

地球環境変化予測のための地球システム統合モデルの開発

研究代表者 松野太郎（地球フロンティア研究システム長）

1. 研究計画の目的

本研究の目的は地球環境全体の変化、すなわち気候、大気・海洋の組成、陸・海の生態系が相互に影響を与えつつ一体となって変化して行くのをシミュレートできる地球環境（地球システム）の統合モデルを開発する事、およびそれを用いて炭素循環のフィードバックを含んだ地球温暖化予測を行う事である。

これまでの地球温暖化予測では、温暖化の原因である大気中二酸化炭素(CO₂)濃度の将来について、人間活動によるCO₂放出シナリオをもとに簡略化したモデルを用いて、海洋と陸域生態系（植生・土壌）への吸収量を見積もって大気CO₂濃度の将来予測を先ず行い、その結果を気候モデルに導入して温暖化と気候変化のシミュレーションを行って来た。しかしこれでは十分とは言えない。CO₂増加は温暖化・気候変化を引き起こすが、逆に気候変化は大気中CO₂濃度に影響を与えるのにそのフィードバック効果が入り込まれていなかったからである。温暖化によって土壌有機物の分解が進んで大気中にCO₂やメタン(CH₄)の濃度が増加する、即ち正のフィードバックが作用する可能性があるため、これを無視するのは危険である。

気候モデルに炭素循環プロセスを組み込んでそのフィードバック効果を取り入れたモデルで予測を行わねばならない。また、温暖化・気候変化は生態系の変化を引き起こすと考えられているが、それもCO₂やCH₄の濃度に影響する。さらに、もう一つの温室効果ガスである対流圏オゾンも温暖化・気候変化の影響を受ける。そこで、大気・海洋・陸域生態系にまたがる炭素循環や大気組成変化のプロセスを気候モデルに取り入れ、（炭素循環・大気組成・気候統合モデルを作り）、それらのフィードバックを含めて温暖化予測実験を行う必要がある。

2. 研究計画の概要

大気・海洋・陸地面の、主に物理的状態を扱う「物理的気候システムモデル」として東大気候センターと国立環境研で開発された既存のCCSR/NIESモデルを用い、それを基礎として、地球フロンティア研究システムの各研究領域で研究されている、大気・海洋の化学組成変化、陸域生態系と大気物質交換などの諸過程をそれぞれに取り入れた部分統合モデルを3年目を目安に作り、その上で全体を結合した、「地球システム統合モデル」を研究期間内に完成させる。その過程で3～4年目までに、大気・海洋・陸域生態系にまたがる全球炭素循環モデルを作り、それと気候モデルを結合させたモデルを用いて温暖化と炭素循環とのフィードバック効果を含んだ温暖化予測実験を行う。温暖化と大気組成や陸域生態系の相互作用に関して、さらに温暖化そのものについても未解明のプロセスが多いので共生プロジェクトの第3課題のもとに行われる野外観測やプロセス研究によって必要なパラメータを求め、逆にモデルの結果から精度向上に必要な

なプロセス研究を依頼し、モデルの確度向上を図る。

3. 年次計画

研究開発 1 年目：全体及びサブ課題の研究戦略立案及び各サブ課題での部分統合モデル作製に向けての個別モデルの整備。

研究開発 2 年目：サブ課題ごとに部分統合モデルの開発。

研究開発 3 年目：各サブ課題において部分統合モデルを作りあげる。この段階において地球温暖化にかかわる数値実験着手。次年（2005年）にかけ実験を終了し成果をできるだけ IPCC 第 4 次報告書に間に合うようまとめる。

研究開発 4 年目：部分統合モデルによる実験を終了し同時に並行して全体を統合した「地球システム・モデル」の開発に着手。

研究開発 5 年目：地球システム・モデル完成。それを用いた温暖化に伴う全地球環境変化予測の試行。

4. 平成15年度の研究計画

現在地球フロンティア研究システムの各研究領域で行われている個別モデル（大気組成、陸域生態系炭素循環など）の開発をひき続き進めながらそれらひとつひとつを物理的気候システムモデル（大気・海洋・陸面の“物理的”過程を中心としたモデル、CCSR/NIESにより開発された既存のものを利用）と結びつけ、「部分統合モデル」を作る作業を継続する。

(1) 炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル・サブグループ

大気海洋結合気候モデル MIROC に、海洋炭素循環モデルと陸域炭素循環モデルとを結合させる作業に今年度中に着手する。海洋コンポーネントについては、4成分の簡略な生態系モデルと海洋大循環モデルとの結合がほぼ完了している。陸域コンポーネントについては、地球フロンティア研究システムで開発中の Sim-CYCLE の気候モデルへの組み込みに15年度早々に着手する。陸面プロセスモデル MATSIRO と Sim-CYCLE の統合も行う。また亜寒帯林については温暖化により植生分布が大幅に変化することが懸念されるため、Sim-CYCLE 拡張へ向け亜寒帯林に特化した植生動態モデルの開発を始める。MIROC へ組み込む前に各コンポーネントモデル単体での性能の吟味は充分に行う必要がある。

(2) 温暖化・大気組成変化相互作用モデル・サブグループ

① 温暖化・大気組成変化相互作用モデル

東大気候センターで開発された対流圏化学モデル CHASER を拡張して成層圏化学反応を組み込

み、高解像度 time slice simulation を行う。ただし CHASER は非常に多くの変数を含み大量の計算機資源を要求するため、具体的にどの程度の解像度で実験を行うかはこれから実際に地球シミュレータ上でモデルを稼動させながら検討していく必要がある。解像度の決定には化学過程に重要な循環場の再現という見地も必要とされるので、物理気候コアモデル改良サブグループと一体となり最もバランスのとれた解像度を模索していく。またこれらの活動と並行して移流スキームの改善にも取り組む。

② 温暖化一雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

GCM におけるエアロゾルの取り扱い改善へ向け、物質が異なると雲粒の形成し易さが大きく変わってくる効果の考慮を検討する。GCM よりも高い解像度のモデル結果も利用していく。共生プロジェクトの他の課題（諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化(大気・海洋分野)）やモデル統合化領域とも連携していきたい。

(3) 寒冷圏モデル・サブグループ

観測データや古気候再現実験を通じた検証を行い、気候センターで開発された氷床モデルや、MIROC に導入されている海氷モデルの高精度化に努める。また共生プロジェクトの他の課題（諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化(大気・海洋分野)）の観測研究とも連絡をとりあい、海氷モデルの将来的な改善について検討を行っていく。

(4) 物理気候コアモデル改良サブグループ

成層圏における大気化学過程を現実的に再現するためには、現行モデルに見られる下部成層圏における低温・水蒸気過多という欠点の除去と低緯度成層圏における QBO の再現が必要条件と言える。こうした条件を満たしつつ計算コストの面からも現実の使用に耐えるような、バランスの取れたモデルの解像度を模索していく。成層圏大気循環の形成には内部重力波が重要な役割を果たしており、モデルで陽に表現される成分とパラメタライズされる成分との両方について解析を行っていききたい。モデルの鉛直座標系を、従来の σ 座標系から σ -P ハイブリッド座標系に更新する作業も並行して行うことになっており、対流圏界面付近の循環の再現性が向上することが期待される。

