

地球システムモデリングにおける炭素循環過程の検証と発展

Progress of earth system model evaluation in terms of global carbon cycle

羽島 知洋^{1*}・伊藤 昭彦^{2,3}・野口 真希⁴
Tomohiro HAJIMA^{1*}, Akihiko ITO^{2,3} and Maki NOGUCHI-AITA⁴

¹ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター

² 国立研究開発法人 国立環境研究所 地球システム領域

³ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境部門 北極環境変動総合研究センター

⁴ 国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター

¹ Research Center for Environmental Modeling and Application, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

² Earth System Division, National Institute for Environmental Studies

³ Institute of Arctic Climate and Environment Research, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

⁴ Earth Surface System Research Center, Research Institute for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

摘 要

温暖化予測や地球環境変動の理解に向けて開発されている地球システムモデルは、気候に関わる物理的過程をモデル化した気候モデルを中心に、陸域や海洋における生態系・物質循環過程も加えられたものである。気候-炭素循環過程の予測では、特に、炭素循環に関わる全球観測情報が近年得られるようになり、地球システムモデルの炭素循環過程の検証・評価の可能性が飛躍的に高まっている。しかし、モデルで扱われる多種多様な過程、特に、炭素循環や生態系過程を多角的に検証するための全球情報は十分であるとは言えず、予測精度の向上において長期・広域の観測情報の発展は、今後とも必要不可欠である。

キーワード：温暖化予測，炭素循環，地球観測，地球システムモデル

Key words：global climate projection, carbon cycle, earth observation, earth system model

1. はじめに

地球の全大気平均 CO₂ 濃度は 2016 年に初めて 400 ppm を超え、2021 年現在では 415 ppm を目前に控えている(温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」ウェブサイト：<http://www.gosat.nies.go.jp/recent-global-co2.html>)。この濃度上昇の主な原因は、化石燃料の燃焼や土地利用変化といった人間活動にともなう CO₂ 排出である。人為排出 CO₂ のうち約半分が陸域生態系及び海洋に吸収されるが、残りの半分が大気に残留し、これが大気中 CO₂ 濃度の増加を引き起こしている。このような海陸における CO₂(炭素)シンク(吸収源)の強さは常に一定というわけではなく、大気中濃度や気候変動の影響を受けながら変化している。

2021 年の 8 月に、気候変動に関する政府間パネルの第 6 次評価報告書(6th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC-AR6)が出版され、1850~1900 年及び 2010~2019 年

における人為的な全球平均気温上昇について、可能性が高い予測幅及び最良の見積りはそれぞれ、0.8°C~1.3°C、1.07°C であると報告された。今後の人間活動の影響により、気候が更にどう変化していくのかを見通すために活用されているのが、気候モデルや地球システムモデルと呼ばれるシミュレーションモデルである。前者は温暖化予測モデルと呼ばれることもあり、主として気候を形成する物理的過程に焦点が当てられてモデル化されたものである。Manabe *et al.* (1965) や Manabe and Bryan (1969) によってその礎が築かれた気候モデルは、大気、海洋、及び陸域といった気候システムを構成するサブシステムに対応した要素モデルが結合されており、各要素モデル内において諸物理過程(例えば、大気における力学・放射収支・雲・降水過程、海洋における水温及び塩分の移流拡散や海水動態に関わる過程等)を解き、要素モデル間で変数交換を行いながらその時間発展をシミュレートする。多くの温暖化予測やその研究場面で開発・活用されており、シミュレーシ

受付：2021 年 10 月 14 日，受理：2021 年 12 月 27 日

* 〒 236-0001 神奈川県横浜市金沢区昭和町 3173-25 海洋研究開発機構 横浜研究所，E-mail：hajima@jamstec.go.jp

ンの際には、あらかじめ入力データとして用意された温室効果ガス等の「濃度」をモデルに与えることにより、過去の気候の再現や将来の予測を行う。

後者の「地球システムモデル」は、かつては「気候-炭素循環モデル」とも呼ばれており、Cox *et al.* (2000)の研究に端を発する。その名の通り、気候と炭素循環の相互作用をシミュレートするために開発されてきたもので、物理的過程が主対象である気候モデルに対し、更に炭素循環を形成する陸域や海洋における生態系・物質循環過程(生物・化学的過程)を解くサブモデルが結合されている。その結果、大気CO₂濃度そのものではなく濃度上昇の原因である人為起源のCO₂排出量を入力データとして与えることにより、モデル内で海洋や陸域によるCO₂交換速度が明示的に計算され、これに従って大気CO₂濃度の変化とそれによって生み出される放射強制力及び気候の変化がシミュレートされる。現在では更に、炭素循環のみならず、気候と重要な相互作用を有する他の過程(炭素循環以外の物質循環過程や大気化学過程等)が含まれることもある。現在、このような地球システムモデルは世界各国で開発・活用されており、The Coupled Model Intercomparison Project Phase 6(CMIP6)と呼ばれるモデル間相互比較プロジェクト(Eyring *et al.*, 2016)では、地球システムモデル(Earth System Models, ESMs)という名を冠したモデルが30強ほどエントリーしている(気候モデルを含めた全エントリー数は110強。なお、著者の主観ではあるが、活動度の高い地球システムモデル/モデリングセンターは更に絞られ十数程度という印象)。このような地球システムモデリングの開発史や展望についての更なる詳細は、Hajima *et al.* (2014a)やKawamiya *et al.* (2020)を参照してほしい。

