

目次

I. 研究計画の概要

1. 研究の主旨	1
2. 研究概要	1
3. 研究年時計画	2
4. 平成14年度研究計画	2
5. 平成14年度実施体制	3
6. 研究運営委員会、研究連絡会（*省略 5～24）	4

II. 研究成果の概要

1. 総括	25
2. サブテーマごと、個別項目ごとの概要	25
3. 波及効果、発展方向、改善点等	28
4. 研究成果の発表状況	28
5. 国際共同（協力）研究の状況	30

III. 研究結果の詳細報告

1. 炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル	33
1-1. 陸域炭素循環モデル	33
1-2. 海洋生物地球化学モデル	41
1-3. 陸域炭素循環モデルにおける植生態移動予測モデルの構築	50
2. 温暖化・大気組成変化相互作用モデル開発	56
2-1. 温暖化・大気組成変化相互作用	56
2-2. 温暖化—雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価	65
3. 寒冷圏モデル開発	76
4. 気候物理コアモデル改良	81

I. 研究計画の概要

1. 研究の主旨

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(CO_2)濃度の将来について、人間活動による CO_2 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 CO_2 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。 CO_2 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 CO_2 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入れら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 CO_2 やメタン(CH_4)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ので、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 CO_2 や CH_4 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. 研究概要

大気・海洋・陸地面の、主に物理的状態を扱う「物理気候モデル」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他の課題（陸域生態系モデル作成のためのパラメタリゼーションに関する研究、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プロセス研究を依頼し、モデルの確度向上を図る。

3．研究年次計画

平成14年度：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。

平成15年度：サブ課題ごとに部分統合モデルの開発。

平成16年度：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-FARに間に合うようまとめる。

平成17年度：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。

平成18年度：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14年度研究計画

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気候モデル（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」を作る作業に着手する。

（1）炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル開発

海洋炭素循環に関して、地球温暖化領域で進められている詳細な生物・地球化学過程（10以上の成分）を含むモデルの開発を進める傍ら、統合モデルに適切な、より簡略なプロセス（4成分程度）を含むモデルをつくり、東大気候センターで開発された海洋

モデルCOCOの中解像度版に導入する作業に着手する。

陸域炭素循環に関して、生態系変動研究領域で使われているSimCYCLEモデルを、統合モデルに合うよう簡略化を進める。解像度に関して、生態系研究領域で地表面を詳しく扱うべく、高解像度化しているのとは逆に、統合モデルの予定解像度約100kmに見合うようプロセス・モデルを作る、同時に、水循環領域で使われている地表面プロセスモデルMATSIROとSimCYCLEの統合を検討する。

(2) 温暖化・大気組成変化相互作用モデル開発

大気組成研究領域で現在行われている「全球化学天気予報」のモデルを統合モデルに組み入れる為の改造を行う。その一つは、高解像化(280km→100km)とそれに見合う大気化学プロセスの選択を行うことである。

(3) 寒冷圏モデル

氷床変動モデルに関しては、当面地球温暖化研究領域での独自の研究を進めるにとどめる。

(4) 物理気候コアモデル改良

物理気候コアモデルに関して、高度約80kmまでの成層圏・中間圏までを含め、同時に鉛直解像度を高くする作業に着手する。中層大気化学(オゾン層化学)過程で統合モデルに適切なプロセスモデルの考察も行う。

5. 平成14年度実施体制

海洋科学技術センターを主管研究実施機関とし、研究代表者を松野太郎(地球フロンティア研究システムシステム長)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。

(1) 炭素循環、炭素循環・気候変化結合モデル開発

代表者：及川 武久

陸域炭素循環モデル

伊藤 昭彦、田中 克典、市井 和仁

海洋生物地球化学モデル

山中 康裕、岸 道郎、相田 眞希、吉川 知里、河宮 未知生

陸域生態系変動モデル

甲山 隆司、佐藤 永

(2) 温暖化・大気組成変化相互作用モデル開発

代表者：高橋 正明

温暖化・大気組成変化相互作用モデル

滝川 雅之、渡辺 真吾、永島達也、須藤 健悟、竹村 俊彦

温暖化－雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

久芳 奈遠美、鈴木 恒明、野沢 徹、對馬 洋子、鈴木 健太郎、中島 映至

(3) 寒冷圏モデル

代表者：阿部 彩子

大垣内 るみ、瀬川 朋紀

(4) 気候物理コアモデル改良

代表者：江守 正多

鈴木 恒明、鈴木 立郎、高田 久美子、木本 昌秀、羽角 博康、松野 太郎、

渡辺 真吾

II. 研究成果の概要

1. 総括

地球システムの統合モデルは、これまでその概念については議論されていたが、実際に多くの要素モデルを結合して統合モデルとする試みは、ごく最近急速に世界の主要研究センターで開始されたところである。その背景には、地球温暖化が炭素循環、とりわけ陸域生態系の CO₂ 吸収能に大きな影響を与えるおそれがあることが知られ、今後の地球温暖化予測は炭素循環のフィードバックを含むものでなくてはならないとの認識がある。このような時期に、関連各分野の専門家が集まっており、日本で唯一統合モデル開発の力を持つ地球フロンティアがそれに向けてプロジェクトを開始した事はきわめてタイムリーで有効であった。この事が第一の成果である。

このように世界的に見ても開拓段階のしかも多専門の緊密な連携・協力を必要とする研究課題であるから、適任な研究者を集める必要がある。公募により 6 名の研究者の参加を得たが、いずれもそれぞれの専門において優れ、かつ「統合モデルづくり」に強い意欲を持った人々で、地球フロンティアの既存領域を横断して行う当プロジェクトのしっかりとした核を作ることができた。これが第二の成果である。

平成 14 年度は各分野のメンバーがそれぞれの分野でのモデリングの現状をレビューし、統合モデル開発の戦略を練って、モデルの大枠とそこに至る道筋を決めるため 7 回にわたり討論の場を持った。その結果、まだ詰め切れていない所もあるが、モデルの大枠の構造が決まり、IPCC 第 4 次報告書（2007 年）に統合モデルによる温暖化予測実験を行える見通しが立った。これは初年度として最も重要な成果である。なお、これから開発する必要のある海洋・生物化学モデルに着手するとともに物理気候コアモデルを成層圏まで拡張する作業を開始し、それぞれ困難をかかえながらもとに角動き始めた。

2. サブテーマごと、個別項目ごとの概要

（1）炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル

陸域炭素循環モデル

大気 CO₂ 濃度に短期～長期的な影響を与える陸域生態系の炭素収支を推定し、陸域生態系の機能量を代表する指標である葉面積指数（LAI）を予報する生態系動態モデルを構

築する。平成 14 年度はSim-CYCLEを基本とした生態系モデルの骨格を作成し、同時に off-lineによる応答シミュレーションを行った。

海洋生物地球化学モデル

4 成分をもつ簡略な海洋生態系モデルを東大気候センターと地球フロンティアが共同開発する海洋大循環モデルCOCOに組み込み、7 年間の積分を行った結果を観測データと比較した。海洋生態系にとって重要な物理環境である混合層深度は大循環モデルによって比較的良好に再現されており、北大西洋北部と南極海における振幅の大きな混合層深度季節変動もモデルによって表現されている。また植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル濃度分布についても、北大西洋・北太平洋北部や赤道域、南極海といったエクマン湧昇域で濃度が高くなる様子、北大西洋北部と南極海における急激な混合層深さの変化のため植物プランクトンのブルームが起こる現象などがモデルにより再現された。炭酸系のモデルへの組み込みも既に完了しており、定常に達するのに必要な数千年の積分をこれから行う予定である。全球の海洋生態系モデルとしては高解像度といえる本研究での設定の下こうした長期積分を行うためには地球シミュレータを用いても3ヶ月程度の実時間が必要であり、従来のスーパーコンピュータでは事実上不可能といえる。

陸域炭素循環モデルにおける植生帯移動予測モデルの構築

陸域統合モデルの構築に向けて、その構成要素とする植生動態モデルを開発する。限られた人的資源と期間のもとで一定の成果を得る為に、これは温暖化の影響が最も顕著に生じると考えられている北方域の植生変化に特化した植生動態モデルとする。高等植物にとっての極限環境である高緯度地域では、既存の DGVM で仮定されているギャップ動態よりも、微少な気候変化や山火事による攪乱が植生動態を最も強く規定している。そこで、そのような高緯度地域に特異的な動態を扱った極域生態系移行モデル ALFRESCO をベースとして用いる。ALFRESCO は、経験的データに基づいて極域生態系の移行を予測するものの、統合モデルの構築に際して必須の情報である木本現存量やサイズ構造を扱わない。そこで、これらを扱えるように、ALFRESCO に植物の成長・拡散モデルを組み込むという拡張を試みる。また、より信頼の置ける予測を得るため、次の拡張を試みる。(1)種子拡散を明示的に扱う、(2)極域のヘテロ的景観を適切に扱う。

(2) 温暖化・大気組成変化相互作用モデル開発

温暖化・大気組成変化相互作用

対流圏オゾン、それ自身が地球温暖化に影響を与えるだけでなく、二酸化炭素やメタ

ンなどの温暖化気体の光化学的寿命をコントロールするという重要な役割を持っている。本サブグループでは化学過程と陽に結合した大気大循環モデルを用いて対流圏・成層圏オゾンと気候変動との相互作用を定量的に評価するとともに、統合モデルにおいては地表植生モデルや海洋化学モデル、エアロゾルモデルなどの他のサブモデルとの相互作用についても考慮する予定である。平成14年度においてはまずその端緒として、大気大循環モデルにおける高精度物質移流スキームの導入と、対流圏化学結合大気大循環モデルを用いた温暖化・大気組成変化相互作用に関する数値実験を行った。高精度移流スキームにより、モデルの上部対流圏における比湿の過大評価傾向が改善されることが確認できた。また対流圏光化学結合大気大循環モデルを用いた将来予測実験を行った結果、主要な温暖化起源物質であるメタンおよび硫酸エアロゾルの濃度が気候変動および水蒸気量の変動に大きく影響されることが分かった。

温暖化—雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

このグループでは大気大循環モデル(GCM)でエアロゾルが雲の光学特性に及ぼす影響、すなわち対流圏エアロゾルの間接放射強制力を評価するためのパラメタリゼーションを開発することを目指している。まず GCM におけるエアロゾルの間接放射強制力の評価についての現状を把握するため、CCSR/NIES-GCM と Max Plank Institute GCM に関して文献調査、検討を行った。また、地球フロンティア研究システムで開発した雲微物理モデル(Kuba et al., 2003)により、雲粒の凝結核(Cloud Condensation Nuclei: CCN)が雲の微細構造に及ぼす影響を評価するパラメタリゼーションを開発した。このパラメタリゼーションを有効に機能させるために、エアロゾル気候モデルである SPRINTARS の出力の取り入れ方の検討を行った。NICAM(New Icosahedral Atmospheric Model, Satoh, 2003, Tomita, 2002)を用いた雲微物理モデル搭載超高解像度全球モデル開発の準備として、ヘブライ大学 HUCM 雲微物理モデル(Khain et al., 1999)と気象庁 MRI/NPD-NHM 非静力メソスケールモデル(Saito and Kato, 1999)を基に、新たに3次元ビン法雲微物理モデルを開発した(井口、2002)。

(3) 寒冷圏モデル開発

(4) 気候物理コアモデル改良

大気・海洋・陸地面の主として物理過程から成る気候モデル(CCSR/NIES モデル、既存)で成層圏の諸プロセスを改良もしくは新しく取り入れたモデルを開発する。

大気モデルの改良に関しては、現モデルで不十分な中層大気(成層圏・中間圏)の諸プロセスの改良を図る。即ち、中層大気中への人為起源物質の侵入により、中層大気特有

のオゾン層の物理・化学過程と太陽からの放射の変動が相互に影響し合って中層大気の変動を引き起こすと共に、それが下層対流圏の変動と結合して気候変動を生じる機構をモデル実験によって明らかにする。また、内部重力動波の挙動とそれが大気循環に及ぼす影響を超高解像度大気モデルによって明らかにする。

本年度は、気候モデルの上端を上部中間圏（80 km）まで拡張し、モデルの水平・鉛直解像度ならびに物理過程のチューニング・パラメーターを変化させた実験を数十ケース行うことにより、中層大気の様々な過程を支配する大気波動の役割の重要性を認識できた。本年度のシミュレーションで達成した解像度は、水平 T106 (1.1 度格子)、鉛直層厚 200 m である。また、解像度を変えて実験した際に、地球シミュレーターの計算機資源と、実際の計算時間をどの程度必要とするかも調査した。また、従来のモデルで用いられてきた鉛直座標系は σ 座標系であり、地表から離れた対流圏界面付近以上の高度では、力学過程の表現に問題が生じる可能性が指摘されていたが、これを σ - p ハイブリッド座標系に変更することにより、成層圏以上での計算精度が向上した。一方、このモデルに特有の問題である、対流圏界面付近の低温・湿潤バイアスに関しては、その実態の詳細と、原因となる過程に関する調査を進めたが、その解決は次年度の課題として残された。

3．波及効果、発展方向、改善点等

開拓段階にある新しい研究課題に着手したばかりなので将来についての具体的議論はまだ早過ぎる。しかし、地球温暖化問題の将来を考えると、温暖化を「防止」する事は不可能で、ある程度の温室効果ガスの増加（CO₂ 2 倍ぐらい）は不可避と思われ、そのため気候変化・環境変化を予測する事は、適切な対応策をとるために必須の社会の基盤情報となると予想される。このプロジェクトはそれへ向けての第一歩と考えている。

4．研究成果の発表状況

< 口頭発表 >

発表者名： 佐藤永

発表題名： 次世代の気候モデルにおける植生帯移動予測の役割

発表場所等： 21 世紀地球科学技術を考える会 (2003 年 2 月 19 日東海大学校友会館)

須藤健悟、高橋正明、秋元肇, 熱帯対流圏界領域・上部対流圏におけるオゾン収支：全球 3 次元化学モデルを用いた考察, 日本気象学会 2002 年春季大会 (専門分科会), 大宮ソニックシティー, 2002 年 5 月.

Sudo, K., M. Takahashi, T. Nozawa, H. Kanzawa, H. Akimoto, SIMULATION OF FUTURE OZONE POLLUTION AND ACID DEPOSITION: A GLOBAL MODEL STUDY, 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC SCIENCES AND APPLICATIONS TO AIR QUALITY, Tsukuba, Japan, 11-13 March, 2003.

Takigawa, M., K. Sudo, M. Takahashi, and N. Takegawa, Estimation of the contribution of inter-continental transport during the PEACE-A campaign by using a global chemical model, America Geophysical Union fall meeting, San Francisco, U.S.A., 6-10 December, 2002.

Takigawa, M., H. Akimoto, K. Sudo, M. Takahashi, and N. Takegawa, Estimation of the contribution of inter-continental transport by using a global chemical model, Data Workshop for ITCT 2K2 and PEACE, Boulder, U.S.A., 5-6 March., 2003.

S. Watanabe, Development of a middle atmosphere GCM at the Frontier, GRIPS annual workshop, Mar 6 2003, Washington DC., USA.

< 論文発表 >

Kuba, N., H. Iwabuchi, K. Maruyama, T. Hayasaka, T. Takeda and Y. Fujiyoshi, Parameterization of the effect of cloud condensation nuclei on optical properties of a non-precipitating water layer cloud, J. Meteorol. Soc. Japan, 81, 2,393-414, 2003.

Kuba, N. and H. Iwabuchi, The revised parameterization to predict cloud droplet number concentration and the retrieval method to predict CCN number concentration, J. Meteorol. Soc. Japan, submitted, 2003.

5 . 国際共同（協力）研究の状況

本課題で開発を進める、地球システム統合モデルは、生物・化学過程をも含めた様々な要因が、相互作用を持ちながら地球環境を形成するプロセスを、できるだけ現実的に再現するものであり、従来の大気海洋結合大循環モデルが将来的に発展していく方向として IPCC の第 3 次報告書でも重要視されている。実際、同書の「政策決定者向けの要約<SPM>」で挙げた、気候モデルと気候の諸過程に関する研究での、今後の課題には次の点が明記されている：

- 気候システムの物理的及び生物地球化学的両面において、重要なが未解明の諸過程やフィードバックを理解し特徴を明らかにする。
- 物理的な気候と生物地球化学システムのモデルをより効果的に関連させ、さらに人間活動の振る舞いとの結合を改善する。

一方、2003 年度のヨーロッパ地球物理学会・アメリカ地球物理連合の合同会合（EGS-AGU joint meeting）では「地球システム科学」に関する独立したセッションが設けられ活発な議論が交わされた。地球環境を、互いに影響しあう多様な構成要素の集合、すなわちシステムとして捉える学際的な研究の隆盛は世界的な趨勢であると言える。

このような観点に立ち、以下、個別項目に関係する個々の共同・協力関係は除き、一般的な国際共同(協力)研究の状況について述べる。

（１）課題に関連する国際研究協力の枠組み

A. 地球変動の解析・解釈・モデリング（GAIM）

GAIM は、国際学術連合会議（ICSU）の下に策定された「地球圏 - 生物圏国際協同研究計画（IGBP）」のコアプロジェクトのひとつであり、IGBP における他のコアプロジェクトで得られたデータやモデル結果から、地球変動の総合的理解や、モデル構築を行うことを目的にしている。IGBP は 1986 年に設立され、地球規模の生物圏が大気・海洋の物理的環境と相互作用をもちながら地球環境を形成する過程を明らかにしていこうというプロジェクトであり、GAIM 以外にも、コアプロジェクトとして、「地球変化と陸域生態系研究計画（GCTE）」や「地球大気化学国際協同研究計画（IGAC）」、「全球海洋フラックス合同研究計画（JG0FS）」など本課題のサブテーマに関連の深いものが多い。それらを統合する役割をもつ GAIM は本課題からの成果を広く海外の研究者にも伝えるのに適した枠組みであると言える。GAIM はまた、「世界気候研究計画（WCRP）」の

地球システムのモデル化に関するグループとの協力も図っている。GAIM のタスクフォースには議長の J.-H. Schellnhuber（英国）をはじめ各国から 24 名の研究者がメンバーとして名を連ねており、日本からは 2003 年から 3 年の任期で阿部彩子（東大）、河宮未知生（地球フロンティア）が参加している。二名ともに本課題のメンバーであり、これは本課題の成果を世界に発信していく上で大きな利点となる。

B. 全球炭素プロジェクト（GCP）

GCP は、地球温暖化問題において、炭素循環の科学的解明が求められる中で、IGBP、「地球環境変化の人間・社会的側面に関する国際研究計画（IHDP）」及び WCRP の連携さらには、生物多様性科学国際協同プログラム（DIVERSTAS）の協力の下に、炭素循環をテーマとした共同プロジェクトが計画されてきており、現在実行計画立案段階にある。WCRP、IHDP、DIVERSTAS は、IGBP とは異なった視点を持ちながらも、IGBP と同様地球環境の理解に主眼を置いた国際的な研究の枠組みである。WCRP は気象学・気候学的見地、IHDP は社会科学的見地、DIVERSITAS は生物多様性に関する科学の見地から、それぞれ研究を行っている。

GCP の計画書によれば、陸域と海洋の炭素循環を地球規模で統一的に扱う全球大気海洋結合炭素循環モデルの構築は GCP の重要な活動として位置づけられており、本課題のサブテーマ「炭素循環・気候変化結合モデル開発」と密接に関係する。また炭素循環については米国が「炭素循環科学プログラム（Carbon Cycle Science Program）」を立ち上げており、全米科学財団（NSF）など複数の資金提供機関が資金を提供している。結合炭素循環モデルの構築の必要性はここでもやはり強調されている。

（2）日本—EU 間の研究協力状況

平成14年度における、日本—欧州連合（EU）間の研究協力に関する会合としては、「気候研究に関する日本・欧州連合の第2回シンポジウム（Second EU-Japan Symposium on Climate Research）」（ベルギー・ブリュッセル、2003年3月13 - 14日）が開かれ、日本側からは、当課題担当者を始め、「人・自然・地球共生プロジェクト」の各課題担当者や、気候モデル開発関係者など23名の参加があり、日本の主要な気候変動モデル開発状況が紹介された。欧州連合（EU）側も英国のハドレー・センター（Hadley Centre）、ドイツのマックスプランク研究所（MPI）、フランスの気象局/国立気象研究センター（Météo France / Centre National de Recherches Météorologiques）、ヨーロッパ中期予報センター（ECMWF）など、主要モデリングセンターから21名の参加があり、それぞれの現状と計画が報告され

た。会議は日本とEUにおける気候モデル開発・研究の現状についての情報、今後の研究協力関係について意見交換をするよい機会となった。

現在 EU では、4 年ごとに更新している「研究・技術開発の枠組み計画（Framework Programme for Research and Technological Development）」の第 6 期（2002-2006 年）に当たり、その中の重点項目に、「持続的発展、地球変動、および生態系（Sustainable Development, Global Change and Ecosystems）」があり、その下には、「持続可能なエネルギー・システム」、「持続可能な陸上輸送」となっており、「地球変動と生態系」が取り組まれており、共生プロジェクト日本モデルミッションに対応するところが多い内容（understanding, detection, mitigation, adaptation, preserving of ecosystem などから構成）である。

特に、当課題のサブテーマ（１）炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデルでは、生態系にかかわる過程についてのモデル開発が進められていることから、今後、EU と共通の対象についての密接な研究協力の可能性がある。ただ、当課題では、IPCC という、第一作業部会的な観点から、気候モデル開発の一環として、生態系を扱っているのに対し、EU 側は、生態系の脆弱性・適応等の影響評価や緩和策など第二・第三作業部会的な観点も含む広い観点からの研究を進めており、この点留意して協力を進める必要がある。

（３）日米の研究協力状況

米国は、京都議定書の批准は保留しているが、平成 14 年度始めに成立した IPCC 第 4 次評価報告書の新体制においては、科学的評価を担当する第 1 作業部会の共同議長を出し、また第一作業部会の技術支援室（TSU）も担当するなど、温暖化予測など気候変化の研究に対しては重要視した積極的な立場が示されている。この新しい状況を踏まえ、日米科学技術協定、および地球変動研究・予測分野の日米政府間実施取り決めに基づく第 11 回日米変動研究ワークショップを、日本側では地球フロンティア研究システムを中核期間として、平成 15 年度に日本で開催する方向で提案中である。前回は、平成 13 年度末に「気候と水」をテーマに行われているが、次回は、第 4 次評価報告書に向けた研究成果が現在求められていることから、それに対する両国間の協力関係について討論することが必要と考えられる。当課題に関しても、日米協力に関し積極的に取り組む必要がある。

