ資源量に及ぼす影響に着目し、伊勢・松阪地区における漁獲量減少との関連性を明らかにするため、次の 2 種類の解析条件 SIM 1、2 を設定した。2000~2004 年の気象、河川(流量、水温、水質)、外洋(潮位、水温、塩分、水質)条件を与えて行う計算

を SIM 1 とし、SIM 1 の解析条件のうち風向・風速のみを 1988~1992 年のデータ(図 3b)に置き換えたものを SIM 2 とした。

SIM 1 と 2 の松阪地区の結果を比較したところ、底生貝の総個体数密度には大きな差が見られなかった(図 3c)が、殻長 25 mm 以上の成貝個体数密度では SIM 1 より SIM 2 が高密度になる傾向が見られた(図 3d)。この差は風向・風速の差によって生じた餌濃度の違い(図 3e)が主な原因であると考えられた。

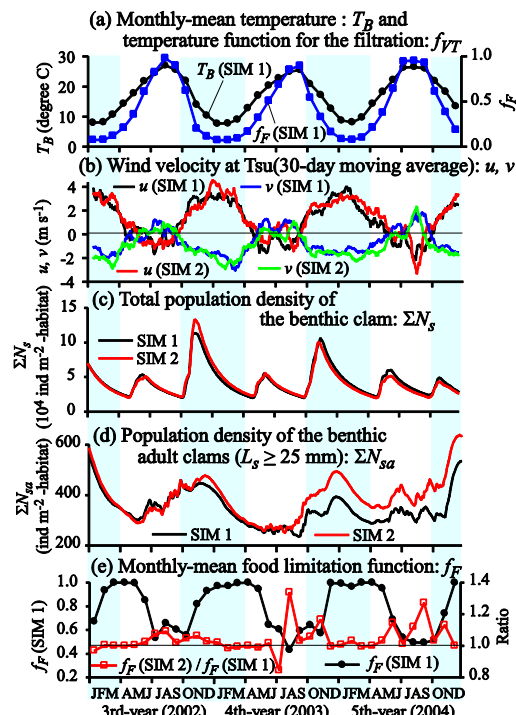


図 3 風向・風速の変化による松阪地区のアサリ資源量への影響。

### 4. 今後の計画

陸域と海域の生態系機能評価モデルを統合し、流域の土地改変・社会経済活動変化・気候変動等による陸域~沿岸域~海洋という広義の流域圏の生態系機能・サービスへの影響を定量的に予測・評価する流域圏環境・生態系機能評価モデルの開発を目指す。

### 5. 本年度までの計算機資源の利用状況(2007年4月~2010年7月)

実行ユーザ数: 4 CPU 時間 1 ノード未満: 45 hrs, 1 ノード: 6,579 hrs, 2 ノード: 0 hrs, 計: 6,625 hrs.

## 研究課題名：大気海洋結合モデルの物理過程改良および気候変化予測の手法開発

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 小倉知夫

共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 江守正多・長谷川聡・阿部 学  
東京大学気候システム研究センター 木本昌秀・今田（金丸）由紀子・  
野中（荒井）美紀・近本喜光・高萩 縁・羽角博康  
海洋研究開発機構地球環境変動領域 横島徳太

実施年度：平成 19 年度～平成 21 年度

### 1. 研究目的

地球温暖化が社会・経済に及ぼす影響を把握する上で、今後 30 年程度の近未来に注目した極端現象（豪雨、熱波等）の予測は重要な課題である。近未来の気候予測は経年変動の影響を比較的強く受けるため、経年変動の位相を含めた予測がより望ましい。しかし、そのためには気候モデルによる経年変動の再現性改善、初期値アンサンブル予測の手法開発などの問題を克服する必要がある。そこで本研究では、大気海洋結合 GCM ‘MIROC’ による数値実験とその物理・力学過程の改善を通して、近未来の気候予測の技術的基盤を確立することを目的とする。また、今後 100 年以上の長期に渡る気候予測においては気候感度推定の信頼性向上が重要な課題であるため、これにも併せて取り組むこととする。

### 2. 研究計画

近未来予測については、実験的気候予測システムを開発することで、十年規模変動の位相を含めた将来予測に取り組む。このシステムは、海洋表層の水温、塩分の観測データを利用して気候モデル MIROC の状態を現実に近づけ（データ同化）、その状態に摂動を加えることで複数の初期値を作成し、得られた初期値からアンサンブル予測を行うものである。この方法で予測する対象は温暖化のトレンドに乗った 30 年先までの気候状態であり、特にその気候状態が十年規模変動でどれだけ変わるかが焦点となる。

気候感度の推定については、不確実性が生ずる最大の要因である雲フィードバックに注目し、気候モデルによるフィードバック推定の信頼性を高めるために雲パラメタリゼーションの精緻化に取り組む。また、モデルで推定した気候感度に観測データから制約を加えるため、1991 年のピナツボ火山噴火について再現実験の準備を整える。この実験は、火山噴火に伴う気温変化を気候モデルで再現し、観測データと比較して再現成績が良いモデルほど気候感度の信頼性が高いと判断するものである。

### 3. 成果概要

本研究課題では近未来予測の技術的基盤を整えるため、実験的気候予測システム(System for Prediction and Assimilation by MIROC, ‘SPAM’)を開発し、研究ツールとして稼動を開始した。また、SPAM による気候予測の性能を評価するため、数年規模で変動するエルニーニョ・南方振動(ENSO)の予報実験を実施した。その結果、他機関の予報システムと比べて予報成績に改善の余地が認められたため、SPAM の構成要素（データ同化手法、アンサンブル予測手法、気候モデル本体等）に改良を加えて予報精度の向上を図った。例えばアンサンブル予測手法については、新しい初期値作成方法として Analysis Increment Perturbation (AIP)法を開発した。AIP 法は従来の方法（同化アンサンブル）と比べて計算コストが約 1/10 であるにも関わらず、従来と同じ程度の予測精度を示すことが確認できた（図 1、図 2）。また、気候モデル本体については、ENSO の振幅が観測と比べて過小評価される問題があり、この性質が熱帯海洋表層の鉛直温度成層の過小評価と関係していること知られてきた。そこで海洋の移流スキームを Utopia-Quickest 法 からより高精度の Second-Order-Moment 法へ変更したところ、中央・東部熱帯太平洋で表層の温度成層が強化され、ENSO の振幅も観測に近づく成果を得た。このほか、温暖化に伴う降水変化のメカニズムを理解するために数値実験を行い、赤道域と中緯度域の降水増加が海面水温上昇の効果、亜熱帯域の降水減少が CO<sub>2</sub> 増加によることなどを確認した。

本研究課題では気候モデルによる雲フィードバック推定について信頼性を高めるために、雲氷量の計算方法を経験的な診断から物理的な予報へ変更した。新しい計算方法では、雲水の液相・固相の表現がより現実的になるほか、気候感度が不確実なパラメータ値にあまり依存しなくなるという利点がある。気候モデルの改良としてはこのほか、雲量の計算方法を変更し、格子内部で水蒸気の空間分布が変化する効果を採用入れた。以上の改良の結果、モデルで計算した中層雲の分布が衛星観測データに近づく様子が確認できた。また、

気候感度に観測データから制約を加えるための火山噴火実験については、火山性エアロゾルのデータを境界条件としてモデルに入力する方法を改善し、その結果、火山噴火に伴う気温変化の再現性が向上することを確認した。

**4. まとめと今後の課題**

本研究課題で実験的気候予測システム SPAM を開発したことにより、MIROC を用いた気候変化の予測に十年規模変動の影響を取り込むことがある程度可能となった。また、雲パラメタリゼーションを精緻化すること等により、MIROC による気候感度推定について信頼性が向上した。これらの成果は、MIROC による将来気候の予測について説得力を増すものと期待される。本研究で開発された SPAM と MIROC は、IPCC 第 5 次報告に向けた将来予測シミュレーションに現在活用されている。このシミュレーションで得られた結果は次期の IPCC 報告書に掲載予定であるほか、社会・経済への温暖化影響を評価する研究においても入力データとして活用される見込みであり、最終的には、日本の環境政策の立案を支援する基礎データとして役立つものと期待される。以上の成果を得るには多くの数値実験を試行錯誤しながら実施する必要があり、そのために NIES SX-8R の計算機資源が不可欠であった。

なお、本研究課題で十分に解決できなかった課題としては、観測データを利用した気候モデル MIROC の性能評価（特に火山噴火再現実験、雲の衛星観測データの活用）を挙げることができる。また、物理摂動アンサンブル（気候モデルのパラメータに摂動を与えることで実施する、温暖化予測のアンサンブル実験）による将来予測の不確実性定量化も重要である。これらは共に、気候の将来予測の不確実性を狭める上で鍵となるテーマであり、NIES SX-8R を用いた研究課題で今後取り組む予定である。

**5. 昨年度までの計算機資源の利用状況（2007 年 4 月～2010 年 3 月）**

実行ユーザ数：10 CPU 時間 1 ノード未満：710 hrs, 1 ノード：176,579 hrs, 2 ノード：101,175 hrs, 計：278,414 hrs.

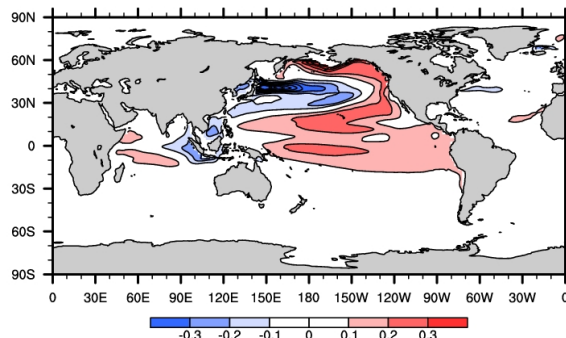


図 1 MIROC によって計算された、北太平洋亜表層水温の年平均偏差場の経験的直交関数第 1 モードに対する回帰係数分布。亜表層水温は表層から深さ 100 m までの鉛直平均値として定義。モデルの内部変動を抽出するために 20 世紀再現実験における 10 アンサンブル平均からの各メンバーの偏差に対して経験的直交関数解析を行った。

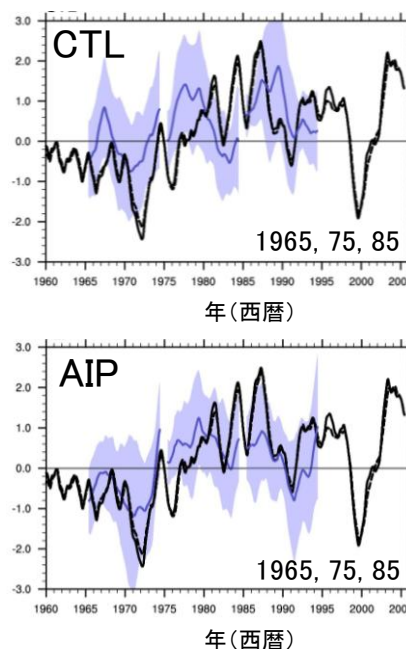


図 2 経験的直交関数第 1 モードの空間パターンに射影した時係数。上(CTL)が同化アンサンブルによる予測、下が AIP 法による予測。初期値を 1965, 1975, 1985 年に設定した結果を示す。黒の実線が観測、破線が同化を示す。青の実線と陰影は予測時におけるアンサンブル平均とアンサンブルスプレッドを示す。

## 研究課題名：全球気候モデル MIROC への新規陸域モデルの結合とその大気陸域相互作用研究への応用

課題代表者：国立環境研究所社会環境システム研究領域 花崎直太

共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 伊藤昭彦

東京大学生産技術研究所 沖 大幹・Yadu Pokhrel

東京工業大学大学院 鼎 信次郎

北海道大学大学院工学研究院 山田朋人

実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

降水量や土壌水分量などの水文水資源量の予測精度を向上することは、洪水・渇水災害を軽減する上で極めて重要である。本研究は人工衛星や現地観測により得られたデータを加工し、陸面過程モデルに与えることで得られる”準観測”土壌水分データを初期値とする GCM による過去 10 年間の予報実験を実施した。そして 1～2 か月スケールの水文気象諸量の予報精度がどの程度改善されるのか 1988 年夏に北米で発生した大旱魃を例に評価を行い、気候システムにおける土壌水分の役割について予測という観点から議論を行う。

### 2. 研究計画

本研究で使用する GCM は MIROC であり、陸面過程には MATSIRO を使用した。人工衛星観測による降水データ (Global Precipitation Climatology Project; GPCP) や大気再解析データと MATSIRO を用いたオフライン実験を行うことにより観測情報に基づく土壌水分データを作成し、予報実験の初期値として利用した。

水文気象予報スキルに与える土壌水分初期値の影響を抽出するため、2 種類のアンサンブル実験 (series-1、series-2) を行った。**Series-1**: 大気過程の予報変数と SST に加えて土壌水分データを予報開始時の初期値とする実験。予報実験の開始日は 1986～1995 年の 7 月 1 日とし、各予報は大気初期値に擾乱を与える 10 個のアンサンブル予報により構成される。**Series-2**: Series-1 と同様に大気予報変数と SST を初期値とするアンサンブル予報実験。Series-1 との違いは土壌水分を対象とする年を含めた 1986～1995 年 7 月 1 日の値をすべて用いた 10 通りのアンサンブル初期値とする。Series-1 と-2 による予報実験結果の違いは初期値として使用される土壌水分データが正しいか否かによってもたらされる。

### 3. 進捗状況

本概要では 1988 年夏に北米を襲った大旱魃 (通称 The Drought of 1988) の予報スキルに与える土壌水分初期情報の影響について、大気メモリの期待出来ない予