筆者はこれまで、地球システムモデル開発やそれを用いた研究、特に炭素循環に関わる研究を実施してきた。そこで本稿では、テーマである「地球環境モニタリング等の活動30年の歴史と将来展望」に沿って、地球システムモデルにおける炭素循環過程の検証場面で活用される観測に基づく全球データセットの概観について、解説する。

2. 全球炭素循環過程の評価検証データセット

2.1 地球システムモデル開発黎明期の炭素循環検証

前述の通り、地球システムモデルでは炭素循環過程をモデル化するため、陸域及び海洋における生態系・物質循環過程が含まれている。確立された定式によって記述される大気や海洋の物理過程とは異なり、生態系活動に依存することの多い炭素循環モデリングでは、フィールド研究等から得られる帰納的な関係式やパラメータを使用することが非常に多く、故に予測結果に多くの不確実性が含まれる。したがって、シミュレーション結果の検証作業が重要となるが、地球システムモデル(気候-炭素循環モデル)が開発されはじめた2000年代当初はこのような炭素循環過程を全球規模で評価可能なデータが著しく少ないという状況にあった(表1)。国内では2000年代に、東京大学・国立環境研究所・海洋研究開発機構等が参加する国内の研究コミュニティで開発がなされてきた気候モデルMIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)をベースに、生態系過程等も導入した気候-炭素循環モデルの開発(Kawamiya *et al.*, 2005; Yoshikawa *et al.*, 2008)がなされた。炭素循環を導入したモデルでは、大気中CO₂濃度の人為排出に伴う上昇や、陸域生態系等の

表1 “MIROC”ベースの地球システムモデル(計3世代)の開発論文の炭素循環過程の評価検証で活用されている観測データセット及び関連論文。

モデル (開発論文)	開発論文で使用された陸域炭素循環評価用データセット	開発論文で使用された海洋炭素(物質)循環評価用データセット	該当モデルの炭素循環過程を対象とした評価研究(例)
KISSME/FRCGC (Kawamiya <i>et al.</i> , 2005; Yoshikawa <i>et al.</i> 2008)	NBP(全球値) : IPCC(2007)	CO ₂ フラックス, DIC(全球値) : IPCC(2007), Sabine <i>et al.</i> (2004)	陸域CO ₂ フラックス : Kato <i>et al.</i> (2009)
MIROC-ESM(-CHEM) (Watanabe <i>et al.</i> , 2011)	一次生産力 : Zhao <i>et al.</i> (2005) [MODIS] 森林炭素 : Kindermann <i>et al.</i> (2008) [複合] 土壌炭素 : IGBP-DIS(2000) [データベース]	硝酸塩 : Conkright <i>et al.</i> , 2002[WOA] 一次生産力 : Behrenfeld & Falkowski (1997) [SeaWiFS]	陸域ベンチマーキング, マルチモデル : Anav <i>et al.</i> (2013) CO ₂ 濃度, マルチモデル : Hoffman <i>et al.</i> (2014) 土壌炭素, マルチモデル : Todd-Brown <i>et al.</i> (2013)
MIROC-ES2L (Hajima <i>et al.</i> , 2020)	一次生産力 : Jung <i>et al.</i> (2011) [フラックス観測+機械学習] 森林炭素 : Kindermann <i>et al.</i> (2008) [複合] 土壌炭素 : Batjes (2016) [WISE30sec], Hugelius <i>et al.</i> (2013) [NCSDv2] NBP等 : Le Quéré <i>et al.</i> (2018) [GCP2018]	硝酸塩, リン酸塩, 酸素 : Garcia <i>et al.</i> (2013a,b) [WOA] 溶解鉄 : GEOTRACES 無機炭素, アルカリ度 : Lauvset <i>et al.</i> (2016) [GLODAPv2] 一次生産力 : Behrenfeld & Falkowski (1997) [SeaWiFS], Moore <i>et al.</i> (2013) CO ₂ 交換 : Landschützer <i>et al.</i> (2014), Le Quéré <i>et al.</i> (2018) [GCP2018]	CO ₂ 濃度とフラックス : Patra <i>et al.</i> (2021) 海陸CO ₂ フラックス等, マルチモデル : Liddicoat <i>et al.</i> (2020) 土壌炭素, マルチモデル : Ito <i>et al.</i> (2020) 海洋物質循環ベンチマーキング, マルチモデル : Seferian <i>et al.</i> (2020) CO ₂ 濃度, マルチモデル : Gier <i>et al.</i> (2020)