5. 平成15年度の研究成果

(1) 炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル・サブグループ

① 陸域炭素循環モデル

陸域生物圏は、光合成によって大気中のCO₂を吸収し、植生の呼吸・土壌有機物分解によって大気中にCO₂を戻し、陸域炭素循環の中で主要な役割を担う。陸域炭素循環と大気組成、気候変動の間には、大気CO₂濃度増大による光合成肥沃化効果、温度変化による光合成・呼吸・土壌有機物分解の変化、水循環変化による光合成・土壌有機物分解の変化、また陸域↑大気的作用としては、正味炭素収支変化によるCO₂濃度変化、アルベドや蒸発散変化を通じたエネルギーバランスの変化等、様々な相互作用が挙げられる。そのため、より正確な将来予測を行うためには気候と炭素循環の相互作用を導入した地球システム統合モデルの構築が必要である。

地球システム統合モデルにおいて、陸域炭素循環の役割は重要である。この分野で先駆的な研究を行ったHadley CenterやIPSLの結果では、将来の大気CO₂濃度・気候変動の予測は両者で大きな違いを示す。この要因の一つに、陸域炭素循環モデルの応答の違いが挙げられている。グローバルな炭素循環に対して、モデルによっては、シンク・ソースの符号すら異なるという結果が得られているのが現状である。従って、陸域炭素循環モデルの精度向上も同時に行う必要がある。

本サブグループは、(1)陸域炭素循環モデルの精度向上、(2)陸域炭素循環と大気大循環モデルの結合、の2点を目的として研究を進めている。陸域炭素循環モデルの作成に当たっては、わが国で開発が行われている”Sim-CYCLE”と”MATSIRO”の両者を結合することにより、第一段階のモデルが完成する。Sim-CYCLEは炭素や水などの収支から陸域生物・土壌の季節変動や経年変動といった生物地球化学プロセスを扱うモデルである。一方、MATSIROはGCMの陸面過程モデルとして開発され、キャノピーや土壌における放射収支・エネルギー収支・水収支等をシミュレートし、短いタイムスケールの現象を扱うモデルである。Sim-CYCLEで予測されたLAI(葉面積指数)をMATSIROが利用し、MATSIROで予測された土壌気温・土壌水分量をSim-CYCLEで利用する、といった形で、陸域での植生を介した水、CO₂、エネルギーの大気との交換に関する統合モデルが構築される。

平成15年度は、(1)Sim-CYCLEオフライン評価、(2)Sim-CYCLEとMATSIRO-AGCMの結合、(3)人為的な土地利用変化による炭素収支プロセスの組み込み検討、の3点を行った。

Sim-CYCLEオフライン評価については、陸域炭素循環の将来予測の不確定をもたらす要因についての解析を行った。この要因は、モデル構造の不確定性、モデルパラメータの不確定性、将来の気候予測の不確定性、将来の温室効果ガス排出量の不確定性の4点が考えられる。このうち、モデルパラメータの不確定性・将来の気候予測の不確定性・将来の温室効果ガス排出量の不確定性の3点について、評価を行った。その結果、土壌有機物の分解プロセスの温度依存性パラメータや、将来の気候シナリオ(GCMに依存)によって、大きく変動することが明らかになった。

また、炭素循環と気候の統合モデルを構築するために、CCSR/NIES GCM(含MATSIRO)とSim-CYCLEの結合を行った。GCMに含まれるカプラーを介して、Sim-CYCLEとMATSIROを相互補間する形で、上述のように結合を行った。AGCMに大気CO₂の輸送プロセスを加え、陸面でCO₂交換を発生させることにより、大気CO₂濃度の季節変動をシミュレートでき、結合を確認できた。

国際的なプロジェクトへの参加に向けてのモデル構築も行ってきた。本課題のような炭素循環

と気候を統合したモデルについては、C4MIP(The Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project; 炭素循環-気候結合モデル相互比較プロジェクト)が始まろうとしている。このプロジェクトの第一ステージでは、陸域炭素循環に焦点を当てることとなっている。このプロジェクトに参加するためには、自然植生と耕作地に転換するといった土地利用変化によるCO₂排出プロセスを含む必要がある。今年度は、単体Sim-CYCLEにこのプロセスの導入を検討した。

今後の課題としては、Sim-CYCLEとMATSIRO結合モデルの評価、過去の炭素循環の再現、C4MIPプロトコルに合わせた統合モデルの開発・評価を早急に進める必要がある。さらに、生態系変動過程モデルサブグループのモデルと統合を行い、地球環境変動による植生帯の変動も今後モデルに組み込む予定である。

② 海洋生物地球化学モデル

大気海洋結合モデルへの炭素循環過程組み込みの前段階として、海洋単体モデルへ組み込んだ炭素循環モデルを用い、予備的な温暖化実験を行った。すなわち、大気海洋結合モデルを用い過去に行われた二酸化炭素漸増実験の結果得られた風応力、海表面温度を海洋モデルの駆動力として用い、温暖化によって海洋環境が変化した場合とそうでない場合とについてIS92aシナリオに従って大気中二酸化炭素濃度が増加したときの海洋二酸化炭素吸収量が両ケースの間でどのように異なるのか調べた。その結果、温暖化による海洋循環変化が二酸化炭素吸収量に与える影響は小さいという結果が得られた(図1)。IPCC第3次報告書でも複数のモデルで同様な実験を行った結果が報告されており、それによると温暖化の影響はモデルによって差がある。しかし陸域炭素循環モデルで対応する実験を行った結果と比べると、どの海洋モデルでも温暖化の海洋炭素循環への影響は有意に小さくなっており、この点で我々の結果は過去のものとは矛盾しないといえる。本プロジェクトで採用しているモデルはIPCC第3次報告書で採用されているものよりも海洋表層生態系の記述が詳細になっているが、ここでの温暖化実験では過去の実験結果を追認するに終わった。このこと自体は華やかな結果ではないが、陸域炭素循環と結合させる前段階として、我々のモデルがもっともらしい振る舞いを見せることは確認できたと言える。

このことを受け、大気海洋結合モデルへの炭素循環モデル移植にも着手し、現在その原型が完成した段階にある(図2)。今後、モデルパラメータのチューニングやコードの整備、十分なスピンアップを行い、炭素循環-気候結合モデル相互比較プロジェクト(C4MIP)への参加、ひいてはIPCC第4次報告書への貢献に備える。

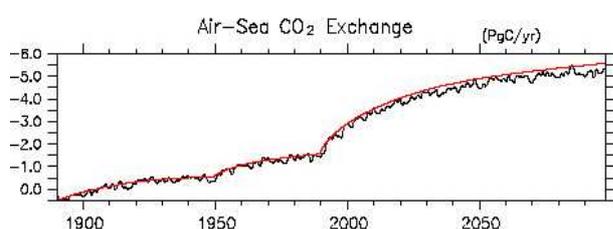


図1: IS92aシナリオに従って大気中二酸化炭素濃度が増加したときの、海洋二酸化炭素吸収量のモデル予測。赤線が温暖化による海洋環境の変化がないとした場合、黒線があるとした場合。