III. 研究成果の詳細報告

1. 炭素循環モデル、炭素循環・気候変化結合モデル

1—1. 陸域炭素循環モデル

担当機関：地球フロンティア研究システム

研究者名：伊藤昭彦（生態系変動予測研究領域）

田中克典（水循環予測研究領域）

及川武久（生態系変動予測研究領域 / 筑波大学 生物科学系）

市井和仁（名古屋大学大学院 環境学研究科）

a. 要約

大気CO₂濃度に短期～長期的な影響を与える陸域生態系の炭素収支を推定し、陸域生態系の機能量を代表する指標である葉面積指数(LAI)を予報する生態系動態モデルを構築する。平成14年度はSim-CYCLEを基本とした生態系モデルの骨格を作成し、同時にoff-lineによる応答シミュレーションを行った。

b. 研究目的

陸域生態系による光合成と呼吸は年間100～120 Pg Cに達し、大気CO₂に関与する炭素フローの中では最大の規模を持つ。現在の地球環境変動によって陸域生態系機能に深刻な変化が発生すれば、大気-陸域間のCO₂収支にも変化が生じ、将来の気候温暖化の進行速度を有意に変化させるという仮説があるが、実際にいくつかの先駆的モデル研究によってすでに検討が始められている(Friedlingstein et al., 2003)。

共生第2課題で構築される統合モデルにおいて、炭素循環に関する陸域生態系機能を推定するモジュールを作成することが本サブグループの研究目的である。大気とのCO₂は植物による光合成と植物および土壌生物による呼吸が主であるが、長期的な生態系動態を再現するためには、生態系内部における複雑多様な過程を考慮する必要がある。それらの生理生態学的性質に関して解明されていることは少なく、一般的モデルの導出は困難であることから、経験的な部分を残しつつも誤差の少ないパラメタリゼーションを目指す。そのた

めに、共生第3（陸域生態系）などの観測プロジェクトと連携を深めつつモデル化を進める。

陸域生態系モデルのもう一つの用途は、炭素動態のシミュレーションから、水熱収支などの陸面過程に関係するパラメータを与えることである。特に重要なパラメータは葉面積指数（LAI、単位土地面積あたりの葉面積）であり、植生キャノピーにおける日射の吸収量や蒸散速度の推定に用いられる。陸域生態系モデルから、葉の炭素貯留量を介して LAI を高い精度で予報することができれば、陸面における水熱収支の予測性を向上させることができると思われる。

c. 研究計画・方法・スケジュール

・平成14～15年度

上記の研究目的は、既存の陸域炭素循環モデルであるSim-CYCLEと陸面過程モデルMATSIRO（Takata et al., 2003）のリンクを行うことで最も効率よく達成される。大気-陸域の相互作用について、Sim-CYCLEによるLAIに基づいてMATSIROが水熱交換と光合成速度を計算する。そのMATSIROによる光合成量に基づいて、Sim-CYCLEが植生の各部への分配、呼吸や枯死による消費、土壌中での分解といった生態系内部の諸過程を計算する（そのときにMATSIROによる地温や土壌水分を考慮する）。つまり、MATSIROは大気から陸域へのCO₂吸収、Sim-CYCLEは陸域からのCO₂放出を推定することで、合計として正味の交換量を得るという相補的な関係にある。

・平成15～16年度

モデルの動作確認は、様々な実測データを用いた検証を通じて行われる。第1に、共生第3（陸域）の地上観測班、環境省総合推進費S1のフラックス班などによる大気-陸域間の水・熱・CO₂交換の継続観測データを用いて小面積ベースでの検証を行う。そこでは熱帯多雨林からツンドラまで各種の生態系が対象となる予定である。第2に、共生第3（陸域）のリモセン班などによる広域的な植生活動の衛星観測データとモデル推定値を比較する。そこではLAI、光合成有効放射の吸収率、植生の光合成生産などの項目について全球スケールで比較検討が行われる予定である。

検証を経たモデルは、統合的地球システムモデルにおいて、陸面での水・熱・CO₂収支を介した気候的フィードバックをon-lineで与える役割を果たす。数値実験として、植生のCO₂濃度や温度変動に対する応答パラメータを変化させる感度分析や、異なる人為起源のCO₂排出シナリオを設定した予測実験が行われる。

・平成16～18年度

次の段階として、陸域生態系の構造的変化を考慮するための拡張が行われる。共生第2の植生動態班が開発する植生分布変動モデルとリンクすることで、生態系を構成する植物タイプ（常緑広葉樹、低木、単子葉草本など）の組成変化を考慮した、より現実に近い予測実験を行う。MATSIRO と Sim-CYCLE、植生動態モデルをリンクした陸域に関する総合的なモデルに収束させていく。最終的に、水熱収支-炭素収支-植生構造の変化が気候システムに与える影響を導入した統合モデルによる予測実験が実施される。

d. 平成14年度研究計画

既存の生態系モデル Sim-CYCLE を、気候モデルとの親和性を高めるべく書き換えを行う。具体的には、C言語で記述されているオリジナルのソースコードを FORTRAN 言語に変換する。同時に、地球シミュレータなどのベクトル計算機上での実行を想定してソースコードにベクトル化を施す。効率的な計算を行うため、ソースコードのベクトル化率は95%以上を目標とする。

上記作業と平行して、C言語版のSim-CYCLEに大気CO₂濃度と気候変動の予測シナリオを off-lineで入力する感度実験を行う。気候予測シナリオは、統合モデルの物理気候コアモデルとなるCCSR/NIESのほか、英国Hadleyセンターおよびカナダ気候センターによる大気-海洋結合大循環モデル（AOGCM）による数値実験から得られたものを使用する。対象期間は1950年から2099年までであり、IPCC-SRESによるA2およびB2シナリオに基づく気候予測実験の時系列データを逐次的に入力し、陸域生態系の炭素収支の応答を検討する。例えば、将来的に陸域の炭素貯留量が減少し、大気に放出されれば、炭素循環を結合した統合モデルではさらに温暖化が加速されることが推測される。

e. 平成14年度研究成果

研究計画に則り、気候モデルとのリンクを想定した既存モデル Sim-CYCLE をベースとした陸域炭素循環コンポーネントの開発と、予備実験を実施した。

e-1) 陸域炭素循環コンポーネントの概要

基礎となるモデル Sim-CYCLE (Simulation model of Carbon cYCLE in Land Ecosystems) は物質生産理論に基づいて生産力を評価するモデルである。多くのモデルに共通するように、Sim-CYCLE では図1に示す流れで生態系炭素循環を計算する。すなわち、立地条件を特定する入力データに基づいてそれぞれの生態系における環境(正味放射、土壌水分など)

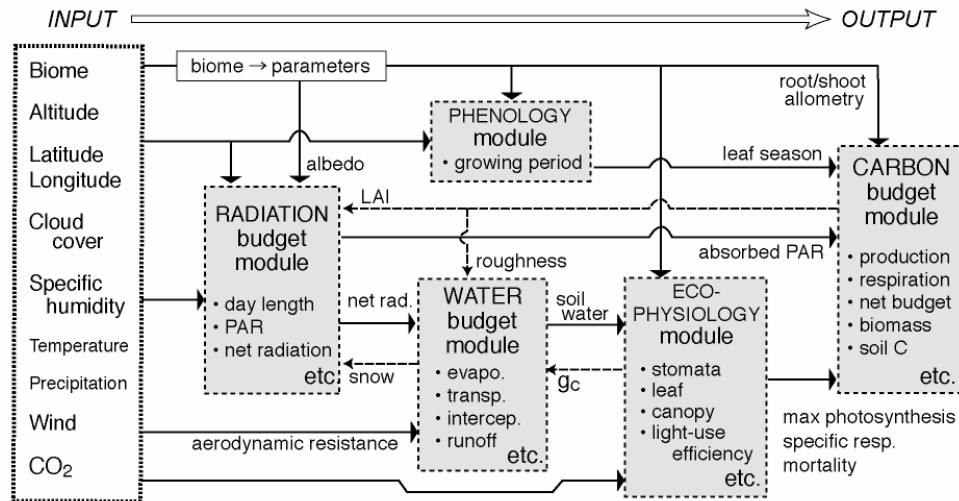


図 1：陸域生態系モデルを用いたシミュレーションの手順。

をより詳しく推定し、さらにそこから植生および土壌の生理生態学的パラメータや植物季節を決定して、最終的に生態系レベルの炭素フローと炭素貯留量の変化を推定する。そのため、炭素収支を正しく推定するためには、正確な入力データはもとより放射環境や水環境の妥当な推定も不可欠だが、様々な誤差要因による正味炭素収支推定への影響は完全には避けられない。

Sim-CYCLEの構造と基礎過程を表 1 と図 2 に要約した。炭素循環は 5 個のコンパートメントと 16 のフローに簡略化されている（図 1 a）。ただし草原生態系では C_3 植物と C_4 植物の各々に独立した炭素プールとフローが設定される。正味生態系炭素収支（NEP）は

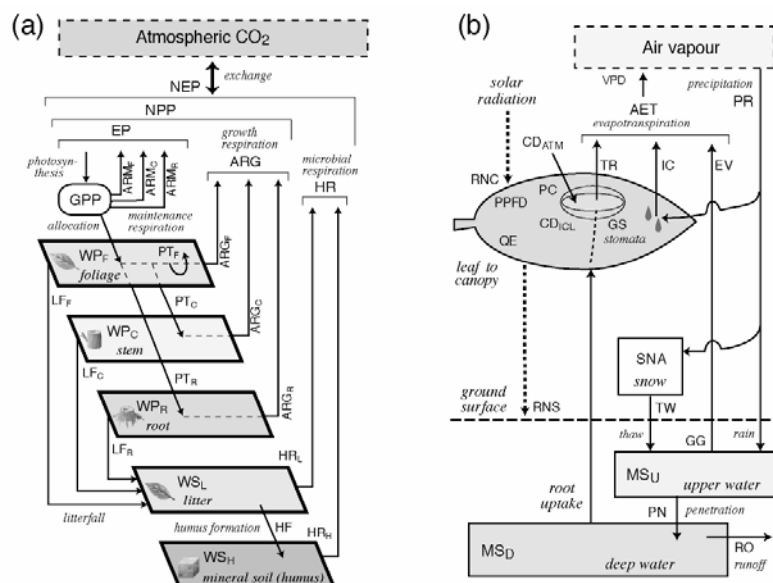


図 2：Sim-CYCLE の構造。(a)炭素循環のコンパートメントモデル、(b)水熱収支スキーム。

$$NEP = GPP - AR - HR$$

で求められる（GPPは総一次生産、ARは植生の独立栄養的呼吸、HRは土壌分解者の従属栄養的呼吸）。従来、炭素循環モジュールについては、Pasohの熱帯多雨林、水俣の温帯常緑広葉樹林、プレーリーのC₃/C₄混生草原、東シベリアのカラマツ林について生態学的調査データに基づいた検証が行われている（Ito and Oikawa, 2002 参照）。図1中の放射・水収支モジュールは図2bに示されている。キャノピー過程は個葉ガス交換をスケールアップすることで表現されるため、気孔コンダクタンス（Ball-Berry型モデル）に制御される

表1：Sim-CYCLEに含まれる諸過程の概要。

プロセス	概要	環境依存性	主要なパラメータ
光合成有効放射 (PAR)	Iqbalの経験式、直達放射と散乱放射に分離して評価。	緯度, 季節, 雲量	-
正味放射 (R _n)	短波放射収支はアルベドに依存。長波放射収支は表面温度, 飽差, 雲量の経験式より。	VPD (飽差), 表面温度, 雲量	アルベド, 積雪
蒸発散	可能蒸発散はPenman-Monteithモデルより。水分利用可能性 (土壌水分+降水) による制限を考慮した実蒸発散。	温度, 風速, 土壌水分, 降水, VPD	キャノピーコンダクタンス
光合成 (GPP)	個葉の光-光合成関係 (直角双曲線) を門司-佐伯法でキャノピーにスケールアップ。	温度, 土壌水分, PAR, 日長, 大気CO ₂	量子収率, 光飽和時の光合成速度, LAI, 光減衰係数, 比葉面積
呼吸 (AR)	2-コンポーネントモデル (成長呼吸と維持呼吸)。維持呼吸のみ温度に対し指数関数的応答 (温度順化含む)。	温度	単位重あたりの呼吸速度, Q ₁₀ (温度の関数)
分配 (PT)	理論的な最適LAIに基づいて葉に炭素を分配する。余剰分をroot/shootのアロメトリーに基づいて根と幹に分配。	間接的に光合成速度と葉フェノロジー	最適LAI, root/shoot比
枯死 (LF)	一定割合の老化による枯死と草原・落葉樹における葉フェノロジー	(葉フェノロジー) 温度, 降水量	単位重あたりの枯死率
分解 (HR)	平均滞留時間が異なる2層モデル。	土壌水分, 地温	単位重あたりの分解率

蒸散と光合成との間には相関関係がある。そして葉面積指数 (LAI) はキャノピーの蒸散と光合成の機能量に関係する指標となっている。また、土壌水分の不足は光合成と土壌有機物分解の両方に対する律速要因に設定されている。

e-2) 予備実験

e-2)-1 実験設定

全球計算は空間分解能 30 分 (約 55km) メッシュで行い、Olsonの現存植生分布、NCEP/NCAR再解析を長期平均 (1961 ~ 1998 年) した気象条件、1950 年当時の大気CO₂濃度を設定し、先ず炭素収支の定常状態を求めた。次に、IPCC/DDCから取得した大気海洋

結合大循環モデルによる気候予測シナリオをSim-CYCLEに入力し、陸域炭素収支を介したフィードバックの無い条件で応答を見るシミュレーションを行った。計算時間ステップは1ヶ月とし、1950～1989年は観測された大気CO₂濃度、1990～2099年はIPCC-SRESによる温室効果気体排出シナリオを想定している。

e-2)-2 実験結果

1950～1990年の間に、陸域生態系の年間純一次生産力は60から63 Pg Cへ、植生バイオマスは515から530Pg Cへ、土壌有機炭素は1360から1370 Pg Cへ変化していた。この期間に生じた気候変動は僅かであり、大気CO₂濃度上昇による光合成への施肥効果が卓越した影響を及ぼしていた（土地利用変化は考慮されていない）。この時点では用いた3種類のGCM（CCSR/NIES、HadCM3、CCCma）によるシナリオの間で炭素収支のトレンドに有意な差は見られない。

1990年以降、大気CO₂濃度は、SRES-A2シナリオでは847 ppmv、SRES-B2シナリオでは621 ppmvまで増加する。それに対応して、全陸域の平均温度は3～7の温暖化を示し、GCM間で応答感度は相当に異なっていた。全陸域の平均降水量はCCSR/NIESの場合は明らかに増加したが、他は現状維持で推移していた。いずれの場合も、気候変動には明らかな地理的変異があり、温度上昇は高緯度域で顕著であり、GCMごとに降水量の増加・減少の地域性が見られた。全陸域の光合成生産、生態系呼吸（植生と土壌微生物の呼吸）、植物バイオマス、土壌有機炭素のトレンドは図3に示されている。現在の1.7～2.4倍に及ぶ大気CO₂濃度上昇による施肥効果の影響で、光合成生産量は30%以上増加し、植物バイオマスは110～200 Pg Cもの増加を見せていた。一方で、温度上昇と一部地域での降水量増加は微生物活動を促進し、土壌からのCO₂放出を加速させ、それが植生からの枯死物供給を上回ることによって、土壌有機炭素貯留を減少させる場合があった。温度上昇幅の大きいシナリオで特にその傾向が顕著に見られた。結果的に、全体の炭素貯留量（＝正味収支）は、大幅なプラスとなるもの（CCCma）から、21世紀の後半からマイナスに転じるものまで不確定性の幅が大きいことが明らかとなった。例えば、ユーラシアの亜寒帯林とアマゾンの熱帯多雨林では、同じ大気CO₂シナリオに基づくにもかかわらず、気候モデルによるシナリオ間で炭素収支の推定結果で量だけでなく定性的にも異なる結果が得られた。

e-2)-3 感度実験

上記の数値実験において貯留量の減少が見られた土壌有機炭素について、分解率のパラメータを増減した実験や、地温上昇を抑制するなどの感度実験を行った結果、土壌からのCO₂放出は（特に長期的には）生態系全体の炭素収支に強い影響を与えることが示唆された。このことは、今後の観測研究に対して、土壌分解に関する性質を重点的に測定してパラメタリゼーションの精度を向上させるよう提言する必要があることを示している。

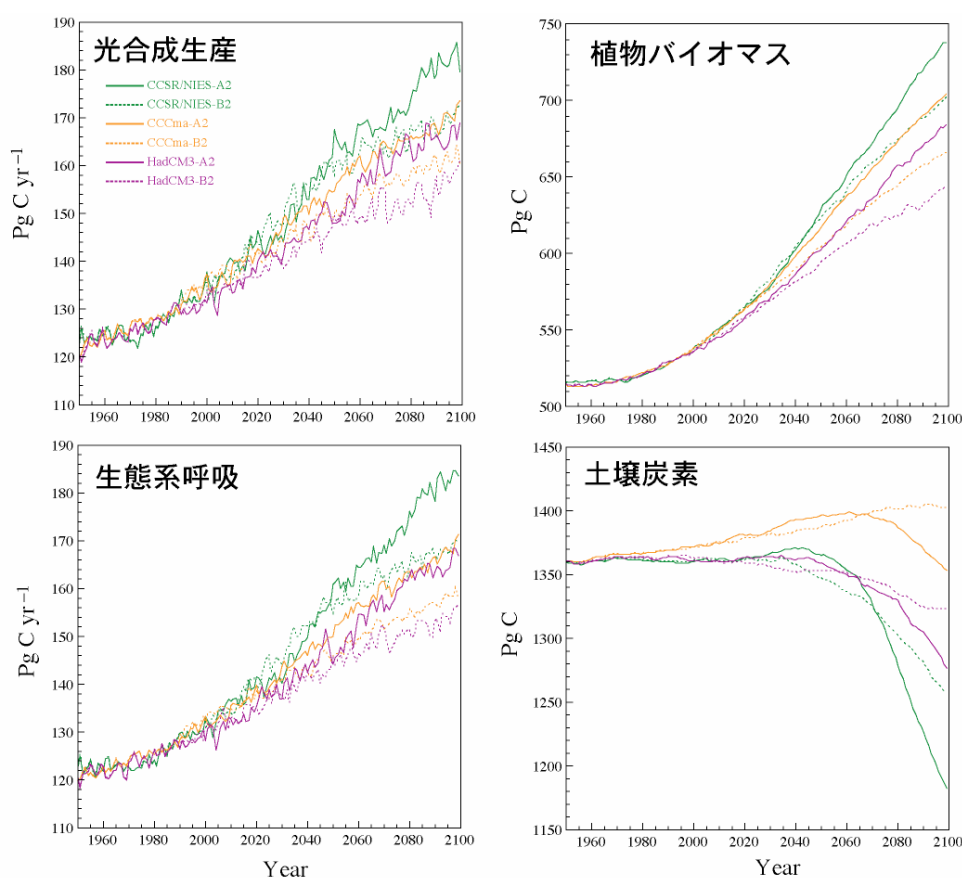


図3：Sim-CYCLE の off-line 実験による全陸域生態系における炭素動態の変化予測。IPCC-SRES による排出シナリオを設定した3種類の大気海洋結合モデルによる気候予測に基づく。

f. 考察

平成14年度において予定された作業はほぼ達成されたので、次年度は開発されたモジュールについて実測データを用いた比較検証を実施する必要がある。予備実験では大気CO₂濃度上昇による植生への施肥効果と、温度上昇による土壌有機物分解の促進効果が顕著であったが、それらは共生第3課題（陸域）において実験的・観測的研究が行われる分野で

ある。例えば、北海道のカラマツ林において高CO₂濃度への暴露実験が行われるので、その結果をモデル検証に活用するなどの方途が考えられる。広域的には、MODISなどの人工衛星によるLAIデータと全球レベルで比較検証を行うことが有効であると考えられる。また、可能であれば陸域CO₂収支が大気CO₂濃度の時空間分布に与える影響を、大気輸送拡散モデルによって再現し、観測データと比較することでtop-downな検証を行う。

その一方で、現在の陸域生態系モデルに導入されていない植生分布の変動(Foley et al., 2000)について、植生動態グループと連携を取りつつ拡張を進めていく必要がある。そこでは、植物間の競争過程、火災などの攪乱過程、さらには人為的な土地利用変化などが対象となるが、それら非常に複雑な現象を取り入れたときに徒に不確定性を拡大させないよう留意する。

g. 引用文献

Foley, J.A., S. Levis, M.H. Costa, W. Cramer, and D. Pollard, Incorporating dynamic vegetation cover within global climate models, *Ecol.Appl.*, 10, 1620-1632, 2000.

Friedlingstein, P., J.-L. Dufresne, P. Cox, and P. Rayner, How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle, *Tellus*, 55B, 692-700, 2003.

Ito, A., and T. Oikawa, A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation, *Ecol.Model.*, 151, 147-179, 2002.