寄与による季節変動を再現できるかが基本的な検証となり、そこでは世界各地で長年にわたり蓄積された観測データが重要な意味をもった。しかし、海洋や陸域における吸収・放出については、当時は全球をカバーできるような評価検証用データはさほど多く得られず(図1, 赤破線)、海洋の溶存無機炭素の空間分布の検証や、IPCC 評価報告書で報告されているような全球の大気・海洋・陸域における年間炭

素収支と比較することが関の山であった。海洋に関しては、Sabine *et al.*(2004)のように、海水試料を用いた海洋表層のCO₂分圧(pCO₂)測定に基づく大気-海洋CO₂交換速度を全球規模で見積もれるようになりつつあったが、陸域については、全球のCO₂収支の残差として見積もるほかなかった(結果、陸域は正味でCO₂を吸収している可能性が示唆されたが、それが何によってどこで吸収されているのかわから

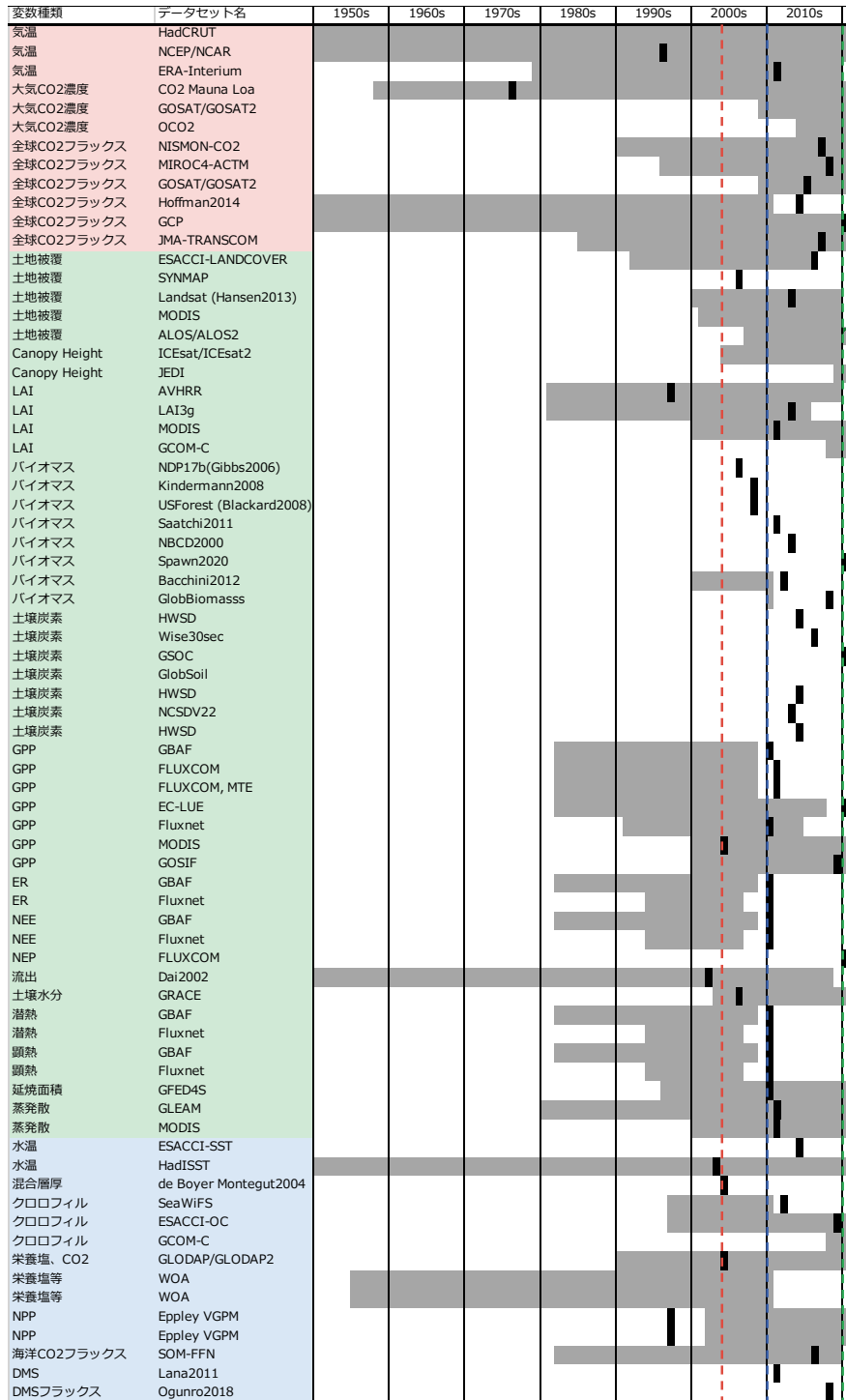


図1 地球システムモデルの炭素循環過程の検証に使われる、主として炭素循環に関わる全球データセット。灰色部は、データセットの対象期間、黒線は関連論文の出版年。灰色部が存在しないものは、対象期間が明示されていない、もしくは不明なもの。縦破線は、MIROC系地球システムモデルの開発論文(Kawamiya *et al.*, 2005, 赤破線; Watanabe *et al.*, 2011, 青破線; Hajima *et al.*, 2020, 緑破線)の出版年を表す。本リストは必ずしも網羅的なものではなく、特に ESMvalTools や ILAMB/IOBM ツール等で活用されているデータセットを中心に挙げた。個々については Eyring *et al.*(2016), Collier *et al.*(2018), Ogunro *et al.*(2018)を参照。

ず IPCC 第 3 次成果報告書(2001)より少し以前では「ミッシング・シンク」とも呼ばれていたこともあった)。このように、全球データの利用可能性が低かったこともあり、当時の気候-炭素循環モデルを用いた数値実験研究では、気候-炭素循環に内在する相互作用を新たに見出したり、その相互作用の強さをモデル間で比較する(例えば、Friedlingstein *et al.*, 2006)といったことに研究の主眼が置かれていた。

2.2 2010 年代, CMIP5/IPCC-AR5 世代の炭素循環検証

地球システムモデルの開発はその後、上述の国際研究プロジェクト CMIP のフェーズに合わせて大幅刷新がなされるようになり(CMIP 自体もまた、IPCC 評価報告書の出版サイクルを意識したプロジェクト進行となった)、2010 年代前半には、CMIP5/IPCC 第 5 次評価報告書に向けた MIROC ベースの新たな地球システムモデル MIROC-ESM(-CHEM)(Watanabe *et al.*, 2011)が開発された。ちょうどこの頃、部分的とはいえ炭素循環を構成する重要な炭素フラックスや炭素プールサイズに関する全球データセットが多く得られるようになり始めた(図 1, 青破線)。例えば、陸域や海洋の一次生産に関して、衛星リモートセンシングデータ: SeaWiFS(Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor, 海洋観測広視野センサー)や MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, 中分解能撮像分光放射計)による全球プロダクトが評価検証において汎用的に活用される状況になりつつあった。