

物理・生態システムさらには 人間システムのつながりをモデルで描く

Development of models for simulating linkages among physical, ecological, and human systems

高橋 潔^{1*}・三枝 信子²・及川 武久³・河宮 未知生⁴・羽島 知洋⁴・
山中 康裕⁵・平田 貴文⁵・阿部 彩子⁶

Kiyoshi TAKAHASHI^{1*}, Nobuko SAIGUSA², Takehisa OIKAWA³, Michio KAWAMIYA⁴, Tomohiro HAJIMA⁴,
Yasuhiro YAMANAKA⁵, Takafumi HIRATA⁵ and Ayako ABE-OUCHI⁶

¹ 国立環境研究所 社会環境システム研究センター

² 国立環境研究所 地球環境研究センター

³ 筑波大学 名誉教授

⁴ 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野

⁵ 北海道大学 大学院地球環境科学研究院

⁶ 東京大学 大気海洋研究所

¹ Center for Social and Environmental Systems Research, National Institute for Environmental Studies

² Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies

³ Professor Emeritus, University of Tsukuba

⁴ Department of Integrated Climate Change Projection Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

⁵ Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University

⁶ Atmosphere and Ocean Research Institute, The University of Tokyo

摘 要

IGBP コアプロジェクトの1つである AIMES は、システムを構成する個別要素の挙動理解やモデル化を基礎としつつ、その個別要素に関する理解を統合化して相互作用を考慮することで、要素別には捉えられない挙動まで扱う地球システム科学の推進に取り組んできた。本稿の目的は、AIMES 及びその前身プロジェクトの活動概要について、特に連携して実施されたモデル比較評価研究群に焦点を当てて紹介するとともに、今後の展開について論ずることである。AIMES の活動は、近年、社会経済モデルと地球システムモデルの統合など、自然科学と人文社会科学の連携をより明確に志向してきている。その連携は、我々人類がかつてなく大規模に地球システムに作用し負荷を与え、その結果としてさまざまな問題が生じつつあることを強く懸念し、その問題の解決・管理のために必須であるがゆえに、志向されるものである。

キーワード：学際研究, 気候変化, 地球圏-生物圏国際協同研究計画,
地球システムの解析・統合・モデリング, 地球システムモデル

Key words：transdisciplinary research, climatic change, earth system model,
AIMES, IGBP

1. はじめに

私たちが住むこの地球は、陸、海、大気、生物、人間といった多様な要素から構成されている。また時間・空間的なスケールの観点からも、多様な規模の事象が混在している。伝統的な分野別研究は、対象とする時間・空間を区切ったうえで、各々の要素について、その性質やメカニズムに関する科学的理解を拡充・深化させてきた。一方、現実の地球においては、各要素・事象は必ずしも独立して存在するものではなく、相互作用がそこかしこで見られ、ま

た、要素間の線引きも往々にして曖昧である。また、異なる時空間スケールで生ずる事象間の相互作用が決定的に重要となる場面もある。特に気候変動問題に代表される地球規模の環境問題への科学的知見の活用を目指す場合などは、過度に問題を単純化し、要素間の相互作用や異なる時空間スケールの事象の相互作用を無視しては、現実の問題解決に資することができないことが多い。

IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme: 地球圏-生物圏国際協同研究計画)の8つのコアプロジェクトの1つである AIMES(Analysis, Integration

受付：2015年3月30日、受理：2015年8月17日

* 〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2, e-mail: ktakaha@nies.go.jp

and Modeling of the Earth System：地球システムの解析・統合・モデリング)は、システムを構成する要素の個別の挙動の理解やモデル化を基礎に持ちつつ、その個別要素に関する理解を統合化して相互作用を考慮することで、要素別には捉えられない挙動まで積極的に扱う地球システム科学の推進を支持し、そのための研究コーディネーションの実施を役割としている¹⁾。

IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change：気候変動に関する政府間パネル)第5次評価報告書第1作業部会報告書(2013年9月公表)²⁾で評価された最近の気候モデルには、大気・海洋システムにおける現象の物理学的な記述にとどまらず、陸域・海洋システムにおける炭素循環に係る現象の生物学的な記述まで結合したもの(地球システムモデル)も多く含まれている。AIMESはその前身のIGBPコアプロジェクトのGAIM(Global Analysis, Interpretation and Modeling：地球変動の解析・解釈・モデリング)の頃より、OCMIP(Ocean Carbon-Cycle Model Intercomparison Project：海洋炭素循環モデル相互比較プロジェクト)、TRANSCOM(Atmospheric Tracer Transport Model Intercomparison Project：大気輸送モデル相互比較プロジェクト)、VEMAP(Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project：植生/生態系のモデル化・分析プロジェクト)、CCMLP(Carbon Cycle Model Linkage Project：炭素循環モデル結合プロジェクト)といった炭素循環の構成要素に関する国際研究協力やモデル相互比較のコーディネーションを通じて、気候モデルの進歩の土台構築に努めてきた。それらの活動は、気候モデルから地球システムモデルへの発展の流れを導くものであった。