Takata, K., S. Emori, and T. Watanabe, Development of the minimal advanced of the surface interaction and runoff, *Glo.Plan.Change*, in press, 2003.

h. 成果の発表

1—2．海洋生物地球化学モデル

担当機関名：地球フロンティア研究システム

研究者名：河宮 未知生（モデル統合化領域）

吉川 知里（地球温暖化予測研究領域）

相田 眞希（地球温暖化予測研究領域）

山中 康裕（地球温暖化予測研究領域 / 北海道大学地球環境科学研究科）

岸 道郎（地球温暖化予測研究領域 / 北海道大学水産科学研究科）

a. 要約

4成分をもつ簡略な海洋生態系モデルを東大気候センターと地球フロンティアが共同開発する海洋大循環モデルCOCOに組み込み、7年間の積分を行った結果を観測データと比較した。海洋生態系にとって重要な物理環境である混合層深度は大循環モデルによって比較的よく再現されており、北大西洋北部と南極海における振幅の大きな混合層深度季節変動もモデルによって表現されている。また植物プランクトン現存量の指標となるクロロフィル濃度分布についても、北大西洋・北太平洋北部や赤道域、南極海といったエクマン湧昇域で濃度が高くなる様子、北大西洋北部と南極海における急激な混合層深さの変化のため植物プランクトンのブルームが起こる現象などがモデルにより再現された。炭酸系のモデルへの組み込みも既に完了しており、定常に達するのに必要な数千年の積分をこれから行う予定である。全球の海洋生態系モデルとしては高解像度といえる本研究での設定の下こうした長期積分を行うためには地球シミュレータを用いても3ヶ月程度の実時間が必要であり、従来のスーパーコンピュータでは事実上不可能といえる。

b. 研究目的

海洋中の全炭酸鉛直分布は表層付近で濃度が低くなる特徴的な分布をしている。二酸化炭素の大気海洋交換にとって大きな意味を持つこうした分布は生物ポンプ・アルカリポンプ・物理ポンプといった過程によって決定されており、中でも表層生態系における有機物の形成とそれに続く沈降に起因する生物ポンプが最も重要な寄与をなしている。その生物ポンプの効率は、海洋混合層の深さやエクマン湧昇、大気による鉄分の輸送など様々な物理過程から影響を受けている。したがって人為起源二酸化炭素に起因する気候変動が生物ポンプを変化させ、さらに海洋の二酸化炭素吸収に正または負のフィードバックをもたら

可能性は十分にある。

ハドレ - センター(英)や IPSL(仏)が行った陸域 - 大気 - 海洋結合炭素循環モデルの結果によれば、気候変動が海洋の二酸化炭素吸収に与える影響は小さいとされる (Cox et al., 2000; Friedlingstein et al. 2001)。しかしながら、大気中の二酸化炭素濃度分布に基づいたインバージョン計算や大気中の窒素 / 酸素比の観測から算出した海洋二酸化炭素吸収の変動によれば、現在の海洋炭素循環モデルは気候変動に対する感度が鈍いことが示唆されている。大気中二酸化炭素濃度の予測のためには、引き続き海洋炭素循環モデルを改善していくことが必要である。本研究テーマでは、4変数の単純な海洋生態系モデルを炭素循環モデルとともに海洋大循環モデルへ組み込んで海洋炭素循環と気候変化との相互作用を調べ、さらに発展して陸域 - 大気 - 海洋結合炭素循環モデルの構築とそれによる全球規模炭素循環の研究を行うことを目的にしている。

c. 研究計画、方法、スケジュール

統合モデル海洋炭素循環コンポーネントに組み込む生態系モデルとしては、Oschlies and Garcon(1999) による植物プランクトン、硝酸、動物プランクトン、デトリタスを変数とする 4 コンパートメント表層生態系モデルを考えている(図 1)。

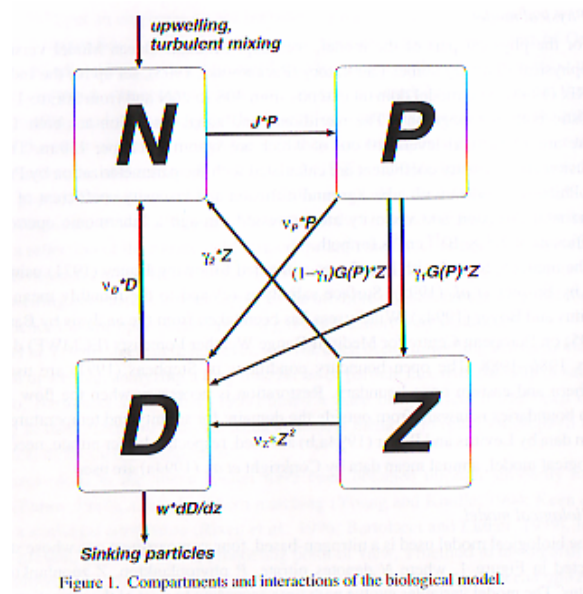


図 1：採用する海洋生態系モデルの概念図。N は硝酸、P は植物プランクトン、Z は動物プランクトン、D はデトリタスをそれぞれ表す。

こうしたモデルのほかにも、多くの研究者によって現実の生態系の構造をより忠実に再現するような複雑な構造をもったモデルも開発されているが、最終的に開発すべき統合モデルは海洋生態系モデルのほかにも多くの構成要素を含みしかもそれぞれにおけるパラメータの不確定性も大きい。こうした状況において、現在の段階であまり複雑な構造をもつ海洋生態系モデルを導入することは得策でないと判断し、上記の4コンパートメントモデルを採用することにした。このモデルの大循環モデルへの組み込みを早急に行い、さらに陸域炭素循環モデルを組み込んだ結合モデルを用いて二酸化炭素漸増実験を3年目までに行う予定である。

3年目以降は、この結合モデルを用いた実験及び結果の解析を行う一方、鉄の大気輸送の効果も考慮した最先端のモデルを構築していくことを考えている。鉄の効果を取り入れた海洋生態系モデルは既にいくつか開発されてきており（e.g., Leonard et al., 1999; Archer and Johnson 2000; Moore et al, 2002）、それらを参考に我々のモデルを作り変えていくのは十分可能であると考えられる。また鉄分の大気輸送に関しては、研究実施者の一人が開発したダスト輸送モデルが大気大循環モデルにすぐ組み入れられる形で既に存在する。これらを組み合わせることで大気による鉄分輸送が生物ポンプに与える影響を陽に取り扱えるようになり、氷期 - 間氷期サイクルや地球温暖化に関して提案されている鉄を介したフィードバック機構（Kumar et al. 1995）に関しより具体的な議論ができるようになることが期待される。

d. 平成14年度研究計画

海洋炭素循環に関して、地球温暖化予測領域で進められている詳細な生物・地球化学過程（10以上の成分）を含むモデルの開発を進める傍ら、統合モデルに適切な、より簡略なプロセス（4成分程度）を含むモデルをつくり、東大気候センターで開発された海洋モデルCOCOの中解像度版に導入する作業に着手する。

e. 平成14年度研究成果

COCO への海洋生態系モデルの組み込みを終え、モデルによる予備的の結果と観測との比較を行った（図2～図4）。比較結果は「f. 考察」で述べることとし、以下にはモデルの概略を記す。

前述のように、生態系モデルとしては Oschlies and Garcon (1999) のものを用いる。このモデルは硝酸 (N)、植物プランクトン (P)、動物プランクトン (Z)、デトライタス (D) の4つを予報変数として持ち、それぞれの現存量は窒素ベースで表される。変数の時間発展は移流拡散方程式に変数間の相互作用を表すソースシンク項を加えたもので記述される。モデルのパラメータ値には基本的に Oschlies and Garcon (1999) と同一のものを与える。ただしデトライタスの沈降と光合成速度の取り扱いには修正を加えた。Oschlies and Garcon (1999) は全層で一定の沈降速度 5m/d を与えていたが、ここでは表層 150m まで沈降速度 5m/d で沈降し、それより深いところでは Martin (1987) が提唱した曲線に従ってデトライタス沈降フラックスの鉛直方向に分布するとした。また Oschlies and Garcon (1999) が採用していた Eppley (1972) による光合成速度の温度依存性について、20 °C 以上の領域では温度依存性はないものとした。大気 - 海洋間二酸化炭素交換の際のピストン速度については、Wanninkhof (1992) が定式化したものを用いた。炭酸カルシウム殻の沈降過程については、デトライタスについてのものと同様に取り扱った。

海洋大循環モデル C O C O の水平解像度は東西ともに 1 °、鉛直の層数は 54 とした。うち表層 100 m に 20 層、100 m 深から 200 m 深までに 10 層おくことにした。混合層モデルとして Mellor and Yamada (1974) の level 2 のクロージャスキームを用いている。風応力や海面熱・淡水フラックス、日射といった表面境界条件については OMIP (Ocean Model Intercomparison Project, <http://www.clivar.org/organization/wgomd/pomip.htm>) により配布されているものを採用した。

モデルを積分する際の初期値には、硝酸については Conkright (1998) による気候値データを用いた。植物プランクトンや動物プランクトン、デトライタスについては全層で 0.1 mmol/m³ とした。全炭酸とアルカリ度については栄養塩のような気候値データセットが今のところ存在しないため、全層一様に一定値 2000 mol/m³ を与えた。これらの変数は自然界では鉛直・水平方向ともに有意な分布を持ち、ここでの実験のように積分期間が短い場合には全層に一定値を与えることは本来受け入れがたい設定ではあるが、予備的実験としては十分であろう。大循環モデルに対しては、生態系モデルと結合せずに一万年積分し定常状態に達した場を与え初期値とした。以上の初期値から 7 年分積分を行い、得られた 7 年目についての解析結果を次節に示す。

f. 考察

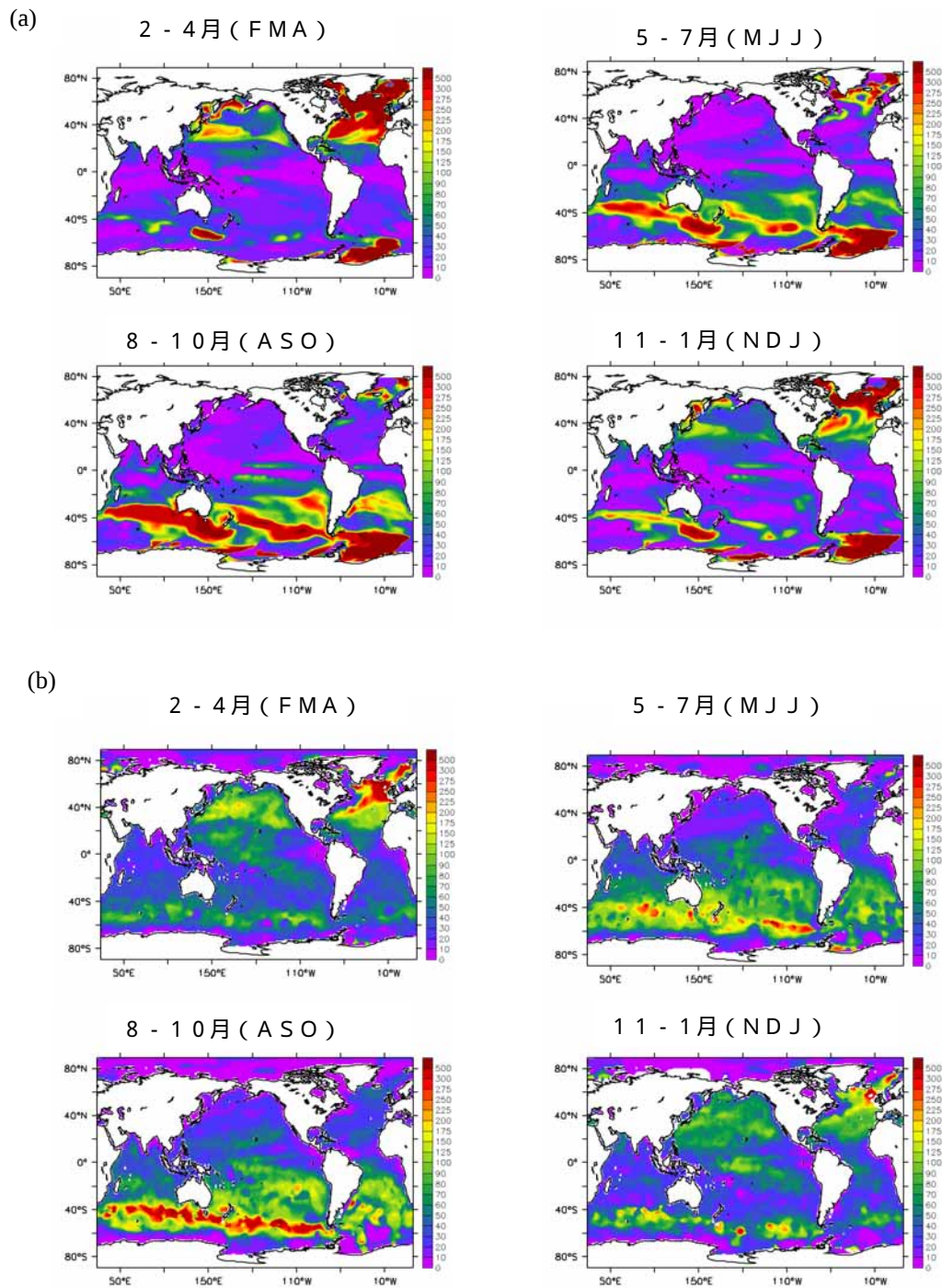


図2：混合層深度の季節変動。モデル結果 (a) と気候値データ (b)。単位は m。

大循環モデルが再現する混合層の深さは、植物プランクトンの光環境と栄養塩環境を規定するため生態系モデルにとって重要なファクターである。図2では、混合層の季節変化についてモデルと観測との比較を行っている。ここで混合層の定義は、海面に対する密度差が水温にして 0.5 度に対応する値に達する深さ、とした。観測の混合層は、Conkright et al. (1998) の水温・塩分のデータをもとに計算した。また海水温の季節変動は大気のそれに比べ2ヶ月程度位相が遅れるため、季節区分は2 - 4月を北半球の冬（南半球の夏、FMAと呼ぶ）と定義し以下3ヶ月ごとに北半球の春・夏・秋（南半球の秋・冬・春、それぞれMJJ・ASO・NDJ）と定義した。FMAで北大西洋北部に、ASOで南極海に500m程度まで混合層が深くなる様子をモデルはよく再現していることが分かる。しかしながらモデル結果において混合層がより深くなっており、かつ混合層が深い領域の面積も大きくなっている。これは一部にはモデルにおいて水温と塩分の鉛直分布が補償しあって鉛直一様な密度分布が形成されているためであり、必ずしもモデルにおいて混合の及ぶ範囲が深すぎることを示すものではない。モデルにおいて混合の及ぶ範囲を忠実に表すためには鉛直拡散係数を基準に混合層の深さを定義するのが望ましいが、観測データから計算する混合層深さとの対応を考えここでは上記の定義を採用した。

図3には植物プランクトン現存量の指標となる海面クロロフィル濃度の季節変動を、モデル結果と衛星観測（CZCS）について示している。なおモデル結果からクロロフィル濃度を得るには一定の換算比 $1.59 \text{ (mg/m}^3\text{)/ (mmol/m}^3\text{)}$ を使用した。年間を通じて北大西洋・北太平洋北部、赤道域、南極海で濃度が高い様子がモデルでよく再現されている。これはこれらの海域ではエクマン湧昇のため下層からの栄養塩供給が盛んなためである。また、北大西洋北部で混合層が急激に浅くなるMJJにおいて光環境が改善されクロロフィル濃度が急激に高くなるブルーム現象がモデルでも捉えられていることが分かる。モデルと観測との違いで最も目立つのは赤道域での過大評価であるが、これは他の大規模スケール海洋生態系モデルにも共通して見られるバイアスであり（Fasham et al., 2001）その除去にはこれから時間をかけて取り組んでいく必要がある。

図4には、通年積分した大気 - 海洋二酸化炭素交換量を示した。積分期間が7年と短いためモデル結果は初期値に強く依存する。全炭酸とアルカリ度を全球で一様に与えた本実験の結果は科学的に見てそれほど意義のあるものではないが、モデルの開発段階を示すものとして意味はあろう。以後、定常に達するのに必要な数千年の積分を行う予定である。海洋生態系モデルを結合した上で大循環モデルを積分する際には Bryan (1969) の加速法を用いることができず、長期積分には多大な計算資源が必要とされる。本実験における設定

で数千年の積分を行うには地球シミュレータを用いても3ヶ月以上の実時間がかかると予想され、従来のスーパーコンピュータで行うことは事実上不可能である。地球シミュレータを用いることにより海洋炭素循環の理解に対し多大な貢献が期待できる。

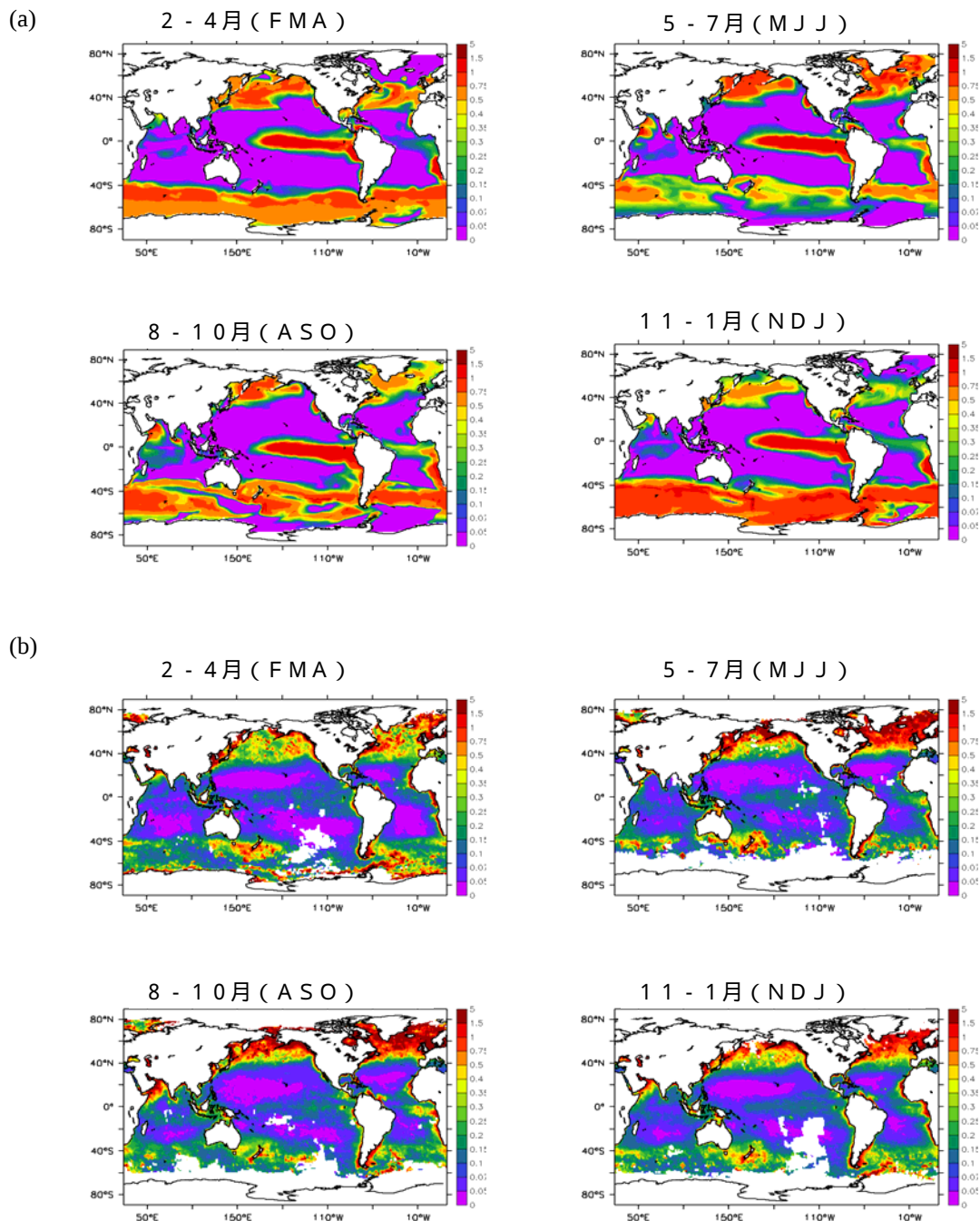


図3：海面クロロフィル濃度の季節変動。モデル結果 (a) とCZCSによる衛星観測 (b)。単位は mg/m^3 。

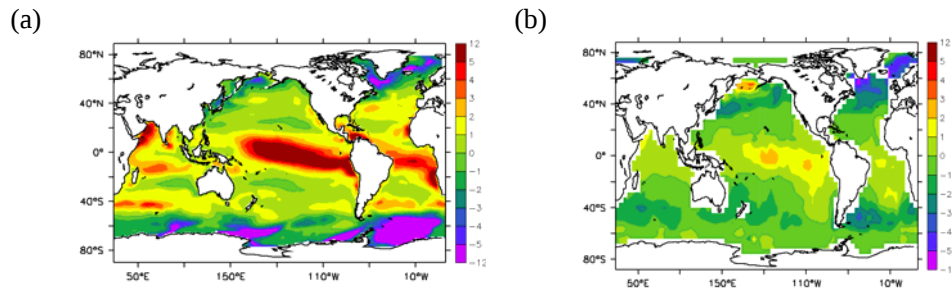


図4：大気 - 海洋間の二酸化炭素交換量。モデル結果 (a) と Takahashi et al. (1999) による観測データ。単位は $\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{yr}$ で、正の値が海から大気へのフラックスを表す。積分期間が 7 年と短いため、モデルと観測との比較はその点に注意して行う必要がある。

g. 引用文献

Archer, D. E., and K. Johnson, A model of the iron cycle in the ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 1436-1446, 2000.

Bryan, K., Climate and the ocean circulation: III. The ocean model., *Monthly Weather Review*, 97, 806-827, 1969.

Conkright, M. E., T. D. O'Brien, S. Levitus, T. P. Boyer, C. Stephens, and J. I. Antonov, *World Ocean Atlas 1998*, NODC, NOAA Atlas NESDIS 12, 1998.

Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall, and I. J. Totterdell, Acceleration of global warming due to carbon cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature*, 408, 184-197, 2000.

Eppley, R. W., Temperature and phytoplankton growth in the sea, *Fish. Bull.*, 70, 1063-1085, 1972.

Fasham, M. J. R., B. M. Balino, and M. C. Bowles, A New vision of ocean biogeochemistry after a decade of the Joint Global Ocean Flux Study (JGOFS), *Ambio Special Report*, 10, 4-30, 2001.

Fridlingstein, P., L. Bopp, P. Ciais, J.-L. Dufrene, L. Fairhead, H. Letreut, P. Monfray, and J. Orr, Positive feedback between future climate change and the carbon cycle, *Geophys. Res. Let.*, 28, 1543-1546, 2001.

Kumar, N., R. F. Anderson, R. A. Mortlock, P. N. Froelich, P. Kubik, B. Bittrich-Hannen, and M. Suter, Increased biological productivity and export production in the glacial Southern Ocean, *Nature*, 378, 675-680, 1995.

Leonard, C. L., C. R. McClain, R. Murtugudde, E. E. Hofmann, and L. W. Harding, An iron-based ecosystem model of the central equatorial Pacific, *J. Geophys. Res.*, 104, 1325-1341, 1999.

Martin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl, and W. W. Broenkow, VERTEX: Carbon cycling in the northeast Pacific, *Deep-Sea Res.*, 34, 267-285, 34.

Mellor, G. L. and T. Yamada, A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers, *J. Atmos. Sci.*, 31, 1791-1806, 1974.

Moore, J. K., S. C. Doney, D. M. Glover, and I. Y. Fung, Iron cycling and nutrient limitation patterns in surface waters of the World Ocean, *Deep-Sea Res. II*, 49, 463-507, 2002.

Oschlies, A., V. Garçon, An eddy-permitting coupled physical-biological model of the North Atlantic 1. Sensitivity to advection numerics and mixed layer physics, *Global Biogeochem. Cycles*, 13, 135-160, 1999.

Takahashi, T., R. T. Wanninkhof, R. A. Feely, R. F. Weiss, D. W. Chipman, N. R. Bates, J. Olafsson, C. L. Sabine, and C. S. Sutherland, Net sea-air CO₂ flux over the ocean: An improved estimate based on air-sea pCO₂ difference, In: *Proc. 2nd Symposium on CO₂ in the oceans*, Nojiri, Y. (ed.), Tsukuba, Japan, January 18-23, pp. 9-15, 1999.