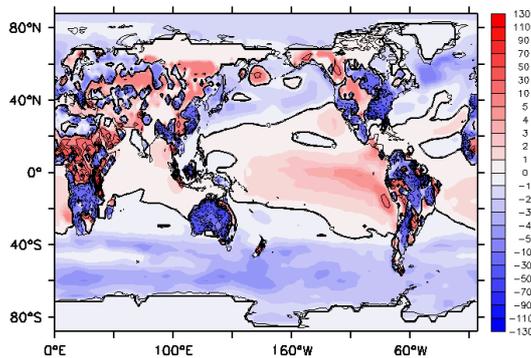


図2 : 炭素循環過程を組み込んだ大気海洋結合モデルによる、地表面・海表面での年間二酸化炭素フラックス。単位は $\text{molC/m}^2/\text{yr}$ 。赤い部分が大気中に二酸化炭素が放出されている場所を示し、青い部分は大気から二酸化炭素が除去されている場所を示す。

③ 陸域生態系変動モデル

共生第2プロジェクトで開発を進めている統合モデルでは、陸面における生態系過程を陸域炭素循環モデル Sim-CYCLE で扱うことを計画している。Sim-CYCLE は、予め 18 種の植生タイプを陸面の各グリッドに割り振り、気候の変動が植生の構造と機能に与える影響、そして、それら植生側の変化が気候システムへ与えるフィードバック反応とをシミュレートする。

Sim-CYCLE では、各陸面グリッドの植生タイプが不変である事を仮定している。しかしながら、百年から数百年といった長い時間スケールにおいては、それぞれの地域における植物の構成も徐々に変化すると考えられ、したがって、この仮定はシミュレートする期間が長くなれば長くなるほど潜在的な誤差を大きくしていくと懸念される。そこで本サブグループでは、Sim-CYCLE に植生変動を予測する構成要素を追加し、いわゆる全球動的植生モデル (Dynamic Global Vegetation Model, DGVM) へと拡張を行う。

気候条件の変化が、植生構成の変化と、その速度に対して与える効果をシミュレートする為には、最低でも次の4点について拡張を行う必要がある。

- 陸域植生を植物機能型 (Plant Functional Types, PFT) の組合せとして表現する
- 死亡、定着といった動態過程を環境条件の関数として定義する
- 火災などといった、植生動態に大きな影響を与えている攪乱過程を組み込む
- PFT 間、または個体間の生存競争を明示的に組み込み、PFT の構成の変化と、それに要する期間の予測を可能にする

本サブグループでは、以上の拡張に加えて、木本を個体ベースで扱い、さらに林分の空間構造を明示的に取り込むという野心的な試みを行う。これらによって、植生変化の方向と、それに要する期間の予測とがより適切に得られると期待される。なぜならば、固着性である植物にとっての競争とは、極めて局所的な環境条件に強く規定され、そのような局所性を無視することは、植生変動の方向や速度の予測を大きく変えてしまうと考えられているからである。

現在までに 1 地点のみの植生変動をシミュレートするプログラムが完成した。今後行うパラメータ推定や調整、そしてベクトル化といった作業の後に、全球レベルでのシミュレーションを行

う下地を整えた。

(2) 温暖化・大気組成相互作用モデル・サブグループ

① 温暖化・大気組成変化相互作用モデル

①-a 統合モデルへの移植を念頭に置いた対流圏大気化学モデル CHASER の改良

概略

温暖化・大気組成変化相互作用サブモデルでは大気化学過程（オゾン分布など）やエアロゾルの温暖化および海洋・陸域植生変化との相互作用を表現・予測することを主な目的としており、全球化学モデル CHASER やエアロゾルモデル SPRINTARS を用いてエアロゾル・化学のオンライン計算を可能にすることが当面の課題である。今年度は本サブモデルを統合モデルに組み込んだ場合の長期実験を念頭に置いて CHASER モデルの高速化を行い、さらに温暖化・大気化学相互作用予測研究のための前段階的な実験を行った。

化学モデル CHASER の高速化

全球化学モデルでは化学過程（特に化学反応）の計算コストが化学過程の舞台となる気候モデルの計算に比して非常に大きく、長期実験をする際の懸案要素である。また統合モデルとして CHASER にエアロゾルや成層圏化学（現状は対流圏化学のみ）も導入した場合の計算コストは更に増すことが予想されるため、化学過程の計算をできるだけ高速化する必要がある。今年度は CCSR/NIES agcm5.6 ベースであった CHASER を agcm5.7b ベースに移行すると同時に化学過程の高速化を行った。図 3 に示すように化学過程に主にリストベクトル化手法を導入したことで全体の計算時間を約 35%削減することに成功した。また、化学反応系の単純化によりさらに 20%の高速化も可能であることを確認した。

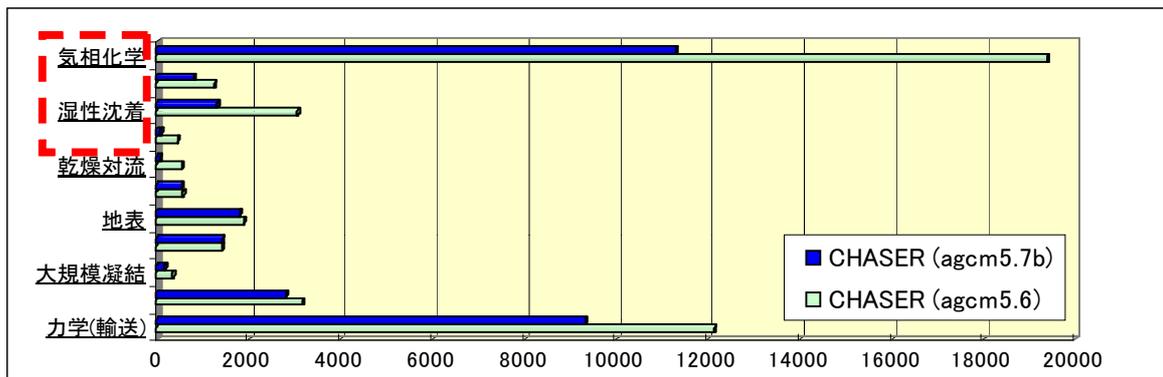


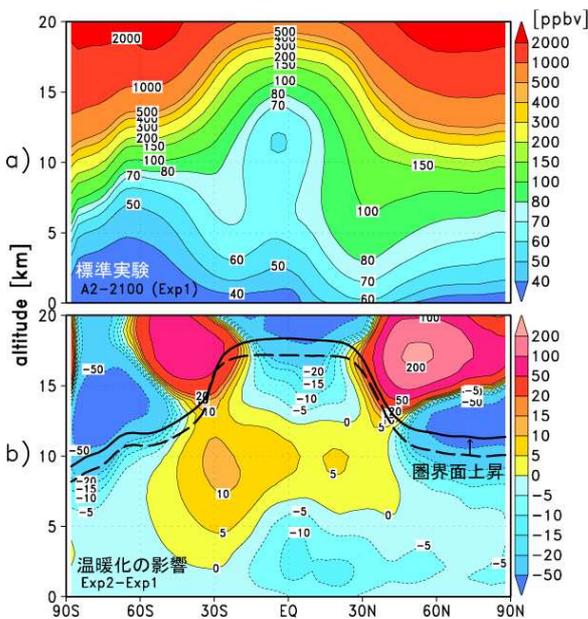
図 3： CHASER モデル中の各過程の CPU 時間（秒）内訳（1 年積分時）。新バージョン（青）では agcm5.7b に移行し、主にリストベクトル手法を導入することで化学関連過程（気相・液相化学、沈着、雷 NOx 生成など）の大幅な高速化が行われた。