さらにGAIMの活動がAIMESに引き継がれて以降、近年には、化石燃料燃焼による人為的な気候変化が典型例であるように、人間活動による自然システムへの干渉を考慮せずには、大気・陸域・海洋等の自然システムの振る舞いを十分に説明できないとの認識が一般的になった。人間活動、並びにそれが自然システムに及ぼす影響について、これをシステムの外側で生じて自然システム・地球システムに作用する外力として扱うのではなく、地球システムを構成する一要素として扱おうとする視点・試みもあらわれつつある。それはまた、自然科学と人文・社会科学の連携・協働を含む、伝統的な学問分野を横断した新たな学問の在り方を求める動きでもある。近年のAIMESの活動でも、自然システムと人間システムの相互作用の理解に取り組むものが増えてきた。例えばAIMESに位置づけられた国際的研究活動の1つであるIHOPE(Integrated History of People on Earth：統合人類史プロジェクト)³⁾は、考古学的データ、古環境データ、人類学的データを駆使することで、古代における自然・人間の統合システムの長期変遷について理解することを目指している。す

なわち、人間システムと自然システムの共進化の過程をより良く理解し、さらにはその実証的理解をふまえ、将来における人間システムと自然システムの在り方を論ずるための素材とすることを目指している。また、地球システムモデルにおける人間システム・人間活動の扱いに関していえば、IPCC第5次評価報告書に向けた気候モデル・地球システムモデルによるシナリオ分析の支援・促進にも取り組んだ。具体的には、気候モデル研究コミュニティーであるWCRP(World Climate Research Programme：世界気候研究計画)中のWGCM(Working Group on Coupled Modeling：結合モデル作業部会)と社会経済・排出シナリオを扱う統合評価モデル研究コミュニティーであるIAMC(Integrated Assessment Modeling Consortium：統合評価モデルコンソーシアム)との協力を通じて、土地被覆・土地利用シナリオを含む温室効果ガス濃度・排出シナリオであるRCP(Representative Concentration Pathways：代表的濃度経路)⁴⁾の開発に貢献した。

以上のように、前身のGAIMから数えると23年にわたるAIMESの活動はダイナミックな変遷を辿りつつ多岐に渡っている。本稿の目的は、IGBPがその23年の活動を経て2016年よりFuture Earthに取れん・移行されることを受け、これまでのGAIM～AIMESの活動の概要を紹介するとともに、さらに今後の道筋について示すものである。第2章では、AIMESの前身にあたるGAIMの概要を、特に、関連して実施された我が国でのさまざまな取組に重点を置いて整理する。次に第3章・第4章では、多岐にわたるGAIM～AIMESの活動のうち、我が国の研究チームが特に重要な役割を担ったC4MIP(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)とMAREMIP(Marine Ecosystem Model Intercomparison Project：海洋生態系モデル相互比較プロジェクト)について、それぞれの活動の概要と主たる研究成果を紹介する。最後に第5章では、AIMESの近況について述べるとともに、今後目を向け、地球環境変化により生ずるリスクに直面する人間社会に対して、その社会が求める科学的知見を提供することを目的とする国際科学協力Future Earthにおける、AIMESの位置づけ・目標について整理する。

2. GAIM

GAIMは、1993年に活動を開始し2004年に終了したIGBP第I期のコアプロジェクトである。GAIMの主な目的は、地球システムの複雑なプロセスを数値計算の手法によって統合することにより、変動する地球環境について、過去から現在に至る現象を把握し、将来を予測するための総合的な理解を得ることである。GAIMは、IGBP第I期の他のコアプロ

ジェクトとは異なり、地球を構成する大気や海洋や陸域植生といった要素のプロセスそのものを研究するのではなく、それぞれの分野で蓄積された知見や手法(モデル)を統合し、地球規模での生物地球化学循環の動態を把握することを目指して設立された。

日本では、学術会議が1992年2月に第1回IGBP国内会議を開催した。当初、学術会議においてはIGBPに7つの研究領域が設けられ、その第4領域としてGAIMが発足した。第1回IGBP国内会議の全体会議の後で、研究領域ごとに分かれて今後の活動について論議を行った。GAIMには、領域別会議では2番目に多い34名の参加者があった。この場で及川武久(当時は筑波大学)が委員長となり、木田秀次(当時は気象研究所;以下個人名について敬称を略する)が事務局を担当することが決まった。しかし、その場に集まった34名の方はお互いにほとんど面識がなく、それぞれがこれまでにどのような研究を進められてきたのかも全くわからなかった。そこでまず取り組むべきことは相互理解を深めることであるという趣旨により、GAIM研究会と称する勉強会を1992年5月29日に初めて気象庁気象研究所(つくば市)で開催した。このとき、研究会の講演要旨を中心としたGAIM通信(第1号)を1992年8月に発行して、関連の研究者に送付した。

その後、GAIM研究会の開催とGAIM通信の発行を年2回のペースで2003年6月発行の第26号まで続けた。同時に、IGBPの基本的な目的である地球圏と生物圏の相互作用の解明に向けて本格的な研究を立ち上げるため、文部科学省の科学研究費の獲得に臨んだ。その結果、基盤研究Aとして、小島 覚(当時は富山大学)「カルシウム動態から見た環境変動が陸域生態系に及ぼす影響の予測(1996~1998年度)」, 末田達彦(当時は名古屋大学)「地球環境資源としての地表植生の広域測定とその機能評価システムの開発(1996~1998年度)」, 木田(当時は京都大学)「CO₂-気候-植生の結合システムに関する基礎的研究(1998~2000年度)」, 及川(当時は筑波大学)「各種陸上生態系における炭素・水・熱フラックスの相互関係の微気象生態学的解析(2001~2004年度)」の4件の課題が順次採択され、GAIM研究会で論議してきた研究を実施に移すことが出来た。