Wanninkhof, R., Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean, *J.*

Geophys. Res., 97, 7373-7382, 1992.

h. 成果の発表

1 — 3 陸域炭素循環モデルにおける植生帯移動予測モデルの構築

担当機関：地球フロンティア研究システム

担当者名：佐藤 永（生態系変動予測研究領域）

甲山 隆司（生態系変動予測研究領域 / 北海道大学大学院地球環境科学研究科）

a . 要約

陸域統合モデルの構築に向けて、その構成要素とする植生動態モデルを開発する。限られた人的資源と期間のもとで一定の成果を得る為に、これは温暖化の影響が最も顕著に生じると考えられている北方域の植生変化に特化した植生動態モデルとする。高等植物にとつての極限環境である高緯度地域では、既存の DGVM で仮定されているギャップ動態よりも、微少な気候変化や山火事による攪乱が植生動態を最も強く規定している。そこで、そのような高緯度地域に特異的な動態を扱った極域生態系移行モデル ALFRESCO をベースとして用いる。ALFRESCO は、経験的データに基づいて極域生態系の移行を予測するものの、統合モデルの構築に際して必須の情報である木本現存量やサイズ構造を扱わない。そこで、これらを扱うように、ALFRESCO に植物の成長・拡散モデルを組み込むという拡張を試みる。また、より信頼の置ける予測を得るため、次の拡張を試みる。(1)種子拡散を明示的に扱う、(2)極域のヘテロ的景観を適切に扱う。

b . 研究目的

植生の分布は気候環境によって大きく規定されるが、気候環境も植生分布の影響を受け、この両者の間にはフィードバック的な相互作用が働く (Foley et al. 2003)。したがって、未来の地球環境を正確に予測するためには、気候変動と植生分布変動との関係を明らかにすることが欠かせない。特に高緯度地域は、短期間に大規模な気候変化が生じると考えられており (Katteberg et al. 1996)、この地域の植生分布予測は優先度の高い課題である。

共生第2プロジェクトでは、陸域統合モデルの構築が進められている。これは、「植生物理過程モデル MATSIRO」と「植生物質循環モデル Sim-CYCLE」(Ito and Oikawa 2002)、そして「植生動態モデル」とを結合することにより、日本独自の統合的陸域炭素循環モデルを構築する試みである。本研究の目標は、これら構成要素のうち唯一未構築である「植生動態モデル」を完成させることである。最終的には、全球スケールでの植生分布変化や動態変化を予測することのできるモデルが必要となるが、さしあたっては、高緯度地域に特化したモデルを構築し、結合することを目指す。

c . 研究計画、方法、スケジュール

本プロジェクトで構築を目指している陸域生態系の物質循環を扱う統合的モデルとしては、すでに幾つかのモデルが動的全球植生モデル(Dynamic Global Vegetation Models <DGVMs>)として構築されている(Reviewed by Cramer et al. 2001)。DGVMsは「物質循環モデル」と「生物過程モデル」、そして「植生動態モデル」とを結合することで、環境条件が変化した場合の、植生構成変化の方向と速度を予測することを試みるモデルである。しかし既存の全ての DGVMs は、種子拡散を明示的に扱っておらず、種子供給速度が律速となるような急激な気候変動下における植生分布変化を予測できない。また既存の DGCM では、植生動態を規定する要因として「高齢木が倒れて生じた明るい林床面から次世代の稚樹が育つ」というギャップ動態モデル(e.g., Prentice and Leemans 1990)を仮定しているが、高等植物にとっての極限環境である高緯度地域では、そもそも疎林が多く、そのようなギャップ動態よりも山火事などの大規模な攪乱が植生の変動や遷移を強く規定しており、この仮定は高緯度地域の植生動態を扱う上で不適当である。

これらの理由から、本研究では「種子散布」と「高緯度地域に特有な植生動態」とを明示的に組み込み込んだ植生帯変動モデルを開発する。このうち「種子散布」については、物理過程に着目したモデルがすでに存在し、それは実測データをよく説明できることが示されている(Tanaka, Shibata, and Nakashizuka 1998)。しかし、ではどのくらい沢山の種子が散布された時に、どの位の数の稚樹が定着できるのか、そしてそこに気象条件がどの様に関与するのか等について直接的な測定を行ったデータは限られている。そこで間接的な推定方法として、森林帯に隣接した山火事跡地や大規模な伐採跡地における森林の回復が生じつつある地域において、森林からの距離と稚樹数・年齢構成との関係を計測し、その地域における過去の気象データと組み合わせることで、このような関係を推定する手法も

併せて開発する。用いる野外調査データは、文献のみからでは十分な質と量が得られないため、IARC の協力の下、アラスカにおいてフィールド調査を行う。

本研究では、高緯度地域における植生移動予測モデル ALFRESCO(Starfield and Chapin 1996)をベースの一つとして用いる。この ALFRESCO は、生態系タイプ間の移り変わりを記述するフレームベースの生態系移行モデルであり、個々の生態系タイプを「フレーム」と呼ばれるサブモデルによって表現され、このフレーム毎に成長や攪乱など、ある植生タイプから別の植生タイプへ切り替わる条件を決めている。ALFRESCO は、高緯度地域における4種類の生態系タイプ間の移り変わりを、気候、攪乱（山火事、食植昆虫の大発生、森林伐採）そして種子供給量の関数として、10年ステップで計算する（図1）。例えば、高地ツンドラにおいては、木本被覆度が50%以上に成長するとトウヒ林となり、山火事が生じた後や暖かく乾燥した気候が一定期間続いた後には寒帯草原となる。また極相であるトウヒ林においては、山火事や伐採といった攪乱が生じない限り安定であるが、そのような攪乱が生じた後には落葉樹林へと移行し、攪乱と木本の生育に適さない気候条件とが重なった場合には寒帯草原かツンドラへと移行する。

このように ALFRESCO は、経験則に基づいた生態系タイプ間の移り変わりパターンを記述している。しかし ALFRESCO は、統合モデルの構築に際して必須の情報である木本現存量やサイズ構造を扱わない。そこで、これらを扱えるように、ALFRESCO に植物の成長・拡散モデルを組み込むという拡張を試みる。また、ALFRESCO を含め殆どの植生動態モデルでは、各グリッドを単一の景観で代表させているが、極域地域は、湖水面、氾濫原、永久凍土地帯、高台地形が混じり合った極めてヘテロ性の強い景観を有しており、グリッド内の炭素循環や植生動態をより適切にシミュレートするためには、このような手法は適切ではない(Kittel, Steffen and Chapin 2000)。そのようなグリッド内ヘテロ性は、パラメタライゼーションや統計的方法によって扱うことが可能であるが、実測された植物個体群動態データを利用したり、また結果の解釈を容易にするためには、地形タイプ毎の計算を行う必要がある。そこで本研究では、グリッド内に高解像度のサンプリング計算区間を複数取り、景観毎の計算を行わせ、後にグリッド全体の景観変化や植物バイオマス変化を推定する手法を開発する。

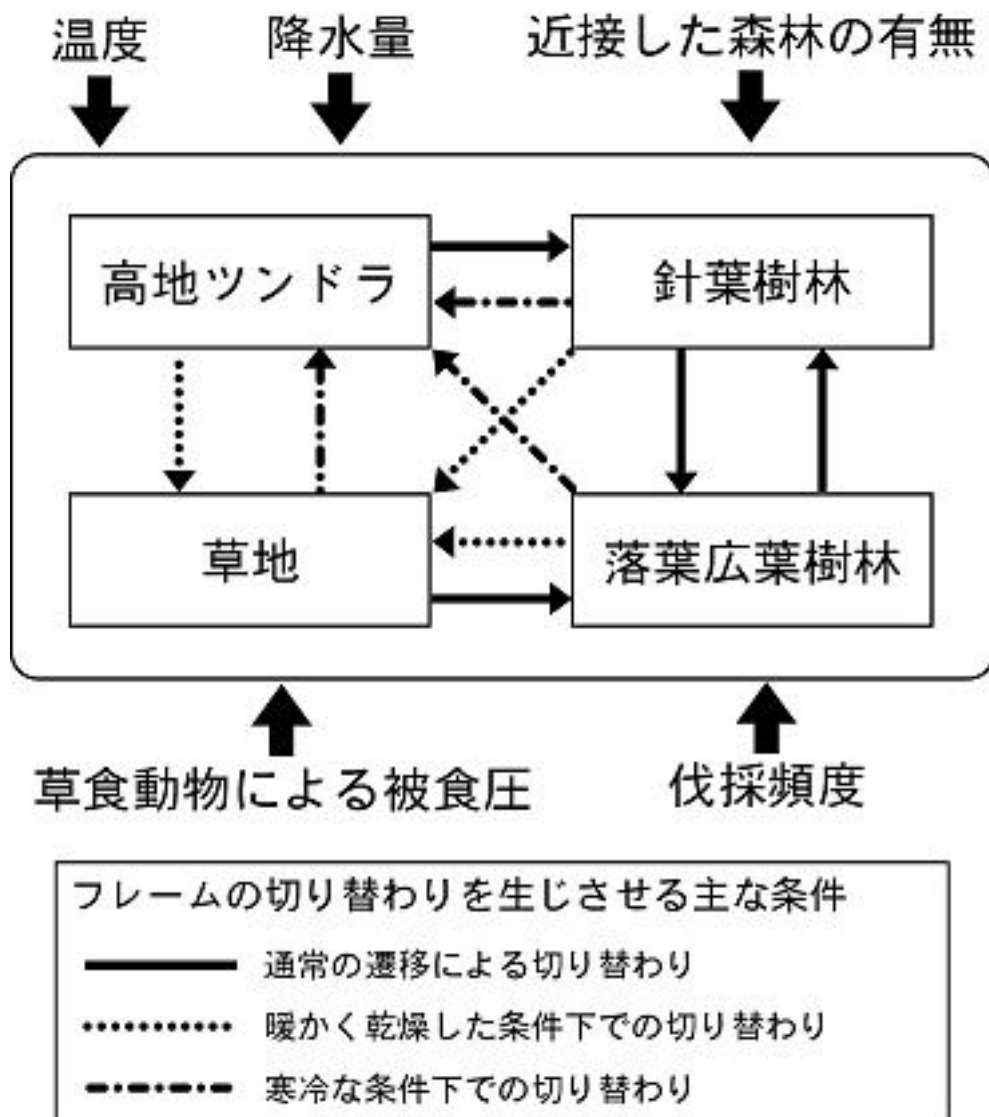


図 1

ALFRESCO の構造の概要。各生態系タイプは「フレーム」で表現され、このフレームが、それぞれの条件にて切り替わる。

Starfield and Chapin (1996)より改変。

スケジュール：

- ・ 4 月・5 月、植生動態研究についての日本語レビュー完成、投稿
- ・ 6 月～7 月中の約 2 週間、アラスカにおいて野外調査
- ・ 6 月・翌 3 月、Sim-CYCLE との結合を念頭においた高緯度地域の植生変動予測モデルの構築。また、このモデルが、現在の植生分布を説明できるかどうかについて、上記モデルを、気候記録と植生被覆パターンを元に検証する。

d . 平成14年度研究計画

- ・ 陸域統合モデルの実現に向け、既存の植生動態モデルについて、それらの持つ構造と限界について調査する。
- ・ 国内では殆ど経験の無い研究領域であるので、この分野の紹介と現状を述べた日本語レビューの執筆を進める。

e . 平成14年度研究成果

- ・ 本プロジェクトで陸域炭素循環を扱う研究者と数度の会合を行い、今後三年間の研究方針について討議を行った。その結果、限られた人的資源と期間のもとで一定の成果を得る為に、温暖化の影響が最も顕著に生じることが予測される北方域の植生変化に特化した植生変動モデルの構築を進める方針を決定した。
- ・ 植生帯変動の予測という研究領域は、国内では殆ど経験がないため、この分野の紹介と現状を述べた日本語レビューの執筆を進めた。
- ・ モデルのベースとする ALFRESCO を、論文等の公開情報を元にプログラムを作成した。

f . 考察

考察すべき研究成果は、まだ得ていない。

g . 引用文献

Cramer W., Bondeau A. and Woodward F. I., et al. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models, *Global Change Biology*, 7, 357-373, 2001.

Foley J. A., Costa M. H., Delire C., Ramankutty N. and Snyder P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate, *Frontier Ecological Environment*, 1, 38-44, 2003.

Ito A. and Oikawa T. 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 Modeling*, 151, 143-176, 2002.

Katteberg A, Giorgi F, Grassl H, et al. Climate models - Projection of future climate. In: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Houghton JT et al.), pp. 285-357, Cambridge University Press, New York, 1996.

Kittel T. G. F., Steffen W. L. and Chapin F. S. Global and regional modelling of Arctic-boreal vegetation distribution and its sensitivity to altered forcing, *Global Change Biology*, 6, 1-18, 2000.

Prentice I.C. and Leemans R. Pattern and process and the dynamics of forest structure: A simulation approach, *Journal of Ecology*, 78, 340-355, 1990.

Starfield A. M. and Chapin F. S. III. Model of transient changes in arctic and boreal vegetation in response to climate and land use change, *Ecological Applications*, 6, 842-864, 1996.

Tanaka H., Shibata M. and Nakashizuka T. A mechanistic approach for evaluating the role of wind dispersal in tree population dynamics. *Journal of sustainable forestry*, 6, 155-174, 1998.

h . 成果の発表

< 口頭発表 >

発表者名：	佐藤永
発表題名：	次世代の気候モデルにおける植生帯移動予測の役割
発表場所等：	21世紀地球科学技術を考える会（2003年2月19日東海大学校友会館）

2 . 温暖化・大気組成変化相互作用モデル開発

2 — 1 温暖化・大気組成変化相互作用

担当機関：地球フロンティア研究システム

研究者名：滝川 雅之（大気組成変動予測研究領域）

永島 達也（国立環境研究所）

須藤 健悟（東大CCSR¹）

高橋 正明（大気組成変動予測研究領域 / 東大 CCSR）

a. 要約

対流圏オゾンは、それ自身が地球温暖化に影響を与えるだけでなく、OHラジカルなどの変動を通じて二酸化炭素やメタンなどの温暖化気体の光化学的寿命をコントロールするという重要な役割を持っている。本サブグループでは化学過程と陽に結合した大気大循環モデルを用いて対流圏・成層圏オゾンと気候変動との相互作用を定量的に評価するとともに、統合モデルにおいては地表植生モデルや海洋化学モデル、エアロゾルモデルなどの他のサブモデルとの相互作用についても考慮する予定である。平成14年度においてはまずその端緒として、大気大循環モデルにおける高精度物質移流スキームの導入と、対流圏化学結合大気大循環モデルを用いた温暖化・大気組成変化相互作用に関する数値実験を行った。高精度移流スキームにより、モデルの上部対流圏における物質濃度の過大評価傾向が改善されることが確認できた。また対流圏光化学結合大気大循環モデルを用いた将来予測実験を行った結果、主要な温暖化起源物質であるメタンおよび硫酸エアロゾルの濃度が気候変動および水蒸気量の変動に大きく影響されることが分かった。

b. 研究目的

大気中のオゾンは、力学的な意味と環境学的な意味で重要な役割を担っている。また、オゾン以外にも水蒸気やOHラジカル、NO_xや一酸化炭素といった化学物質はそれ自体が地球温暖化や地球環境問題に重要であるだけでなく、硫酸エアロゾルやメタンなどといった

¹ 平成15年度より地球フロンティア研究システムに異動

他の温暖化気体にも多大な影響を与えうる。このため、大気化学との相互作用を考慮したモデルを用いて温暖化予測実験を行うことは、予報の精緻化や定量化、また温暖化プロセスの理解の上で重要であると考えられる。

c. 研究計画、方法、スケジュール

東大気候センター、環境研および地球フロンティア研究システムでは、光化学反応過程と陽に結合した大気大循環モデルを開発し、成層圏オゾンホール将来予測実験(Nagashima et al., 2002)、成層圏硫黄収支の見積もり (Takigawa et al., 2002)、ENSOの対流圏オゾンへの影響評価(Sudo et al., 2001)などの研究をこれまでにやってきた。今回の共生プロジェクトにおいては、このうち対流圏光化学モデルを詳細に組み込んだモデル(CHASER, cf. Sudo et al., 2002a, 2002b)を基に成層圏・対流圏の光化学過程と結合した大気大循環モデルへと拡張し、地球シミュレータを用いていくつかのエミッションシナリオに基づく高解像度time slice simulationを行う。この時点での着目点は対流圏ではおもに気候変動による水蒸気変動およびその結果生じるOHラジカルの変化と、それがメタンの光化学的寿命に与える影響である。成層圏では気候変動による成層圏水蒸気量の変動と極域成層圏雲およびその表面上での不均一反応によって活性化されるオゾン破壊効果の相互作用である。あわせて気候変動によって積雲対流活動が変動するため、その際に起きる雷NO_x生成量の変動についても評価したいと考えている。

次に、東大気候センター・九大応力研で開発された対流圏エアロゾルモデルSPRINTARSのダスト巻き上げ過程および成層圏化学結合モデル(Nagashima et al., 2002)の成層圏エアロゾルを組み込み、CHASERをエアロゾル—化学—気候モデルへと拡張したうえで、化学過程のエアロゾルへの影響評価を行う。対流圏エアロゾルのうち、硫酸エアロゾルは化学過程に大きな影響を受けている。これは、地表から放出された二酸化硫黄などの前駆気体が、気相および液相でのオゾン、過酸化水素、OHラジカルとの反応によって硫酸エアロゾルとなるためである。また二酸化硫黄の人為起源エミッションは今後のアジア域、とくに中国の経済発展によって放出量が大きく変動すると考えられており、その気候への影響評価を詳細に検討することは今後の温暖化研究において非常に重要である。

これらの部分統合モデルを用いた各プロセス間の相互作用を評価したうえで、最終的な統合モデルの構築に取り掛かる。先に述べたような相互作用のほかには、陸域生態系モデルからの非メタン炭化水素の放出、また逆に大気化学モデルから予報される酸性雨、オゾン量による生態系への影響などを評価することが考えられる。また海洋上で雲凝結核として硫酸エアロゾルが重要であるといわれているが、その生成源としてのDMSの海洋から大

気への放出量を海洋生態系モデル内で予測することも将来的には検討したいと考えている。

他の共生プロジェクトとの連携については、大気大循環モデルの開発および検証については東京大学気候システム研究センターの「大気海洋大循環モデルの高度化」と相互に連携を取りつつ行う予定である。彼らのグループでは温暖化実験の際に各種エアロゾルと気候変動との相互作用を考慮する予定であるため、大気モデルにおける物質輸送過程の検証やエアロゾル生成過程等については密に連絡を取り合いながらモデル開発等を進めていきたいと考えている。また化学過程については東京大学、地球フロンティア研究システムなどによる「諸物理過程のパラメタリゼーションの高度化」で得られる一酸化炭素などの観測結果と、本モデルで得られる計算結果とを比較・検証することを予定している。また、温暖化実験時における化学物質の地表からのエミッションシナリオについても提供を受けることを考えている。

開発スケジュール

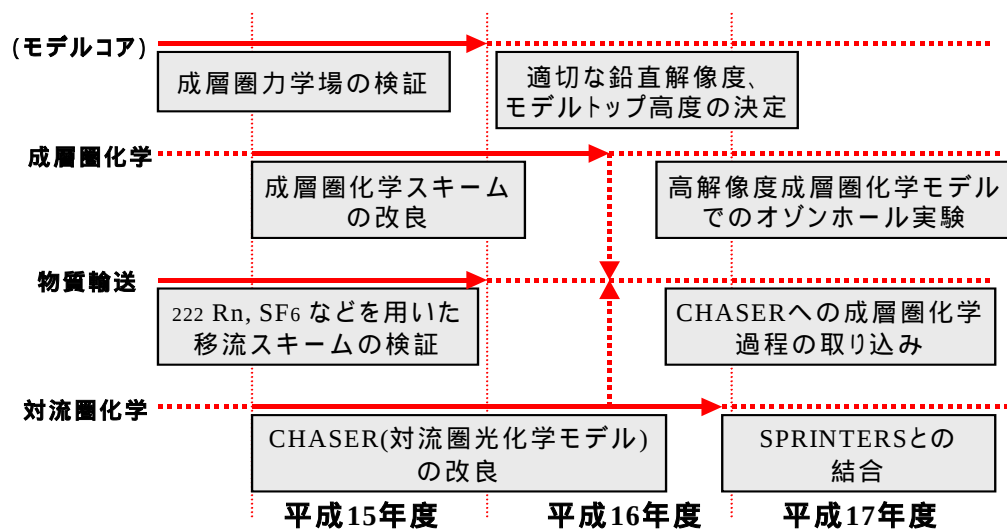


図 1：温暖化・大気組成変動変化相互作用サブサブグループの開発スケジュール

d. 平成14年度研究計画

大気中の化学物質の影響を詳細に評価するためには、まず化学物質の輸送および成層圏・対流圏における化学反応がモデル内で適切に表現されていることが必要である。このため、共生プロジェクトの開始にあたり本年度はこれら二つの過程の改良および評価を行う。

e. 平成14年度研究成果

(ア) 物質循環

CCSR/NIES AGCMにおける成層圏・対流圏での物質輸送の様子を調べるために、ラドンや六フッ化硫黄などのパッシブトレーサーの輸送実験を地球シミュレータなどを用いて行った。これらのパッシブトレーサーはTRANSCOMなどでモデル間の輸送の相互比較に一般的に用いられているものであるが、今回はこれらに加えてLin and Williamson (2000)のAge-of-Air tracerも考慮している。これは成層圏における気塊の年代を調べるための仮想的なトレーサーであり、六フッ化硫黄のモデル結果・観測結果などと組み合わせることにより本モデルにおける成層圏・対流圏物質循環の様子を評価するのに有用である。今回の実験においては水平解像度はおよそ2.8度×2.8度、鉛直解像度は地表から高度およそ80kmまでの67層とした。4年間のスピンアップの後、monotonic van Leer および monotonic PPM(Piecewise Parabolic Method) with steepeningの二種類の移流スキームを用いて各々2年間計算を行った。成層圏の物質循環には数年程度かかるため、今回は対流圏における物質循環、とくにラドン222に関して解析を行った。地表におけるラドン222の季節変化を図2に示す。地表におけるラドン222の分布については、二種類の移流スキームのどちらを用いた場合においても大きな変化はないことがわかる。また、BombayやBermudaなどで季節変化をモデルがよく再現している。Mauna Loaは太平洋上の観測点であるが、モデルの分解能が低いために島嶼部を十分に表現できておらず、地表からのエミッションが主要な生成源であるラドン222の濃度をモデルが過小評価していると考えられる。次に、北半球夏期における東西平均したラドン222の緯度—高度断面図を図3に示す。地表付近での濃度についてはいずれの移流スキームを適用した場合も大きな変化はないが、生成源から遠く離れた領域、とくに上部対流圏から下部成層圏にかけての領域や両極域などにおける濃度に顕著な差が現れていることが分かる。共生第一課題においてvan Leer移流スキームを適用した場合上部対流圏において比湿を過大評価する傾向にあ

ることが知られており、今回の実験の結果は monotonic PPM with steepening 移流スキームがこのモデルバイアスを改善することを示唆している。