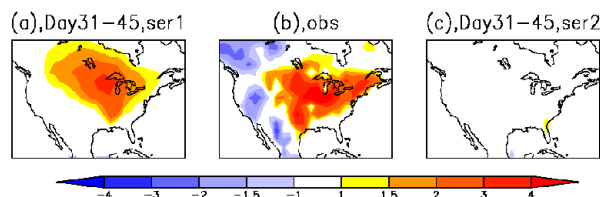


図 1 1988 年夏に北米を襲った大旱魃の予報スキル。いずれも 1988 年 8 月上旬の地表 2 m 気温を示す。図 1-a は大気変数と SST に加えて土壌水分の初期値化を行った Series-1 の予報結果、図 1-b は観測値、図 1-c は大気変数と SST のみの初期情報による予報結果である。図中の色は 1986～1995 年の 8 月上旬の気候値 (平均値) に対する 1988 年 8 月上旬の結果の偏差を示す。予報開始日: Series-1 と-2 とともに 1988 年 7 月 1 日。

報開始後 31～45 日目に着目し議論を行う。図 1 は地表 2 m 気温 (以降、地表気温) について Series-1 (図 1-a)、観測値 (図 1-b)、Series-2 (図 1-c) の予報スキルを示す。この予報スキルとは 1986～1995 年 8 月上旬に対する 1988 年 8 月上旬の平均気温の偏差を意味する。図 1-b (観測値) より 1988 年 8 月上旬は平年値 (1986～1995 年) と比較して北米のロッキー山脈から東部の広範囲にかけて温暖年であることがわかる。土壌水分情報に頼らない予報実験である Series-2 では、予報開始後 31～45 日目の結果として北米の旱魃を予報できていないことが確認できる。この大旱魃の発生原因として Palmer et al. [1989] は太平洋上の SST 偏差の重要性を指摘している。しかし、大気中のメモリは 1～2 週間程度とされていることから、大気データに加え SST を予報初期値に利用しても大旱魃を準季節スケール (ここでは 31～45 日前) で予報することは困難である。一方、図 1-a の Series-1 は北米の中部から東部にかけて温暖年であることを 31～45 日前から予報している。つまり、大旱魃が発生する 1 ヶ月以上前から今年が温暖年の可能性があるという情報が得られることにより、水資源に関わる人間活動を行う上で何らかの事前対策が実施し得ることを示唆するものである。

4. 今後の計画

今後は、他の顕著現象に関しても土壌水分の初期情報と準季節スケールの水文気象予報スキルの関係について分析を行う予定である。また、現在改良が進められている灌漑効果を考慮した陸面過程を含む全球気候モデルにおける大気陸面相互作用の物理的メカニズムの解明を試みる所存である。

5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：6 CPU 時間 1 ノード未満：741 hrs, 1 ノード：0 hr, 2 ノード：0 hr, 計：741 hrs.

6. 昨年度終了研究課題のまとめ

6.1. 昨年度終了研究課題名

全球気候モデル MIROC の陸域過程の精緻化及びそれを用いた大気陸面相互作用の研究

6.2. 昨年度終了研究課題の目的

今年度と同様。

6.3. 昨年度終了研究課題の成果概要

昨年度終了研究課題では(1)全球気候モデルへの農業灌漑の導入とその効果に関する数値実験、(2)氾濫原浸水過程を考慮した全球河川流下モデルの構築、(3)陸域生態系モデルを利用した高分解能シミュレーション、の3つの研究を実施した。

一つ目の研究であるが、MIROC に全球水資源モデル H08 の灌漑スキームを導入した。これによって、全球気候モデルにおいて、耕作期間中の灌漑地の土壌水分をコントロールするという現実的な農業灌漑実験が可能になった。このモデルを利用し、灌漑や取水の方法を変えて複数の気候シミュレーションを実施した。シミュレートされた年間灌漑要求水量は先行研究より過小だったものの、妥当な推定結果であった。灌漑の効果により、全球平均気温が 0.08K 下がり、降水量が 0.2% 増加するという結果が得られた (図 2)。

二つ目の研究であるが、超高解像度の水文地形データから、全球河川流下モデルにおける河道網と氾濫原のサブグリッドスケール地形情報を客観的に抽出する

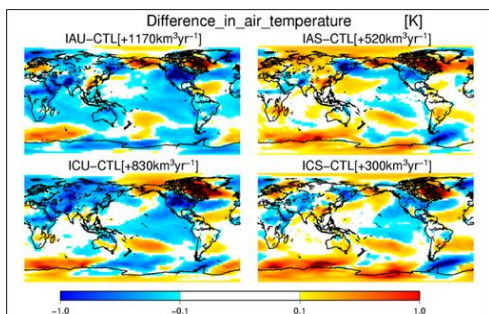


図 2 灌漑実験とコントロール実験の年平均気温の差

手法を考案した。抽出された地形情報を用いて氾濫原浸水過程を考慮した全球河川流下モデルを構築し、水循環シミュレーションを行った。その結果、新たに開発したモデルではアマゾン川のような氾濫原の活動が活発な低平地流域での河川流量の再現性を大幅に向上させること、また氾濫原浸水面積の季節変動を妥当な範囲で再現できることを示した (図 3)。

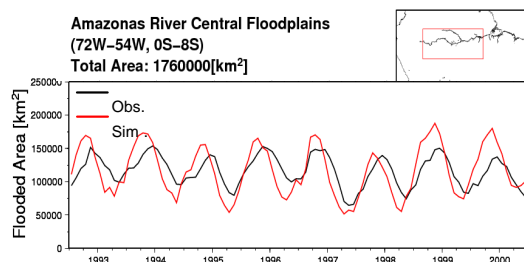


図 3 アマゾン川中部氾濫原の氾濫面積。黒線は衛星観測、赤線はモデル再現値を示す。

三つ目の研究であるが、大気-陸域生態系間の微量ガス交換および生態系内での物質循環を扱うモデル (VISIT) を用いて、環境研スーパーコンピュータを利用してグローバルなシミュレーションを実施した。気候条件、植生タイプ、土地利用変化の分布を考慮しつつ、生物地球化学的にメカニスティックなモデルによる計算を実行した (図 4)。この結果、気候条件や植生分布に応じた CO<sub>2</sub> 固定能の分布パターンが明らかにされた。また、気候変動や土地利用変化が陸域プロセスに与える影響およびそのフィードバック効果も示された。メタンや亜酸化窒素など重要な温室効果ガスの収支を明らかにすることで温暖化予測・緩和への貢献が期待される。

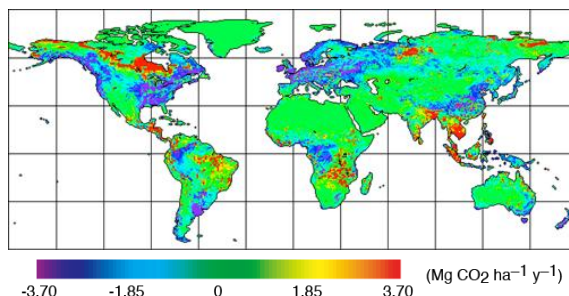


図 4 陸域生態系モデル (VISIT) で推定された 1990 年代の温室効果ガス収支分布。

6.4. 昨年度までの計算機資源の利用状況 (2007 年 4 月～2010 年 3 月)

実行ユーザ数：11 CPU 時間 1 ノード未満：1,108 hrs, 1 ノード：3,142 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：4,250 hrs.

## 研究課題名：広域大気汚染物質の発生源別寄与率解析と気候影響評価

課題代表者：国立環境研究所アジア自然共生研究グループ 永島達也

共同研究者：九州大学応用力学研究所 竹村俊彦

名古屋大学大学院環境学研究科 須藤健悟・井上忠雄・関谷高志・荻原由紀恵

(株)中電シーティーアイ制御システム部 長谷川晃一・榊原篤志

実施年度：平成 22 年度～平成 23 年度

### 1. 研究目的

全球規模の対流圏化学輸送モデルおよび成層圏・対流圏の化学過程とエアロゾル過程が結合した地球システム統合モデルを用いて、東アジア域のローカルな大気汚染、遠隔領域からの輸送、成層圏からの流入などの個別の寄与、すなわち大気汚染の構造を定量的に明らかにする。これにより、大気汚染物質の削減策による大気質改善効果を評価する。更に、そうした大気汚染防止策の温暖抑止効果に関して定量的な評価を行う。

### 2. 研究計画

まずは、対流圏化学輸送モデルを用いて地表オゾンの発生源別寄与率解析を二つの異なる手法に関して行い、両者を比較する。これと平行して地球システム統合モデルの調整を行った後に、大気汚染物質の過去再現実験を行う。この再現実験に対する感度実験として、大気汚染物質前駆体の放出量を変化させた実験を行い、大気汚染物質の削減策による大気質改善効果を評価する。また、大気汚染物質の将来予測実験を複数の大気汚染物質削減策に関して行い、計算される放射強制力や気候応答の違い、すなわち、温暖化防止効果の違いに関して解析を行う。

### 3. 進捗状況

今年度は、異なる二つの手法（Tag 付トレーサー法、ゼロエミッション法）を用いて計算される対流圏オゾンの発生源別寄与の評価結果がどのように異なるかを調べた。ゼロエミッション法による定量化は、特定のソース領域における前駆気体のエミッションを完全に抑止した実験と通常のエミッションを用いる実験を行い、その差から、そのソース領域起源のオゾン量を推定するものである。これを、昨年度までに行った Tag 付きトレーサー法を用いた評価結果（Nagashima et al., 2010）と比較し、また、両手法を組み合わせることによって、両手法間の違いを詳細に調べた。図 1 に、東アジアの地表オゾンを、前駆気体の放出領域とオゾンの生成領域の組に分けて表示した。Tag 付トレーサー法で計算される中国起源オゾンは、図 1 の上図と中図の和であり、ゼロエミッション法では、上図と下図の

和となる。両手法間の違いは、中図と下図の違いに起因するが、日本における中国起源オゾン評価値の両手法による違いは大きくても 1ppbv 程度と小さい。これは、中国以外で放出されて中国で生成されたオゾンと中国で放出されて中国以外で生成されたオゾンとが、日本域ではほぼ打ち消しあっているためである。

また、地球システム統合モデルの硝酸塩エアロゾルに関して調整を行い、更には植物起源の二次有機エアロゾルの導入も行った。

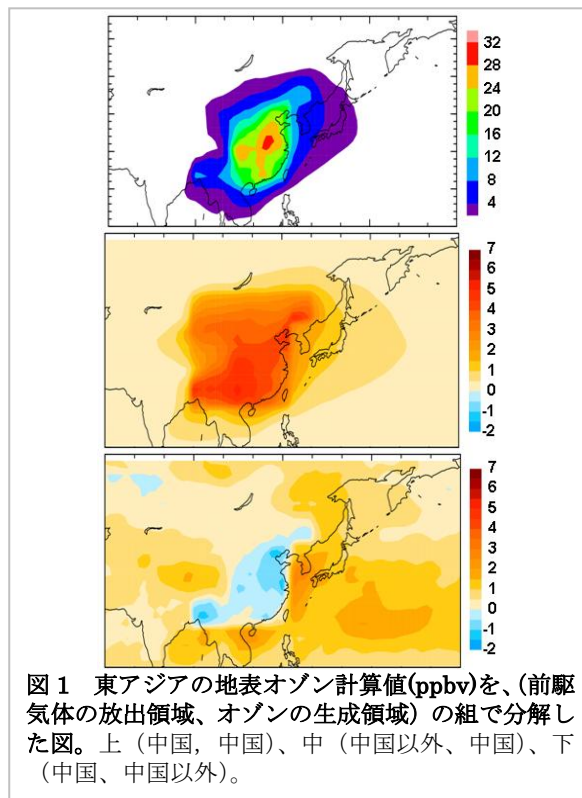


図 1 東アジアの地表オゾン計算値(ppbv)を、(前駆気体の放出領域、オゾンの生成領域)の組で分解した図。上(中国、中国)、中(中国以外、中国)、下(中国、中国以外)。

### 4. 今後の計画

対流圏オゾンの発生源別寄与評価の手法間の相違に関する調査を継続しまとめる。また、地球システム統合モデルの調整を進めて、過去再現実験、感度実験、将来予測実験を進めたい。

### 5. 計算機資源の利用状況(2010年4月～9月)

実行ユーザ数：8 CPU 時間 1 ノード未満：46 hrs, 1 ノード：22,049 hrs, 2 ノード：36,748 hrs, 計：58,843 hrs.