実際に、Watanabe *et al.*(2011)のモデル記述論文においても、陸域に関しては MODIS から推定された葉面積指数(Leaf Area Index, LAI)や総一次生産力(Gross Primary Productivity, GPP), Kindermann *et al.*(2008)による森林バイオマス中の炭素量, Global Soil Data Task Group(2000)による土壌炭素量とモデルの結果を比較している(表 1)。また、海洋においても、一次生産(植物プランクトンによる正味の光合成速度)の動態と関連の深い栄養塩(例えば、硝酸塩やリン酸塩など)の空間分布については、海水採取に基づく水温や塩分、栄養塩の 3 次元空間分布情報(World Ocean Atlas(WOA))と比較を行うとともに、SeaWiFS から推定された海表面クロロフィル濃度や一次生産量との比較が行われている。こういった評価は、全球炭素循環のほんの一側面のみを比較・検証したに過ぎないが、これまでの時空間的に限られた実観測によるスナップショットデータとの比較から、面的な空間分布の比較ができるようになったことは大きな飛躍であった。

さらにその後、複数の地球システムモデル(CMIP5 に参加した地球システムモデル)の結果に対して、当時入手可能な全球データセットを最大限活用することによって比較検証し、場合によってはベンチマーキング(モデルが気候をどの程度再現できているのかという観点での性能評価)も行うような研

究が盛んになってきた。例えば、Todd-Brown *et al.*(2013)の研究では、地球システムモデルによって再現される土壌炭素量とその空間分布について、土壌サンプリングに基づく全球土壌データベースである Harmonized World Soil Database(HWSD; FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC, 2012) や Northern Circumpolar Soil Carbon Database(NCSCD; Tarnocai *et al.*, 2009; 北極域のみ)との比較検証を行いながらマルチモデル解析(複数モデルによるシミュレーション結果の比較)を行っている。また、Hoffman *et al.*(2014)や Friedlingstein *et al.*(2014)では、地球システムモデルによって再現される CO₂ 濃度のバイアス評価を行っている。さらに Anav *et al.*(2013)の研究では、全球データセットを用いた生態系・炭素循環過程のベンチマーキングが初めて行われ、気温、降水量、海面水温、混合層厚、陸域の総一次生産、積算葉面積、陸域の正味 CO₂ 交換速度、土壌炭素、植物炭素、海洋の正味 CO₂ 交換速度、純一次生産に関するモデル結果と全球観測データセットとの比較によりモデルのスコアリング(モデルの再現性能の点数化)が行われた。シミュレーション結果のみならず、観測データセット(特に生物圏に関わるもの)自体も観測誤差などに起因する不確実性を有するため、ベンチマーキングやモデルのスコアリング結果の解釈には注意が必要であるが、このようなモデル-観測比較研究によってモデルを「厳しい目」にさらし、その後のモデル改善や予測能力の向上につなげようとする機運は科学の進展上、重要なものであったと言える。