温暖化の対流圏化学への影響実験

温暖化・大気組成変化相互作用の見通しを得るため、将来の温暖化が化学過程（特にオゾン分布）にあたる影響（フィードバック）について CHASER を用いて実験を行った。図 4 (a) は人為起源気体放出の増加のみを考慮した場合の 2100 年の東西平均したオゾン量の緯度・高度分布の予測結果の一例であるが、さらに温暖化の影響も考慮に入れると、図 4 (b) に示すように対流圏下層では温暖化に伴う水蒸気増加でオゾン破壊が促進されるためオゾン（増加量）は減少し、逆に対流圏上層では温暖化による子午面循環（特に成層圏循環）の強化により成層圏からのオゾン流入量が著しく増加するためオゾン増加が計算された。このような温暖化影響はオゾンに限らず化学反応を介してメタンや硫酸エアロゾルの将来予測量にも大きく影響することが確認された。

今後の課題・予定

今後の目標としては各種エアロゾル（SPRINTARS ベース）と化学過程との結合があるがこれについては現在作業進行中であり、硫酸エアロゾルや有機炭素エアロゾルのシミュレーション（表現方法）の改良も予定されている。さらに海洋・陸域植生における DMS や炭化水素類の放出過程および気体の降下沈着過程については海洋・陸域各コンポーネントと結合し統合モデル化する。



また、上で報告した温暖化影響実験については他のシナリオを含めた追加（感度）実験が必要である。

図 4: (a) 標準実験(エミッション変化のみ)で計算された 2100 年のオゾン東西平均分布(A2 シナリオ)、(b) 温暖化も考慮した場合の差(温暖化実験－標準実験)。対流圏界面も示す（黒実線: 2100 年温暖化、黒破線: 標準実験）。

①-b CHASER への成層圏化学過程の導入

概略

統合モデルへの成層圏化学過程の導入に向けて、本サブグループでは二つの作業を行った。ひとつは対流圏光化学モデル CHASER を成層圏化学過程まで含むように拡張する際、どの程度の化学種までを含めるかを検討することであり、もうひとつは昨年度実装した高精度移流スキームを用い、成層圏および対流圏における輸送場を検証することである。

成層圏化学過程の検討

塩素および臭素などのハロゲン化合物は、その触媒回路作用によって成層圏でのオゾン破壊に重要な役割を果たす。このため、これらの化合物の反応系を考慮することは成層圏化学過程において非常に重要である。次年度以降における統合モデルへの成層圏化学過程の実装に向け、成層圏光化学モデル (Takigawa et al., 1999, 2002, Nagashima et al., 2002, Akiyoshi et al., 2003 など) で用いられている反応系を CHASER に加え、ボックスモデルを用いた計算速度の推定を行った (表 1)。

	計算時間 (秒)	相対比 (現状を 1 とした場合)
対流圏光化学のみ	2.492	(x1.0)
塩素系化合物を追加	5.258	2.11
塩素系・臭素系化合物を追加	5.660	2.27

表 1 : CHASER を基にしたボックスモデルを用いた場合の反応過程と計算速度の変化

表 1 より、塩素系化合物に加えてメタンや一酸化二窒素などの長寿命気体の反応なども新たに考慮する必要があるため、塩素系化合物まで加えると現時点の二倍以上重くなる可能性があることがわかる。また今回のボックスモデルの結果から、臭素系化合物まで入れてもそれほど重くなるわけではない。これらの結果から、実際に統合モデルに実装する際にはまず臭素系化合物までを含めた反応系を導入することを検討したい。

輸送過程の検証

昨年度に引き続きパッシブトレーサを用いた輸送場の検証を行った。本年度はとくに成層圏

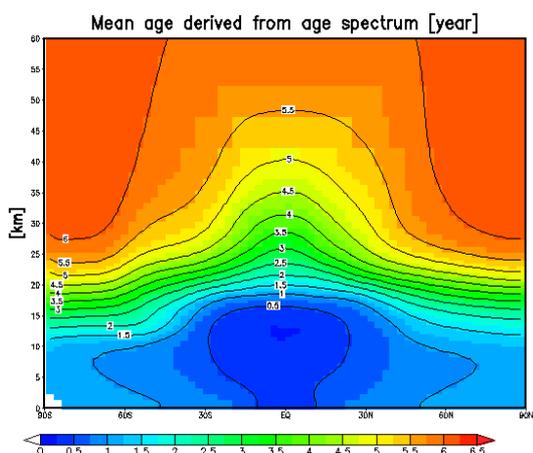


図 5 : モデルを用いて推定された年令分布による平均年令の緯度-高度分布

圏に着目し、その平均年令 (空気が成層圏に入ってから経過した時間) および年令分布を求めたうえで、下部成層圏における二酸化炭素などの航空機観測の結果から推定された実際の年令との比較を行った。積分期間は 10 年で、8 例のアンサンブル実験を地球シミュレータを用いて行った。その結果、赤道域での平均年令は観測からの推定値と良く一致したものの、中・高緯度においては他の三次元モデルと同様に観測からの推定値と比較して平均年令が若くなる

傾向が見られた。次年度以降は水平輸送の解像度依存性について調べるとともに、成層圏・対流圏質量交換フラックスなどについても評価する予定である。

② 温暖化－雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

②-a 詳細雲物理モデルを用いた、大循環モデル用パラメタリゼーションの高度化

雲粒数密度のパラメタリゼーション

詳細雲微物理モデルによる数値実験を繰り返し、得られた結果を用いて、エアロゾルの雲凝結核としての能力および雲底での上昇流速度から雲粒数密度を求めるパラメタリゼーションを開発した(Kuba and Iwabuchi, 2003, Kuba, 2003)。雲粒数密度 N_d (cm^{-3}) は以下の次の近似式で表され、 $N_c(S)$ (cm^{-3}) は過飽和度 S % で活性化する（臨界半径を越えて成長を続け雲粒になる）エアロゾルの数密度、 V (ms^{-1}) は雲底での上昇流速度である。 S の値と A および B の関数形は V に依存する。

$$N_d = A N_c(S) / (N_c(S) + B) \quad (1)$$

$$V < 0.2 \text{ ms}^{-1} \quad ; \quad S = 0.2, \quad A = 4710 V^{1.19}, \quad B = 1090 V + 33.2 \quad (2)$$

$$0.2 < V < 0.5 \text{ ms}^{-1} \quad ; \quad S = 0.4, \quad A = 11700 V - 1690, \quad B = 10600 V - 1480 \quad (3)$$

$$0.5 < V < 1.0 \text{ ms}^{-1} \quad ; \quad S = 0.5, \quad A = 4300 V^{1.05}, \quad B = 2760 V^{0.755} \quad (4)$$

$$1.0 < V < 3.0 \text{ ms}^{-1} \quad ; \quad S = 1.0, \quad A = 7730 - 15800 \exp(-1.08 V), \quad B = 6030 - 24100 \exp(-1.87 V) \quad (5)$$

$$3.0 < V < 10.0 \text{ ms}^{-1} \quad ; \quad S = 2.0, \quad A = 1140 V - 741, \quad B = 909 V - 56.2 \quad (6)$$