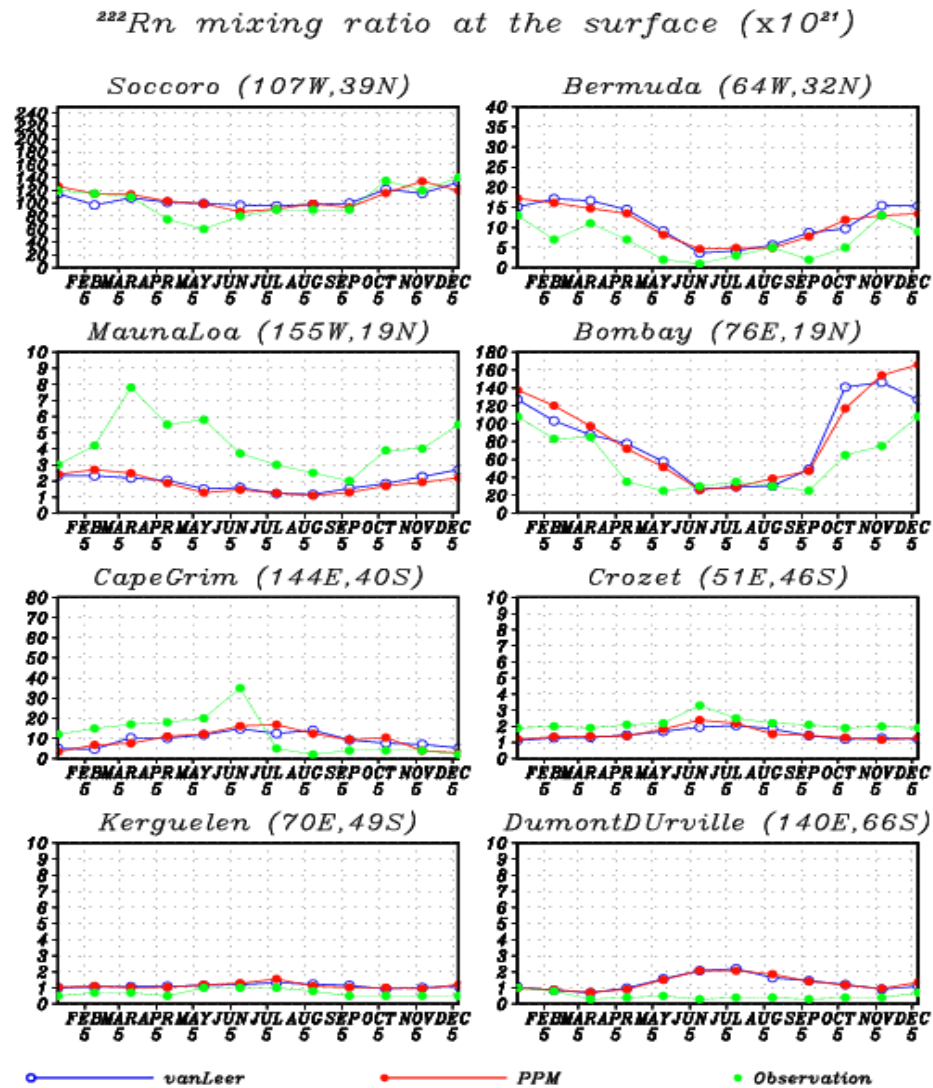


図2：地表におけるラドン濃度の季節変化。緑線は観測値、青線および赤線は移流スキームに FFSL+van Leer, FFSL+PPM をそれぞれ使用して計算された結果をそれぞれ示す。単位は体積混合比。

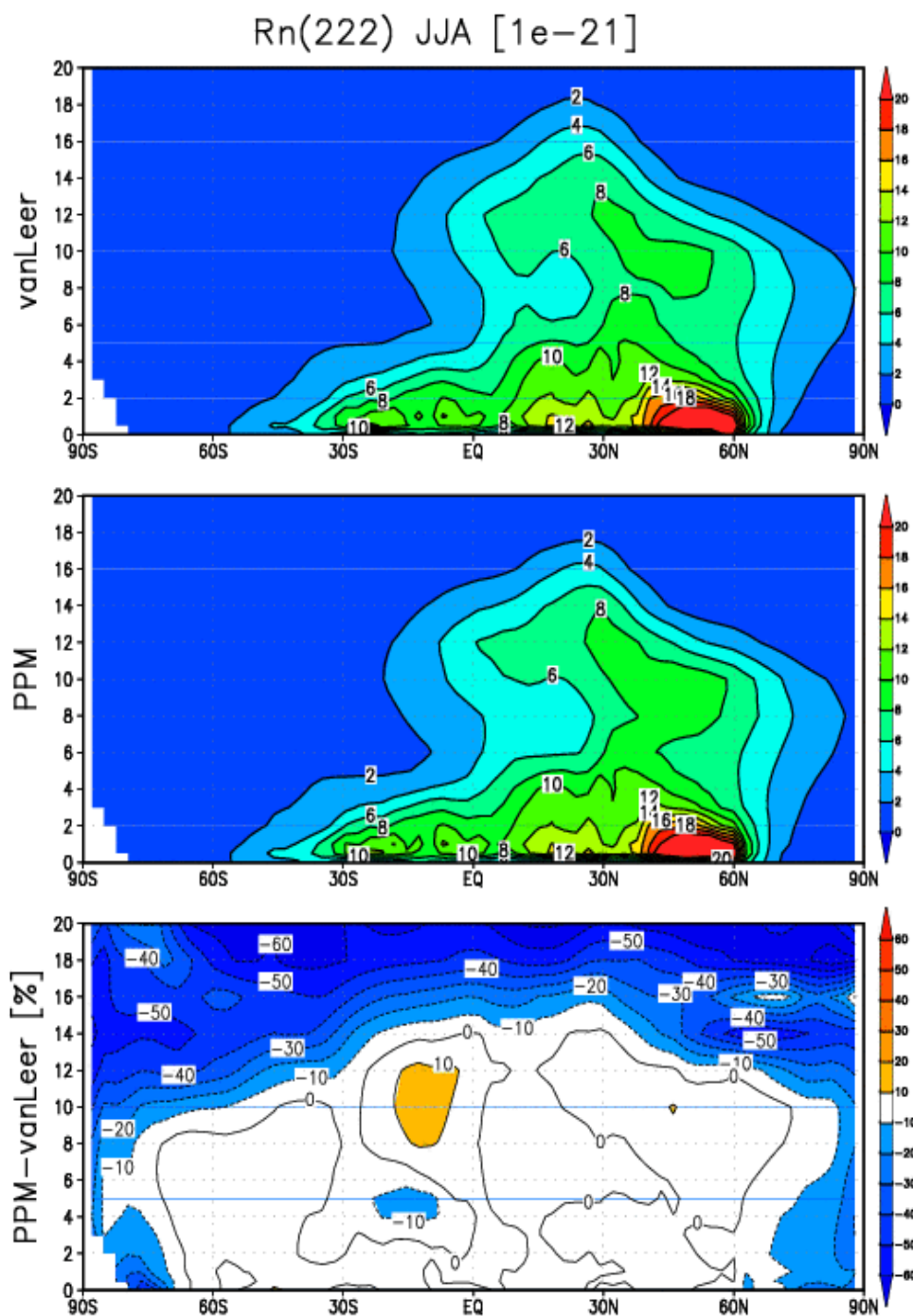


図3：東西平均したラドン222の緯度—高度断面図。上段は移流スキームにvan Leerを用いた場合、中段は同じくPPMを用いた場合、下段は中段 - 上段の差をそれぞれ示す。

(イ) 対流圏化学

将来に向けて対流圏オゾンを中心とした光化学過程がどのように変化するかについて、CHASERを用いた予測実験を行った(cf., Sudo, 2003)。本研究ではemission変化と気候変動による気象場変化の両方の効果を考慮するため、emission変化のみの実験 (Exp1) と emission変化に加え気候変動を考慮した実験 (Exp2) の2種類の実験を実行した。これらの実験ではemission変化、気候変動とともにIPCC SRES-A2シナリオに従った。Exp2の気候変動の予測ではモデル中でCO₂等の温室効果気体濃度を増加させるとともに、CCSR/NIES大気海洋結合モデルにより予測された海面水温と海氷分布を与えた(このモデルは高い気候感度を持ち、将来の気候変動の予測では他のモデルに比べ高めの温度上昇を予測する傾向にあることに注意が必要である)。対流圏オゾン総量は Exp1ではほぼ直線的に増加し、2050年で23%、2100年では 約44%の増加が計算された (図4 a)。Exp2では水蒸気増加によるオゾン破壊の活発化のため対流圏下層では Exp1に比べてオゾン増加は概して緩和されるが、温暖化によるハドレー循環および成層圏循環の強化により成層圏からのオゾン流入が増加し中上部対流圏ではExp1以上のオゾン増加が計算され、結果として全球総量では図のようにExp1とほぼ同じ増加傾向が得られた。また、汚染域の境界層中では温暖化による温度上昇と水蒸気増加により正味のオゾン生成が活発化することがこの実験で確認された。全球平均メタン濃度は Exp1 では emission 増加とOH濃度の減少により 2100年には 4 ppmv までの増加が計算されたが、温暖化を考慮した Exp2では水蒸気増加による OH 濃度増加と温度上昇によりメタン化学寿命が短くなったため、増加は2100年で 3.3 ppmv までに留まった (図4 b)。Exp1で計算された硫酸エアロゾルの総量は SRES-A2シナリオに従い2030年から2050年の間にピークをとるが、汚染域でのOH増加やH₂O₂による液相反応の強化によりその後も 1990年以上の総量が維持されている (図4 c)。Exp2では Exp1 以上の H₂O₂の増加や雲水量および降水の変化により2040年以降 Exp1よりも 1～3 割大きい総量が計算された。この予測実験は 2050年の段階でインド、中国、日本を含む東アジア域でオゾンや硫酸エアロゾルなどの汚染物質が顕著に増加することを定量的に予測すると同時に、硝酸 (HNO₃) と硫酸 (SO₄(2-)) の沈着がそれぞれ同等に大きく将来の降水酸性度 (pH) に影響することを計算しており、酸性雨やオゾン光化学汚染の問題が日本を含む東アジア広域で更に深刻化することを予測している。

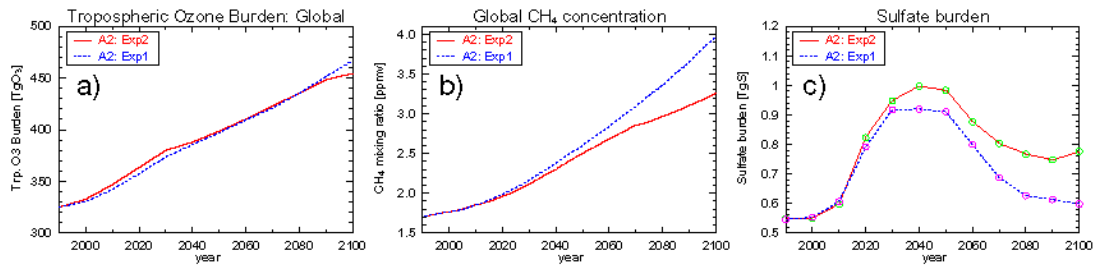


図 4：対流圏オゾン総量(a)、全球平均メタン濃度(b)、硫酸エアロゾル総量(c)の時間発展(1990-2100年:SRES-A2シナリオ)。実線：気候変動あり(Exp2)、点線：気候変動なし(Exp1)。

f. 考察

対流圏における物質輸送が、高精度移流スキームを導入することにより改善されることが確認できた。成層圏における物質輸送に関しては六フッ化硫黄などのパッシブトレーサーを指標として用いることが一般的であるが、三陸沖などでのゾンデ観測を東北大学大学院の中澤氏らのグループが1980年代後半から継続的に行っているため、その観測結果と本モデルを用いた計算結果とを比較することにより、上部対流圏から下部成層圏にかけての領域での物質輸送の様子を調べることができると考えている。

今回の数値実験においては15種類程度の気体を流したが、エアロゾルなどまでを含めた成層圏・対流圏光化学結合大気大循環モデルにおいては50–60種類程度の化学物質の輸送を考慮する必要がある。今後気候変動への影響を評価するために数十年スケールの計算を行う際には、高精度でかつ現状よりも計算時間の短い移流スキームの開発も念頭におく必要があると思われる。また対流圏光化学結合大気大循環モデルCHASERを用いた、IPCCエミッションシナリオを基にした将来予測実験では、主要な温暖化気体のひとつであるメタンの濃度が気候変動に由来するOHラジカル濃度の変動により大きく変化することが分かった。対流圏硫酸エアロゾルなども大きく変動しており、単に気候変動の将来予測というだけではなく、大気環境の将来予測という点において、今後このような実験が社会的な観点からもさらに必要とされるようになっていくと思われる。

g. 参考文献

Nagashima, T., M. Takahashi, M. Takigawa, and H. Akiyoshi, Future development of the ozone layer calculated by a general circulation model with fully interactive chemistry, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 10.1029/2001GL014926, 2002.

Sudo, K., and M. Takahashi, Simulation of tropospheric ozone changes during 1997-1998 El Nino: Meteorological impact on tropospheric photochemistry, *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4091-4094, 2001.

Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto, CHASER: A global chemical model of the troposphere, 1. Model description, *J. Geophys. Res.*, 107(D17), 4339, doi:10.1029/2001JD001113, 2002.

Sudo, K., M. Takahashi, J. Kurokawa, and H. Akimoto, CHASER: A global chemical model of the troposphere, 2. Model results and evaluation, *J. Geophys. Res.*, 107(D17), 4339, doi:10.1029/2001JD001114, 2002.

Sudo, K., Changing process of global tropospheric ozone distribution and related chemistry: a study with a coupled chemistry GCM, ph.D thesis, 187pp., Univ. of Tokyo, Japan, 2003.

Takigawa, M., M. Takahashi, and H. Akiyoshi, Simulation of stratospheric sulfate aerosols using a Center for Climate System Research/National Institute for Environmental Studies atmospheric GCM with coupled chemistry, Part 1: Nonvolcanic simulation, *J. Geophys. Res.*, 107(D22), 4601, doi:10.1029/2001JD001007, 2002.

h. 成果の発表

須藤健悟、高橋正明、秋元肇, 熱帯対流圏界領域・上部対流圏におけるオゾン収支：全球3次元化学モデルを用いた考察, 日本気象学会 2002 年春季大会 (専門分科会), 大宮ソニックスシティー, 2002 年 5 月.

Sudo, K., M. Takahashi, T. Nozawa, H. Kanzawa, H. Akimoto, SIMULATION OF FUTURE OZONE POLLUTION AND ACID DEPOSITION: A GLOBAL MODEL STUDY, 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ATMOSPHERIC SCIENCES AND APPLICATIONS TO AIR QUALITY, Tsukuba, Japan, 11-13 March, 2003.

Takigawa, M., K. Sudo, M. Takahashi, and N. Takegawa, Estimation of the contribution of inter-continental transport during the PEACE-A campaign by using a global chemical model, America Geophysical Union fall meeting, San Francisco, U.S.A., 6-10 December, 2002.

Takigawa, M., H. Akimoto, K. Sudo, M. Takahashi, and N. Takegawa, Estimation of the contribution of inter-continental transport by using a global chemical model, Data Workshop for ITCT 2K2 and PEACE, Boulder, U.S.A., 5-6 March., 2003.

2 2 温暖化—雲・エアロゾル・放射フィードバック精密評価

担当機関名：地球フロンティア研究システム

研究者：久芳奈遠美（水循環予測研究領域）

鈴木恒明（モデル統合化領域）

對馬洋子（地球温暖化予測研究領域）

中島映至（東京大学気候システム研究センター）

竹村俊彦（九州大学応用力学研究所）

鈴木健太郎（東京大学）

野沢徹（国立環境研究所）

a. 要約

このグループでは大気大循環モデル(GCM)でエアロゾルが雲の光学特性に及ぼす影響、すなわち対流圏エアロゾルの間接放射強制力を評価するためのパラメタリゼーションを開発することを目標としている。まず GCM におけるエアロゾルの間接放射強制力の評価についての現状を把握するため、CCSR/NIES-GCM と Max Plank Institute GCM に関して文献調査、検討を行った。また、地球フロンティア研究システムで開発した雲微物理モデル（Kuba et al., 2003）により、雲粒の凝結核（Cloud Condensation Nuclei : CCN）が雲の微細構造に及ぼす影響を評価するパラメタリゼーションを開発した。このパラメタリゼーションを有効に機能させるために、エアロゾル気候モデルである SPRINTARS の出力の取り入れ方の検討を行った。NICAM（New Icosahedral Atmospheric Model, Satoh, 2003, Tomita, 2002）

を用いた雲微物理モデル搭載超高解像度全球モデル開発の準備として、ヘブライ大学 HUCM 雲微物理モデル (Khain et al., 1999) と気象庁 MRI/NPD-NHM 非静力メソスケールモデル (Saito and Kato, 1999) を基に、新たに 3 次元ビン法雲微物理モデルを開発した (井口、2002)。

b. 研究目的

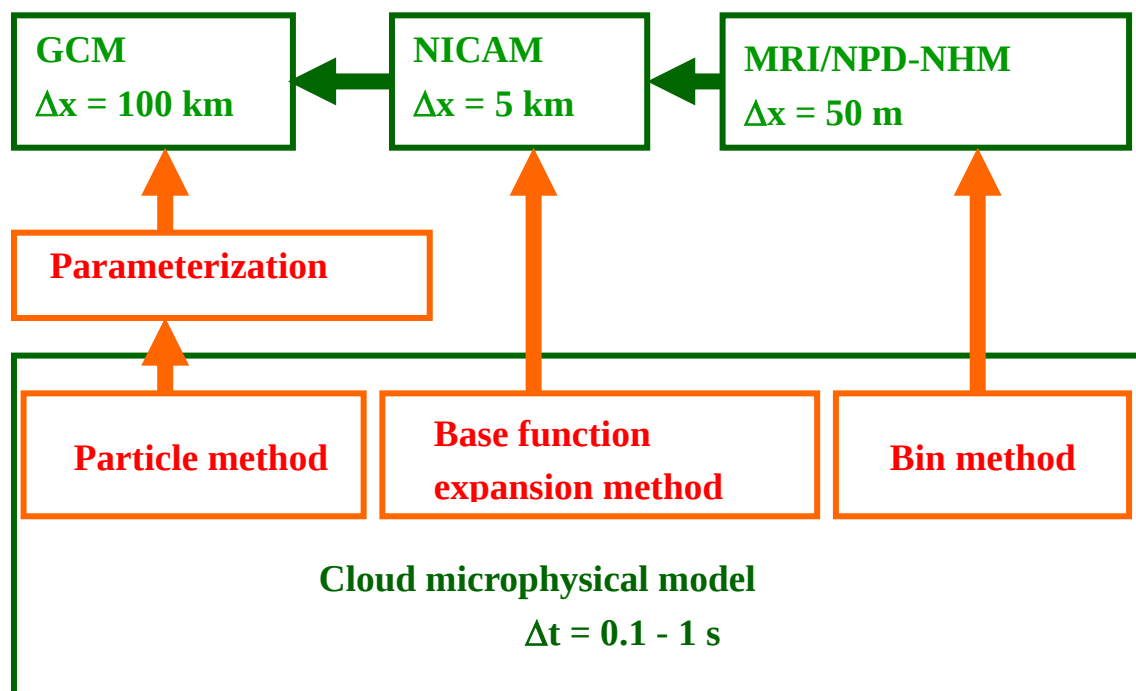
IPCC2001 のレポートにもあるように、対流圏エアロゾルの間接放射強制力の見積もりはいまだに不確定性の大きい問題であり、その主な要因はエアロゾルと雲の関係が不確定であることによる。エアロゾルの中で CCN として働くものの粒径分布や化学組成と雲の中の上昇流速度によって雲粒の粒径分布が決まり、雲の反射率や光学的厚さなどの光学特性や雨の降り易さなどの降水効率が変わり、ひいては気候変動予測の中では放射収支や水循環に効いてくる。これらの因果関係を明らかにするためには詳細雲モデルによる数値実験が不可欠である。この共生プロジェクトでは大気大循環モデル (GCM) でエアロゾルが雲の光学特性に及ぼす影響を評価するためのパラメタリゼーションを開発する。

c. 研究計画、方法、スケジューリング

地球フロンティア研究システムで開発した雲微物理モデル (Kuba et al., 2003) により、CCN が雲の微細構造に及ぼす影響を評価するパラメタリゼーションを開発する。また、GCM の 100 km スケールの格子間隔 (数時間の時間間隔) と雲微物理モデルの 0.1 秒の時間間隔 (数 m 以下の格子間隔) の間のスケールギャップを埋めるためには、超高解像度全球モデル (数 km の格子間隔) と高解像雲解像領域モデル (数十 m の格子間隔) が必要で、それぞれに雲物理モデルを搭載する。

超高解像度全球モデルについては地球フロンティアで開発している NICAM (New Icosahedral Atmospheric Model, Satoh, 2003, Tomita, 2002) を採用し、これに基底関数展開雲物理モデルを実装し、SPRINTARS エアロゾル気候モデル (Takemura et al., 2000, 2002) と結合させる予定である。高解像度領域モデルとしては気象庁 MRI/NPD-NHM 非静力メソスケールモデル (Saito and Kato, 1999) を採用し、地球フロンティアで開発した雲微物理モデル (Kuba et al., 2003) を搭載する。

平成 14 年度は、雲微物理モデル単独でできるパラメタリゼーションの開発および検討を行う。平成 15 ~ 16 年度に NICAM、NHM それぞれへの雲モデルの搭載を行い、17 年度から比較実験を行い、以降 GCM 用のパラメタリゼーションの開発を行う。



d. 平成14年度研究計画

まず、GCMにおけるエアロゾルの間接放射強制力の評価についての現状を把握するため、CCSR/NIES-GCMとMax Plank Institute GCMに関して文献調査をして検討する。また、地球フロンティア研究システムで開発した雲微物理モデル(Kuba et al., 2003)により、CCNが雲の微細構造に及ぼす影響を評価するパラメタリゼーションを開発する。このパラメタリゼーションを有効に機能させるために、エアロゾル気候モデルであるSPRINTARSの出力の取り入れ方の検討を行う。さらに気象庁MRI/NPD-NHM非静力メソスケールモデル(Saito and Kato, 1999)とヘブライ大学HUCM雲微物理モデル(Khain et al., 1999)を基に新たに開発したHUCM+NHMモデルを利用し、雲とエアロゾルの相互作用に関する再現実験を行い、観測値と比較する。

e. 平成14年度研究成果

- GCMにおけるエアロゾルの間接放射強制力の評価についての現状の把握
 - ・ CCSR/NIES-GCMの場合
 - 放射計算に用いる有効半径 r_e を雲粒数密度 N_d から計算している。

雲粒数密度 N_d は

$$N_d = \varepsilon N_a N_m / (\varepsilon N_a + N_m)$$

で表している。ただし、 N_a は総エアロゾル数密度 (sulfate, carbon, sea salt の総和)。雲の寿命効果は雲粒のautoconversion の式で表す。これには、Kessler, modified Kessler, Berry, modified Berry などの式がある。

- ECHAM-GCM (Max Plank Institute GCM, Lohmann et al., 1999)の場合
cloud fraction が相対湿度の関数になっているのは問題あるので、cloud fraction の出し方を検討する。予報変数は水蒸気量、雲水量、雲氷量、雲粒数密度としている (CCSR/NIES では雲氷量は診断)。雲氷粒子数密度は診断。