2.3 2020 年代, CMIP6/IPCC-AR6 世代の炭素循環検証

2010 年代後半から 2020 年にかけては、CMIP6 に向けたモデル開発が活発になっており、国内では地球システムモデル MIROC-ES2L(Hajima *et al.*, 2020; そのコアとなる気候モデルは MIROC5.2(Tatebe *et al.*, 2018))が開発された。MIROC-ES2L では海洋及び陸域の物質循環過程が大幅に高度化され、陸域生態系ではこれまでの炭素に加えて新たに窒素循環が、海洋ではこれまでの窒素・炭素循環に加えて新たにリン・鉄・酸素循環の要素が新たに考慮されるようになった。またこの頃には、地球観測の進展により、陸域及び海洋の生態系・炭素循環を評価可能な全球データセットも大幅に増加しており、例えば植物炭素量に関してだけでも、8 種類以上の全球データセットが入手可能になった(図 1, 緑破線)。また海洋に関しても、これまでのクロロフィル量に加え、植物プランクトンの機能的分類群(Plankton Functional Types, PFTs)の広域分布や、pCO₂ 観測情報を元にニューラルネットワークを活用して見積もった正味 CO₂ 交換速度の広域分布に関するデータプロダクトも得られるようになってきた。さらに、特に 2010 年代以降には世界の科学者による国際共

同プロジェクト Global Carbon Project(GCP)による全球の炭素収支・温室効果ガス収支情報を取りまとめる活動が軌道に乗り、その定期報告書で示される全球 CO₂ 収支情報は極めて重要な参考値となった。GCP ではトップダウン推定(観測された大気情報からの逆推定)、ボトムアップ推定(物質循環モデル・インベントリ)、観測等といった複数手法を縫い合わせた全球収支を取りまとめており、依然として大きな不確実性や収支不整合等も残されてはいるものの、全球の炭素収支に関しては最も包括的で信頼に足る推定値を提供している(Friedlingstein *et al.*, 2020; Friedlingstein *et al.*, 2021 など)。実際、Hajima *et al.* (2020)におけるモデル開発論文や Liddicoat *et al.* (2020)による炭素循環のマルチモデル比較研究などにおいて、GCP による解析結果と地球システムモデルの結果との比較が行われている。

またこの時期は、Greenhouse gases Observing SATellite(GOSAT)や Orbiting Carbon Observatory-2(OCO-2)といった全球 CO₂ 濃度の時空間変動情報が衛星から得られるようになるとともに、逆推定手法による全球 CO₂ 収支の精度や科学的解釈が進展し、地球システムモデルの結果と直接的に比較検証する準備が整ったことも大きな特徴である。Patra *et al.* (2021)では、MIROC-ES2Lによって再現される CO₂ フラックスや大気 CO₂ 濃度について、GOSAT や化学輸送モデル(MIROC-ACTM)による逆推定結果との比較検証を行っており、MIROC-ES2L の 1990 年代以降の大気 CO₂ 濃度の増加率や CO₂ フラックスの再現性が極めて良好であることが確認された。このような情報は、モデルの結果が示すバイアスの原因を特定する上で極めて有効である。例えば、Patra *et al.* (2021) や Gier *et al.* (2020) では、MIROC-ES2L の 1990 年代以降の大気 CO₂ 濃度増加率の再現性が良いと指摘している一方で、2014 年時点での大気 CO₂ 濃度を 10 ppmv 以上過小評価していることが明らかになっており、本モデルによる 1980 年代以前の CO₂ フラックス再現性に改善の余地が残されていることを示唆していた。このように、以前には望めなかった、CO₂ 濃度や CO₂ 交換速度そのものに関して、モデルバイアスに関する時空間的切り分けが可能になってきている。

近年では更に、観測データセットに基づく地球システムモデル評価のうち、特に汎用的な観測データを用いた定型的検証作業を、半自動化し検証するためのツール開発も盛んになっている。代表的なものとして、The Earth System Model Evaluation Tool(ESMValTool: Eyring *et al.*, 2020)や The International Land Model Benchmarking(ILAMB)/IOBM(Collier *et al.*, 2018; Ogunro *et al.*, 2018)が挙げられる。前者は欧州の研究グループが中心となって開発を進めているツールであり、炭素循環に限らず、気候モデル/地球システムモデルによって再現されている気候・