式 (1) に (2) を代入した場合と (4) を代入した場合をそれぞれ図 6 の a と b に記す。

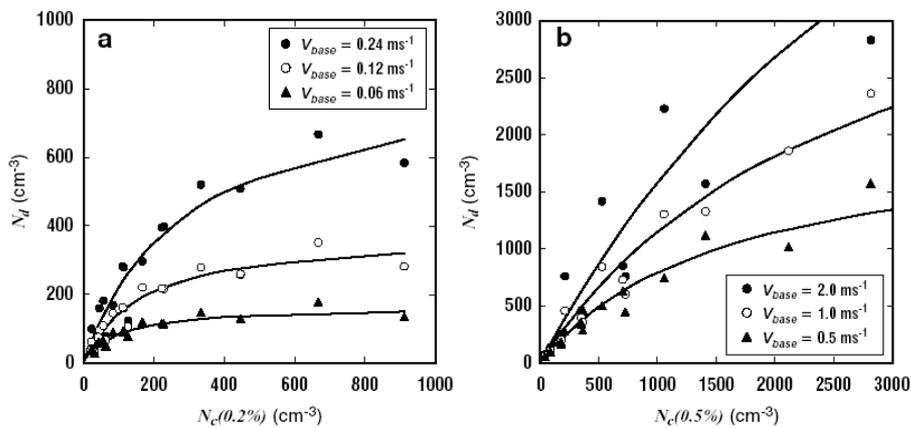


図 6：雲粒数密度 N_d と雲凝結核数密度 $N_c(S\%)$ の関係。a:雲底上昇流速度が 0.24 ms^{-1} 以下の場合で $S = 0.2\%$ とした。b:雲底上昇流速度が $0.5 \sim 2.0 \text{ ms}^{-1}$ の場合で $S = 0.2\%$ とした。

近似式(1)を導入することにより、雲粒数密度にエアロゾルの影響を反映させることができ、さらに Kuba et al. (2003) の雲の光学的性質を評価するパラメタリゼーションを使うことで放射収支計算の精度を向上させることができる。光学的厚さ τ は以下のように表せる。ただし、LWP (gm^{-2}) は鉛直積算雲水量。

$$\tau = C N_d^D \quad C = 0.121 \text{ LWP}^{0.702} \quad D = 0.274 \text{ LWP}^{0.0538} \quad (7)$$

また、雲底上各高度の雲粒の有効半径 R_e (μm) は雲底からの高度を Z (m) とすると以下のよう
に表せる。

$$R_e = E N_d^F \quad E = 6.41 Z^{0.380} \quad F = -0.288 Z^{0.0254} \quad (8)$$

雲粒粒径分布のパラメタリゼーション

非静力学全球モデルや非静力学領域モデルに雲微物理モデルを搭載することが可能になりつ
つある。雲微物理モデルがバルク法の場合は上記の雲粒数密度のパラメタリゼーションを使うこ
とでエアロゾルの影響を考慮することができるが、ビン法の場合はそれに加えて初期雲粒粒径分
布のパラメタリゼーションも必要になる。Kuba(2003) はガンマ分布を用いて初期雲粒粒径分布
 $n(r)$ (cm^{-4}) を次のように表し、係数 A と B は雲水量と雲粒数密度 N_d (cm^{-3}) と雲水量 Q (g cm^{-3})
の関数とし、2次元の簡易雲力学モデルに導入し、詳細雲微物理モデル(パーセルモデル)を搭載
した場合との比較をした。

$$n(r) = A r^\beta \exp(-B r) dr \quad (9)$$

$$A = N_d (4\pi(\beta+3)(\beta+2)(\beta+1) N_d / 3Q)^{(\beta+1)/3} / \beta!$$

$$B = (4\pi(\beta+3)(\beta+2)(\beta+1) N_d / 3Q)^{1/3}$$

雲内の雲粒粒径分布は、ほぼ同等の放射特性を与えるものが得られた。50 分間の積算降水量を
エアロゾルが多い場合(CCN-1)と少ない場合(CCN-10)で比較したものが図7である。ガンマ分布
がパーセル法の詳細雲微物理モデルで得られる雲粒粒径分布より、幅が広く巨大粒子雲核の存在
を十分に表現できないことから、ある程度の差はあるものの、図の中に数値(mm)で表したよう
に領域内平均降水量に大きな差はないことから、数 km 以上の格子間隔のモデルに対しては有効な
パラメタリゼーションといえる。

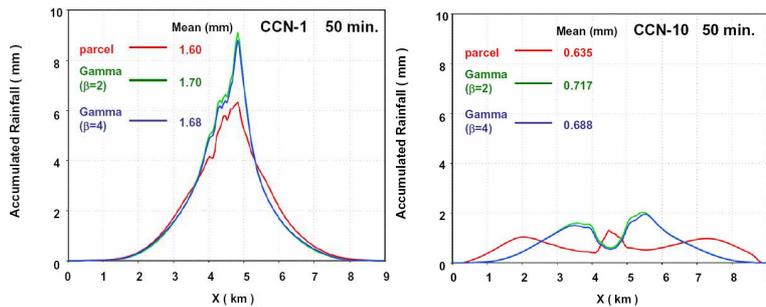


図7：簡易力学モデルにビン法雲微物理モデルを搭載した数値実験での50分間の積算降水量の水平分布。ビン法の初期雲粒粒径分布をパーセル法で雲凝結核から計算した場合(赤線)と雲粒数密度を式(1)とガンマ分布の $\beta=2$ を用いた場合(緑線)および $\beta=4$ を用いた場合(青線)。

②-b 大気大循環モデルにおける雲・エアロゾル相互作用の微物理過程の導入

大気大循環モデルにおいて雲・エアロゾル相互作用をより詳細に扱うために、CCSR/NIES AGCM をベースとしたエアロゾル輸送・放射モデル SPRINTARS (Spectral Radiation-Transport Model for Aerosol Species) (Takemura et al., 2002)へ新しい雲粒数濃度診断式を導入した。エアロゾル間接効果(エアロゾルが雲・降水を通して気候に及ぼす影響)を大気大循環モデルにより評価するためには雲・エアロゾル相互作用を表現するパラメタリゼーションが必要であるが、これまでは雲粒数濃度はエアロゾル数濃度のみに依存する非常に簡略化された診断式を導入するのが一般的であった。しかし、この診断方法には大きな任意性が含まれており、エアロゾル間接効果に対する評価の定量的不確定性の主要因であった。そこで本研究では、エアロゾル数濃度の他に上昇流速度・過飽和度・エアロゾルの化学組成や粒径分布にも依存して雲粒数濃度を診断するパラメタリゼーション(Ghan et al., 1997)を導入することにより、エアロゾル数の変化に伴う雲粒径や降水効率の変化を表現できるようにした。この診断式は雲・エアロゾル相互作用を表現した Köhler 理論をベースとしたものであり、より理論に則したパラメタリゼーションを導入したことになる。取り扱うエアロゾルは対流圏主要エアロゾルである黒色炭素・有機炭素・硫酸塩・土壌粒子・海塩であり、それぞれ粒径分布が異なる。また、大気大循環モデルのスケールにおけるグリッド平均上昇流速度は非常に小さいために、雲内の上昇流速度をある程度表現できるパラメタリゼーションも導入した。