雲内上昇流速を格子内平均上昇流速 w_{grid} から求めるのに、

$$W = w_{grid} + c (TKE)^{1/2}$$

としている。ただし、 TKE は turbulent kinetic energy である。この式の有効性は検討を要するが現状ではこれに代わるより良いものは提唱されていない。

- 当初は雲粒数密度も CCSR/NIES 同様に診断し、エアロゾル (CCN) との関係式(診断式)をまず作ることにする。

○ CCN が雲の微細構造に及ぼす影響を評価するパラメタリゼーションの開発

地球フロンティア研究システムで開発した雲微物理モデルにより、非降水性の層雲の光学特性に対する CCN の効果を調べ、光学的厚さを雲粒数密度と LWP から計算する近似式、雲底上各高度の雲粒の有効半径を雲粒数密度から計算する近似式、雲粒数密度を CCN 過飽和度スペクトルと上昇流速から計算する近似式を開発した (Kuba et al., 2003)。
光学的厚さ τ は N_d (cm^{-3})を雲粒数密度とすると以下のように表せる。ただし、 LWP は鉛直積算雲水量(gm^{-2})。

$$\tau = A N_d^B \quad . \quad (1)$$

$$A = 0.121 LWP^{0.702} \quad ,$$

$$B = 0.274 LWP^{0.0538} \quad .$$

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。

$$R_e = C N_d^D \quad . \quad (2)$$

$$C = 6.41 Z^{0.380} \quad ,$$

$$D = -0.288 Z^{0.0254} \quad ,$$

また、雲粒数密度は雲内の最過飽和度 S_{max} で活性化するCCN数密度 $N_c(S_{max})(\text{cm}^{-3})$ と雲底での上昇流速 $V_{base} \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ を用いて以下のように表せる。

$$N_d = \min\{E(N_c(S_{max}) - F)(N_c(S_{max}) - G), N_c(S_{max})\} \\ \text{ただし、} N_c(S_{max}) < 0.5(F + G) \quad (3)$$

$$E = -0.0231 V_{base}^2 - 0.0108 V_{base} - 0.00180 \quad ;$$

$$F = 70.0 V_{base} - 12.9; \quad G = 8420 V_{base} + 278 \quad .$$

ただし、 $N_c(S_{max}) = 0.5(F + G)$ において N_d はほぼ飽和し、 $N_d = -0.25 E(G - F)^2$ となる。
雲内の最大過飽和度は過飽和度0.075%で活性化するCCN数密度 $N_c(0.075\%)(\text{cm}^{-3})$ を用いて以下のように表せる。

$$S_{max} = H N_c(0.075\%)^I \quad . \quad (4)$$

$$H = 1.16 V_{base}^{0.344} \quad ,$$

$$I = -0.176 V_{base}^{-0.187} \quad .$$

さらに簡便なパラメタリゼーションとして、雲粒数密度 (cm^{-3}) を雲底での上昇流速 $V_{base} \text{ (ms}^{-1}\text{)}$ と過飽和度 S で活性化するCCN数密度 $N_c(S) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ であらわす式を開発した(Kuba and Iwabuchi, 2003)。

V_{base} が 0.4 ms^{-1} 以下の場合、

$$N_d = L N_c(0.2\%) / (N_c(0.2\%) + M) \quad (5)$$

$$L = 4708 V_{base}^{1.19}$$

$$M = 33.2 + 1090 V_{base}$$

V_{base} が 0.4 ms^{-1} 以上の場合、

$$N_d = L' N_c(0.5\%) / (N_c(0.5\%) + M') \quad (6)$$

$$L' = 4300 V_{base}^{1.05}$$

$$M' = 2760 V_{base}^{0.755}$$

これらの近似式と雲微物理モデルのシミュレーション結果を図1に示す。

上昇流速度が 2.0 ms^{-1} についてはばらつきが大きくなっているが、これは雲内の最大過飽和度が 0.5% より大きいいため相関が小さくなっているためである。

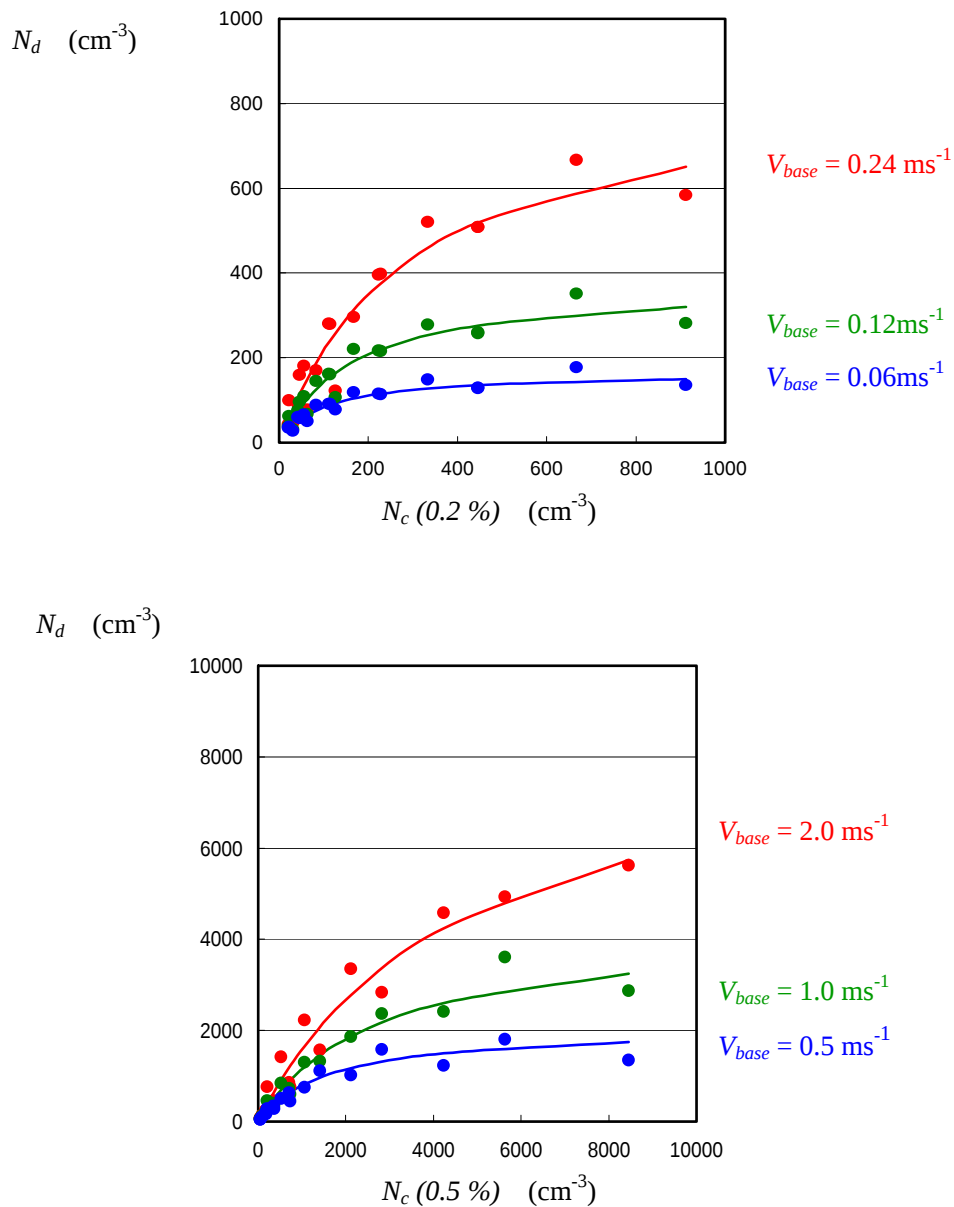


図1 .Kuba et al.(2003) のモデルにより計算された雲粒数密度 N_d とCCN数密度の関係。CCN数密度は過飽和度 S で活性化されるCCNの数密度 $N_c(S)$ で表す。

上図：雲底での上昇流速度は $0.24, 0.12, 0.06 \text{ ms}^{-1}$ 。実線は近似式(5)に3種類の上昇流速度を代入した値。

下図：雲底での上昇流速度は $2.0, 1.0, 0.5 \text{ ms}^{-1}$ 。実線は近似式(6)に3種類の上昇流速度を代入した値。

- SPRINTARS の出力の取り入れ方の検討

エアロゾル気候モデルである SPRINTARS(Takemura et al., 2000, 2002)の出力の取り入れ方を検討するために、SPRINTARS + CCSR/NIRES-GCM に Ghan et al.(1997) の雲粒子数密度パラメタリゼーションの式を組み込み、再現実験を行い、観測値と比較した。雲粒子数密度が過大評価されることがわかったので、SPRINTARS の出力であるエアロゾル数密度から CCN 数密度を求める方法や Ghan et al.(1997)のパラメタリゼーションの正当性について引き続き検討する。

- HUCM+NHM モデル

NICAM を用いた雲微物理モデル搭載超高解像度全球モデル開発の準備として、ヘブライ大学 HUCM 雲微物理モデル(Khain et al., 1999)と気象庁 MRI/NPD-NHM 非静力メソスケールモデル(Saito and Kato, 1999)を基に、新たに 3 次元ビン法雲微物理モデルを開発した(井口、2002)。この HUCM+NHM モデルを利用した雲とエアロゾルの相互作用に関する再現結果を図 2 に示す。図は 2001 年 4 月 21 日の APEX-E2 観測実験において TERRA/MODIS 衛星搭載センサーから得られた低層雲の雲水総量と雲粒子半径をモデル値と比較したものである(Nakajima et al., 2001)。ここで CCN 数は SPRINTARS エアロゾル気候モデルから得られる同日のエアロゾル数密度分布(Takemura et al., 2002)から推定した。図には、同時にオリジナルの NHM モデルから得られる雲水量も示す。オリジナルの NHM モデルは雲微物理過程がバルク法であるために雲粒子半径は計算できない。図によると今回開発したモデルが観測された雲微物理量の分布を適切に再現できることを示している。しかし、観測期間中の別の日(4 月 25 日)の雲水量と雲粒子半径の確率密度関数を図 3 にプロットしてみると、モデルでは仮定した雲核量の 4 倍程度を与えない限り(modelx4) 衛星観測値が示す再頻度雲水量や雲粒子半径(MODIS)を再現することができないことも明らかになった。このようなモデルによる粒子半径の過大評価は鉛直一次元モデルでも報告されている(Zhao et al., 2003)。今後、このような問題を解決するために、必ずしも検討が十分でないエアロゾルから CCN を形成するためのパラメタリゼーションに関しても検討が必要であると思われる。

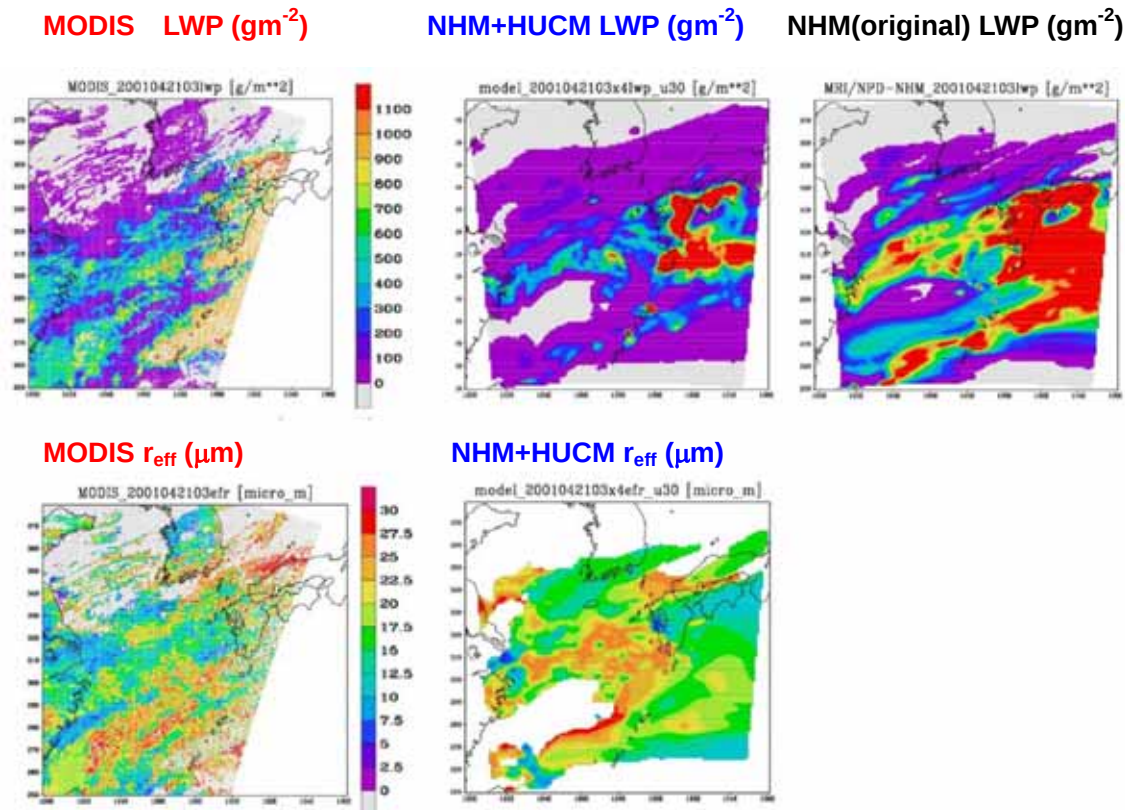


図2 . 上段の図： 2001 年 4 月 21 日 UTC3:00(JST12:00)における鉛直雲水積算量(g/m^2)の瞬間値。左の図はTERRA衛星搭載MODISセンサーより得られた画像を再解析し、計算された観測値(T. Y. Nakajima, 2003)。中央の図はHUCM+MRI/NPD-NHMモデルによる計算結果、右の図はMRI/NPD-NHMによる計算結果。

下段の図： 同時刻における雲頂での雲粒有効半径(μm)の瞬間値。右図は MODIS 画像再解析による観測値、中央図はHUCM+MRI/NPD-NHM モデルによる計算結果。MRI/NPD-NHM では雲粒有効半径は陽に計算できないため、図は示さない。

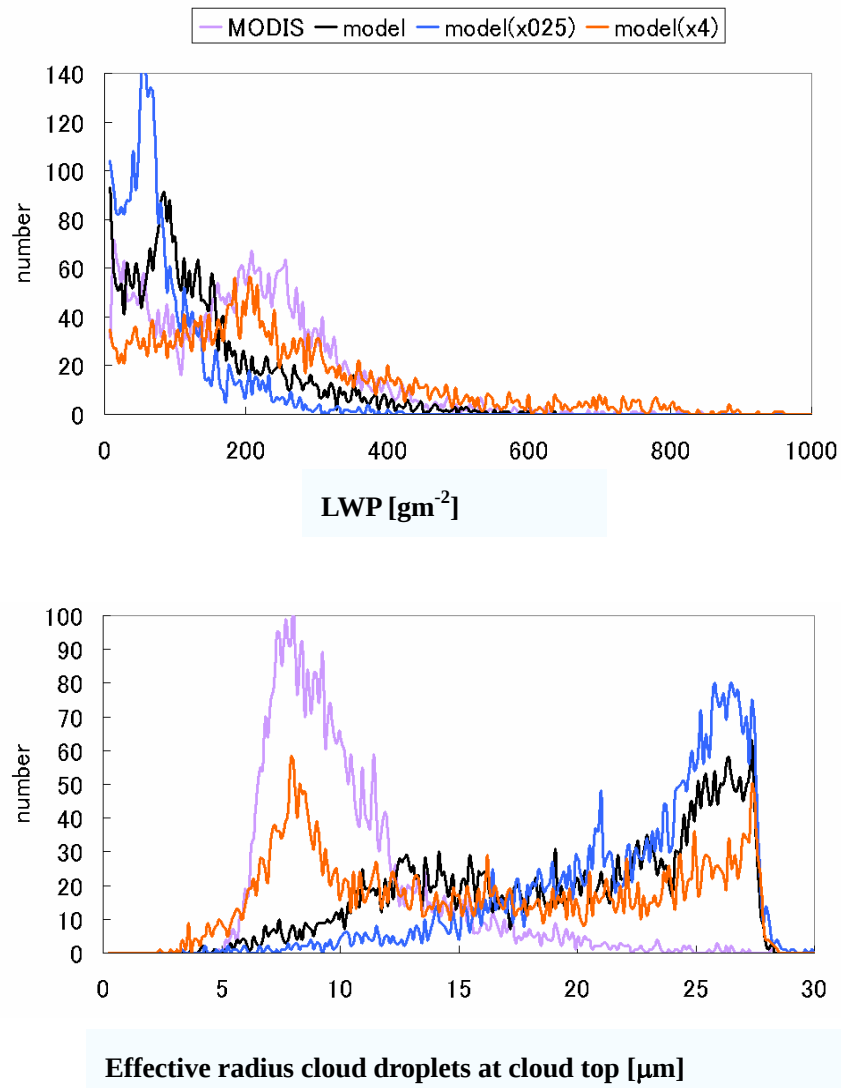


図3 . 2001年4月25日UTC3:00(JST12:00)における解析領域内での水平10km間隔格子上の値の頻度分布図。上図は鉛直積算雲水量(gm^{-2})、下図は雲頂での雲粒有効半径(μm)の頻度分布。それぞれ、紫線はMODIS画像再解析値、黒線はHUCM+MRI/NPD-NHMモデルの計算結果(標準条件として雲核数をSPRINTARSより算定)、青線は標準条件の雲核数を0.25倍した条件での結果、赤線は4倍した条件での結果に対応する。

f. 考察

現状では、エアロゾル数密度からCCN数密度、CCN数密度から雲粒数密度を導き出す有効なパラメタリゼーションが確立されておらず、Kuba et al. (2003)およびKuba and Iwabuchi (2003)のパラメタリゼーションのGCMへの適用方法の検討が必要であり、そのためにはNICAMを用いた雲微物理モデル搭載超高解像度全球の開発およびMRI/NPD-NHM非静力

メソスケールモデル用いた雲微物理モデル搭載高解像度領域モデルの開発が必要である。

g. 参考文献

Ghan, S. J., R. Leung, C. Easter and H. Abdul-Razzak, Prediction of cloud droplet number in a general circulation model, *J. Geophys. Res.*, 102, 21777-21794, 1997.

井口享道, 雲核影響を取り入れた雲改造領域モデルによる雲物理特性の再現に関する研究, 東京大学修士論文, 2002.

Khain, A. P., A. Pokrovsky and I. Sednev, Some effects of cloud-aerosol interaction on cloud microphysics structure and precipitation formation: numerical experiments with a spectral microphysics cloud ensemble model, *Atmos. Res.*, 52, 195-220, 1999.

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

Kuba, N. and H. Iwabuchi, Revised parameterization to predict cloud droplet number concentration and a retrieval method to predict CCN number concentration, *J. Meteorol. Soc. Japan*, submitted, 2003.

Lohmann, U., J. Feichter, C. C. Chuang and J. E. Penner, *J. Geophys. Res.*, 104, 9169-9198, 1999.

Nakajima, T. Y., A. Uchiyama, T. Takamura and T. Nakajima, Inter-comparisons of warm cloud properties obtained from satellite, ground, and aircraft equipment during AREX and ACE-ASIA period in 2001. *J. Geophys. Res.*, submitted. 2001

Saito, K., and T. Kato, The MRI mesoscale nonhydrostatic model, *Met. Res. Note*, 196, 169-195, 1999.

Satoh, M., Conservative scheme for a compressible non-hydrostatic models with moist

processes, Mon. Wea. Rev., 131, 1033-1050, 2003.

Tomita, H. Satoh, M., and Goto, K., An optimization of the icosahedral grid modified by the spring dynamics, J. Comput. Phys., 183, 307-331, 2002.

Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima, Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins J. Geophys. Res., 105, 17853-17873, 2000.

Takemura, T., T. Nakajima, O. Dubovik, B. N. Holben, and S. Kinne, Single-scattering albedo and radiative forcing of various aerosol species with a global three-dimensional model, J. Climate, 15, 333-352, 2002.

Takemura, T., I. Uno, T. Nakajima, A. Higurashi, and I. Sano, Modeling study of long-range transport of Asian dust and anthropogenic aerosols from East Asia, Geophys. Res. Lett., 29, 2158, doi:10.1029/2002GL016251, 2002.

Zhao, C.-S., Y. Ishizaka, and R. Kazaoka, Modeling of marine stratocumulus during APEX/ACE-Asia: the role of initial CCN concentration, J. Geophys. Res., submitted, 2003.

h. 成果の発表

< 論文発表 >

Kuba, N., H. Iwabuchi, K. Maruyama, T. Hayasaka, T. Takeda and Y. Fujiyoshi, Parameterization of the effect of cloud condensation nuclei on optical properties of a non-precipitating water layer cloud, J. Meteorol. Soc. Japan, 81, 2,393-414, 2003.

Kuba, N. and H. Iwabuchi, The revised parameterization to predict cloud droplet number concentration and the retrieval method to predict CCN number concentration, J. Meteorol. Soc. Japan, submitted, 2003.