6. 昨年度終了研究課題のまとめ

6.1. 昨年度終了研究課題名

気候モデル中の物理化学諸過程の高度化及び過去-現在気候の再現実験を通じたモデルの検証

6.2. 昨年度終了研究課題の目的

昨年度終了課題では、IPCC の第 5 次レポート等への貢献を見据えた地球システム統合モデル開発一端を担う目的の下、主に対流圏エアロゾル過程の高度化と対流圏・成層圏が連結された大気化学過程の構築を行い、更に両過程の結合を行った。本年度の課題では、昨年度終了課題で開発した地球システム統合モデルを用いて、広域大気汚染物資の発生源別寄与率解析と気候影響評価を行う事を目的としている。また、既存モデルを用いて、気候の変化メカニズム理解等に資する研究を進めることも、本課題の目的に含めることとした。

6.3. 昨年度終了研究課題の成果概要

本課題では、これまでにそれぞれが多数の研究実績を重ねてきている、対流圏エアロゾル輸送モデル (SPRINTARS)、対流圏化学輸送モデル (CHASER)、成層圏化学気候モデル (秋吉モデル) の 3 モデルを、環境研/東大 CCSR/海洋研究開発気候が共同で開発している最新の大気海洋結合モデルである MIROC (ver.4) をベースとして統合した (図 2)。SPRINTARS においては、従前に比較してエアロゾルの粒子径による区切りを詳細化したり、間接効果の導入手法を変更したりするなど、各種の高度化を施した。大気化学過程では、秋吉モデルに含まれているハロゲン物質の化学反応や極域成層圏雲上の不均一反応を CHASER に導入し、対流圏・成層圏を共通の化学反応系で計算する事を可能とした。更には、CHASER で計算した化学物質 (オゾン、OH、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、SO<sub>4</sub>) を SPRINTARS に受け渡して、対流圏エアロゾル量の計算を行う一方、計算されたエアロゾルによって放射場や気温場に変化が生じた場合には、それによって引き起こされる光化学反応速度の変化を通して化学物質質量に変化が生じる、というガス状の化学物質とエアロゾル間のフィードバック過程を陽に表現することが可能になった。

一方、既存のモデルを用いて以下のような研究が行われ、国際モデル相互比較プロジェクトへの対応や、気候変化のメカニズムに関する理解の進展、東アジアの対流圏オゾンに関する発生源別の寄与率評価などの成果を得ることが出来た。

1) 成層圏化学気候モデルを用いた研究：  
 ◇成層圏オゾンの長期変動に及ぼす外的な気候強制要因の影響分析、特に太陽 11 年周期変動の影響を定量的

に明らかにした。  
 ◇成層圏化学気候モデルのモデル間相互比較プロジェクト (CCMVal) に対応。そのために 2000 年相当の各種境界条件を課した定常実験、過去再現実験、将来予測実験、およびそれらの感度実験 (GHG を増加させない実験など) を行った。

2) 大気海洋結合気候モデルを用いた研究：  
 ◇気候モデルに様々な組み合わせの境界条件を与えた実験を行い、気候変化要因の可算性を評価した。  
 ◇地上気温の変化に対する降水量の変化の仕方が、排出シナリオによって大きく異なることを明らかにした。  
 ◇エアロゾルの第 2 種間接効果による“瞬時”降水量変化を診断する新手法を開発した。

3) 対流圏エアロゾルモデルを用いた研究：  
 ◇全球エアロゾルモデルのモデル間相互比較プロジェクト (AeroCom) に対応。そのために、同プロジェクトで独自に用意された排出量推計値と、IPCC の第 5 次レポートに向けて整備された排出量推計値を用いて、1980 年から 2008 年までの対流圏エアロゾル過去再現実験を行った。

4) 対流圏化学輸送モデルを用いた研究：  
 ◇化学輸送モデルを用いたタグ付きトレーサー輸送実験を行い、東アジアの対流圏オゾンに対する、様々なオゾンソース領域からの寄与 (率) を定量的に評価し、その季節性や東アジアの中でも領域ごとの違いなどを明らかにした。

6.4. 昨年度までの計算機資源の利用状況 (2007 年 4 月 ~ 2010 年 3 月)

実行ユーザ数：20 CPU 時間 1 ノード未満：1,691 hrs, 1 ノード：829,086 hrs, 2 ノード：454,460 hrs, 計：1,285,237 hrs.

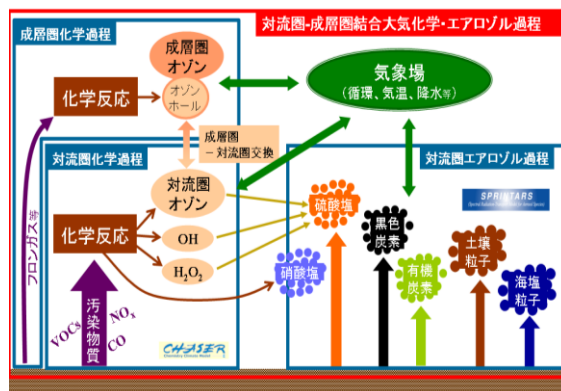


図 2 対流圏化学過程、対流圏エアロゾル過程、成層圏化学過程を統合した、地球システム統合モデルの大気化学・エアロゾル関連部分の概念図。

## 研究課題名：長期気候変動予測と近未来気候変動予測に関わる不確実性の理解と制約

課題代表者：国立環境研究所大気圏環境研究領域 塩竈秀夫  
 共同研究者：国立環境研究所大気圏環境研究領域 野沢 徹・川瀬宏明  
 国立環境研究所地球環境研究センター 小倉知夫・江守正多・長谷川聡・阿部 学・石崎安洋・横畠徳太  
 東京大学大気海洋研究所 木本昌秀・渡部雅浩・羽角博康・高藪 縁・近本喜光・野中（荒井）美紀・安中さやか・森 正人  
 実施年度：平成 22 年度～平成 23 年度

### 1. 研究目的

気候変動に対する影響評価、適応策、緩和策などの研究は、大気海洋結合モデルによる気候変動予測実験のデータを元に行われている。しかし、気候変動予測の不確実性は未だ大きく、適応策、緩和策などの政策決定に影響を与えている。本課題では、国立環境研究所が開発・運用に参加してきた大気海洋結合モデル MIROC を用いて数値実験を行い、長期予測と近未来予測のそれぞれの不確実性の要因を研究する。特に長期予測に関しては気候感度の不確実性、近未来予測に関しては内部変動の不確実性に着目し、その低減を目指す。

### 2. 研究計画

気候感度に関しては、これまで用いてきた MIROC3 と、雲、境界層、積雲などさまざまな物理スキームを改善した新モデル MIROC5 を用いて、CO<sub>2</sub>濃度を増加した実験を行い、両モデルの応答を比較する。

一方、近未来予測については、データ同化実験とアンサンブル予測実験を行い、どのような内部変動に関して予測可能性があるかを調べる。

### 3. 進捗状況

CO<sub>2</sub>濃度 2 倍増に対する気候感度は、MIROC3 と MIROC5 で大きく異なり、それぞれ 3.6°C と 2.6°C である。図 1 に、両モデルの対流圏調節放射強制力とフィードバック係数を示す。対流圏調節放射強制力に有意な差は見られず、MIROC5 の方が長波+短波で負フィードバックが強いために、気候感度が低いことがわかった。フィードバック係数の差は、雲短波フィードバックの符号が異なる (MIROC5 は負で、MIROC3 は正) ために生じている。

近未来予測に関しては、MIROC3 を用いて同化実験とアンサンブル予測実験を行い、熱帯大西洋の SST 変動とそれに伴う降水変動の予測可能性について調べた。MIROC3 に海洋の水温と塩分の偏差を同化したところ、SST 変動に伴う海上風および降水変動が観測値とよく似たパターンを示した。この同化によって得られた初

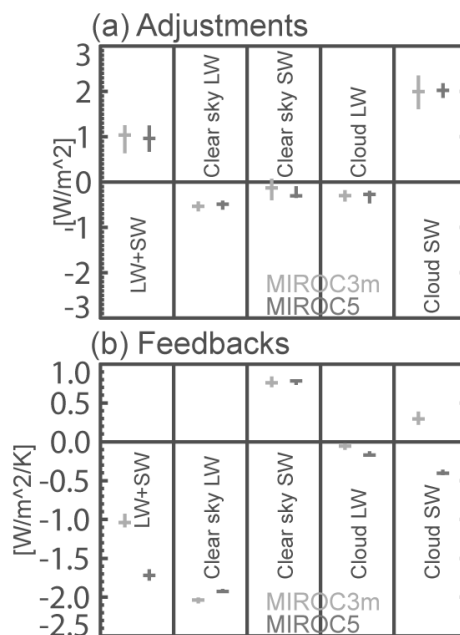


図 1 大気上端での放射フラックスの (a) 対流圏調節 [W/m<sup>2</sup>] と (b) フィードバック [W/m<sup>2</sup>/K]。灰色 (左側) が MIROC3m で、黒色 (右側) が MIROC5。

期値を用いてアンサンブル予測実験を行った。この予測実験では、熱帯大西洋における SST 偏差の南北勾配が 3 年程度の予測可能性を示し、それに伴う ITCZ の南北変移もまた、3 年程度の予測可能性を示した。

### 4. 今後の計画

気候感度に関しては、MIROC5 の物理パラメータに摂動を与える“物理アンサンブル実験”の準備を進める。近未来の内部変動予測に関しては、エルニーニョをターゲットにアンサンブル予測実験に着手する。

### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：17 CPU 時間 1 ノード未満：5 hrs, 1 ノード：85,905 hrs, 2 ノード：81,388 hrs, 計：167,298 hrs.

## 研究課題名：成層圏オゾン層の長期変動とその成層圏－対流圏気候への影響に関する研究

課題代表者：国立環境研究所大気圏環境研究領域  
共同研究者：国立環境研究所大気圏環境研究領域  
東京大学大気海洋研究所 高橋正明  
実施年度：平成 22 年度～平成 23 年度

秋吉英治  
菅田誠治・山下陽介・中村哲

### 1. 研究目的

化学気候モデルを用いたオゾン層の長期変動の計算を行い、ハロゲンガス濃度の影響、温暖化ガス濃度の影響、成層圏気象場への影響、および対流圏への影響を明らかにする。

### 2. 研究計画

化学気候モデルと温暖化ガスおよびフロン・ハロン濃度の長期シナリオを用いたオゾン層の長期変動の計算と複数の感度実験を行って、ハロゲンガス濃度の影響、温暖化ガス濃度の影響、成層圏気象場への影響、対流圏への影響などの解析を行う。今年度は、現行の化学気候モデル（CCSR/NIES AGCM 5.4g ベース）を使って行った、異なる温室効果ガスシナリオのオゾン層変動への影響に関する数値実験結果について、共同研究者との議論を行い論文にまとめる。また、現行モデルの熱帯上部対流圏の低温バイアス、それに伴う成層圏水蒸気量の過小バイアスなど、これまでの計算結果から明らかになった問題点を改善・除去するため、新しい放射スキームを搭載した MIROC3.2 ベースの化学気候モデルの開発を行う。

### 3. 進捗状況

現行化学気候モデルによるオゾン層将来予測実験と温暖化ガスシナリオを変化させたその感度実験については、環境研のスパコンでの計算結果を CCMVal に提出し、温暖化ガスシナリオの違いによるオゾン濃度の違いを解析・議論した。その結果は共同研究の論文として本年 8 月に出版された (Eyring et al. (2010), *Geophys. Res. Lett.*)。この論文では、将来の温室効果ガスの増加による成層圏冷却が上・中部成層圏のオゾン濃度を増加させる効果と、将来ハロゲンガスに代わって増加が予想されるメタンや亜酸化窒素がオゾン層を破壊する効果との競合関係、およびその効果の温暖化ガス濃度シナリオによる違いを明らかにした。

また、MIROC3.2 に光化学反応過程を導入した化学気候モデルの開発を行っている。その結果、現化学気候モデルの最大の欠陥であった熱帯対流圏上部の 6-8K の低温バイアスがかなり解消し、それによって

成層圏水蒸気量が倍増して観測値に近くなり、これによって、成層圏上部の HOx が増加しこの高度領域のオゾン量の過大バイアスが解消した。それによって成層圏上部の気温の高温バイアスが解消した (図)。

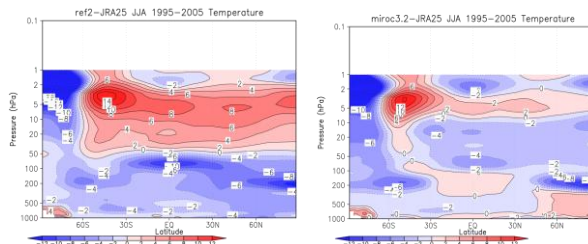


図 経度平均した気温の現モデル (左) と新モデル (右) の観測値からのバイアスの分布。6-7-8 月平均。等値線はバイアス値を表す[°C]。赤色は高温バイアス (モデルの気温が観測に比べて高い) の領域を、青色は低温バイアス (モデルの気温が観測に比べて低い) 領域を表す。

他には、極域オゾン破壊に重要な大気の球面効果の導入を行った。さらに、オゾン層の長期変動シミュレーションに必要な、太陽 11 年周期変動に伴う太陽スペクトルの変化、火山性エアロゾルや QBO の影響の導入も行った。現在、CCMVal や SMILES 観測で明らかとなった光化学過程に関するいくつかの不備な点を修正している。

### 4. 今後の計画

MIROC ベース化学気候モデルの化学に関する修正を早急に終わらせ、2000 年定常状態の 20 年程度の計算を行い、極域オゾン破壊や気温分布、風速分布などの検証を行う。その後、温室効果ガス濃度とハロゲンガス濃度シナリオを使ったオゾン層変動の長期ランを行って、現行モデルの結果との比較を行う。次年度以降は、今年度開発を行った MIROC ベース化学気候モデルを使って、成層圏オゾン層の長期変動とその成層圏－対流圏気候への影響の研究を展開する。

### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：5 CPU 時間 1 ノード未満：2 hrs, 1 ノード：156,336 hrs, 2 ノード：1,202 hrs, 計：157,540 hrs.