図8には、エアロゾル数濃度と雲粒数濃度の関係のシミュレーション結果を示す。過去の研究で使用されていた雲粒数濃度診断式のように両者の関係は1対1には決まらず、上昇流速度やエアロゾルの化学的性質・粒径分布に依存して分散することがわかる。図9には、温度が273K以上の雲頂における雲粒有効半径の年平均分布を示す。このシミュレーション結果は衛星観測等で得られるものと定量的に良く一致しており、大陸上で雲粒径が小さく海上で大きいというコントラストが見られる。また、過去の簡略化されたパラメタリゼーションでは、観測と比較して低緯度で雲粒径を過大評価し、中高緯度で過小評価していたが、今回導入したパラメタリゼーションではこの問題は解消された。

このモデルによる人為起源エアロゾルの全球平均間接効果放射強制力は -0.8 W m^{-2} と計算されている。今後は、雲に関する観測データとの詳細な比較を行い、また地域モデルや雲解像モデルからの知見も導入することにより、雲・エアロゾル相互作用をより適切に表現できるように改良を重ねる必要がある。

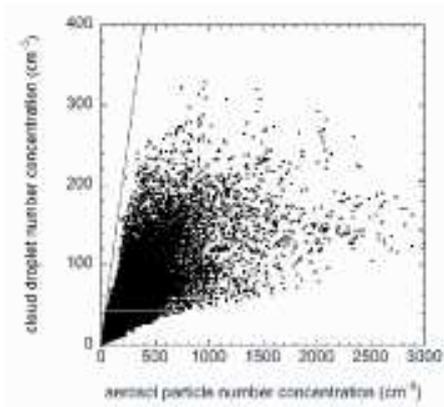


図8：エアロゾル数濃度と雲粒数濃度の関係

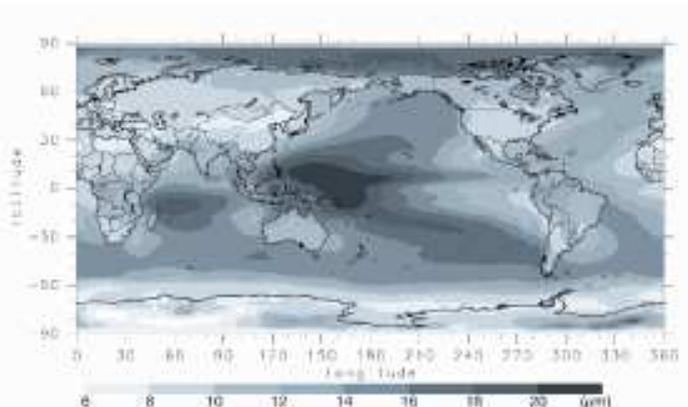


図9：水雲の雲頂における雲粒有効半径の年平均分布

②-c 全球での直接雲解像を目指した非静力学大気モデルNICAMの開発

雲形成の微物理過程で重要な上昇速度が直接計算される非静力学大気モデル NICAM の開発を引き続き進めている。

力学過程についていくつかの改良を行った。(I) 角運動量保存を考慮し、浅い大気の近似をとりやめ、鉛直方向に広がりを持った深い大気への拡張を行った。(II) 乱流スキームの実装に伴い、乱流運動エネルギーを含めた全エネルギーの保存を保証するように修正した。(III) 各物理過程の検討用に一部格子を集中させることが出来る格子生成法を確立した(図10)。また、地球シミュレータ上でスペクトル変換モデルとの計算速度の比較を行い、水平格子間隔数10km以下では準一様格子を用いたモデルの方が有利であることを示した。

物理過程についての実装状況は以下である。雲微物理過程に Kessler(1969)型の暖かい雨のスキーム、Grabowski(1988, 1999)の簡単な氷晶過程を導入し、図10のような集中格子を用いて、スコールライン実験を行った(図11)。下層 cold pool の形成、上層での雲の組織化が再現されていることが分かる。以上はバルク法についてのものであるが、より詳細な雲微物理に基づくビン法の導入も視野に入れている。そのほか、主な物理過程として Mellor-Yamada level2, 2.5 乱流過程、Louis による地表面過程を実装済みである。

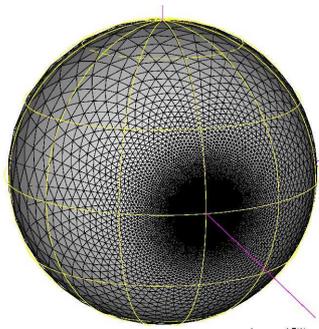


図10：一部集中格子。球面一様な正20面体格子に数学的な変換を掛けて生成。

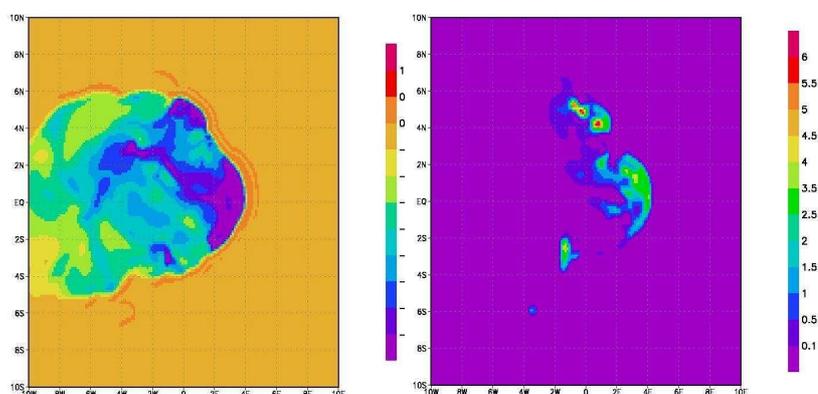


図11：スコールラインの実験結果。(a) 6時間後の最下層での温度偏差(K)。(b) $z=1.4\text{km}$ での雲水と雨水の和(g/kg)

(3) 寒冷圏モデル・サブグループ

温暖化に対する氷床の応答特性や海水準への影響を調べるため、現実をよく表現するよう氷床モデルを開発し、グリーンランドと南極への適応性を調べた(Saito and Abe-Ouchi, 2004)。さらにグリーンランド地域の気候が3〜4度温暖化すると海水準3メートル程度に相当する氷床の融解が起こり、南極地域は気候が7〜8度以上温暖化してようやく氷床の融解による海水準上昇をもたらすことを示した。一方、温暖化の予測の程度について調べるため、地球シミュレータを用いて人工的なフラックス調節のない大気海洋氷結合モデル(解像度は中程度、大気200km、海洋100km程度)の調整や感度実験を行なった。全球と比較してとくに温暖化感度が高い高緯度の気候や氷床の再現性や温暖化に対する応答特性を調べた結果、グリー