3. 寒冷圏モデル

担当機関：地球フロンティア研究システム

研究者：阿部 彩子（地球温暖化予測研究領域 / 東大 CCSR）

瀬川 朋紀（地球温暖化予測研究領域）

大垣内 るみ（地球温暖化予測研究領域）

齋藤冬樹（東 CCSR）

小倉知夫（東大 CCSR）

羽角 博康（東大 CCSR）

a. 要約

現実をよく表現するよう開発された氷床モデルをグリーンランドと南極に適応し、温暖化に対する氷床の応答特性を調べた。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ること、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。また、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海氷結合モデル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海氷の再現性や温暖化に対する応答特性を調べた結果、北半球高緯度の気候の再現性やグリーンランド氷床周辺の温暖化の程度は、海洋深層循環や対流の位置や強さなどの再現性に大きく影響される可能性が示された。今後は、大気海洋海氷結合モデルの結果が氷床変動にどれほど影響を及ぼすかをより詳しく調べるため、大気—氷床結合（部分統合モデル）に着手する。

b. 研究目的

地球上南北両極には陸上に氷床、海上に海氷があり、それらの生成変動は地球規模の気候変動と直結している。このため、温暖化に伴い氷床や海氷が敏感に反応して融解したり、さらに広範囲の気候や海面変動に影響を及ぼすことが懸念されている。そこで、このグループでは、最終的には地球シミュレータ上で稼動する大気／海洋／海氷／氷床結合モデルを構築し、地球温暖化や海面変動の予測実験を行なう。まず、部分モデルの改良をしながら様々な感度実験を通じて不確定要素の把握につとめる。さらに、結合されたモデルを用いて現在や過去の再現実験を行いながら、予測実験の精度を高めることをめざす。また、2万年前の最終氷期以降に関して、海洋底堆積物や地形のデータによる過去の気候や氷床

変動 / 海水準の復元がかなり高精度で行われるようになってきたので、これを再現する数値実験を試みることを通してモデルの検証を行っていく。

c. 研究計画、方法、スケジュール

氷床の質量は、降雪や融解と再凍結といった大気との相互作用のほか、内部の氷の流動変形や底滑りなど氷床の力学過程により決まっている。温暖化に影響されると、氷床は融解するばかりでなく、降雪の増加や氷の変形による負のフィードバック（氷床の全体としての質量損失を押さえるメカニズム）を受けたり、逆に面積や高度の低下による気温と融解への正のフィードバックを受けたりする。また融け水の増加、氷温度の変化、流動や底滑りの変化は、大気や海洋深層循環を通じて、氷床変動に正ないし負のフィードバックをもたらす。そこで氷床変動の予測には、降水量や気温や放射などを計算する気候モデルと、融解量などを計算する表面質量収支モデルと、氷床の流動と底滑りや形を予測する氷床力学モデルで構成される必要があり、それらが密接に関係しているので結合する必要がある。14年度までに部分モデルの製作は一通り行ない、応答特性を調べてきた。今後は、各部分の改良を行ったり、地球シミュレータ用に氷床モデルプログラムを並列化最適化したり、カップラーの開発を行って気候モデルと氷床力学モデルの結合の特性を調べる。

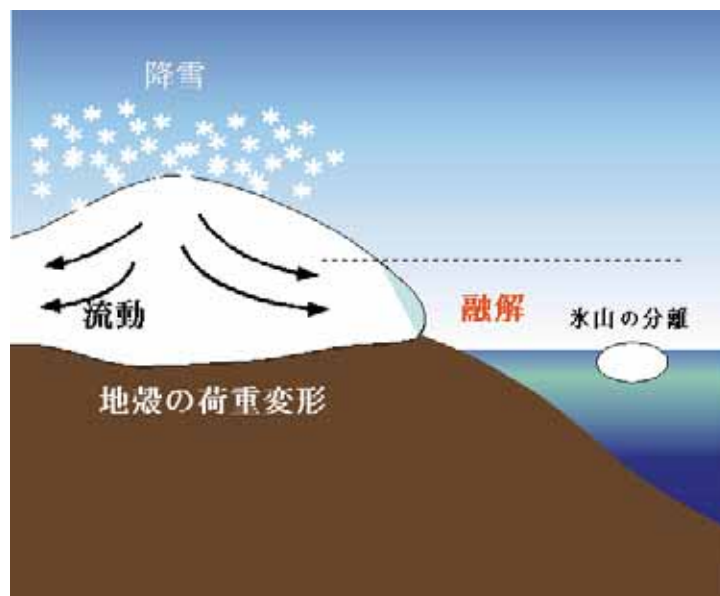


図 1. 氷床モデルの構成について

また、共生第一課題では東京大学気候システム研究センター(CCSR)、国立環境研究所(NIES)、地球フロンティア研究システム(FRSGC)が共同で大気海洋結合大循環モデル(OAGCM 'MIROC')の開発を進めている。共生第二課題の統合モデル開発はこの OAGCM を基盤として進められる予定である。海氷についてはすでに結合が完了しており、平成 14 年度までは主に海氷力学部分について詳しく検討を行ってきた。平成 15 年度以降は海氷熱力学部分の精密化を検討することを予定している。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））の観測研究とも密接に連絡をとりあってより現実的で本質的な過程の取り込みを行う。

d. 平成 14 年度研究計画

今年度は、大気—氷床の部分統合モデルの開発を中心に行なう。簡単な大気モデルを用いた部分統合モデルは試験的に行なった成功した（大森、2003）ので、この経験に基づき大循環モデル（MIROC）のカップラーに氷床モデルを結合するための変更を加える。氷床モデルおよび海氷モデルの各部分の改良を、とくに質量変化を直接左右する熱力学部分について重点的に行なう。また、地球シミュレータ用に氷床モデルプログラムを並列化最適化したり、カップラーの開発を行って気候モデルと氷床力学モデルの結合の特性を調べる。

e. 平成 14 年度研究成果

- (1) 温暖化に対する氷床モデルの応答特性について調べた。温暖化における氷床の変動の時間尺度は百年から千年に及ぶものである。氷床モデル単独計算によると、海水準増加に 2 メートル分貢献するのにグリーンランド氷床上で約 2 度温暖化、南極氷床上で約 8 度温暖化が必要。高度効果以外の結合プロセス（アルベドfeedbackや降水量変化）は今回は考慮していないので、直接結合が必要となる。

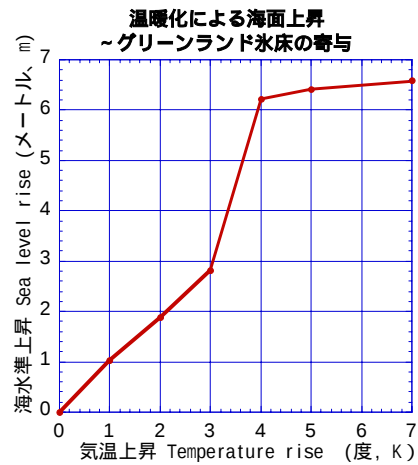


図2.グリーンランド氷床の温暖化に対する応答

(2) 中解像度の大気海洋結合モデル（大気 T42, 20 層, 海洋は緯度経度 0.5 から 1 度程度、40 層）の調整を行ない、応答特性を調べた。従来用いられてきたフラックス調節をしなくても済むかどうか、調整を重ねた。その結果、気温や海水準のドリフトはほぼないと言える良好な結果を得るに至った。ただし、深層循環の再現には課題が残された。さらに、試験的にあるバージョンの大気海洋結合モデルを用いた温暖化実験（CO₂ 年率 1% 増加にたいする気候応答）を実行した結果、温暖化とともに深層循環沈みこみ場所の北方への移動や弱まりが見られ、グリーンランド周辺の温暖化の程度はこれまでフラックス調整のあるモデルで言われていた程度を大きく越えるものであった。グリーンランド氷床の融解の程度に大きく影響を与える程度のものであることがわかったので、さらに詳細に検討が必要である。

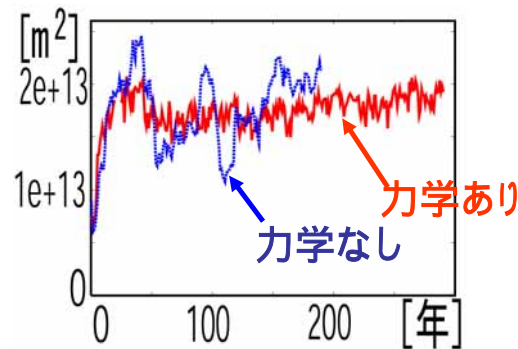


図 3 南半球冬季（８月）海氷面積の時系列。海氷力学過程を含む場合と含まない場合の大気海洋結合 G C M 出力。

(3) 南半球の海氷分布決定に海氷力学過程がどのような役割を果たすか調べた(Ogura, Abe-Ouchi and Hasumi, 投稿準備中)。海氷分布を決定するプロセスは熱力学的な部分と力学的な部分（移流）に大別できる。ここでは力学過程を含めた OAGCM と含めない OAGCM で海氷分布を計算し、両者で得られた結果を比較することで力学過程の海氷分布への影響を評価した。その結果、図 3 に示すように冬季海氷面積は力学過程を含まない場合 10 年規模で顕著に変動するのに対し力学過程を含む場合はより安定して推移する。従って、力学過程は南大洋で海氷分布の 10 年規模変動モードを一つ抑制し、海氷をより安定に維持させる働きがあることが示唆された。力学過程を含まない感度実験に見られた海氷面積変動は冬季ウェッデル海における海氷面積減少・増加及び海洋コンベクションの活発・不活発に対応しており、海氷縁辺部で海洋の成層が不安定になることが海氷底面に対する海洋からの熱の供給増加および海氷面積減少に関係することが示された。

f. 考察

温暖化変化等の高緯度での気候と雪氷分布特性は大気 海洋 雪氷の相互作用で決まっている。海氷モデルはすでに大気海洋結合モデルの中に組み込まれたが、考察する道具が作成できたに過ぎないので、さらなる数値実験や感度実験で高緯度域の気候の応答特性を調べることが今後の課題である。とくに、氷床の存在するグリーンランド域と南極域では海氷と海洋循環（対流）の相互作用が気候に大きな影響を及ぼすことがわかったので、今後詳しく調べる。また温暖化時の氷床の融解によって融け水が対流に影響を及ぼす影響も考えられるので、今後、氷床 大気 海洋の部分統合モデルの作成を通じて検討を重ねる必要があろう。

4 . 気候物理コアモデル改良

担当機関：地球フロンティア研究システム

担当者：渡辺 真吾（モデル統合化領域）

江守 正多（モデル統合化領域）

鈴木 恒明（モデル統合化領域）

鈴木 立郎（モデル統合化領域）

高田 久美子（水循環予測研究領域）

羽角 博康（東大 CCSR）

木本 昌秀（東大 CCSR）

a . 要約

大気・海洋・陸地面の主として物理過程から成る気候モデル（CCSR/NIES モデル、既存）で成層圏の諸プロセスを改良もしくは新しく取り入れたモデルを開発する。

大気モデルの改良に関しては、現モデルで不十分な中層大気（成層圏・中間圏）の諸プロセスの改良を図る。即ち、中層大気中への人為起源物質の侵入により、中層大気特有のオゾン層の物理・化学過程と太陽からの放射の変動が相互に影響し合って中層大気の変動を引き起こすと共に、それが下層対流圏の変動と結合して気候変動を生じる機構をモデル実験によって明らかにする。また、内部重力動波の挙動とそれが大気循環に及ぼす影響を超高解像度大気モデルによって明らかにする。

本年度は、気候モデルの上端を上部中間圏（80 km）まで拡張し、モデルの水平・鉛直解像度ならびに物理過程のチューニング・パラメーターを変化させた実験を数十ケース行うことにより、中層大気の様々な過程を支配する大気波動の役割の重要性を認識できた。本年度のシミュレーションで達成した解像度は、水平 T106 (1.1 度格子)、鉛直層厚 200 m である。また、解像度を変えて実験した際に、地球シミュレーターの計算機資源と、実際の計算時間をどの程度必要とするかも調査した。また、従来のモデルで用いられてきた鉛直座標系は σ 座標系であり、地表から離れた対流圏界面付近以上の高度では、力学過程の表現に問題が生じる可能性が指摘されていたが、これを σ -p ハイブリッド座標系に変更することにより、成層圏以上での計算精度が向上した。一方、このモデルに特有の問題である、対流圏界面付近の低温・湿潤バイアスに関しては、その実態の詳細と、原因となる過程に関する調査を進めたが、その解決は次年度の課題として残された。

b . 研究目的

本研究の目的は、気候物理モデルの開発・改良と、それに結びつく大気中の様々な過程をより良く理解することにある。とりわけ、中層大気における、大気組成の変化と気候との相互作用過程を正確にシミュレートするためには、大気微量成分やエアロゾルの輸送を支配する大気の運動と、光化学反応過程に重要な大気の温度場を適切に再現できる必要がある。

中層大気中の大規模な循環と温度場の季節変化や年々変動をよりよく再現するためには、オゾンによる太陽紫外線吸収がもたらす加熱や、二酸化炭素・メタン・オゾン・水蒸気を代表とする温室効果気体が放つ赤外放射による冷却、すなわち放射過程と、数百メートルから惑星規模にわたるさまざまな大気波動が、それぞれモデル中で適切に表現される必要があると考えられている。放射過程および小規模の大気波動を正しく表現するためには、モデルの水平・鉛直解像度がある程度高くなければならないと考えられている。

しかしながら、長期間にわたって、大気組成変化との相互作用までも含めた温暖化予測実験を行ううえで必要十分な解像度は、今もって十分明らかにはされていない。地球シミュレーターを用いた大規模計算により、各々の過程のモデル解像度に対する依存性を明らかにしていくことは、統合モデルの設計にとって必須であるとともに、学術的にも意義深いものであり、本サブテーマの中心課題である。

全体計画において、最終的な統合モデルの基礎となる高解像度全球大気モデルの開発を長期的な目標とするとともに、各サブグループ(部分統合モデル)のニーズに合わせた大気モデルの開発・提供を行っていく予定である。

c . 研究計画、方法、スケジュール

大気・海洋・陸地面の主として物理過程から成る気候モデル(CCSR/NIES モデル、既存)で成層圏の諸プロセスを改良もしくは新しく取り入れたモデルを開発する。成層圏・中間圏大気の温度と循環・物質輸送に大きな役割を果たす内部重力波の効果を正しく取り入れるため、内部重力波をパラメタライズせず直接取り扱う水平解像度 20 km、鉛直層厚 100 m 程度のモデルで数値実験を行う必要がある。この実験を 2 年目までに実施し、3 年目には、中層大気までを含む中解像度大気化学・気候結合モデルに新しいパラメタリゼーションを組み込めるようにする。中層大気を含む化学・気候結合モデルは、サブテーマ(2) - 「温暖化・大気組成相互作用モデル」の開発 - とともに協力して平衡して開発を進め、オゾン層破壊と温暖化の相乗効果など中解像度モデルで実験を行う。

d . 平成 14 年度研究計画

物理気候コアモデルに関して、高度約 80 km までの成層圏・中間圏までを含め、同時に鉛直解像度を高くする作業に着手する。中層大気化学（オゾン層化学）過程で統合モデルに適切なプロセスモデルの考察も行う。並行して、現状の気候モデルの問題点の改良も行う。

e . 平成 14 年度研究成果

e-1) モデル上端の拡張

最初に、モデルの鉛直計算範囲の拡張を行った。具体的には、CCSR/NIES モデルの上端を従来の 50 km 未満から、80 km に上げた。このことにより、成層圏・中間圏のすべてを表現できるようになり、長期間にわたる大気組成の変化と気候の変動を適切に予測できる可能性が高まった。例として、7月の帯状平均東西風を図1に示す。図1aは、従来のモデルの結果であり、南半球の冬季西風ジェットの上部や、北半球の夏季東風が表現されていない。これに対して、図1bは、上端を80 km にしたモデルの結果である。また、オゾンホールが発達に関係のある下部成層圏の季節進行に関して、冬半球の西風ジェットや夏半球の東風ジェットをすべて表現できるようになったことから、より正確なシミュレーションが可能となった。

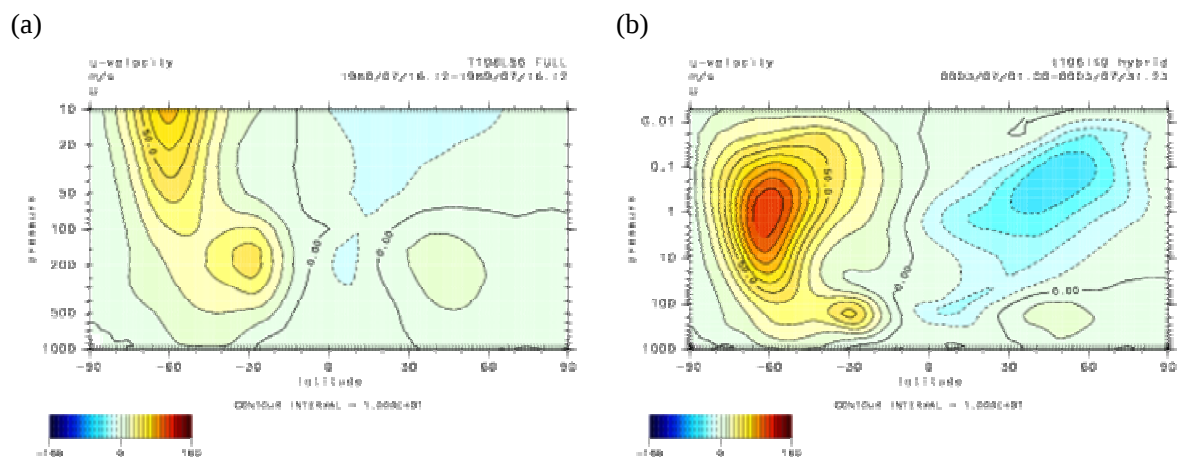


図1：7月の帯状平均東西風、(a) 上端 50 km のモデル；図の上端はおよそ 30 km。(b) 上端 80 km のモデル；図の上端は 80 km。等値線間隔は 10 m/s。青色は東風。

e-2) 鉛直座標系の変更

モデルの鉛直座標系を、従来の σ 座標系から、中層大気モデルで一般に用いられており、上部対流圏から中層大気における循環場および物質輸送の改善が期待される σ - p ハイブリッド座標系に変更した。これに伴い、微量成分気体(水蒸気)の分布が変化した。

図 2a は、 σ - p ハイブリッド座標系を用いた場合の 120 hPa 面の水蒸気混合比、図 2b は、従来の σ 座標系の結果である。 σ 座標系を用いた場合には、山岳地形周辺でモデルの座標面が盛り上がるため、より下層の水蒸気を多く含んだ空気がヒマラヤ、ロッキー、アンデス等、山岳の風下(右手方向)に向かって流出する効果により、下部成層圏がより湿潤になる傾向が見られたのに対し(図 2b)、 σ - p ハイブリッド座標系いた際には、そのような悪影響が除去されることが分かる(図 2a)。

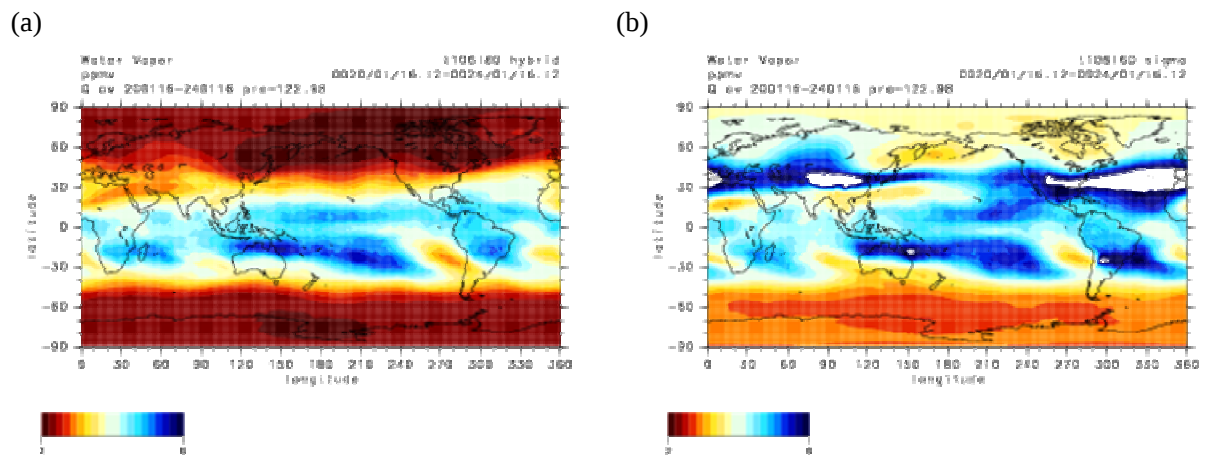


図 2：同一の初期値から同一の境界条件で積分した 20-24 年目平均の、(a) σ - p ハイブリッド座標系、(b) σ 座標系における、120 hPa 面、1 月の水蒸気混合比分布図。カラスケールの最小・最大値はそれぞれ 2 ppmv と 6 ppmv。白抜き領域は 6 ppmv 以上を表す(b)。

e-3) 水平・鉛直解像度・および物理過程のパラメーターの違いに対するモデル大気の応答

モデルの水平・鉛直解像度、および様々な物理過程のパラメーターを変更して、それに対するモデル大気の応答の違いを調査した。実際の作業は、数十例におよぶ実験を数年間ずつ繰り返すものであったが、主な実験設定と、その成果のみを整理して以下に挙げる。

e-3-1) 水平解像度

モデルの水平解像度を上げることは、より詳細な気温や降水の分布を再現できるようになるといった、対流圏の気候の再現性を向上させる意味だけではなく、中層大気においても、大循環の形成に重要な役割を果たす小規模の内部重力波の表現が可能となると

いう点において重要である。たとえば、大気大循環モデルに共通した大きな問題点として、冬季-春季にかけて極域下部成層圏の気温が観測に比較して低温になりやすいという「高緯度低温バイアス」が存在する。その主な原因として、小規模の内部重力波の表現が不十分であることが考えられている(たとえば Hamilton et al., 1999)。

図 3 のカラスケールは、水平解像度を T106 (1.1 度格子)および T21 (5.6 度格子)で行った実験における、重力波の運動量輸送に伴う東西風の加・減速の分布を示している。いずれも 7 月の結果で、鉛直解像度は成層圏で 200m、モデル上端付近で 500m となるように取っている。水平解像度が高い方が、より多くの重力波を表現し、結果として、帯状平均東西風をより強く、より低い高度から減速させていることが分かる。等値線で表されている東西風の分布を見ると、南半球冬季の極夜ジェットのピークは、高解像度のものは 110 m/s 程度であるのに対して、低解像度のものは 170 m/s 程度となっている。

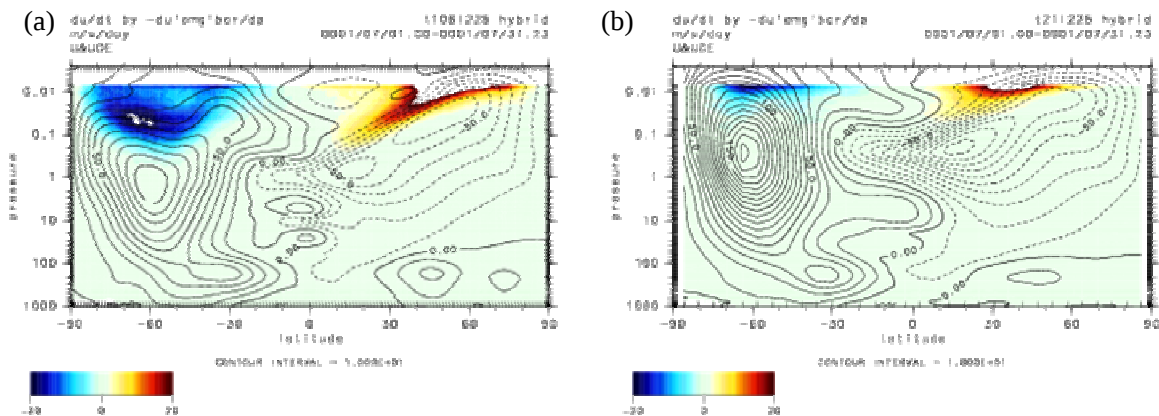


図 3 : (a) T106、(b) T21 の結果(7 月)。カラスケール：重力波(=東西波数 5 以上の成分)の運動量フラックスの収束にともなう東西風加速[m/s/day]。青色は西風の減速を表す。等値線：帯状平均東西風；10 m/s 間隔。点線は東風を表す。

図 4 は、同じ実験の温度場を、観測(CIRA86)からのずれ、すなわちバイアスで表現したものを表す。水平解像度が高くなるほど、南半球冬季の高緯度成層圏の低温バイアスが改善される様子が分かる。低解像度では 50 K 以上ある低温バイアスが、高解像度では 15 K 程度まで小さくなっている。