さらに、環境省の環境研究総合推進費の課題としてGAIM関連のプロジェクトが採択され、研究推進の大きな支えとなった。特に2002年度に開始した戦略課題「S-1: 21世紀の炭素管理に向けたアジア陸域生態系の統合的炭素収支研究」(以降、S-1プロジェクト)では、及川がプロジェクトリーダーを務めるとともに、GAIM研究会で活動を共にしてきた多くのメンバーが研究に参画した。5年間にわたるS-1プロジェクトにおいて、アジア陸域における熱・水・二酸化炭素収支の観測ネットワークの構築と本格的な多点比較研究の開始、熱帯からシベリア北方林を

カバーするアジア各地の生態系における地上観測-衛星観測-プロセスモデルの統合と広域評価手法の比較検証などの研究が拡大し、2007年3月に多くの成果をまとめて終了することが出来た。しかし、我々にとっての最大の痛恨事は、アドバイザーボードメンバーとして常に深い洞察力に基づく示唆を与えた木田秀次が、S-1プロジェクト終了直前の2006年11月に逝去したことである。S-1プロジェクトが始まったのも木田とともに進めてきたGAIM研究会によって啓発された研究者の発想と熱意が評価されたからに違いなく、木田を失ったことは誠に残念でならない。なお、S-1プロジェクトで得られた研究成果を中心に「陸域生態系の炭素動態」(及川武久・山本 晋 編)⁵⁾が2013年2月に出版されている。

IGBP第1期の終了とともにGAIM研究会もその活動を終了することとなったが、地球圏-生物圏の諸問題に関わるさまざまな分野の研究者が自由に集まって情報交換と議論を行う場の必要性はますます高まっていた。そこで、GAIM研究会の後継として、馬淵和雄(当時は気象研究所)を委員長として日本気象学会に「統合的陸域圏研究連絡会」を立ち上げ、第1回連絡会を2006年日本気象学会秋季大会に併せて名古屋市にて開催した。同連絡会は、現在もおよそ年1回のペースで開催され、分野を越えた研究者の交流と議論の場を提供し続けている。

3. C4MIP

C4MIPは、人間活動の影響下における気候-炭素循環相互作用のメカニズム解明を主たる目的として、AIMES(旧GAIM)とWCRP-WGCMのジョイント研究として1998年に提案されたプロジェクトである⁶⁾。研究アプローチは、気候-炭素循環モデル(のちに地球システムモデルと呼ばれることになる)を用いた数値計算と、その結果のマルチモデル比較である。AIMESは本来、観測データ解析や数値計算モデルを駆使し、人間活動-生物地球化学過程-気候からなる地球システムの、過去・現在・未来にわたるそのダイナミクスをより深く定量的に理解することをミッションとしている。これを達成するため、数値計算モデルに関するAIMESのプロジェクトプランは、1)まず地球のサブシステムである陸域や海洋における生態系/生物地球化学過程のモデル開発推進とそのモデル間相互比較による検証を行い、2)その上で気候モデルと生物地球化学モデルを統合化した地球システムモデルの開発を推進しそのモデル間相互比較を行う、というものであった。冒頭にも述べたOCMIP, TRANSCOM, VEMAPといった要素モデルに相当するモデル比較プロジェクトは1)に該当し、C4MIPは、2)に該当する。

C4MIPの変遷を示すため、ここでは時系列に沿ってC4MIP-(1), C4MIP-(2), C4MIP-(3)と便宜的に

区別する。まず C4MIP-(1)は、2000 年前後の IPCC 第 4 次報告書に向けた科学的準備が進められていた時期に相当する。この頃、Cox *et al.*(2000)⁷⁾の気候-炭素循環モデルを用いた数値計算研究を皮切りに、世界各国でこのようなモデルが開発され始めている。日本では、文部科学省による「人・自然・共生プロジェクト(2002~2006年)」において、同様のモデル開発が行われている。C4MIP-(1)は、AIMES と WGCM のジョイント研究として設立されたが、コアプロジェクトとして AIMES 主導でプロジェクト推進が図られてきた。この C4MIP の初期の研究成果は Friedlingstein *et al.*(2006)⁸⁾としてまとめられており、「気候-炭素循環の相互作用は、人為 CO₂ 排出によって生じる温暖化に拍車をかける」ということをマルチモデルの結果から示した。この研究成果は、今日でもマイルストーン的研究として多数引用されており、「気候-炭素循環を数値計算により統合的に理解する」という AIMES の使命の一部を達成したものであった。なおこの頃、気候モデルのモデル間相互比較プロジェクト CMIP3(phase 3 of Coupled Model Intercomparison Project: 第 3 期結合モデル相互比較プロジェクト)が WCRP-WGCM 主導で進められていたが、モデル比較というスタイルや対象とする時期(産業革命以降~未来)以外、特に C4MIP と CMIP3 で共通化された部分はなく、これら 2 つの MIP はほぼ独立した形で実施されている。