## 研究課題名：化学-気候モデルによる温暖化の将来予測における対流圏オゾンと成層圏オゾンの役割評価

課題代表者：気象研究所 環境・応用気象研究部 柴田清孝  
 共同研究者：気象研究所 環境・応用気象研究部 出牛真  
 実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

オゾンは成層圏と対流圏で地球温暖化への放射効果は逆になっており、対流圏オゾンの増加は温暖化を促進するものとして、特にアジア域が原因となるものは、非常に懸念されている。一方、成層圏オゾンも放射効果を通して力学に作用し対流圏の気候に大きな影響を与えることが示されている。温暖化に伴い成層圏のブリューワー・ドブソン循環が強化(成層圏と対流圏の質量交換が促進)され、高濃度な成層圏オゾンの上部対流圏への輸送が増加し、また地表起源の大気汚染関連物質の下部成層圏への輸送が増加するので、これらが大気化学過程を変化させることが予想されている。この変化が全球的にどのような相互作用を通して対流圏や成層圏の気候に影響を与えるのかの評価するのが目的である。

### 2. 研究計画

化学-気候モデル検証 (CCMVal) の国際プロジェクトの枠組みで行われた成層圏オゾンの将来予測およびその気候への影響評価に参加した気象研究所の MRI-CCM1 に詳細な対流圏化学を組み込んだ MRI-CCM2 を使ってオゾンの影響を評価するものである。将来予測のシナリオは CCMVal のものを使うことで、すでに得られている CCMVal1 や CCMVal2 の結果と比較することを通して対流圏オゾンと成層圏オゾンのそれぞれの評価を行うものである。

### 3. 進捗状況

MRI-CCM2 は化学種の数や化学反応の数がそれぞれ 90、247 と MRI-CCM1 の約 2 倍になり、地表からの種々の人工的、自然的な化学種のエミッションも多くなり、化学を安定に解くため化学の CPU 時間が大幅に増加している。海面水温などの外部条件に 1990 年代の気候値を使ってモデルを積分した時の、スピンアップ後の約 10 年間の地表オゾンの気候値を図 1 に示す。春季 4 月は太陽が北半球にあるので、北半球亜熱帯から中緯度に高濃度域があり、それがアフリカ、ヨーロッパ、アジア、北米に帯状分布している。秋季 10 月は太陽が南半球へ移動するが、インドや中東ではなお高濃度オゾンがある。中央アフリカや亜熱帯付近のアフリ

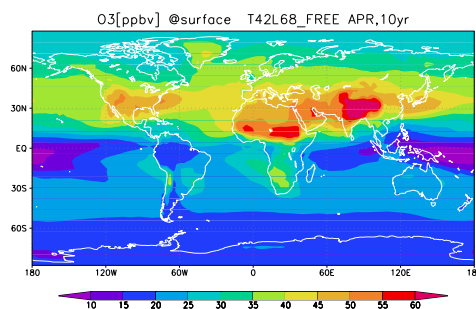


図 1a MRI-CCM2 でシミュレートされた 4 月の地表オゾンの分布 (単位は ppbv)。

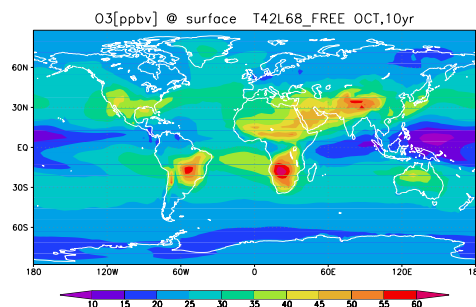


図 1b MRI-CCM2 でシミュレートされた 10 月の地表オゾンの分布 (単位は ppbv)。

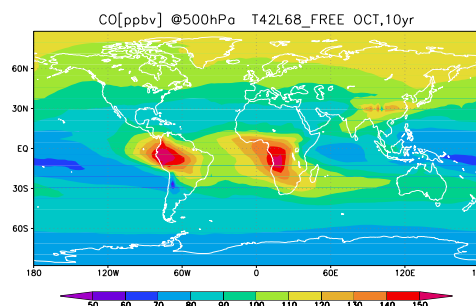


図 2 MRI-CCM2 でシミュレートされた 10 月の 500 hPa の一酸化炭素の分布 (単位は ppbv)。

カ、南米での高濃度域はバイオマス燃焼によるものである。対流圏中層 (500 hPa) で見ると、アフリカや南米での地表のバイオマス燃焼による高濃度 CO が東風で

西に輸送されているのが明瞭である。

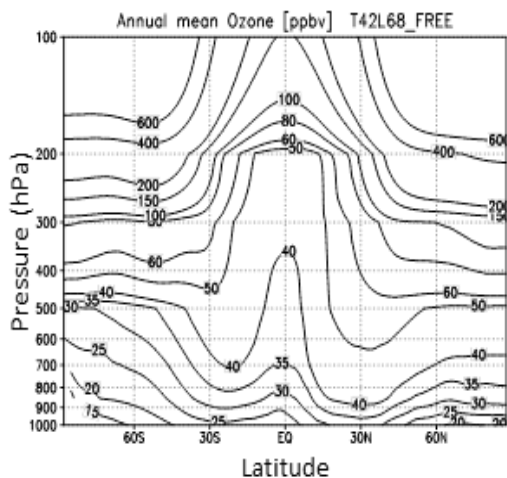


図 3 MRI-CCM2 でシミュレートされた年平均帯状平均オゾンの緯度-高度分布 (単位は ppbv)。

対流圏(1000-100 hPa)での年平均帯状平均オゾンの分布(図 3)は熱帯で強い上昇流により低濃度オゾンが対流圏上層へ伸びており、中緯度では成層圏の高濃度オゾンが侵入して来ている様相を現実的に再現している。成層圏化学がメインの化学-気候モデル MRI-CCM1 と比較すると対流圏のオゾン濃度は低くなっており、対流圏化学の導入は系統誤差を軽減する方向に働いていることを示している。大気場を観測の場にナッジングするランではより現実的な分布を示す(図省略)

#### 4. 今後の計画

MRI-CCM1 の CCMVal2 の将来予測ランのリスタート条件と地表面のエミッションの両方を与えて、MRI-CCM2 を 2080 年から 2100 年の 20 年ほどを積分し、MRI-CCM1 と MRI-CCM2 の両ランを比較し、対流圏化学の影響を解析する。

#### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：1 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：11,449 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：11,449 hrs.

#### 6. 昨年度研究課題のまとめ

##### 6.1. 昨年度研究課題名

オゾン層破壊の長期変動要因の解析と将来予測に関する研究

##### 6.2. 昨年度研究課題の目的

化学-気候モデルの複数のラン(アンサンブルラン)を行い、オゾン層の過去再現実験や将来予測実験にお

ける不確実性を減少させることを目的としている。

#### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

過去再現(1960-2006)実験：REF-B1、過去再現-将来予測(1960-2100)実験：REF-B2 についてアンサンブル実験を行い、さらに、オゾン層破壊物質や温室効果気体の影響を調べるため、ハロゲン類を 1960 年代値に固定する過去再現-将来予測(1960-2100)実験：SCN-B2b、気候を 1960 年代値に固定する(温室効果気体濃度、海面水温、海氷を 1960 年代に固定、ただし季節サイクルはある)過去再現-将来予測(1960-2100)実験：SCN-B2c を行った。REF-B2 (3 メンバー平均)や SCN-B2c では人為的なハロゲン類の経年変化に呼応して全球オゾンは 2000 年過ぎまで急激に減少し、以後はゆっくりと増加しているが、SCN-B2b では非常にゆっくりと減少している。これらのことは、オゾン全量では温室効果気体の増加による気候変化よりハロゲン類の影響ははるかに大きいことを示している。気候変化の影響は SCN-B2b の結果や REF-B2 と SCN-B2c の差で表れ、気候変化は全球オゾンを増やす方向に働く。

南極オゾンホールで見ると、ハロゲン類固定の SCN-B2b ではオゾン全量が 220DU 以下にならないのでオゾンホールは発生しない。SCN-B2b と REF-B2 を比較すると、年々変動はいずれのランでも同じ程度の大きさを示しており、全体的な変化傾向もよく似ている。オゾンホールの最大値は 2000 年付近であることが再現されており、これが消滅するのは 2070-2080 年である。また、温室効果気体増加による気候変化は影響が小さい。

#### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：1 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：62,858 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：62,858 hrs.

## 研究課題名：海水面および海中での物質の乱流拡散機構の解明と海水面を通しての物質の交換機構に及ぼすうねりの効果

課題代表者：京都大学大学院工学研究科 小森 悟  
 共同研究者：京都大学大学院工学研究科 黒瀬良一・高垣直尚  
 実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

地球温暖化およびそれに伴う異常気象の発生や海洋汚染の予測を正確に行う上で、大気・海洋間での炭酸ガスなどの物質の交換速度を正確に評価することは重要である。本研究では、うねりを伴う風波気液界面に対して数値計算を適用することにより、風波やうねりが海水面近傍の乱流構造や物質輸送に及ぼす影響を明らかにし、その影響をモデル化することを目的とする。

### 2. 研究計画

本研究では、気液界面を壁面とみなすことなく移動・変形する風波気液界面を再現可能な気液二相流の数値計算を行い、風波気液界面近傍の乱流構造および物質交換機構について詳細に調べた後、うねりの効果をも含めたより正確な物質交換モデルの考案を試みる。

### 3. 進捗状況

昨年度は移動・変形を伴う風波気液界面を再現可能な気液二相流の直接数値計算 (DNS) コードの開発に成功し、風波気液界面を通してのスカラ輸送機構について検討を行った。しかし、DNS では計算コストの制約から、その適用可能な条件が低 Reynolds 数、低 Schmidt 数 ( $Sc = 1$ ) に限られている。そこで今年度は、より高い風速もしくはより広い領域を対象とした高 Reynolds 数条件下の計算や、実際の物質 ( $CO_2$ ) の輸送を対象とした高 Schmidt 数 ( $Sc \approx 600$ ) 条件下での計算を可能とするため、DNS コードのラージ・エディ・シミュレーション (LES) コードへの拡張を行い、そのコードを用いた検討を進めている。

図 1 に LES により得られた初期気側一様流速  $U_{\infty,ini} = 7.0$  m/s、気側高さ  $\delta = 2.5 \times 10^{-2}$  m ( $u^* = 0.35$  m/s、 $Re_{ini} = 11550$ ) の条件下における気液界面を通しての局所スカラフラックスの瞬間分布を示す。DNS により得られた  $U_{\infty,ini} = 5.2$  m/s、 $\delta = 1.25 \times 10^{-2}$  m ( $u^* = 0.25$  m/s、 $Re_{ini} = 4340$ ) の条件下における分布 (後述の図 4) に比べて、スパン方向に存在する局所スカラフラックスストリークの数は増加し、より広い領域の挙動が捉えられていることがわかる。

図 2 にスカラ濃度の  $y-z$  断面分布の時間変化を  $Sc$

$= 1$  と  $Sc = 600$  の場合を比較して示す。なお、これらの計算ではともに流れ場の計算を DNS、スカラ場の計算を LES により行っている。両ケースともに、スカラは気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されるが、 $Sc = 600$  の場合のスカラ輸送量は  $Sc = 1$  の場合に比べて極端に少ないことがわかる。

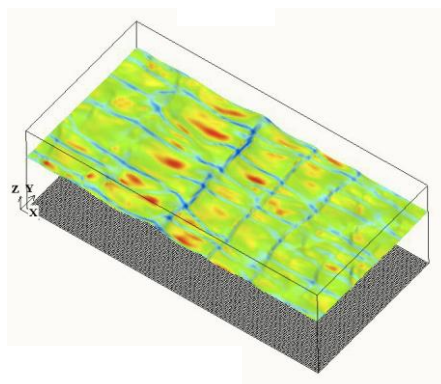


図 1 LES により得られた局所スカラフラックスの瞬間分布。

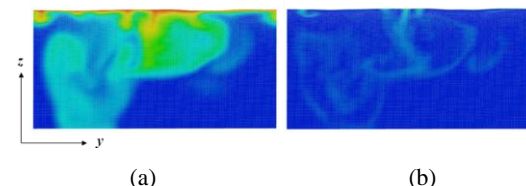


図 2 スカラ場の LES により得られたスカラ濃度の  $y-z$  断面分布。(a)  $Sc = 1$ 。(b)  $Sc = 600$ 。

### 4. 今後の計画

LES コードの開発により、うねりの計算に可能な高 Reynolds 数条件下における計算、および実際の物質 ( $CO_2$ ) の特性に近い高 Schmidt 数条件下における計算が可能となった。そこで、今後は、高 Reynolds 数、高 Schmidt 数条件下における風波気液界面を通してのスカラ輸送機構を明らかにするとともに、うねりの影響についての調査にとりかかる。

### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：3 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：4,668 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：4,668 hrs.