物質循環過程を幅広く評価するためのものとなっている。IPCC 評価報告書等でも見られるような気温の予測グラフ作成にとどまらず、複数の評価指標を組み合わせた統合的なモデル評価グラフ(例えば、Taylor ダイアグラムと呼ばれる図)の作成や、Emergent constrain と呼ばれる将来予測の不確実性幅を現在の観測情報に基づいて拘束する手法によるモデル評価など、本ツールを通して各モデルの特徴を可視化し解析を実行できる。ILAMB/IOBM ツールは主に陸域/海洋のモデル評価を意図したツールとなっており、炭素循環に限らず、陸域の水文過程等の評価も含む。このような評価検証システムは、地球システムモデルの再現精度や予測能力の向上にあたって今後更に重要な役割を担っていくのは想像に難くない。なお、炭素循環過程を対象とした研究ではないが、Brunner *et al.* (2020)では、モデルで再現される全球平均気温の過去再現性を評価した上で、各モデルのスコアリングに基づいて将来予測結果の重み付けを行っている。つまり、予測結果を見る際に、過去の再現において「性能が良い」と客観的に判断されるモデルの結果により重きを置くような試みである。このような応用研究は、モデルの開発者に対して「自分達のモデルの結果は、解析対象から省かれる(ことと、ほぼ同様の)扱いを受けることになるかもしれない」という緊迫感を強いる(検証に用いられる評価検証用データセットそれ自体の精度や信頼性、有用性も同時に問われる)ものではあるが、シミュレーション研究や温暖化予測研究をより健全・着実に進捗させる上で重要な提案であり、同様の研究例が更に増していくと予想される。

3. CMIP6 における炭素循環マルチモデル研究

これまで紹介してきた全球観測データセットによる地球システムモデルの評価検証を踏まえた上で、CMIP6 実験を通じて新たに得られた科学的理解や今後の課題、特に炭素循環に関わるものを以下に概説する。そもそも CMIP6 では、参加する気候モデル/地球システムモデルは全て、DECK(Diagnostic, Evaluation and Characterization of Klima; Eyring *et al.*, 2016)と呼ばれる必須の基本実験群(産業革命以前の定常的な状態を再現するコントロール実験や、1850 年から 2015 年までの過去再現実験、Manabe and Wetherald(1975)や Manabe and Stouffer(1980)で提案された理想化 CO₂ 増加実験を含む基礎的感度実験)を実施する必要がある。その上で、約 20 存在する Endorsed MIP と呼ばれる研究テーマ別の相互比較実験に任意で参加する。Endorsed MIP のうち、炭素循環や地球システムモデルに深く関わるものとして、気候-炭素循環相互作用に関する C4MIP(Coupled Climate-Carbon Cycle Model Intercomparison Project; Jones *et al.*, 2016)、土

土地利用変化に関する LUMIP (Land Use Model Intercomparison Project; Lawrence *et al.*, 2016), 海洋及びその生態系・物質循環過程に関する OMIP (Ocean Model Intercomparison Project; Griffies *et al.*, 2016), 人為的 CO₂ 除去の影響に関する CDRMIP (Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project; Keller *et al.*, 2018) などが挙げられる。

気候-炭素循環相互作用研究 (C4MIP) では、地球システムモデルによって再現される気候-炭素循環相互作用 (炭素循環フィードバック) の比較がなされており (Arora *et al.*, 2020), 長らく指摘されている炭素循環フィードバックの不確実性のうち、特に陸域炭素循環の CO₂ 応答 (大気 CO₂ 濃度の上昇による光合成速度の増加とそれによって引き起こされる陸域生態系全体への炭素蓄積) において、依然として大きいモデル間差が存在することが確認された。しかし、陸域炭素循環の環境応答に強い制約を与える窒素循環の影響を考慮したモデル (MIROC-ES2L を含む計 6 モデル) では、炭素循環フィードバックが抑制傾向にあることが分かり、陸域の炭素-窒素循環相互作用の重要性が示唆された。また、Hajima *et al.* (2014b) や Ito and Follows (2005) による手法をもとに、陸域及び海洋の炭素循環フィードバックを詳細過程に分解し、モデル間のばらつきを生み出す要因について洞察が深められるようになったことも大きな進展である。なお、CMIP6 では新たに、Shared Socio-economic Pathways (SSPs) と呼ばれるシナリオを用いた将来予測が行われた。代表的な SSPs には、SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5 などがあるが、ハイフンの前に記載されている数字は、社会経済的なストーリーライン (気候変動の緩和と適応の困難度で 5 つに分類される) を表し、ハイフンの後ろにある x.x という数字は放射強制力 (人間活動によって生じる地球の放射収支のインバランス、単位は $W m^{-2}$) を表す。例えば、SSP1-2.6 は、気候変動に対して緩和と適応がなされ放射強制力が $2.6 W m^{-2}$ に抑制されるようなシナリオであり、SSP3-7.0 は、世界が分断され人口増加と化石燃料依存が続くことにより放射強制力が $7.0 W m^{-2}$ にまで至るようなシナリオである。本原稿の趣旨から外れるために詳細は割愛するが、これら SSPs に基づく気候-炭素循環の将来予測の結果については、Tebaldi *et al.* (2021) や Liddicoat *et al.* (2020) にまとめられているので、詳しくはこれら論文を参照して欲しい。