C4MIP-(2)は、2007 年頃から始まった、IPCC 第 5 次報告書に向けたフェーズのものである。この頃、WCRP-WGCM では CMIP3 を継ぐプロジェクトとして CMIP5(第 5 期結合モデル相互比較プロジェクト)が準備され始めたが、この時期の C4MIP は AIMES のコアプロジェクトとしての目標・理念を保持しながら、実際の活動の場をこの WGCM-CMIP5 内に次第に移行していった⁹⁾。具体的には、C4MIP によって行われていた地球システムモデルの相互比較実験が、CMIP5 の中に正式に位置づけられた。またその数値計算の結果は、Earth System Grid という一元化されたデータ管理システム下で管理・Web 公開されており、その計算結果が広く利用可能になった。このような C4MIP 実施体制の移行と CMIP との融合化が進んだ結果、モデル間相互比較による気候-炭素循環研究の論文成果は C4MIP-(1)を越えるものとなり、10 本以上の C4MIP 関連論文が Journal of Climate の C4MIP 特集号で取り上げられるとともに、同特集号以外にも多数の論文が公表された。C4MIP-(1)が、「数値計算モデル中での気候と生物地球化学プロセスの統合化」が果たされたフェーズと位置付けられるならば、C4MIP-(2)は、1)プロジェクト実施体制、2)実験規約、3)出力結果のシェアリング、4)科学成果の普及、といったさまざまなレベルで、気候と炭素循環研究の統合化・融合化が進められたフェーズであると位置づけられるかもしれな

い。この頃、日本では文部科学省による「21 世紀気候変動予測革新プログラム(2007-2011 年)」が実施されたが、サブ課題「地球システムモデルを用いた長期気候変動予測」において、C4MIP への参加・貢献が行われている。

C4MIP-(2)では、AIMES-C4MIP と WGCM-CMIP の研究体制での統合化/融合化が促進された時期であると述べたが、C4MIP-(2)が CMIP5 の枠組みにうまく収まるためには、それなりの仕組み作りが必要であった。例えば、モデル間相互比較で実施する数値実験の種類は多岐にわたるが、そのうち核となる実験群は、気候モデルや地球システムモデルといったモデルタイプに依らない不可欠なもの(例えば基本的な感度実験や産業革命以降の過去再現実験など)で構成され、気候モデルと地球システムモデルが比較しやすい環境が整えられた(C4MIP-(1)で実施されたような気候-炭素循環に関わる感度実験は、地球システムモデルに固有の実験群として別途設定された)。他にも、CO₂ 濃度を予報することが可能な地球システムモデルに対し、あえて CO₂“排出量”ではなく“濃度”を与えることにより、気候モデルと地球システムモデルという 2 つの異なるモデルの計算結果を比較しやすくさせる、という試みもなされている(もちろん CO₂ 排出量をモデルに与え、CO₂ 濃度と気候変動の予測を行う方式の数値実験も多数実施されている: 詳しくは羽島(2014)¹⁰⁾を参照)。これら実験規約上の工夫があってはじめて、このような AIMES と WGCM の深い連携が達成出来たと言える。

C4MIP-(2)では、Friedlingstein *et al.*(2006)⁸⁾のような気候-炭素循環相互作用に注目した研究成果も得られたが、目新しい取り組み/研究成果の 1 つとして、「土地利用変化」に関するモデル開発・研究がある(例えば Brovkin *et al.*(2013)¹¹⁾; Friedlingstein *et al.*(2013)¹²⁾)。C4MIP-(2)に参加したいくつかのモデルには、C4MIP-(1)にはなかった「土地利用変化という人間活動を介した炭素循環への攪乱過程」がモデル内に明示的に取り込まれており、人間活動と地球環境の関わりをより詳細にモデル内で扱えるようになっている。AIMES が掲げる使命の重要なポイントとして「人間活動の影響」という点が挙げられるが、モデルもそれを反映した、より包括的かつ統合的なものへと発展してきている。

C4MIP-(3)は、まさに取組が始まった段階のものであり、IPCC の第 6 次報告書に向けたフェーズにあたる。C4MIP-(2)のように、C4MIP-(3)の体制もまた CMIP6(第 6 期結合モデル相互比較プロジェクト)の一環として位置づけられそうな見込みであるが、事情は少々異なる。まず CMIP6 では、以下の 7 つの科学的「Grand Challenge」項目を掲げている¹³⁾: 1) 雲-大気海洋大循環-気候感度、2) 雪氷圏変化、3) 極端現象、4) 地域スケールの気候、5) 地域

スケールの海面上昇, 6) 水利用可能性, そして, 7) 生物地球化学的な影響およびフィードバック, である。そして最後の7番目の項目が, AIMES-WGCM のジョイント研究として位置づけられている。ただし, この項目に対して C4MIP がそのまま当てはまるわけではない。そもそも CMIP6 は, Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima(DECK)と呼ばれる基本的な感度実験と過去の再現実験を核とした必要最低限の実験群を設定しており, それ以外の科学的関心が高い研究内容に関しては, 「研究提案-参加研究機関の確保-CMIP6 からの承認」を経ることによって, 正式な CMIP6 研究の一部として承認(endorsed)される。C4MIP も例外ではなく, 2015年3月現在, この承認に向けた活動が行われているところである。その他, AIMES-WGCM ジョイント研究に関連しそうな研究提案として LUMIP(Land-Use Model Intercomparison Project: 土地利用モデル相互比較プロジェクト)が挙げられるが, その状況は C4MIP と同様である。もちろん, 気候-炭素循環の相互作用とそれによって生じる今後の地球環境の変動に関しては依然, 強い科学的関心が持たれており, またその予測不確実性も大きいことから, C4MIP が CMIP6 の一環として位置づけられるのはほぼ間違いなさそうである。