6. 昨年度研究課題のまとめ

6.1. 昨年度研究課題名

海水面および海中での物質の乱流拡散機構の解明と海水面を通しての物質の交換機構に及ぼすうねりの効果

6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同様。

6.3. 昨年度研究課題の成果概要

6.3.1 目的

移動・変形する風波気液界面近傍の乱流場とスカラ場を再現可能な気液二相流の直接数値計算 (DNS) コードを開発し、スカラ輸送機構を検討する。

6.3.2 計算方法

本計算では、界面追跡手法として風波気液界面の形状に合わせて計算領域全体の格子形状を境界適合座標系 (Boundary Fitted Coordinate, BFC) により時々刻々再構成する ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian Formulation) 法を採用した。図 3 に計算領域の概略を示す。x、y、z 方向をそれぞれ主流、スパン、鉛直方向として、気液界面を挟んで鉛直上側を気相、鉛直下側を液相とした。計算領域および格子点数は主流、スパン、鉛直方向にそれぞれ  $8\delta \times 4\delta \times 3\delta$ 、 $200 \times 100 \times 180$  とした。支配方程式の数値解法には有限差分法に基づく MAC (Marker And Cell) 法を用いた。本計算では、初期気側一様流速  $U_{\infty,ini}$  を 5.2m/s、初期気側摩擦速度  $u_*$  を 0.25 m/s とした。この時の気側一様流速  $U_{\infty}$  と気側高さ  $\delta (=1.25 \times 10^{-2} \text{m})$  基準の Reynolds 数  $Re_{ini}$  は 4340、気側摩擦速度と  $\delta$  基準の Reynolds 数  $Re_{\tau,ini}$  は 210 となる。またスカラ場の計算は  $t = 2.35\text{s}$  から開始した。ここで、時間  $t$  は気液界面上に風を吹かせ始めてからの時間である吹送時間を表す。本研究では、風波が発達する乱流場 (以下、風波乱流場と呼ぶ) と、界面形状を平滑面に固定し風波を発達させない乱流場 (以下、平滑乱流場と呼ぶ) の 2 ケースについて計算を行った。

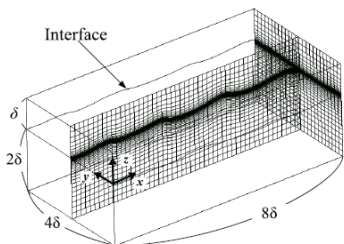


図 3 計算領域と計算格子。

6.3.3 計算結果および考察

図 4 に風波乱流場および平滑乱流場での  $t = 4.5\text{s}$  における気液界面を通しての局所スカラフラックスの瞬間

分布をそれぞれ示す。局所スカラフラックスは風波乱流場の方が平滑乱流場より高い値をとることがわかる。また、風波乱流場と平滑乱流場の局所スカラフラックス分布にはともに主流方向にストリーク状の低い値をとる領域が存在するが、その低局所スカラフラックスストリークは風波乱流場の方が非一様に分布していることもわかる。このような低局所スカラフラックスストリークは、液側の界面近傍領域に発生するバースティング運動に寄与する縦渦型の (主流方向に軸をもつ) 乱流渦が界面付近のスカラを輸送するために現れることが知られている。従って、風波乱流場では、波動運動が乱流の発達を促進し、液側の界面近傍におけるバースティング運動の発生を活発にするため、平滑乱流場に比べて局所スカラフラックスが高く、低局所スカラフラックスストリークが非一様に分布するようになると考えられる。図 5 にスカラ濃度の  $x-z$  および  $y-z$  断面分布の時間変化を示す。風波乱流場のスカラは気液界面から縦渦を意味するマッシュルーム状に巻き込まれながら下方へと輸送されることがわかる。

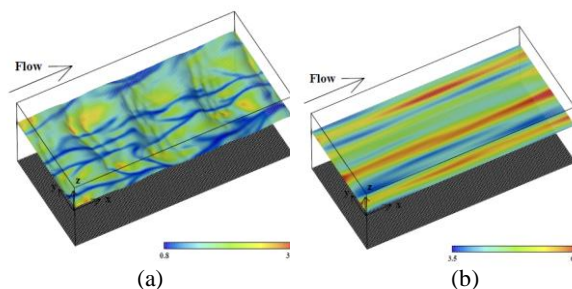


図 4 局所スカラフラックスの瞬間分布。(a) 風波乱流場。(b) 平滑乱流場。

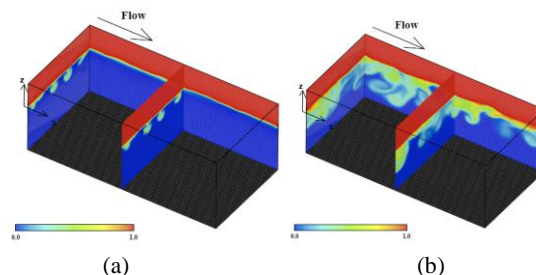


図 5 スカラ濃度の  $x-z$  および  $y-z$  断面分布 (風波乱流場)。(a)  $t = 3.0 \text{ s}$ 。(b)  $t = 5.0 \text{ s}$ 。

6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数 : 3 CPU 時間 1 ノード未満 : 72 hrs, 1 ノード : 21,765 hrs, 2 ノード : 0 hr, 計 : 21,838 hrs.

## 研究課題名：湿潤惑星大気用数値モデル群の開発および基礎的実験

課題代表者：神戸大学大学院理学研究科 林 祥介  
 共同研究者：九州大学大学院理学研究科 中島健介  
 神戸大学大学院理学研究科 高橋芳幸・納多哲史  
 北海道大学大学院理学研究科 石渡正樹・小高正嗣・山下達也  
 実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

本研究の目的は、地球を含む惑星大気パラメータ空間で数値計算を可能とする数値モデル群を開発し、その実証としての基礎実験を実行することにある。数値実験を用いて湿潤大気の高多様性を探索し、これに地球大気を位置づけることによりその認識を深めることを目標とする。

本研究で計算対象とするものの 1 つは系外惑星の 1 つの姿であると考えられている同期回転惑星の全球循環である。昼半球と夜半球が恒常的に存在する水惑星における循環構造、および暴走温室状態でも全球凍結状態でもない地球的な環境が実現される条件を考察する。もう 1 つの計算対象は凝結性成分を主成分とする大気中の雲対流である。二酸化炭素のみから成る大気における循環構造および雲分布を求め、微量成分が凝結する地球の雲対流との相違を考察する。主成分が凝結する場合の対流に関する考察は、大気が暴走温室状態に接近した場合の対流構造あるいは過去火星における温暖気候の存在条件に関する議論に対して示唆を与えると期待される。

### 2. 研究計画

同期回転惑星設定の計算は昨年度に引き続き、全球静水圧モデル DCPAM (高橋ら、2009) を用いて行う。昨年度は T21 または T42 の低分解能計算によって循環パターンの自転角速度依存性を調べることに留まった。そこでは自転角速度の値に応じて 3 種の循環パターンが現れることが示されていた。今年度は T319 程度までの分解能変更実験 (並列計算) を行い、循環構造の分解能依存性を調査する。また、昼夜半球間の顕熱・潜熱輸送に対する昼夜間対流・大気波動・小スケール擾乱などの寄与を明らかにする。これらの結果に基づき低分解能計算で得られていた結果の正当性に関する検討を行う。

主成分が凝結する大気における雲対流に関しても、二酸化炭素大気の対流に関する数値実験を昨年度から継続して行う。使用するモデルは鉛直雲対流モデル deepconv (杉山ら、2009) である。昨年度は、統計的平衡状態を得ることができず並列計算を必要とする大

規模計算には至らなかった。今年度は、計算コードの正当性の確認を行い 2 次元領域での平衡状態を求めた後に、これを大領域化し本格的なパラメータ計算を実施するとともに 3 次元化を実現しその実装実験を行う。

### 3. 進捗状況

DCPAM を用いた同期回転惑星設定における高解像度計算に向けた予備的な実験として、分解能を T85L16 とした計算を行った。その結果を図 1 に示す。これは太陽定数、自転角速度ともに地球の値を与えた場合に得られたものである。昨年度行った低分解能実験 (T21 の結果を図 2 に示す) と比較して地表面温度分布も降水量分布もおおむね同様のパターンを示している。しかし、中高緯度における表面温度の値が低い、夜半球

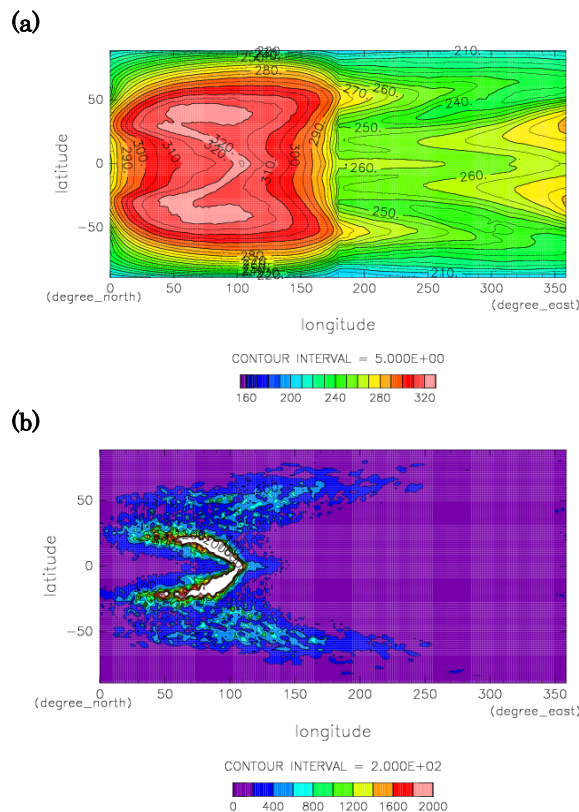


図 1 同期回転惑星設定における数値計算結果。T85L16 の結果。経度 0 度から 180 度までが昼半球、180 度から 360 度までが夜半球である。(a) 表面温度の水平分布。等値線間隔は 5 [K]。(b) 凝結加熱量の水平分布。等値線間隔は 200 [W/m<sup>2</sup>]。白い部分は 2000 W/m<sup>2</sup> 以上を示す。

における降水域が狭いなどの差異も生じた。これらの差異と循環構造のモデル表現の変化との整合性に関する検討にはまだ着手していない。

deepconv を用いた主成分凝結対流に関しては、今年度前半に、温位と雲密度の保存性および数値コードのチェックを行い、雲密度移流の差分計算で生じてしまう負の雲密度の処理に問題があることを確認するところまで行った。現在は、負の雲密度の処理を改善し、統計的平衡状態を得るための長時間積分を再実行中である。

#### 4. 今後の計画

今年度の後半においては、DCPAM を用いた同期回転惑星計算に関しては、T319 程度まで分解能を順次増大させた計算を実施する。自転角速度の値としては地球の値、地球の値の 1/13、0 を用い、地球の年平均日射分布を与えた場合との比較計算を同時に行う。これらの実験により、循環構造の分解能依存性を調べるとともに、熱収支やエネルギー輸送における大規模循環・大気波動・小スケール擾乱などの寄与に関して、地球での知見との比較検証的な考察を行う。これらの結果に基づき、低分解能実験で得られていた循環構造の自転角速度依存性に関する結果の正当性が検証されると期待される。

また、deepconv を用いた主成分凝結対流の数値計算に関しては、2 次元領域における統計的平衡状態を求め初期温度分布や雲微物理過程への依存性を調査する。これに加えて、水平方向に 1 万キロスケール程度の大規模並列計算、3 次元計算の実装実験を行う。その後には、全球静水圧モデルと鉛直雲対流モデルの双方を用いた、凝結性成分が増加した場合における大気構造の考察へと進む予定である。なお、deepconv の完成後は、同期回転惑星夜昼対流の雲分解実験にも着したい。

#### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：7 CPU 時間 1 ノード未満：553 hrs, 1 ノード：325 hrs, 2 ノード：13 hrs, 計：891 hrs.

#### 6. 昨年度研究課題のまとめ

##### 6.1. 昨年度研究課題名

湿潤惑星大気用数値モデル群の開発および基礎的実験

##### 6.2. 昨年度研究課題の目的

昨年度課題における目的も基本的には今年度と同様である。昨年度は数値モデル群の整備を行った後に、

大規模計算の開始をめざしていた。しかし、次節で述べる理由によりそこまで到達することができなかったため、今年度に継続されている。

#### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

deepconv を用いた計算として、主成分凝結対流に関する数値実験を行った。しかし、そこでは温位偏差が単調増加を続け計算コードの正当性確認が必要となった。このため、並列計算を必要とする大規模計算には至らなかった。DCPAM を用いた計算としては、同期回転惑星設定における数値実験を実施したが、低分解能計算による自転角速度依存性の調査を行うのに留まった(図 2 には地球の自転角速度を与えた場合の結果を示す)。

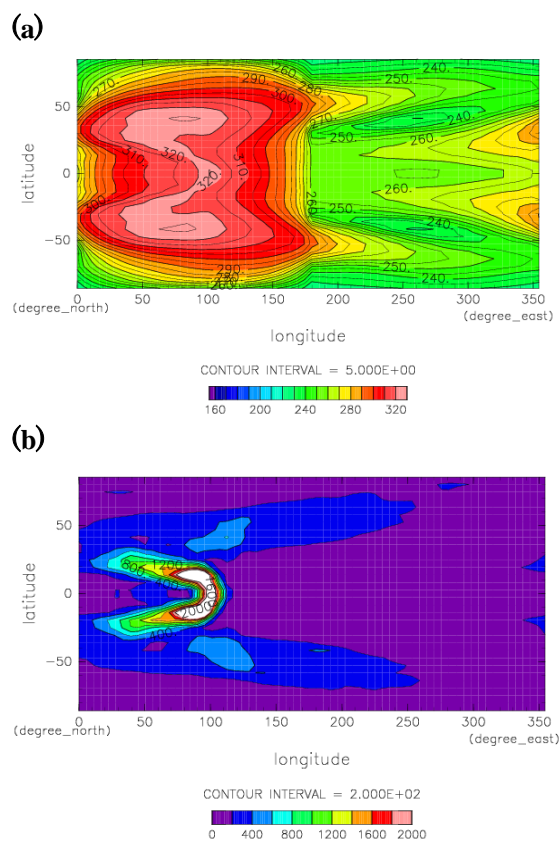


図 2 低分解能実験で得られた同期回転惑星設定における数値計算結果。T21L16 の結果。(a) 表面温度の水平分布。(b) 凝結加熱量の水平分布。等値線間隔などは図 1 と同様。

#### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：8 CPU 時間 1 ノード未満：1,861 hrs, 1 ノード：0 hr, 2 ノード：0 hr, 計：1,861 hrs.