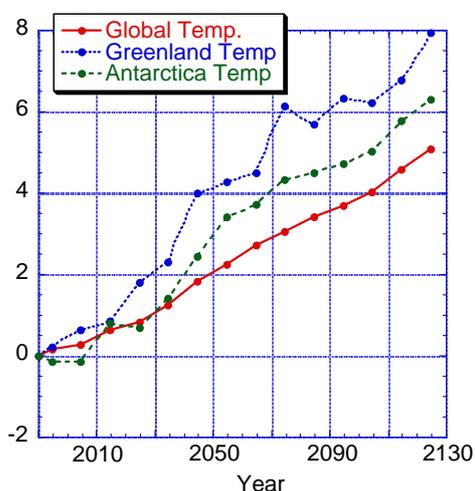


図12: 大気海洋氷結合モデルによる二酸化炭素1%漸増実験における地表付近気温上昇。

ーンランド氷床周辺の温暖化の程度は、21世紀末頃に温室効果ガスが安定化したとしても、海水準に有意に影響を及ぼす程度に達する。大気中二酸化炭素増加量が年率1%と仮定して、4倍に達する140年間後までの予測を行った(図12)。全球に比べて気温増加が極域とくに北半球で大きく、グリーンランド氷床が海水準に有意に影響する程度となる。南極氷床においては降水量増加の方が気温増加の効果よりやや上回る結果となった。今後、モデルの不確定パラメタや感度の異なるバージョンで同様の実験を行なう。数十年変動や不確定性の幅など極域のより詳しい解析が必要である。さらに、同期した大気-氷床結合(部分統合モデル)の計算を可能にするためのプログラム改変をすすめており、現在調整を続けている。

(4) 気候物理コアモデル改良サブグループ

今年度の当サブグループの最優先課題は、共生第一課題(住グループ)と共有している大気大循環モデル(CCSR/NIES/FRSGC AGCM)において上部対流圏-下部成層圏に見られる、顕著な低温バイアスの除去であった。それに加えて、オゾンホールが生じる冬季から春季の高緯度下部成層圏の気温、および熱帯の循環を現実的にシミュレートするために、地形起源以外の重力波のパラメタリゼーションの導入を行った。

AGCMの低温バイアスは、このモデルが開発された当初から現在に至るまで存在し、成層圏と対流圏の間の物質交換、特に成層圏中の水蒸気量を正しくシミュレートするのに大きな障害となっていた。CCSRの放射グループでは、放射収支の計算に用いるプログラムの改良が行われてお

り、新しい放射コードを AGCM に組み込み、テストを行うことができた。

図 1 3 は、新放射コードを用いた実験の結果で、北半球夏季平均の帯状平均温度から観測値を引いた値を示している(カラーの両端は+10 K を表す)。従来の放射コードを用いた実験に見られた顕著な低温バイアス(図 1 4)が、大幅に改善されている。今後さらに改良を重ねて行けば、将来化学過程を含めたシミュレーションを行う際にも、水蒸気やオゾンといった地球温暖化にとって重要な物質の分布がより良く再現されることが期待される。

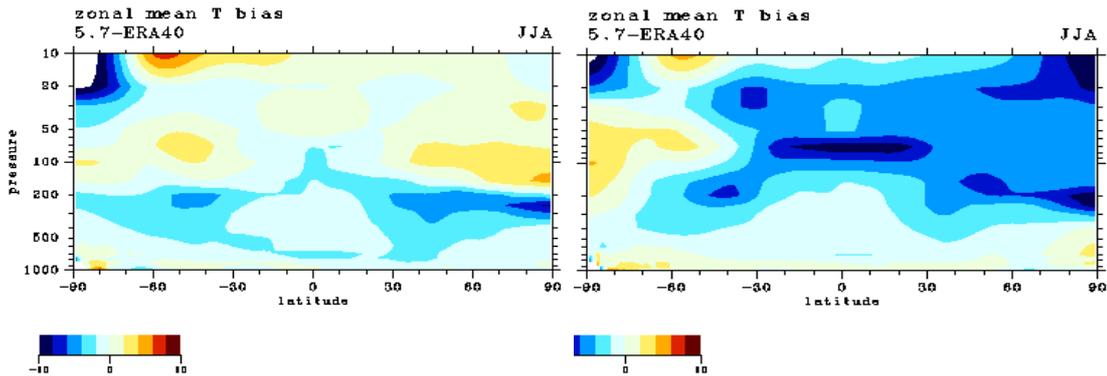


図 1 3: 新放射コードを用いた実験における、北半球夏季の帯状平均温度バイアス。

図 1 4: 従来のコードを用いた実験における、北半球夏季の帯状平均温度バイアス。

非地形性重力波抵抗パラメタリゼーションの導入に当たっては、最も普及している Hines (1997) のものを選択した。下部成層圏の重力波の観測は限られているため、このパラメタリゼーションにする必要がある、各方位に伝播する重力波の RMS 振幅を、T106L250 AGCM によるシミュレーション結果から導出することを試みた。このモデルの鉛直解像度は 300m であり、通常の AGCM では解像できない鉛直方向に小規模な重力波を表現しうる。現在テスト段階ではあるが、地理変化・季節変化を含む重力波ソースを用いて、現実的な赤道 QBO の再現に成功している。今後は高緯度循環の再現性向上を目指す必要がある。

6. 研究発表

(1) 炭素循環モデル、炭素循環・気候変化モデル・サブグループ

①陸域炭素循環モデル

学会発表

Ichii, K., A. Ito, K. Tanaka, T. Oikawa, Development of terrestrial biosphere model for

fully coupled earth system modeling, International Conference on Earth System Modelling, Hamburg, Germany, Sep. 2003.

論文出版

Ito, A., K. Ichii, K. Tanaka, T. Oikawa, Variability and uncertainty of the belowground carbon cycle of terrestrial ecosystems in response to global environmental change: Sensitivity analysis with a process-based model, in preparation.

伊藤昭彦, 市井和仁, 田中克典, 佐藤 永, 江守正多, 及川武久 (2004): 「地球システムモデルで用いられる陸域モデル: 研究の現状と課題」, 天気, 投稿中.

②海洋生物地球化学モデル

学会発表

M. Kawamiya and T. Matsuno (2003): “Development of an integrated earth system model on the Earth Simulator”, IUGG2003, 6月30日-7月11日, 札幌.

M. Kawamiya, C. Yoshikawa, M. Aita and T. Matsuno (2003): “Development of an integrated earth system model on the Earth Simulator -- Preliminary results from the ocean carbon cycle component - “, 地球システムモデリングに関する国際会議, 9月15-19日, ハンブルグ.

M. Kawamiya (2003): “Overview of Earth System Modelling in Japan” 地球システムモデリングに関する日英ワークショップ, 10月1-3日, ケンブリッジ.

M. Kawamiya, C. Yoshikawa, M. Aita, and T. Matsuno (2003): “Projection of ocean uptake of anthropogenic CO₂ using an ocean carbon cycle model: Preliminary results from the oceanic component of the integrated earth system model at FRSGC”, 地球システムモデリングに関する日英ワークショップ, 10月1-3日, ケンブリッジ.

論文出版

Kawamiya, M. and A. Oschlies (2004): “Impact of intraseasonal variations in surface heat and momentum fluxes on the pelagic ecosystem of the Arabian Sea”, J. Geophys. Res., in press.