IGBP は今後, Future Earth の枠組みの中に完全に移行し, AIMES は Future Earth のプロジェクトとして位置づけられる。そこではこれまでと同様, 統合的な地球システムモデルの構築とそれを用いた地球環境変動のメカニズム解明, 過去から未来を通じた人間活動との関係解明が, 重要なミッションであり続けるはずである。一方で WCRP-WGCM も, その組織体制を維持しながら Future Earth と強いパートナーシップを結び, その中で CMIP も継続的に実施されていくようである。特に, DECK という軸を設けつつ時代背景に応じた優先的研究課題を「Satellite MIP」として柔軟に設定することにより, DECK に「過去と将来の MIP 間の橋渡し」を行わせる役割を担わせ, より継続的な取り組みを目指しているようである。この中で, C4MIP そのものが今後も継続されるかどうかは不明ではあるが, AIMES の使命を受けたなんらかの AIMES-WGCM ジョイント研究が, 今後も CMIP の中で重要な位置づけであり続けることは間違いなさそうである。

4. MAREMIP

MAREMIP は, OCMIP¹⁴⁾の流れを受けて派生した, 海洋大循環モデルを用いた生物地球化学モデルに海洋低次生態系モデルを組み込んだ海洋モデルの開発努力として, Dynamic Green Ocean Models¹⁵⁾を開発する有志により 2007 年に発足した国際モデル比較プロジェクトである。日本からは 2009~2013 年

までに山中康裕らが共同議長および平田貴文が事務局長を務めるなど, 日本の研究者も主要な貢献をしている。現在は, 米・瑞・日・仏・英・独・南アなどを含む世界の科学者が参加している。

MAREMIP で開発・比較されているモデルでは, 炭素循環に加え, 窒素, カルシウム, 鉄, などの多数の生物地球化学物質の循環がモデル化されている場合が多く, これらの物質循環に対する低次浮遊生態系群集の寄与・応答に関する科学的知見の獲得を念頭においている。特に, この寄与を生物地球化学的な機能(Plankton Functional Type, PFT)と定義し, 同一分類群内(例: 植物プランクトン)で少なくとも 2 群以上にわたる群集が明示的に表現されているモデルを MAREMIP では扱っている。このため, MAREMIP に参加しているモデルは, PFT モデルとも呼ばれている。PFT モデルでは, 扱う群集ごとに生理的特性に加えて生態的特性も表現される。よって, 生理特性の違いによる同一分類群内における生存競争に加え, 複数の異なる分類群・群集間での食物鎖(したがって食物網)も同時に表現するモデルとなっている。MAREMIP に参加するモデルは全て全球モデルであり, 近年では地球システムモデルに組み込まれる例も少なくない。

MAREMIP の活動として, 低次浮遊生態系の過去再現を目的とした Phase 0 と将来予測を目的とした Phase 1 が挙げられる。Phase 0 では, MAREMIP 発足初期から参加する主要モデル間で, 植物プランクトン群集間の競合の解析が行われた。特に, 生物ポンプに重要な役割を果たしていると考えられている珪藻の全植物プランクトンに対する優占度が, 春季ブルームの強さに反映されていることがどのモデルでも共通して示される一方, その結論に導く主要メカニズムはモデルごとに異なる事が示され, 気候変動下での海洋低次生態系の応答はモデルごとに異なることが予測された¹⁶⁾。また, 植物プランクトンと動物プランクトン間の捕食関係といった食物網のダイナミクスはモデル間で多彩である一方, モデル間の違いは主に動物プランクトンの餌選択性に起因するところが大きいことも示された¹⁷⁾。特に, モデルにおいて植物プランクトンの動態と同様のレベルで動物プランクトンの動態を再現するには, 鍵となるパラメータを現場・分析実験などでより良く定量化する必要がある一方で, 捕食・被食関係そのものの知見の改善の必要性も示唆されている。

MAREMIP は, そのタイトルどおりにモデルの相互比較が主要目的ではあるものの, Phase 0 では, モデル開発そのものや現場データセットの編纂, 人材交流や育成も目標として掲げてきた。特に, いくつかの低次生態系内の分類群・群集の生物量などの現場データを全球でグリッド化したデータセット「MAREDAT」¹⁸⁾を, オープンジャーナルで刊行することを先導した。MAREMIP は, モデリングコミュ