OMIP では、Seferian *et al.* (2020) によって、CMIP6 に参加した地球システムモデルの海洋の生態系・物質循環過程のベンチマーキングが行われている。CMIP5 世代の地球システムモデルに比べ、CMIP6 のモデルは海洋生態系・物質循環過程の複雑さが増しており、例えば、対象とする栄養塩の種数増加や、エアロゾルに関する大気-海洋相互作用過程の導入などが新たに行われている。また、海洋混合層

深度、大気-海洋 CO₂ 交換速度、クロロフィル濃度、酸素分圧、硝酸塩濃度といった海洋の炭素循環過程と関わりの深い要素について全球観測データセットによる検証を行ったところ、CMIP5 から CMIP6 にかけて各種変数の再現性も向上していることが確認された。また、Kwiatkowski *et al.* (2020) では、海洋生態系へのストレスである海水温の上昇、酸性化、貧酸素化、栄養塩について、SSPs を用いた将来予測実験結果を調べた。その結果、これらの将来変化トレンドは複数のモデル間で概ね一致していたものの、ストレスの影響を受ける一次生産力の将来変化傾向はモデル間でのばらつきが大きく、今後の課題となっている。

全球炭素循環や生物物理過程にも大きな影響を与える土地利用変化に関するマルチモデル解析は LUMIP で実施されている。Boysen *et al.* (2020) では、土地利用変化に関する理想化されたシナリオ実験を行うことにより、土地利用変化に起因する炭素循環過程と生物物理過程を介した気温変化をそれぞれ定量化できるようになった。また、Ito *et al.* (2020) では、土地利用変化を含む将来シナリオによって、将来生じうる土壌炭素量変化についてマルチモデル解析を行った。現在、気候における全球土壌炭素量やその空間分布に関して依然として大きなモデル間差が存在していることを確認する一方で、土地利用変化 (管理) を介した土壌への炭素貯留は、温暖化緩和オプションとして有効であるとの結論が得られた。土地利用変化に起因する CO₂ 排出に大きな不確実性が残されていることは Liddicoat *et al.* (2020) でも指摘されているが、特に土壌炭素量の経時変化に関する広域モニタリングは難しく、今後の大きな課題であると言える。

以上、CMIP6 の主に炭素循環に関わるマルチモデル比較研究の結果について、かいつまんで説明したが、現在も多数のマルチモデル解析が進行中である。特に「人為 CO₂ 排出削減や人為隔離によって大気 CO₂ 濃度を低下させてゆく」世界において、炭素循環が気候と相互作用しながらどのように振舞うのかについての科学的理解は十分ではなく、CDRMIP 等から発信されるであろう今後の研究成果に期待が高まっている。

4. おわりに

本稿では、地球システムモデルで利用されている観測に基づく全球データセットのうち、特に炭素循環過程の検証に関わるものについての概説を行った。今後は、炭素循環に加えてメタンをはじめとする温室効果ガス/短寿命気候強制力因子の動態に関する全球データセットなどに対する必要性が、モデル検証や気候変動緩和を議論する上で高まっていくと予想される。炭素循環においてそうであったよう

に、全球動態を把握する上で鍵となる変数(例えば炭素循環であれば陸域の総光合成速度など)の全球データセットの整備が強く望まれる。

観測データを活用する場面(人工衛星等による広域観測だけに留まらずフィールド研究等から得られる測定値を活用する場面も含む)は必ずしも評価検証段階だけではなく、1)基礎的スキーム・モデルの構築(例えば, Botta *et al.*, 2000), 2)パラメータ決定, 特に生物の生理生態に関わるフィールド・実験室レベルでの測定結果を多数の文献値から収集し統計解析することで, 全球モデル等に適用しやすいパラメータが得られるメタ解析(例えば, Kattge *et al.*, 2011), 3)気候の内部変動の位相を現実に合わせて予測するためのデータ同化(初期値化)手法(例えば, Watanabe *et al.*, 2020), 4)モデルによる将来予測の結果を現在の観測結果で拘束する Emergent constrain と呼ばれる手法(例えば, Wenzel *et al.*, 2016; Hall *et al.*, 2019)等, 多くの場面で活用され始めている。炭素循環をはじめとする物質循環過程は不確実性の大きい生態系プロセスに依存することが多く, このような観測事実に基づくデータセットを多面的に活用していくことが, 今後のモデル開発の発展や温暖化予測の不確実性の低減において重要である。