## 研究課題名：受容体－化学物質間相互作用解析に基づく生体毒性予測システムの開発

課題代表者：立教大学理学部化学科 常盤広明

共同研究者：国立環境研究所環境リスク研究センター 青木康展

日本大学医学部 山田幸子

立教大学極限環境情報センター 山岸賢司

実施年度：平成 21 年度～平成 21 年度

### 1. 研究目的

近年、生体毒性のない有用な新規化学物質を環境に負荷をかけず高効率に設計・開発するために、*in silico*（コンピュータ支援型）分子設計技術が必須のアプローチ手法となってきている。本研究では、生体高分子の高精度全電子計算手法である *ab initio* フラグメント分子軌道法 (FMO) 法の開発段階を、次のステージへと進めて、ターゲットタンパク質受容体と各種リガンドとの仮想スクリーニングを通して、スーパーコンピュータ上で実行可能な『生体毒性予測システム』を構築し、多種多様な化学分子種に対する高効率な毒性予測を行うことを目指した。

### 2. 研究計画

実際の生体毒性予測には、アミノ酸残基の置換や複数のリガンド分子の組み合わせ（数百パターン）の解析が必要であるため、従来までの方法では、時間的にも資源的にも不可能であった。そこで、スーパーコンピュータなどによる大規模高速計算を効率的に利用することによって、ターゲットタンパク質を網羅的に解析する計画を立てた。すでに開発済みの電子相関法のプログラムエンジン群を用いることによって、生体毒性予測に欠かすことのできない、疎水性残基とのファンデルワールス相互作用（分散力）の計算が高速に行えるのも、本研究の大きな利点である。また本解析法は、実験的アプローチが困難な系の解析にも適用が容易であり、危険性がなく環境に全く負荷を掛けない点も特筆される。本年度は、プロジェクトの準備段階と位置付けて、部分構造最適化を利用した FMO 法に基づくドッキング手法をさまざまな系への応用し、理論的生体毒性システムの構築を試みた。

### 3. 成果概要

百花繚乱のコンピュータ支援分子設計システムは、その多くが経験的パラメータを含む分子力学法に基づいており、その精度や適用対象系に制限がある。それらに対して、本研究は一線を画し、従来不可能といわれたタンパク質や DNA などの生体高分子に対する *ab initio* 全電子計算に基盤を置く新たな毒性評価システムである。

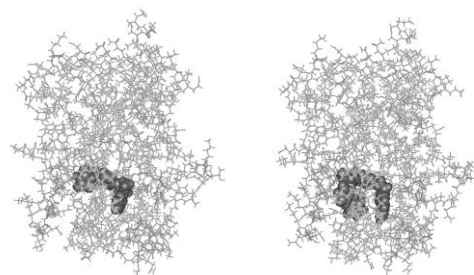


図 1. X 線結晶構造 (a)PPAR $\gamma$ /rosiglitazone 複合体、  
(b) PPAR $\gamma$ /farglitazar 複合体

核内受容体 PPAR $\gamma$  の強力なアゴニストである *rosiglitazone* などの TZD 誘導体はインスリン抵抗性改善薬として実用的に用いられているが、浮腫、肥満、肝障害などの化学毒性が問題となっている。これらの副作用はチアゾリジン環の相互作用に基づくため、非チアゾリジン化合物の結合性解析が待たれていた。本研究によって、非チアゾリジン環化合物のひとつである *farlitazar* が、従来の TZD 誘導体とは異なる結合様式を持つことが明らかとなった。今後、化学毒性のない新規薬物開発の突破口となることが期待される。

### 4. 今後の計画

今後、化学薬物毒性などの副作用のない生理作用発現に重要となる LBD 全体の構造変化を *ab initio* レベルで達成することや、リガンド結合に伴うそれらの構造変化を動的にトレースするような分子動力学解析の実行などが課題となっている。また、ターゲットレセプターの全体の構造変化については、大規模な最適化を必要とするため、現在までのところ、計算資源の制限から実行には至っていない。今後、多層化や PCM モデルの採用によって、溶媒効果やエントロピー項を含む自由エネルギー変化なども正しく考慮した計算も必要とされる。

### 5. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：2 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：0 hr, 2 ノード：0 hr, 計：0 hr.

## 研究課題名：MIROC 中解像度および氷床力学モデルと炭素循環モデルを用いた古気候数値実験と温暖化予測

課題代表者：東京大学大気海洋研究所 阿部彩子  
 共同研究者：東京大学大気海洋研究所 吉森正和・岡 顕・北澤達哉・小山佑介・浅田真也・住吉政一郎・若松俊哉  
 実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

本研究では、MIROC 気候モデルに氷床モデルおよび炭素循環モデル(海洋は NPDZ モデルや堆積モデル、陸域は LPJ 動的植生炭素循環モデル)を併用できるよう、必要な結合作業やモデル開発を行う。さらに、最近ではもっとも変化シグナルとフォーシングがはっきりしている最終氷期などの古気候実験を行い、大気水循環のほか、熱塩循環、海洋炭素循環、陸域炭素循環、植生、氷床、海洋トレーサー、ダストなどの変化特性を調べる。またフィードバック解析などの解析を行って変動特性を明らかにしていく。本年度は特に、将来の海水準予測にも関係する、過去における急激な気候変動と氷床の融解イベントの関係について調べる。

### 2. 研究計画

まず、10 万年スケールの氷期・間氷期サイクルを現実的にシミュレートすることができる 3 次元氷床モデル(IcIES)の最新バージョンを国立環境研究所のスーパーコンピュータ SX-8 に移植する。氷期において、北大西洋に流入した氷床からの融け水が海洋循環を通じて気温変化をもたらし、氷床にフィードバックする影響を調べるために、別途作成された気温変化パターンを氷床モデルに外部入力として与える。これにより、数千年スケールで起きた融け水イベントが氷期サイクルに与える影響を調べる。与える気温変化パターンの空間分布やタイミング、大きさなどが結果に与える影響についても調べる。

### 3. 進捗状況

3 次元氷床モデル(IcIES)を国立環境研究所のスーパーコンピュータ SX-8 に移植した。これまで与えてきた日射や温室効果ガスに加えて、新たな融け水由来の数千年スケールの気温変動(以降、DO 振動)を外部境界条件として与えるために、プログラムの一部を改変した。

まず、標準実験として DO 振動入力のない最終氷期サイクル実験を行い、次にあらかじめ大気海洋結合大循環モデルによって計算された融け水流入による気温

変動応答を現実的な振動のタイミングで与えた。両者の比較から、DO 振動入力のある場合には約 6 万年以前では、約 2 万年の日射変動のスケールでの氷床体積変化率の変動幅が増幅されることがわかった(図 1)。一方、約 6 万年以降では、顕著な変化は見られなかった。これらの結果をより詳しく調べるために、DO 振動入力として与える気温変化パターンを空間一様なものに変えて実験を行った。さらに、DO 振動入力のタイミングも現実的なタイミングから 5000 年周期のものに 2000 年周期のものに変えて実験を行った。その結果、空間分布やタイミングを変えても、本質的な結果は変わらないことがわかった。

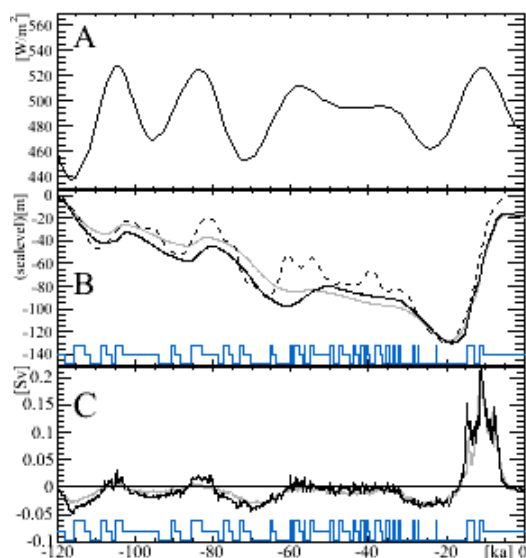


図 1 DO 振動が最終氷期サイクル(120,000 年前から現在)の氷床に及ぼす効果：A)北緯 65 度の日射の変動；B)氷床の体積(海水準)、破線は観測、灰色線は DO 振動入力なし、黒実線は DO 振動入力あり；C)氷床体積変化率、灰色線は DO 振動入力なし、黒実線は DO 振動入力あり。B と C の下部の凹凸は DO 振動のタイミングを示す。凹が寒冷期、凸が温暖期。

これまでの実験では、DO 振動を氷床モデルの外部入力として与え、その起源については明確に規定してこなかった。ここでは、一つ前の DO 振動により励起

された氷床体積変化によってもたらされた融け水量の変化が次の DO 振動を引き起こす可能性を検証するため、氷床体積変化の大きさを定量的に検証した。その結果、大気海洋大循環モデルで数千年スケールの DO 振動を引き起こすのに十分な約 0.01 Sv (1 Sv =  $10^6$  m<sup>3</sup>/s) に匹敵する氷床体積変化が起きていることが確認され、DO 振動が大気・海洋・氷床の相互作用による自励的振動である可能性が否定できないことが明らかになった。

#### 4. 今後の計画

これまでの実験については氷床の体積やその変化量に注目してきたが、空間分布などの詳細はまだ十分に調べられていない。そこで、今後はより詳細な解析を行い、特に、振る舞いの異なる、約 6 万年以前と以降の比較や急激に氷床体積が変化する退氷期について調べる。また、観測との整合性についても詳しく調べる予定である。さらに、6 万年以前と以降の大きな違いが氷床の大きさによるものか日射の変動の大きさによるものか定かではないため、日射の変動を変えた感度実験を行うことにより明らかにする。

#### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：8 CPU 時間 1 ノード未満：939 hrs, 1 ノード：2,560 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：3,499 hrs.

#### 6. 昨年度研究課題のまとめ

##### 6.1. 昨年度研究課題名

MIROC 中解像度および氷床力学モデルと炭素循環モデルを用いた古気候数値実験と温暖化予測

##### 6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同様

##### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

MIROC による温暖化実験および最終氷期再現実験のほか、以下のようなさまざまな古気候数値実験およびそれらの結果の解析を通じて、地球温暖化への知見を深めるための研究を実施した。(a) 最終氷期における海洋深層循環の弱化的メカニズムを調べるための海洋大循環モデル COCO による感度実験、(b) 最終氷期における海洋生物生産の変化のメカニズムを調べるための海洋中の炭素・鉄循環のシミュレーション、(c) モデルの気候感度がどのようなフィードバックによって決められているのかを定量的に調べるツールの作成および

それらを用いた解析。

最終氷期における海洋深層循環の弱化的メカニズムを調べるための海洋大循環モデル COCO による感度実験により、海面冷却の強さとともに風応力の違いが海洋深層循環の応答に大きく影響することがわかった。また、最終氷期における海洋生物生産の変化のメカニズムを調べるための海洋中の炭素・鉄循環のシミュレーションを行い、南大洋の応答には海氷の広がりによる短波放射量の減少が重要であることなどが示された。

パラメータアンサンブルのフィードバック解析により、気候感度や将来予測を確率的に表現するだけでなく、その不確実性の原因となる物理プロセスの同定にまで踏み込んで解析が可能になったことは意義深い。また、古気候と将来気候を広いパラメータ空間で結び付けることにより、モデルの特性の理解や過去の事実から将来の気候感度の制約への発展が可能になった。間接的ではあるが、構造的な不確実性の重要性が認識されたことも非常に重要である。これらの結果は、使用されたモデル応答の解釈だけでなく、他国のモデルとの比較や気候システムの理解にとっても本質的に重要であり、国際的な貢献度も大きいと考えられる。

#### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：7 CPU 時間 1 ノード未満：2,562 hrs 1 ノード：17,968 hrs, 2 ノード：0 hr, 計：20,530 hrs.