ニティーのみならず、観測コミュニティとの協働も行い成果を収めている。

現在、MAREMIPはPhase 1への移行期にあり、共通シナリオとして代表的濃度経路RCP8.5を用いた将来予測実験も行われている。2000年から2100年までの海洋基礎生産を比較した最新の結果によれば、全てのモデルは高緯度で基礎生産は増加するという結果を得た。一方で、多くのモデルは、低緯度において、今後2100年までに海洋の基礎生産は減少すると予測しているが、無視できない数のモデルが現状と変わらないとも予測している¹⁹⁾。また、低緯度で基礎生産が将来減少するとした予測モデルの間でも、その結論に至る根拠はさまざまである。結果として、海洋の基礎生産の将来予測は大きな不確実性を有するが、この改善には自然現象のメカニズムの理解が重要であり、今後モデルの開発・改良に一層の努力が払われるべきことが示された。

以上のように、MAREMIP内においても、現状では海洋低次生態系変動の知見に関する統一見解が得られているわけではない。にもかかわらず、MAREMIPへの期待は大きい。MAREMIPモデルは、前述のように物理モデルを源とし炭素循環モデルに上乘せする形で種々の生物地球化学物質を扱い、かつ、これまでは単純化されていた低次生態系における分類群をより現実に沿うように複雑化しているため、気候・地球システムモデルが発展・複雑化する上で、MAREMIPモデルの発展は、そのねらいに即している。また、海洋の低次生態系や環境変動に大きく依存すると考えられる高次生態系(例：水産魚種)の資源量推定などといった研究領域へ、気候・地球システムモデルが利用できる可能性を生み出し、結果として食料問題や水産経済といった社会経済モデルとの結合へ糸口を生み出すかもしれない。さらに、人類にとって安全な惑星空間を保つ上で生物多様性の損失が危機にさらされていると指摘されている中²⁰⁾、ほとんどのMAREMIPモデルではPFTの分類数が同一分類群内で2~3群集と多くない一方で(ただし、5群集を扱ったものもある)、MAREMIPモデルで表現される分類群や群集の数を究極的に増やすことで、海洋の生物多様性を表現するモデルが多数開発される時代がくるかもしれない。結果として、持続的人間社会への道筋の提供を未来像とするIGBPのコアプロジェクトの1つであるAIMESが、地球システムモデルと社会経済モデルの統合を目指す中に、MAREMIPの幅広い可能性が秘められている。

5. AIMESの最近の活動状況と今後

第2~4章で述べたように、GAIM~AIMESを特徴づけた主活動は、地球システムを構成する諸要素のモデルの相互比較であり、またその知見の統合的な地球システムモデルへの反映であった。さらに、

近年、社会経済モデルと地球システムモデルの統合など、自然科学と人文社会科学の連携をより明確に志向してきている。その連携は、単にこの複雑な世界をより詳しく正確に理解しモデル化すること自体を目的としたものではない。我々人類がかつてなく大規模に地球システムに作用し負荷を与え、その結果としてさまざまな問題が生じつつあることを強く懸念し、その問題の解決・管理のために必須であるがゆえにその連携を志向している。

これまで一定の成果を挙げてきたIGBPはその役割に区切りをつけ、今後はDIVERSITAS(ラテン語の「diversity」、International Programme of Biodiversity Science:生物多様性科学国際共同計画)、IHDP(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change:地球環境変化の人間の側面国際研究計画)等と共にFuture Earthの旗印の下、「持続的な世界に向けた変革の加速化への支援」という明確な社会的使命を伴って研究の発展に努める。この大きな潮流に対し、近年のAIMESの方向性は整合的に位置づけられうるものである。事実、Future Earthの枠組みの中で、AIMESは人新世における人間と自然環境の相互作用の理解とモデル化を重要課題として掲げ、取り組む意思表示をしている。特に焦点をあてる個別の活動としては、自然物理と社会経済に関する一貫性のあるデータの取得と整備(Merton Initiative)、過去における人間-環境の相互作用の実例から教訓・知識を見出す取組(IHOPE)、人間を内部の要素として扱う複雑系としての地球システムのモデリングである。主要な包括的テーマとしては、人間-環境の相互作用の典型例たる土地利用変化、ならびに地球システムの臨界的遷移(tipping points)の理解・予測を掲げている。

また、2014年8月、Future Earthは米国NSF(National Science Foundation:国立科学財団)の支援を受け、現行のGEC(Global Environmental Change:地球環境変化)プロジェクトが取り組む研究領域をふまえ、統合的活動に弾みを付け、分野横断的な協力を強化することを意図して、8つのFTI(Fast Track Initiative:ファスト・トラック・イニシアティブ)を選び示した。そのうちの1つ「土地利用ならびに生物多様性の変化を予測・管理するための地球システムモデルと社会経済モデルの結合」は、特にAIMESのリーダーシップの下での推進が期待される課題である。人間-環境システムを統合的にモデル化する能力並びにアプローチの大幅な進歩をめざし、地球システム、生物多様性、社会・経済の各科学分野におけるモデルコミュニティの連携を促進することが、具体的取組として掲げられている。AIMES自体は国際的な研究コーディネーションを通じて本件に取り組むことになるが、対応する形で、我が国においても斬新かつ有用な研究の展開が出来るように、多分野の連携促進の仕組みを整備していくことが求

められるであろう。

謝 辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費 S-10「地球規模の気候変動リスク管理戦略の構築に関する総合的研究」ならびに文部科学省「気候変動リスク情報創生プログラム」の研究助成によって行われた。また、伊藤昭彦博士には、執筆にあたり多くのアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を示す。