河宮未知生 (2004): 「数値生態系モデルによる北太平洋の低次生産機構に関する研究」, 海の研究, 印刷中

③陸域生態系変動モデル

学会発表

H. Sato, (2003): "Development of an integrated terrestrial ecosystem model for global changing prediction", 種生物学会国際シンポジウム 2003, 10月, 札幌.

(2) 温暖化・大気組成相互作用モデル・サブグループ

①温暖化・大気組成相互作用モデル

学会発表

Sudo, K., Takahashi, M., and Akimoto, H. (2003): "Future changes in stratosphere-troposphere exchange and their impacts on future tropospheric ozone", American Geophysical Union (AGU) Fall meeting, 8-12 December, San Francisco, U.S.

Sudo, K., Akimoto, H., Nozawa, T., Kanzawa, H., and Takahashi, M. (2003): "Simulation of future distributions of tropospheric ozone and sulfate aerosol: impacts of emission change and climate change", International Conference on Earth System Modelling, 15-19 September, Hamburg, Germany.

Sudo, K., Takahashi, M., Nozawa, T., Kanzawa, H., and Akimoto, H. (2003): "Simulation of future distributions of tropospheric ozone and sulfate aerosol: impacts of emission change and climate change", International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), 30 June - 11 July, Sapporo, Japan.

須藤健悟, 高橋正明, 秋元肇 (2003): 「対流圏オゾン化学における成層圏オゾンの役割とその変動過程」, 第14回大気化学シンポジウム, 1月7-9日, 豊川市民プラザ.

須藤健悟, 秋元肇, 野沢徹, 神沢博, 高橋正明 (2003): 「対流圏オゾン・硫酸エアロゾル全球分布の将来予測実験」, 日本気象学会 2003年秋季大会, 10月15-17日, 宮城県民会館.

須藤健悟, 秋元肇, 高橋正明, 野沢徹, 神沢博 (2003): 「全球化学気候モデル CHASER を用いた対流圏光化学場の将来予測シミュレーション」, 第9回大気化学討論会, 5月28-30日, 伊香保温泉ホテル木暮.

須藤健悟、高橋正明、秋元肇 (2003): 「対流圏オゾンによる放射強制力: 化学結合 GCM による見積もり」, 日本気象学会 2003 年春季大会, 5 月 21-24 日, つくば国際会議場.

滝川雅之 (2004): 「CCSR/NIES 大気大循環モデルを用いた成層圏 Age Spectral の計算」第 14 回大気化学シンポジウム.

論文出版

Sudo, K., Takahashi, M., and Akimoto, H. (2003): “Future changes in stratosphere-troposphere exchange and their impacts on future tropospheric ozone simulations”, *Geophysical Research Letters.*, 30, 24, 2256, doi:10.1029/2003GL018526.

②温暖化-雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

②-a 詳細雲物理モデルを用いた、大循環モデル用パラメタリゼーションの高度化

学会発表

Kuba, N. (2003): 雲物理パラメタリゼーションの構築. 第 5 回非静力学モデルに関するワークショップ. 11月24~25日. 横浜.

論文出版

Kuba, N., H. Iwabuchi, K. Maruyama, T. Hayasaka, T. Takeda and Y. Fujiyoshi (2003): “Parameterization of the effect of cloud condensation nuclei on the optical properties of a non-precipitating water layer cloud. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 81, 393-414.

Kuba, N. and H. Iwabuchi (2003): Revised parameterization to predict cloud droplet concentration and a retrieval method to predict CCN concentration. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 81, 1485-1487.

②-b 大気大循環モデルにおける雲・エアロゾル相互作用の微物理過程の導入

学会発表

Takemura, T. and T. Nakajima (2003): Aerosol radiation-transport model on Earth Simulator. Workshop on Global Aerosol Measurements for Climate Studies - Present and Future, 15-18 September, Paris, France.

Takemura, T. (2003): Analysis of climate response to aerosol direct and indirect effects

by aerosol transport radiation model. AGU Fall Meeting, 8-12 December, San Francisco, USA.

竹村俊彦, 野沢徹, 久芳奈遠美 (2003): 全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルを用いた雲・エアロゾル相互作用のパラメタリゼーション, 日本気象学会 2003 年秋季大会, 10 月 15-17 日, 宮城県民会館.

竹村俊彦, 野沢徹, 江守正多, 久芳奈遠美, 黒川純一 (2004): 全球3次元エアロゾル輸送・放射モデルを用いた直接・間接効果による気候応答の解析, 第 14 回大気化学シンポジウム, 1 月 7-9 日, 豊川市民プラザ.

②-c 全球での直接雲解像を目指した非静力学大気モデル NICAM の開発

学会発表

M. Satoh et al. (2003): “Development of the nonhydrostatic icosahedral atmospheric model in Frontier Research System for Global Change”, Second Workshop on the Future of Cloud Parameterization, May 7-9, Hawaii.

H. Tomita et al. (2003): “A Comparison Study of Computational Performance between a Spectral Transform Method and a Gridpoint Method”, Parallel Computer Fluid Dynamics 2003, May 13-15, Moscow

M. Satoh (2003): “Development of a non-hydrostatic model for climate study and radiative-convective equilibrium calculations”, IUGG2003, Jun. 30-Jul. 5, Sapporo

H. Tomita et al. (2003): “A nonhydrostatic global model on the icosahedral grid system”, IUGG2003, Jun. 30-Jul. 5, Sapporo

M. Satoh and T. Nasuno (2003): “Radiative-convective equilibrium calculations with cloud resolving models: a standard experiment and parameter study”, Fifth international SRNWP-Workshop on Non-Hydrostatic Modeling, Oct 27-29, Frankfurt

H. Tomita et al. (2003): “Development of the global cloud resolving model on the icosahedral grid”, Fifth international SRNWP-Workshop on Non-Hydrostatic Modeling, Oct 27-29, Frankfurt

M. Satoh (2003): “Development of a non-hydrostatic model for climate study and

radiative-convective equilibrium calculations” , IUGG, Jun.30-Jul.5, Sapporo

論文出版

Satoh (2003) : “Conservative scheme for a compressible non-hydrostatic models with moist processes” , Mon. Wea. Rev., 131, 1033

H. Tomita & M. Satoh (2003): ” Global Nonhydrostatic Dynamical Core on the Icosahedral Grid” , revised in Fluid. Dyn. Res.

(3) 寒冷圏モデル・サブグループ

論文出版

Saito, F. and A. Abe-Ouchi (2004): Thermal Structure of Dome Fuji and East Queen Maud Land, Antarctica, simulated by a three-dimensional ice sheet model. Annals of Glaciology, 38, in press.

(4) 気候物理コアモデル改良サブグループ

学会発表

Watanabe, S. and T. Nagashima (2004): Seasonally and Geographically Varying Wave Source for a Doppler-spread Parameterization Derived from a High-resolution General Circulation Model Experiment; (I) Propagation Direction, Amplitude Distribution, and Saturation of Gravity Wave Spectrum, Chapman Conference on Gravity Wave Processes and Parameterization, 10-14 January, Hawaii.

Watanabe, S. and T. Nagashima (2004): Seasonally and Geographically Varying Wave Source for a Doppler-spread Parameterization Derived from a High-resolution General Circulation Model Experiment; (II) Impacts on Large-scale Circulations, Chapman Conference on Gravity Wave Processes and Parameterization, 10-14 January, Hawaii.