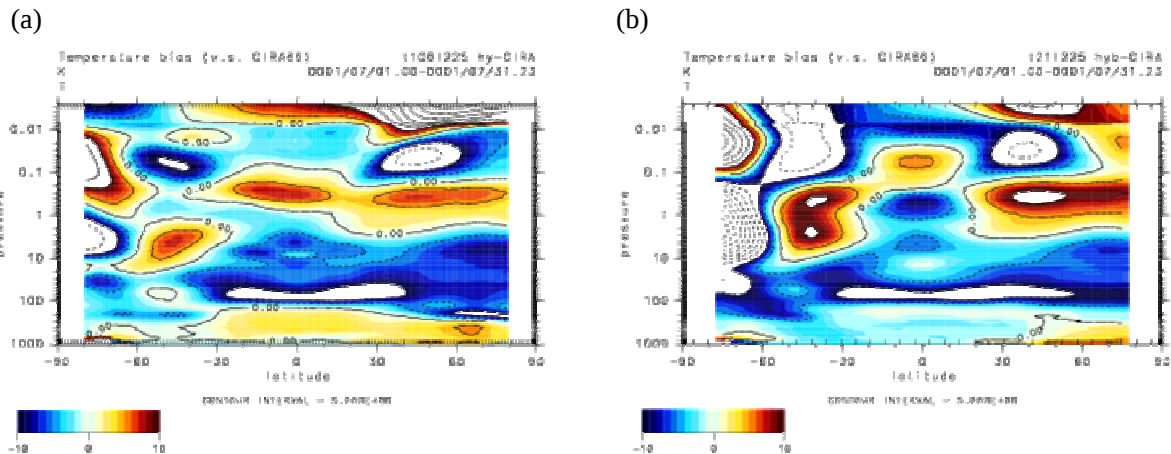


図4：図3と同じ期間の帯状平均温度バイアス。(a)T106、(b)T21。等値線間隔：5K。

e-3-2) 鉛直解像度

GCMの水平解像度のみを上げて鉛直解像度が相対的に低いままであると、再現される大規模な流れの場や大気波動に問題が生じることが指摘されている(Lindzen and Fox-Rabinovitz 1989)。また、放射過程や微量成分の輸送、重力波の散逸過程を正確にシミュレートするためには十分な鉛直解像度が必要になる。このため、鉛直解像度を变化させて実験を行った。波動に関する詳しい解析は未だ行っていないが、鉛直解像度を高くすることによって、このモデル(CCSR/NIES AGCM)に固有の問題である、下部成層圏の低温・湿潤バイアスがある程度改善されることが分かった。

図5は、鉛直解像度を、従来中層大気大循環モデルで用いられてきた1500 m程度から、200 mまで細かくしたときの、温度場の再現性の变化(6月の帯状平均温度バイアス)を示す。これらの図の数値は、シミュレーションの結果から、ECMWFの再解析データ：ERA15の値を引いたものであり、絶対値が小さくなるほどシミュレーションの結果が良好であることを表す。なお、結果は数年間積分した最後の3年間の平均を示してある。この結果から、鉛直解像度を高くすることによって、下部成層圏から対流圏界面付近(50-300 hPa)の低温バイアスが改善されていくことが分かる。また、図は示さないが、湿潤バイアスに関しても、鉛直解像度を上げるにより対流圏界面付近において水蒸気の過剰な成層圏への輸送が抑制されることが分かった。湿潤バイアスは水蒸気の放射冷却を通じて低温バイアスの原因ともなりうるため、より詳しい解析が必要である。

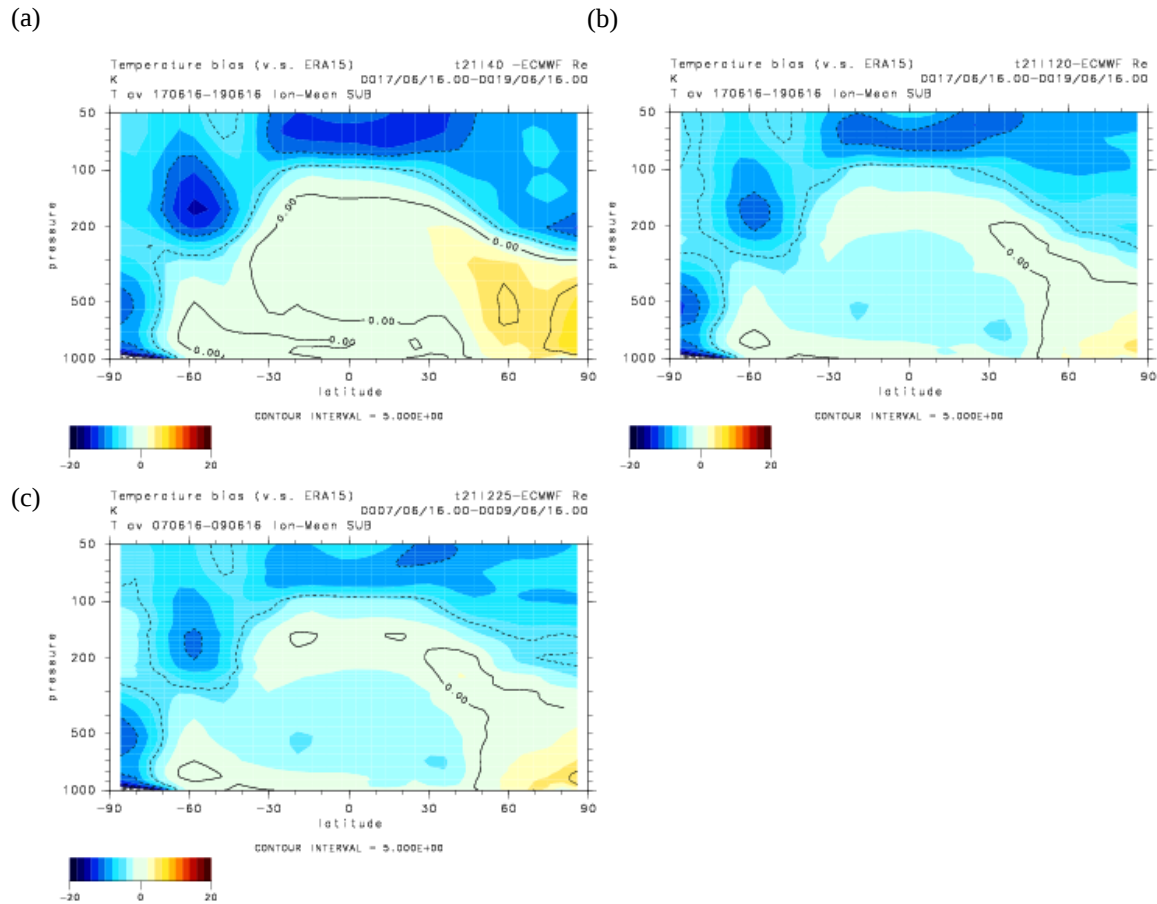


図5: 6月の帯状平均温度バイアス。(a) 鉛直解像度 1500 m、(b) 同 500 m、(c) 同 200 m。(単位:)

e-3-3) 重力波エネルギー・スペクトルと成層圏赤道 QBO の再現

単に水平・鉛直解像度のみを高くしても、モデル中の重力波は適切に再現されず、したがって、大気大循環の気候場の再現性も向上しない。重力波をよりよく再現するためには、複数の物理過程のパラメーターを適切にチューニングする必要がある。それらパラメーターの中で、重力波の散逸に関する水平拡散と、励起に関する積雲対流パラメタリゼーションにおける相対湿度の閾値(RHc)が、特に重要であることが確かめられた。(RHc に関しては、辻ほか, 2002 を参考にした。)

図6は T106L60 (上端は約 50 km、下部成層圏の鉛直解像度は約 500 m)の解像度で再現された成層圏赤道東西風の準二年振動(QBO)を示す。およそ 20 hPa 付近を中心として、約 25~27 ヶ月周期で東西風が交代する様子が見られる。観測されているものに比べるとやや振幅が小さいが、モデルの上端の低さや鉛直解像度の不足などが原因であると推測される。なお QBO のレビューとしては、Baldwin et al. (2001)、重力波パラメタリゼー

ションを用いない GCM による QBO の再現に関しては、Takahashi (1996, 1999)、Horinouchi and Yoden (1998)、Hamilton et al.(2002)などが挙げられる。

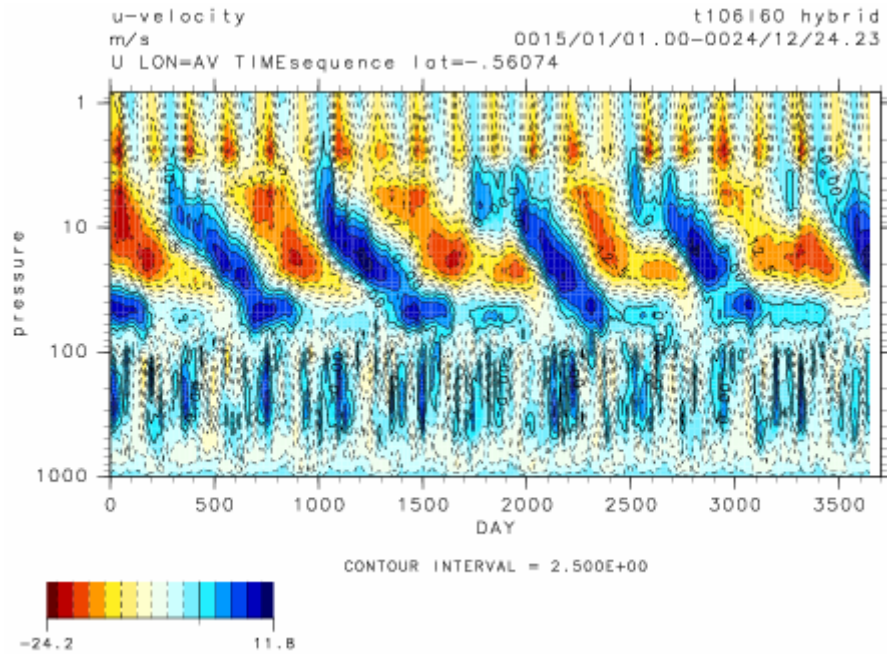


図 6：赤道上空(0.56°S)における、帯状平均東西風の高度・時間断面。25 年間積分した最後の 10 年間を示す。等値線間隔：2.5 m/s。濃い青色は西風。

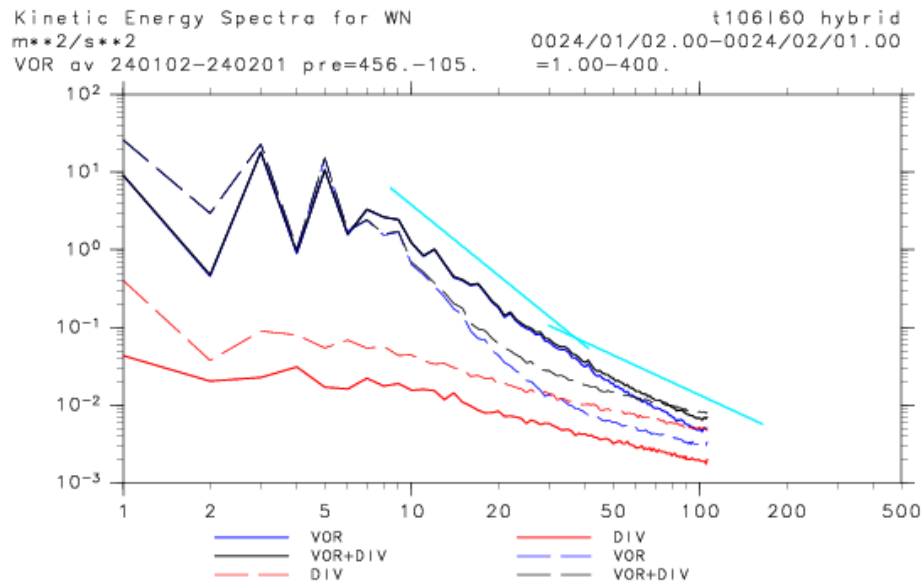


図 7：水平運動エネルギーの全波数に対するスペクトル。実線は上部対流圏の平均値、破線は成層圏の平均値を表す。青色は渦度成分、赤色は発散成分、黒色は正味の値を示す。左側の水色の実線は波数の-3 乗、右側は波数の-5/3 乗の傾きを表す。

図 7 はこのときの水平運動エネルギーの全波数スペクトルを示す。図の黒い実線は、上部対流圏における正味のエネルギー・スペクトルを表しているが、その傾きに注目すると、およそ全波数 10-40 の範囲では、波数の-3 乗に、それより大きな波数では、およそ波数の-5/3 乗に従って、高波数ほどエネルギーが弱くなっていることが分かる。これらは航空機観測から得られた実際のスペクトル分布と良い一致を示している(Nastrom et al., 1984)。

図の赤線は水平運動エネルギーのうち、発散成分を表すが、その大部分は内部重力波に関するものである。特に成層圏においては、大気密度の減少とともに重力波の持つエネルギーは増加し、特に高波数では、正味のエネルギーの大部分を占めるようになることが分かる。この重力波成分による運動量輸送が、QBO の再現に特に重要であると考えられている(たとえば Dunkerton, 1997, Horinouchi and Yoden, 1998)。

多数のパラメーターを変化させて行った感度実験の結果から、このような観測事実に近いエネルギー・スペクトルの傾きとQBOを同時に再現するためには、水平拡散および積雲対流に関するパラメーターを、ある程度こまめにチューニングしてやる必要があることが分かった。T106 の場合、水平拡散に関しては標準的な 4° の拡散から、 8° の拡散に変更し、最大波数に対するダンピング・タイムを 1 日程度とする必要があった。また積雲対流から、適当な時空間スペクトルを持った重力波を励起させるために、対流発生の判定に関するパラメーターRHcを、鉛直解像度に応じて適宜調節を行った。

e-4 モデルの鉛直範囲の拡張と鉛直解像度の決定に関する補足

本研究では、既存の九州大学 GCM (Miyahara et al., 1995)や、GFDL の SKYHI GCM (Fels et al., 1980)を参考にし、それらよりもはるかに鉛直解像度を高めることを念頭に開発を行った。以下にモデル開発を通じて経験的に得られた知見を記しておく。

鉛直層厚を一定にとることが内部重力波の伝播と散逸過程を正確に表現する上で重要であるが、計算安定性の面から言えば、鉛直層厚を高度とともに線形に増加させると、より安定に、より長いタイム・ステップで高速に積分が可能になることが確認された。(同じ鉛直層数の場合、実際の計算コストはおよそ 6 割になった。) SKYHI GCM をはじめ他の GCM も同様に高度とともに鉛直解像度を粗くしており、鉛直高分解能ではあるが、重力波そのものには注目せず、安定に短時間でモデルのスピン・アップを行いたい場合などには、有効であると考えられる。線形以外の割合で層厚を増加させた場合には、モデル大気の東西風や大気波動の鉛直伝播に際立った不連続が生じることも確認した。

また、同様の不連続は、放射の計算に用いるオゾンデータの鉛直分布が不連続な場合にも生じたため、用いるオゾンデータには必要最小限のスミージングを施した。

一方、重力波による東西風の減速を近似するために GCM で一般に用いられているレイリー摩擦は、鉛直高解像度モデルに適用した場合には、その適用高度において、モデル大気に著しい不連続が現れることが分かったため、モデル上端付近のスポンジ層以外では使用を中止した。その結果、たとえば T106L250(1.1 度格子、鉛直層厚 300m)の解像度では、中・高緯度の極夜ジェットが、両半球とも観測に比較して 20-30 m/s 程度強く、また、低緯度では、成層圏界面の半年周期振動や中間圏の半年周期振動の再現性が悪くなっている。今後は、より水平・鉛直解像度を高めた実験を行うとともに、モデルの上端をもう少し上げるなどして、改良に取り組む必要がある。

f . 考察

全体的に、ほぼ当初の研究計画どおり、あるいはそれ以上の成果を達成したといえる。鉛直座標系の更新に伴って、水蒸気輸送に大きな改善が見られたが、山岳地形周辺の循環場そのものの変化は、場所や季節でまちまちであり、座標系の変更によるものなのか、簡単な解析からは判断できなかった。以後の課題としたい。

水平解像度の向上に対するモデル中層大気の応答に関しては、すでに今回調査した T106 の 1.1 度格子を上回る 0.3x0.33 度格子を用いた SKYHI GCM の結果が出版されている (Hamilton et al., 1999)。しかしながら、彼らのモデルは格子法に基づいており、スペクトル法を用いたわれわれのモデルとは結果が異なる可能性がある。今後、より水平解像度を高めた実験を行い、詳しく検証する必要がある。

鉛直解像度の向上に対するモデル大気の応答に関して、世界を見渡すと、中層大気 GCM としては下部成層圏で鉛直層厚 500 -700 m 程度とし、高度とともに鉛直解像度を粗くしていくものが最高であり、鉛直層数は 80-90 層である (Hamilton et al., 1999、Giorgetta et al., 2002)。現時点で、前項で例に示した 200 - 300 m という解像度で十分な期間にわたって計算ができるのは、地球シミュレーターを用いたわれわれのモデルだけである。内部重力波の伝播や砕波を正確に表すためには、鉛直層厚が 100 m のオーダーになることが求められているため、今後さらに開発を続けていく必要がある。また、下部成層圏の低温・湿潤バイアスの改善に向けても、より詳しい検討が必要である。

内部重力波を含んだ運動エネルギーの全波数スペクトルに関しては、様々な水平解像度の中層大気 GCM の結果を比較した論文がある (Koshyk et al., 1999)。水平解像度が T42 (2.8 度格子)程度であり、内部重力波のうち比較的大規模なものしか表現できない従来の気候モ

デル、あるいは数値予報のためのモデルにおいては、モデルの表現できる最小規模にちかい重力波は、計算不安定をもたらすノイズとして数値的に除去されていた。そういう経緯のため、水平解像度が高められた今日の GCM においても、高波数の波に対しては、強めの水平拡散を作用させてしまい、観測されているスペクトル強度よりも小さくなっている例が多かった。

開発中のモデルでは、重力波の再現性を重視しており、ひとつの指標としてスペクトルの傾きが観測事実に近づくように調整を行った。ただし、スペクトルの強度そのものに関しては、異なる積雲対流スキームを用いた他のモデルと比較するとやや小さい傾向にあるので、今後はそのあたりの考察も行いたい。また、QBO の生じる下部成層圏高度だけでなく、内部重力波の砕波が頻繁に生じる上部中間圏における重力波の振る舞いに関しても、今後より高解像度のモデルを用いて詳しく調べていきたい。

最後に、今回の報告書では触れていないが、次年度中には、中解像度版 GCM において重力波のパラメタリゼーション(Hines 1997a, b)を導入する予定である。それに先駆けて、超高解像度版の中層大気 GCM における重力波のパラメーターとの直接比較を行い、より適切なパラメタリゼーションの実装方法を模索する予定である。

謝辞：

本研究の計算は地球シミュレーターを用いて行われた。作図には GFD-DENNOU Library および GTOOL を使用した。鉛直座標系の変更に関しては、方程式系の導出および実際の作業の大部分は、東京大学気候システム研究センター大学院の院生である三浦氏の手によって行われた(Miura, 私信)。

g . 引用文献

Baldwin, M. L. J. Gray, T. J. Dunkerton, K. Hamilton, P. H. Haynes, W. J. Randel, J. R. Holton, M. J. Alexander, I. Hirota, T. Horinouchi, D. B. A. Jones, J. S. Kinnersley, C. Marquardt, K. Sato and M. Takahashi, The Quasi-Biennial Oscillation, *Rev. Geophys.*, 39, 179-229, 2001.

Dunkerton, T. J., The role of gravity waves in the quasi-biennial oscillation, *J. Geophys. Res.*, 102, 26,053-26,076, 1997.

Fels, S. B., J. D. Mahlman, M. D. Schwarzkopf and R. W. Sinclair, Stratospheric

sensitivity to perturbations in ozone and carbon dioxide: radiative and dynamical response, *J. Atmos. Sci.*, 37, 2265-2297, 1980.

Giorgetta, M. A., E. Manzini and E. Roeckner, Forcing of the quasi-biennial oscillation from a broad spectrum of atmospheric waves, *Geophys. Res. Lett.*, 29, 8-86., 2002.

Hamilton, K. J., R. J. Wilson and R. S. Hemler, Spontaneous stratospheric QBO-like oscillations simulated by the GFDL SKYHI general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 58, 3271-3292, 2002.

Hamilton, K. J., R. J. Wilson and R. S. Hemler, Middle atmosphere simulated with high vertical and horizontal resolution versions of a GCM: Improvements in the cold pole bias and generation of a QBO-like oscillation in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, 56, 2829-3846, 1999.

Hines, C. O., Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 1: Basic formulation, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 59, 371-386, 1997a.

Hines, C. O., Doppler-spread parameterization of gravity-wave momentum deposition in the middle atmosphere. Part 2: Broad and quasi monochromatic spectra, and implementation, *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 59, 387-400, 1997b.

Horinouchi, T and S. Yoden, Wave-mean flow interaction with a QBO-like oscillation simulated in a simplified GCM, *J. Atmos. Sci.*, 55, 502-526, 1998.

Koshyk, J. N., B. A. Boville, K. Hamilton, E. Manzini and K. Shibata., Kinetic energy spectrum of horizontal motions in middle-atmosphere models, *J. Geophys. Res.*, 104, 27,177-27,190, 1999.

Lindzen, R and Fox-Rabinovitz, Consistent vertical and horizontal resolution, *Mon. Weather Rev.*, 117, 2575-2583, 1989.

Miura, H., Vertical differencing of the primitive equations in a Sigma-p hybrid coordinate (For Spectral AGCM), CCSR Internal Report, University of Tokyo, in press.

Miyahara, S., Y. Miyoshi, T. Kayahara, Y. Yoshida, M. Ooishi and T. Hirooka, Development of a middle atmosphere general circulation model at Kyushu University, Climate System Dynamics and Modeling, Center for Climate System Research, University of Tokyo, pp. 75-103, 1995.

Nastrom, G. D., K. S. Gage and W. H. Jasperson, Kinetic energy spectrum of large-and mesoscale atmospheric processes, Nature, 310, 36-38. 1984.

Takahashi, M., Simulation of the stratospheric quasi-biennial oscillation using a general circulation model, Geophys. Res. Lett., 23, 661-664, 1996.

Takahashi, M., Simulation of the quasi-biennial oscillation in a general circulation model, Geophys. Res. Lett., 26, 1307-1310, 1999.

辻ほか, 対流圏積雲対流活動のQBOサイクルに及ぼす影響, 日本気象学会 2002年度春季大会講演予稿集, pp. 58, 2002.

h . 成果の発表

< 口頭発表 >

S. Watanabe, Development of a middle atmosphere GCM at the Frontier, GRIPS annual workshop, Mar 6 2003, Washington D.C., USA.