引用文献

- 1) van der Leeuw, S. (2013) AIMES2.0: Towards a global earth system science. *Global Change*, Issue 81, 10-13.
- 2) IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- 3) Costanza, R., S. van der Leeuw, K. Hibbard, S. Aulenbach, S. Brewer, M. Burek, S. Cornell, C. Crumley, J. Dearing, C. Folke, L. Graumlich, M. Hegmon, S. Heckbert, S. T. Jackson, I. Kubiszewski, V. Scarborough, P. Sinclair, S. Sörlin and W. Steffen (2012) Developing an Integrated History and future of People on Earth (IHOPE). *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(1), 106-114.
- 4) van Vuuren, D. P., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi, A. Thomson, K. Hibbard, G. C. Hurtt, T. Kram, V. Krey, J. Lamarque, T. Masui, M. Meinshausen, N. Nakicenovic, S. J. Smith and S. K. Rose (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109, 5-31.
- 5) 及川武久・山本 晋(編) (2013) 陸域生態系の炭素動態 地球環境へのシステムアプローチ. 京都大学学術出版会.
- 6) AIMES (2010) Science Plan and Implementation Strategy. IGBP Report No.58, IGBP Secretariat, Stockholm.
- 7) Cox, P. M., R. A. Betts, C. D. Jones, S. A. Spall and I. J. Totterdell (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187.
- 8) Friedlingstein, P., P. Cox, R. Betts, L. Bopp, W. von Bloh, V. Brovkin, P. Cadule, S. Doney, M. Eby, I. Fung, G. Bala, J. John, C. Jones, F. Joos, T. Kato, M. Kawamiya, W. Knorr, K. Lindsay, H. D. Matthews, T. Raddatz, P. Rayner, C. Reick, E. Roeckner, K.-G. Schnitzler, R. Schnur, K. Strassmann, A. J. Weaver, C. Yoshikawa and N. Zeng (2006) Climate – Carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, 19, 3337-3353.
- 9) Taylor, K. E., R. J. Stouffer and G. A. Meehl (2012) An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, 485-498.
- 10) 羽島知洋 (2014) 気候変動(WG1) – 炭素循環および累積炭素排出量に対する気候の過渡的応答. 環境情報科学, 43(3), 14-20.
- 11) Brovkin, V., L. Boysen, V. K. Arora, J. P. Boisier, P. Cadule, L. Chini, M. Claussen, P. Friedlingstein, V. Gayler, B. J. J. M. van den Hurk, G. C. Hurtt, C. D. Jones, E. Kato, N. de Noblet-Ducoudré, F. Pacifico, J. Pongratz and M. Weiss (2013) Effect of anthropogenic land-use and land-cover changes on climate and land carbon storage in CMIP5 projections for the twenty-first century. *Journal of Climate*, 26, 6859-6881.
- 12) Friedlingstein, P., M. Meinshausen, V. K. Arora, C. D. Jones, A. Anav, S. K. Liddicoat and R. Knutti (2014) Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks. *Journal of Climate*, 27, 511-526.
- 13) Meehl, G. A., R. Moss, K. E. Taylor, V. Eyring, R. J. Stouffer, S. Bony and B. Stevens (2014) Climate model intercomparisons: preparing for the next phase. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 95(9), 77.
- 14) Orr, J. C., V. J. Fabry, O. Aumont, L. Bopp, S. C. Doney, R. A. Feely, A. Gnanadesikan, N. Gruber, A. Ishida, F. Joos, R. M. Key, K. Lindsay, E. Maier-Reimer, R. Matear, P. Monfray, A. Mouchet, R. G. Najjar, G. K. Plattner, K. B. Rodgers, C. L. Sabine, J. L. Sarmiento, R. Schlitzer, R. D. Slater, I. J. Totterdell, M. F. Weriği, Y. Yamanaka and A. Yool (2005) Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437, 681-686.
- 15) Le Quéré, C., S. P. Harrison, I. C. Prentice, E. T. Buitenhuis, O. Aumont, L. Bopp, H. Claustre, L. C. Da Cunha, R. Geider, X. Giraud, C. Klaas, K. E. Kohfeld, L. Legendre, M. Manizza, T. Platt, R. B. Rivkin, S. Sathyendranath, J. Uitz, A. J. Watson and D. Wolf-Gladrow (2005) Ecosystem dynamics based on plankton functional types for global ocean biogeochemistry models. *Global Change Biology*, 11, 2016-2040.
- 16) Hashioka, T., M. Vogt, Y. Yamanaka, C. Le Quéré, M. Noguchi-Aita, S. Alvain, L. Bopp, T. Hirata, I. Lima, S. Saillely and S. C. Doney (2013) Phytoplankton competition during the spring bloom in four Plankton functional type models. *Biogeosciences*, 10, 6833-6850.
- 17) Saillely, S., M. Vogt, S. C. Doney, M. Noguchi-Aita,

- L. Bopp, E. Buitenhuis, T. Hashioka, I. Lima, C. Le Quéré and Y. Yamanaka (2013) Comparing food web structures and dynamics across a suite of global marine ecosystem models. *Ecological Modelling*, 261-262, 43-57.
- 18) Buitenhuis, E. T., M. Vogt, R. Moriarty, N. Bednaršek, S. C. Doney, K. Leblanc, C. Le Quéré, Y.-W. Luo, C. O'Brien, T. O'Brien, J. Peloquin, R. Schiebel and C. Swan (2013) MAREDAT: towards a world atlas of MARine Ecosystem DATA. *Earth System Science Data*, 5, 227-239.