## 研究課題名：NICAM による雲降水システムの研究

課題代表者：東京大学大気海洋研究所 佐藤正樹  
 共同研究者：東京大学大気海洋研究所 柳瀬 亘  
 実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

台風やスコールラインなどのように積雲対流が組織化してできる雲降水システムは、暴風や豪雨などの顕著現象を引き起こし、また、潜熱解放や放射などを通じて気候に大きな影響を与えている。このため、雲降水システムは現在や将来の地球環境を理解する上で重要な現象である。従来の全球モデルでは解像度や物理過程の扱いの点から、雲降水システムを直接に表現することはできなかった。

本研究で使用する全球モデル NICAM は、非静力学方程式系に基づいた格子モデルであり、格子間隔 10km 以下の解像度のシミュレーションを行うのに適している。さらに従来のような積雲パラメタリゼーションは用いずに、雲水・雲氷・雨・雪・あられを考慮した雲微物理を計算して雲降水システムを直接に表現することができる。また、気候モデルとして使用することも前提に開発されているため高度な放射スキームや陸面スキームも組み込まれている。このように、NICAM は雲降水システムも直接に表現できる全球気候モデルとして、地球温暖化などの評価をするのに今後ますます重要となることが期待される。これまでは地球シミュレータを用いて全球一様な 3.5, 7, 14 km の格子間隔でシミュレーションを行い、熱帯低気圧の分布やマッデン・ジュリアン振動の再現に成功している。

本課題では NICAM で雲降水システムの基礎的なプロセスを理解するため、特定の領域だけ格子間隔を細かくとるストレッチ格子というシステムを利用する。これまでに国立環境研究所の SX-8R を利用して、太平洋上の台風や雲降水システムの分布などのシミュレーションが行われた。このような局所雲解像シミュレーションで得られた基礎プロセスの知見や検証は、同じモデルを用いた全球雲解像シミュレーションの結果を理解する上でも役立つ。

### 2. 研究計画

本課題は大きくは 2 つのテーマに分けられる。1 つ目は個々の雲降水システムの再現とそのメカニズムの理解である。具体的には北西太平洋や北インド洋の熱帯低気圧（台風やサイクロンの総称）の発生過程に取り組んできた。熱帯低気圧の発生過程は雲降水システ

ムの力学が重要であると考えられる現象の一つである（詳細は「昨年度研究課題のまとめ」で述べる）。2 つ目は、雲降水システムの鉛直構造やサイズなどの統計的分布の再現性について、近年に発展した衛星観測技術を利用して検証することである。雲降水システムの統計的分布が現実的に再現できることにより、地球温暖化予測などの不確実性を減らすことが期待される。

### 3. 進捗状況

昨年度に行った台風 Fengshen の発生過程の研究（後述）を継続している。また、今年度は雲降水システムの統計的分布の研究に向けての準備を進めている。熱帯降水観測衛星 TRMM による観測データを、NICAM シミュレーションの結果と直接に比較するために Matsui et al. (2009)で提案された TRMM Triple Sensor ThreeStep Evaluation Framework (T3EF)の手法を利用する。T3EF では NICAM の雲微物理量の出力結果を用いて放射伝達方程式を解き、衛星のリモートセンシングと同じ物理量を求めることができる。例えば図 1 では、太平洋での各格子点でのレーダーエコー頂高度（横軸）と赤外輝度温度（縦軸）との関係を TRMM 観測と NICAM シミュレーションで比較したものである。このような分布を調べることで、NICAM の雲降水システムの統計的な再現性を検証することができる。

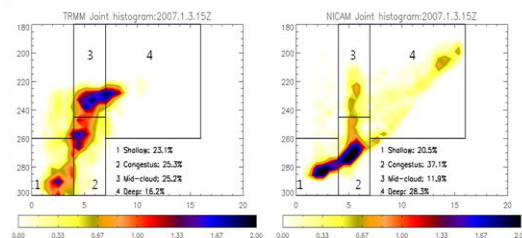


図 1 レーダーエコー頂高度（横軸）と赤外輝度温度（縦軸）の頻度分布。(a) TRMM の観測データ、(b) NICAM のシミュレーション結果。2007 年 1 月 3 日 0015UTC の 20°S-20°N, 160°E-160°W の領域で比較。

### 4. 今後の計画

現時点では衛星観測と比較する事例が十分ではないので、今後は様々な季節や領域の雲降水システムのシ

ミュレーションを行う。体系的な類似点・相違点を明らかにすることで NICAM の雲降水システムの再現性を改善していき、さらに、衛星観測だけではわからないプロセスを解明していく。また、TRMM 以外の衛星観測のデータも利用していく予定である。

## 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：2 CPU 時間 1 ノード未満：0 hr, 1 ノード：2,342 hrs, 2 ノード：3,542 hrs, 計：5,884 hrs.

## 6. 昨年度研究課題のまとめ

### 6.1. 昨年度研究課題名

NICAM による雲降水システムの研究

### 6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同様。主に熱帯低気圧の発生過程を調べた。

### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

NICAM のストレッチ格子システムを利用し、台風の発生過程について調べた。熱帯低気圧はある程度の強さの渦が最初にあると自発的に発達することが知られているが、そもそもの最初の渦がどのようにできるかという発生過程については十分に理解がなされていない。気象衛星の雲画像では積雲対流の集団が次第に台風へと組織化していく様子がわかるが、積雲対流がどのように台風の渦をつくるかは自明ではない。本研究では 2008 年に北太平洋西部に発生した台風 Fengshen の発生過程のシミュレーションを行い、そのメカニズムについて解析している。

昨年度は基本的な構造の変化について主に調べた。図 2 は台風の発生前後の動径高度分布の違いを示している。台風発生後には半径 50 km 付近の下層に接線風のピークが見られ (図 2b)、高度 1 km 以下の境界層では台風中心に風が吹き込み (図 2d)、積雲対流も台風中心に集中していた (図略)。一方で、台風発生前には接線風のピークは広く弱く存在し (図 2a)、境界層での吹き込みは見られず (図 2c)、積雲対流も散在していた。積雲対流が台風スケールの渦をどのように作るかを解析中である。

また、昨年度に行ったシミュレーションでは台風の移動経路の再現性が良くなかった。境界層スキームにより台風の降水分布が変化し、それが原因となって移動経路の変化を生じさせている可能性が考えられる。本年度は境界層スキームなどを改良して、台風のライフサイクルの再現性を改善できる可能性を調べている。

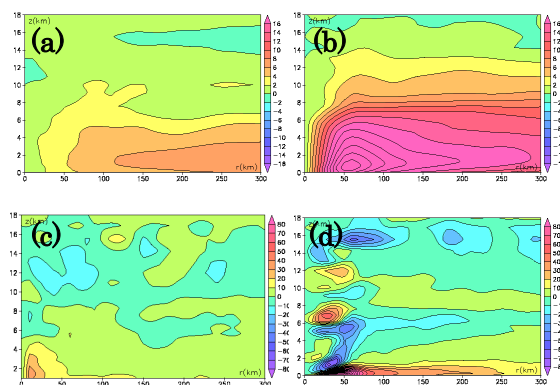


図 2 台風 Fengshen の動径高度分布。(a), (b) 接線方向の風。(c), (d) 動径方向の風。擾乱中心を原点とした円筒座標系にて、軸対称成分 (接線方向への平均) を求めた。(a) (c) は台風発生前 (16 日 00UTC)、(b) (d) は台風発生後 (19 日 00UTC)。

### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：2 CPU 時間 1 ノード未満：2 hrs, 1 ノード：868 hrs, 2 ノード：16,008 hrs, 計：16,877 hrs.

## 研究課題名：雲解像モデルを用いた豪雨と暴風の数値シミュレーション

研究課題代表者：名古屋大学地球水循環研究センター 坪木和久

共同研究者：名古屋大学地球水循環研究センター 篠田太郎・大東忠保・加藤雅也・吉岡真由美  
前島康光・日置智仁・岡本宏樹

実施年度：平成 21 年度～平成 21 年度

### 1. 研究目的

名古屋大学地球水循環研究センターでは、雲・降水システムとそれに伴う激しい気象の研究を、雲解像モデルを用いて進めている。本研究課題では、雲・降水現象のシミュレーションのために開発された雲解像モデル CReSS を用い、近年、災害としても社会的に関心の高くなっている台風や局地豪雨、豪雪などの高解像度シミュレーションを行い、これらの構造やプロセスおよびメカニズムを明らかにする。

### 2. 研究計画

平成 21 年度は 2008 年 2 月に発生した冬季日本海上の小低気圧、台風 0712 を用いた台風中心の気圧低下のメカニズムと、2009 年 1 月の北陸の降雪をもたらした線状降雪帯について、雲を解像する高解像度シミュレーションを行った。これら 3 事例の現象についての降水量、水蒸気量の量的評価および構造・成因を明らかにした。

### 3. 成果概要

#### 3.1 冬季日本海上の小低気圧の感度実験

2008 年 2 月 4 日に日本海上に発生した小低気圧の形成過程における凝結の効果を調べるために、湿潤、乾燥大気それぞれの設定でシミュレーションを行った。両ケースとも順圧不安定によって擾乱が形成されるが、湿潤大気では擾乱中心部での上昇流に伴う水蒸気の凝結によって擾乱の渦度が強化された。

#### 3.2 北陸西部沿岸の停滞性線状降雪帯

冬季の北陸地方西部沿岸では、西南西から東北東方向に伸びる線状降雪(降水)帯が停滞する事例がしばしば観測される。このような線状降雪帯は、季節風と陸側からの風の収束により形成され、停滞することが知られている。本研究では、2009 年 1 月 24 日～26 日に発生した山陰から北陸沿岸に伸びる停滞性線状降雪帯の事例について数値実験を行い、その季節風との収束を形成させる陸側からの風の形成要因を調べた。

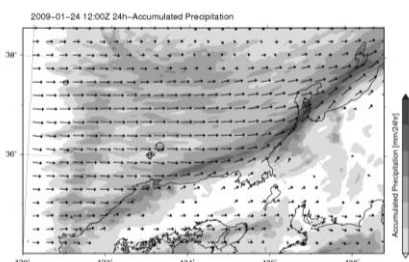


図 1：CReSS 計算結果 24 日 12UTC～25 日 12UTC 陰影。24 時間積算降水量 矢印:高度 500 m の 24 時間平均風。

コントロールランの結果は、気象庁レーダーの観測値と比較して、降水量、停滞位置をとともによく再現した(図 1)。環境場の西寄り風と、陸側の南寄り風との収束の場に線状降水帯が再現された。地形と海陸分布の影響を取り除いた感度実験およびトラジェクトリー解析から、この線状降雪帯を形成・維持させている環境場の西風と陸側の南寄り風との収束は、海陸の熱的性質の違いに起因する下層大気温度によって生じた気圧傾度力によりもたらされていることが示された。海陸の粗度の差と地形による迂回効果は、その収束を補助的に強める役割であることも示された。

#### 3.3 発達する台風の気圧低下メカニズム

発達する台風で中心気圧が低下していくのは、空気が中心部から外側へ取り除かれるからであると考えられる。眼の壁雲域の上層に見られる強い吹き出しだけでは、気圧低下につながる空気の排出を説明できない。本研究では台風 0712 号について数値実験を行い、トラジェクトリー解析を用いて中心部の空気塊のラグランジュの時間変化を調べた。トラジェクトリー解析では、中心部にある空気塊が眼の壁雲域を通過して対流圏上層まで上昇し、高度 12 km から 16 km 付近のアウトフローによって外側へと吹き出していることが示された(図 2)。対流圏全層にわたって、中心部の空気が眼の壁雲域を通過して対流圏上層から外側へと排出されることで、台風の中心気圧の低下を引き起こすことを示した。

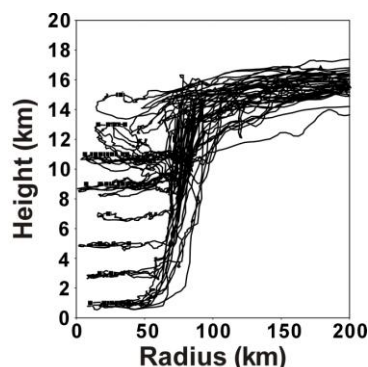


図 2：フォワードトラジェクトリー解析の結果。実践は個々の軌跡、■が出発地点、▲が到達地点を示す。

### 4. 今後の計画

他の事例の高解像度シミュレーションを行い、構造や形成過程を明らかにしていく。

### 5. 計算機資源の利用状況

実行ユーザ数：8 CPU 時間 1 ノード未満：4 hrs, 1 ノード：86 hrs, 2 ノード：6,019 hrs, 計：6,100 hrs.

## 研究課題名：GOSAT データ処理運用システムの定常運用および維持改訂

課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター 渡辺 宏

共同研究者：国立環境研究所地球環境研究センター 横田達也・Shamil Maksyutov・松永恒雄・  
開 和生・河添史絵・林 謙二・石原博成・信田浩司・小林弘幸・宮坂隆之・菊池信行・  
國島 和・松澤邦裕・川崎裕之・小島伸一・幸 昭

実施年度：平成 22 年度～平成 23 年度

### 1. 研究目的

温室効果ガス観測技術衛星 (GOSAT) は平成 21 年 1 月 23 日に打ち上げられた。国立環境研究所 (NIES) では、GOSAT の観測データの high-level 処理を行い、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 濃度を算出し、それら濃度分布に基づいて、大気輸送モデルを利用して、亜大陸規模別に炭素の吸収・排出量を推定するなどの役割を担っている。

### 2. 研究計画

GOSAT により観測されたデータは、JAXA/EORC にて受信し、レベル 1 処理が行われた後、NIES に設置された GOSAT データ処理運用施設 (GOSAT DHF) で high-level 処理を行い、レベル 2、3、4 プロダクトを作成する。データ処理には、3 つの施設の計算機 (GOSAT DHF 内に設置する計算機、NIES スーパーコンピュータ、東京大学 T2K オープンスパコン) を連携して利用する。NIES スーパーコンピュータは、レベル 2 処理の中で CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> のカラム濃度算出の前処理としての大気輸送モデル計算処理及びエアロゾル輸送モデル計算処理、レベル 4 の中で炭素収支モデル計算処理、大気輸送モデル計算処理に利用される。

### 3. 進捗状況

現在、定常的なデータ処理を実施している。

CO<sub>2</sub> カラム濃度算出の前処理としての大気輸送モデル計算及びエアロゾル輸送モデル計算は観測開始から継続的に処理している。これらの結果を GOSAT のそれぞれの観測位置、時刻に対応して空間、時間的に補間してカラム濃度算出時の先験値として利用する。大気輸送モデル計算結果の例 (7 月 1 日 6 時 UT) を図 1 に示す。2009 年 7 月 1～31 日の間に観測した FTS の短波長赤外 (SWIR) バンドから求めた CO<sub>2</sub> カラム濃度の全球分布を図 2 に示す。アルゴリズムの改訂結果を反映させた FTS SWIR レベル 2 プロダクトの新バージョン (V01.xx) を 2010 年 8 月 24 日に一般に公開した。旧バージョンとの相違点の 1 つとして、旧バージョンで北半球の春～夏にサハラ砂漠～アラビア半島にかけて見られた確からしくない高濃度が抑えられた。次期バー