高橋 潔 / Kiyoshi TAKAHASHI

博士(工学)。専門は環境システムモデリング。1996年に国立環境研究所に入所し、以降、統合評価モデルAIM(Asia-Pacific Integrated Model)の開発に携わり、地球規模の影響評価モデル開発を担当してきた。最近では気候モデル研究との連携を通じた、全球規模の気候リスク管理の研究を中心課題としている。IPCC第4次・第5次評価報告書で代表執筆者を担当。また、本稿紹介のAIMESに関しては、2013年より現在まで、科学運営委員を担当。



三枝 信子 / Nobuko SAIGUSA

博士(理学)。専門は陸域生態系の炭素循環。1996年に当時の通産省・資源環境技術総合研究所に入所し、以降、森林による大気中二酸化炭素の吸収に関する観測研究を担当。2008年に国立環境研究所に移動し、アジアの各種生態系における観測ネットワーク構築や陸域炭素収支の広域評価に取り組んでいる。IGBPの活動に関しては、第I期にGAIMの国内小委員会委員、第II期にiLEAPS科学運営委員などを担当。



及川 武久 / Takehisa OIKAWA

理学博士。専門は地球生態学。生態系の動態について物質生産を基礎とした生態系モデルで熱帯多雨林の動態を再現する(1990)。それ以降、森林に加えて草原も対象としたモデルも作成し、草原の現存量は森林に比べて遙かに小さいものの、植物生産力は逆に大きいことを示す。その理由は草は樹木のような幹や枝といった非生産器官が少ないために、呼吸消費が小さいからである、という新説を唱えている。この原理で、グローバルの植生分布の大枠も決まっている、と考えている。IGBPではGAIM小委員会の委員長を10年以上担当。



河宮 未知生 / Michio KAWAMIYA

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 統合的気候変動予測研究分野 分野長。専門は海洋物理学、炭素循環モデリング、地球システムモデリング。1969年愛知県生まれ。東京大学大学院博士課程修了。東京大学気候システム研究センター研究員、独キール海洋学研究所研究員などを経て現職。文部科学省環境エネルギー科学技術委員会委員、日本海洋学会評議員、日本地球惑星科学連合代議員なども務める。博士(理学)。『地球温暖化はどこまで解明されたか』(共著、丸善)、『計算と地球環境』(共著、岩波書店)など。

- 19) Laufkötter, C., M. Vogt, N. Gruber, M. Aita-Noguchi, O. Aumont, L. Bopp, E. Buitenhuis, S. C. Doney, J. Dunne, T. Hashioka, J. Hauck, T. Hirata, J. John, C. Le Quéré, I. Lima, H. Nakano, R. Seferian, I. Totterdell, M. Vichi and C. Völker (2015) Drivers and uncertainties of future global marine primary production in marine ecosystem models. *Biogeosciences Discussions*, 12, 3731-3824.
- 20) Rockström J., W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. Stuart Chapin III, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Synder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen and J. A. Foley (2009) A safe operating space for humanity. *Nature*, 461, 472-475.



羽島 知洋 / Tomohiro HAJIMA

博士(農学)。専門は陸域生態系を中心とした物質循環過程とそのモデリング。日本学術振興会特別研究員ののち、2008年から海洋研究開発機構にて、文部科学省の温暖化予測プロジェクト「21世紀機構変動予測革新プログラム」および「気候変動リスク情報創生プログラム」に参画、地球システムモデルの開発とそれを用いた温暖化予測研究に携わる。CMIP5およびCMIP6において、C4MIP関連実験の対応を行う。



山中 康裕 / Yasuhiro YAMANAKA

博士(理学)。専門は海洋生態系・物質循環モデリング。1991年東京大学気候センター助手、1998年北海道大学地球環境科学研究科准教授、2010年より現職。2007年英国アングリア大学滞在中にMAREMIPを立ち上げる。教育では実践環境科学コースを設立して、さまざまな団体と連携して持続可能な地域づくりに取り組む。2009年から2013年までAIMES科学運営委員。IPCC第5次報告書には、指導学生の博士論文を校了した論文2編を含め、論文10編が引用される。



平田 貴文 / Takafumi HIRATA

Ph.D. 専門は衛星海洋学。2009年に北海道大学大学院地球環境科学研究院に赴任し、以後、地球規模生態系モデルの開発・評価へ衛星データを活用する研究の推進を行っている。本稿紹介のMAREMIPにおいて、事務局長を経て科学運営委員を担当している一方で、JAXA, NASA, ESAといった世界の宇宙機関および科学者により運営されるIOCCGの科学委員を務めている。



阿部 彩子 / Ayako ABE-OUCHI

PhD. 専門は気候力学、古気候モデリング。東京大学気候システム研究センター助手を経て、東京大学大気環境研究所准教授。猿橋賞受賞(2012)。AIMESを経て、PMIP科学運営委員。IPCC第5次報告書第一部会代表執筆者。