ジョンに向けてアルゴリズムの改善と、品質条件のチューニング検討を進めている。

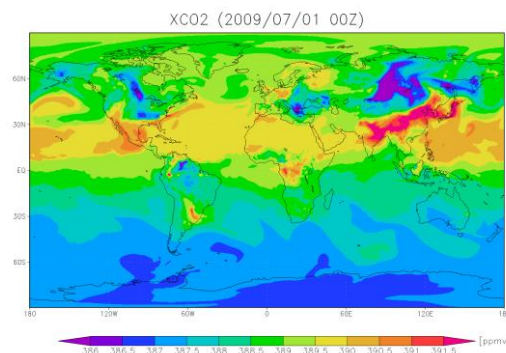


図 1 大気輸送モデル計算処理結果。2009 年 7 月 1 日 6 時の例。

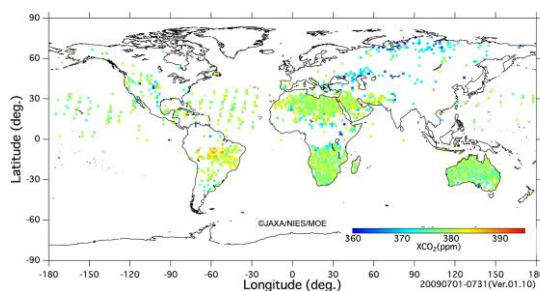


図 2 SWIR バンドから求めた CO<sub>2</sub> カラム濃度。2009 年 7 月 1-31 日の観測例。

### 4. 今後の計画

レベル 4 処理については、現在準備を進めており、今年度後半より公開を開始する予定である。

データ処理アルゴリズムの改訂やシステムの維持・改訂を行い、プロダクトの精度向上を目指す。

また、算出されたレベル 2 プロダクトは、プロダクトの検証作業を経たのち、ユーザへ配布を行っている。レベル 3 プロダクトも順次公開している。

### 5. 計算機資源の利用状況 (2010 年 4 月～9 月)

実行ユーザ数：17 CPU 時間 1 ノード未満：54 hrs, 1 ノード：0 hr, 2 ノード：0 hr, 計：54 hrs.

## 研究課題名：大気輸送モデルとインバースモデルによる温室効果ガス収支量の推定とその高精度化に関する研究 (Application of transport models for inverse modeling of the greenhouse gas fluxes)

研究課題代表者：国立環境研究所地球環境研究センター Shamil Maksyutov

参加研究者：国立環境研究所地球環境研究センター Dmitry Belikov・Vinu Valsala・白井知子・古山祐治・小田知宏・齊藤誠・齊藤龍・佐伯田鶴・高木 宏志  
総合地球環境学研究所 金 憲淑

実施年度：平成 20 年度～平成 22 年度

### 1. Objective

We study the global and regional distributions of CO<sub>2</sub> and methane surface fluxes with the ground-based, aircraft observations and GOSAT satellite observation data, using forward and inverse tracer transport modeling schemes.

### 2. Research plan

Our current research focuses on the use of the CO<sub>2</sub> and methane observations of the whole troposphere as observed by monitoring programs and GOSAT satellite. Numerical simulation of CO<sub>2</sub> and methane is used to explain seasonal and interannual variations of the greenhouse gases and other relevant tracers along with observations by NIES monitoring programs over Siberia, East Asia, the Pacific Ocean, and by JAL aircraft. To provide more accurate estimation of the surface fluxes with inverse modeling, the atmospheric transport model and inversion algorithms have to be improved.

### 3. Progress

Atmospheric tracer transport model algorithms were improved by applying isentropic vertical coordinates in the stratosphere which led to increasing stratospheric transport delay for stable tracers closer to observed values (Fig .1). The transport model was utilized in the inverse modeling of the regional-level CO<sub>2</sub> fluxes with the column average CO<sub>2</sub> data from GOSAT satellite. Preliminary analysis showed usefulness of the satellite observations in the areas of poor ground-based observation coverage. Multiyear simulations of the methane transport were completed for Transcom-CH<sub>4</sub> intercomparison. Methane flux inversion was used to improve estimate of the West Siberian wetland emission. For analysis of fossil fuel emissions, we designed simulations with a Lagrangian-Eulerian transport model using surface fluxes of 1 km resolution globally. Corresponding fossil fuel emission dataset was developed based on remote sensing data of anthropogenic activity and

large point source emissions. Simulated fluxes by an ecosystem model were also remapped to 1 km resolution based on satellite-based ecosystem type map. With an ocean pCO<sub>2</sub> data assimilation system we assimilated the surface ocean pCO<sub>2</sub> fields from 1996 to 2008, using assimilated ocean currents from NCEP. Computationally efficient inverse modeling algorithm based on Kalman smoother method was implemented with significant reduction in sensitivity matrix computation. Observed atmospheric CO<sub>2</sub> seasonal cycles were used in an inverse model to optimize and the terrestrial ecosystem model VISIT parameters.

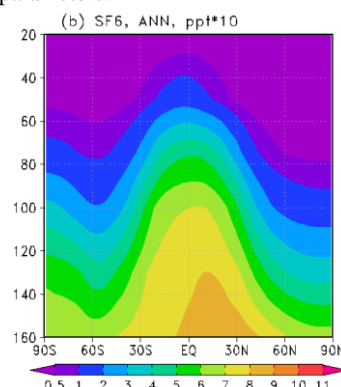


Fig. 1. Two-dimensional view of the global distribution of stratospheric SF<sub>6</sub> simulated on isentropic grid.

### 4. Future plan

We will continue the analysis of the GOSAT data and develop advanced inverse modeling algorithms using Lagrangian-based high resolution transport and an adjoint version of the transport model. Terrestrial biospheric model VISIT optimization will be extended to use of the Fluxnet and biomass data.

### 5. Current status of CPU use (from April to September 2010)

11users, CPU hours<1 node: 3,026 hrs, 1 node: 318 hrs, 2 node: 0 hr, total: 3,344 hours

## 研究課題名：CAI 衛星解析とモデルシミュレーションの統合システムの構築

課題代表者：東京大学大気海洋研究所 中島映至

共同研究者：東京大学大気海洋研究所 N.A.J.Schutgens・五藤大輔・鶴田治雄  
近畿大学 中田（向井）真木子

実施年度：平成 22 年度～平成 22 年度

### 1. 研究目的

本研究では、温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT; Greenhouse gases Observing Satellite)に同時搭載される雲・エアロゾルイメージャー (CAI) によって得られるリモートセンシングデータと、エアロゾル気候モデルによって得られるシミュレーションデータを結合して、CAI データ解析アルゴリズムの初期値に役立て、衛星解析ができない場合の補完データとして利用するシステムの開発を行う。従って、リモートセンシングデータとシミュレーションデータの融合のための、エアロゾル同化システムの構築が、第一の目的であり、シミュレーションの精度向上のためのモデル改良が第二の目的である。

### 2. 研究計画

前年度までに開発した CCSR/NIES/FRCGC-大気大循環モデル (MIROC-AGCM) と SPRINTARS エアロゾル放射モデル結合した全球エアロゾルシミュレーションシステムの性能の検証を、AERONET スカイラジオメーター地上観測網のデータで行う。

また、エアロゾル同化システムに関しては、前年度のカルマンフィルター (KF) 法とは別の同化システムであるカルマン smoother (KS) 法を用い、MODIS 衛星と AERONET から得られる実データに適応して、その結果の検証も行う。そして、KS 法の同化システムを用いて、エアロゾルの排出量推定を試験的に行う。

### 3. 進捗状況

AERONET データとの検証結果では、エアロゾルの光学的厚さ、オンゲストローム指数、一次散乱アルベドについて、改善されたモデル結果 (改良版 B) が標準版よりも実測値に近づくことを確認した (図 1)。このような結果は、硫酸塩と硝酸塩の増加によって、エアロゾル自身の存在量が増加したことと、散乱成分が増加したことが、要因である。また改良版Aでは、エアロゾルのサイズ分布の幅が広すぎたために、大粒子の散乱を過大評価していたと解釈できる。

エアロゾル同化研究では、前年度までの KF 法とは別の KS 法も開発した。その結果、KS 法も KF 法と同

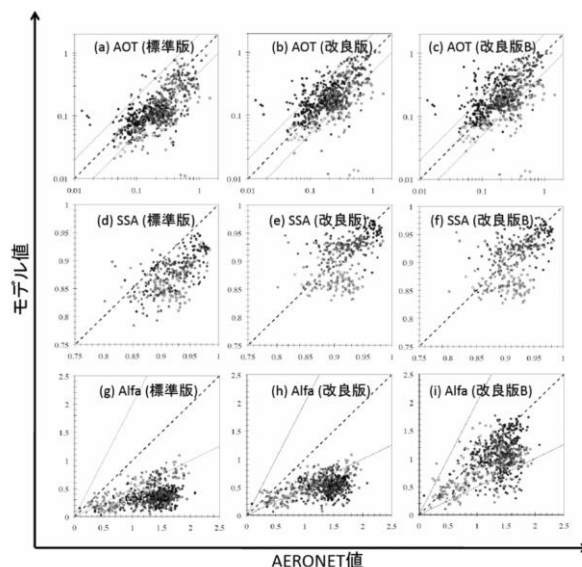


図 1 AERONET 観測値とモデル値 (標準版、改良版、改良版 B) の 3 つの結果の比較。波長 440 nm における光学的厚さ (AOT) を図 a-c に、440 nm における単一散乱アルベド (SSA) を図 d-f に、440 nm と 870 nm を用いて計算したオンゲストローム指数 (Alfa) を図 g-i に比較した。

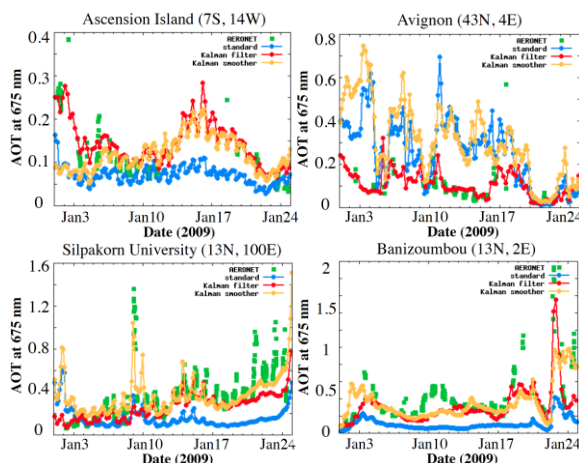


図 2 エアロゾルの光学的厚さ (波長 675 nm) のデータ同化例。図中の各線は、AERONET サイトのデータ (緑)、非同化モデル結果 (青)、KF 法の結果 (赤)、KS 法の結果 (橙) を示す。

程度に、データ同化しない場合よりも観測に近い値が得られることを確認した(図2)。また、KS法を用いることで、エアロゾルの排出量推定を行うことができるので、その初期的な結果も添付した(図3)。

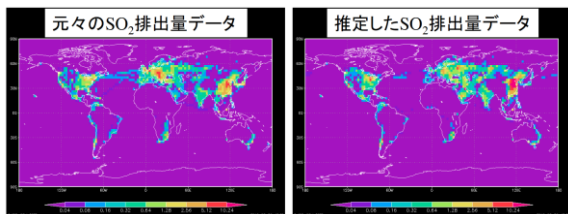


図3 2009年1月の人為起源二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)の排出量推定値。元々の排出量データ(左)と、KS法のデータ同化システムを使用して推定した排出量データ(右)を示す。

#### 4. 今後の計画

今年度で、当初計画していた2つの課題(同化とモデルの高精度化)に到達できた。今後は、これら2つを組み合わせて、GOSAT ミッションに対してより正確なエアロゾル情報を提供する研究と、逆にGOSATのデータを本モデルと組み合わせることによって、より正確なエアロゾルの放射強制力の評価を試みる予定である。

#### 5. 計算機資源の利用状況(2010年4月~9月)

実行ユーザ数: 4 CPU時間1ノード未満: 258 hrs, 1ノード: 12,527 hrs, 2ノード: 0 hrs, 計: 12,785 hrs.

#### 6. 昨年度研究課題のまとめ

##### 6.1. 昨年度研究課題名

CAI衛星解析とモデルシミュレーションの統合システムの構築

##### 6.2. 昨年度研究課題の目的

今年度と同様

##### 6.3. 昨年度研究課題の成果概要

これまで取り組んできたSPRINTARSエアロゾル放射モデルを組み込んだCCSR/NIES/FRCGC-大循環気候モデル(MIROC)によって得られた全球のエアロゾル分布のシミュレーション結果を衛星観測結果と比較した結果、違いが明らかになったので、今年度は、その改善のために、硝酸塩エアロゾルの取り込みと、硫酸塩過程の改善を図り、衛星観測結果により近い結果を得た。また、前年度開発したアンサンブルカルマン

フィルター(EKF)法を、AERONETおよびSKYNET地上観測網のデータおよび、TERRA/MODIS衛星から得られる光学的厚さとオンゲストローム指数に適用して、モデル値が観測値に近づくことを確認した。さらに、GOSAT/CAI衛星データを想定したシミュレーションを行い、当初の期待したように、EKF法によって、モデル結果が良い一致度で同化されることを確認した。

#### 6.4. 昨年度計算機資源の利用状況

実行ユーザ数: 4 CPU時間1ノード未満: 7,606 hrs, 1ノード: 36,671 hrs, 2ノード: 0 hr, 計: 44,277 hrs.