謝 辞

本研究は, 文部科学省受託研究「統合的気候モデル高度化研究プログラム 領域テーマB(JPMXD 0717935715)」及び環境研究総合推進費 戦略的研究開発領域 SII-8「温室効果ガス収支のマルチスケール監視とモデル高度化に関する統合的研究(JPMEERF 21S20800)」の支援により行われた。執筆にあたり, 河宮未知生博士に多くの助言を頂いた。

引用文献

- Anav, A., Friedlingstein, P., Kidston, M., Bopp, L., Ciais, P., et al. (2013) Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models. *Journal of Climate*, 26(18), 6801-6843. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00417.1>
- Arora, V. K., Katavouta, A., Williams, R. G., Jones, C. D., Brovkin, V., et al. (2020) Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models. *Biogeosciences*, 17(16), 4173-4222.
- Batjes, N. H. (2016) Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269, 61-68.
- Behrenfeld, M. J. and Falkowski, P. G. (1997) Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnology and Oceanography*, 42, 1-20.
- Botta, A., Viovy, N., Ciais, P., Friedlingstein, P. and Monfray, P. (2000) A global prognostic scheme of leaf onset using satellite data. *Global Change Biology*, 6(7), 709-725. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00362.x>
- Boysen, L., Brovkin, V., Pongratz, J., Lawrence, D., Lawrence, P., et al. (2020) Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models. *Biogeosciences*, 17, 5615-5638. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/bg-17-5615-2020>
- Brunner, L., Pendergrass, A., Lehner, F., Merrifield, A., Lorenz, R. and Knutti, R. (2020) Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics Discussions*, 1-23. <https://doi.org/10.5194/esd-2020-23>
- Collier, N., Hoffman, F. M., Lawrence, D. M., Keppel-Aleks, G., Koven, C. D., et al. (2018) The International Land Model Benchmarking (ILAMB) System: design, theory, and implementation. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10(11), 2731-2754. <https://doi.org/10.1029/2018MS001354>
- Conkright, M. E., Locarnini, R. A., Garcia, H. E., O'Brien, T. D., Boyer, T. P., Stephens, C. and Antonov, J. I. (2002) World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp.
- Cox, P. M., Betts, R. A., Jones, C. D., Spall, S. A. and Totterdell, I. J. (2000) Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187. <https://doi.org/10.1038/35041539>
- Eyring, V., Bock, L., Lauer, A., Righi, M., Schlund, M., et al. (2020) Earth System Model Evaluation Tool (ESMValTool) v2.0 : An extended set of large-scale diagnostics for quasi-operational and comprehensive evaluation of Earth system models in CMIP. *Geoscientific Model Development*, 13(7), 3383-3438. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3383-2020>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J. and Taylor, K. E. (2016) Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- FAO · IIASA · ISRIC · ISSCAS · JRC (2012) Harmonized World Soil Database (version 1.10), FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.

- Friedlingstein, P., Cox, P., Betts, R., Bopp, L., von Bloh, W., et al. (2006) Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C4 MIP Model intercomparison. *Journal of Climate*, 19(14), 3337–3353. <https://doi.org/10.1175/JCLI3800.1>
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., et al. (2021) Global carbon budget 2021. *Earth System Science Data*, <https://doi.org/10.5194/essd-2021-386>
- Friedlingstein, P., Meinshausen, M., Arora, V. K., Jones, C. D., Anav, A., Liddicoat, S. K. and Knutti, R. (2014) Uncertainties in CMIP5 climate projections due to carbon cycle feedbacks. *Journal of Climate*, 27(2), 511–526. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00579.1>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., et al. (2020) Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 12, 3269–3340.
- Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Antonov, J. I., Bara-nova, O., et al. (2013a) World Ocean Atlas. Dissolved Oxygen, Apparent Oxygen Utilization, and Oxygen Saturation, Vol. 3, *In*: Levitus, S. and Mishonov, A. (eds.) Atlas NESDIS 75, NOAA, US Government Printing Office, Washington DC, USA, 27 pp.
- Garcia, H. E., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Antonov, J. I., Bara-nova, O., et al. (2013b) World Ocean Atlas. Dissolved Inorganic Nutrients (phosphate, nitrate, silicate), Vol. 4, *In*: Levitus, S. and Mishonov, A. (eds.) Atlas NESDIS 76, NOAA, US Government Printing Office, Wash- ington DC, USA, 25 pp.
- Gier, B. K., Buchwitz, M., Reuter, M., Cox, P. M., Friedlingstein, P. and Eyring, V. (2020) *Spatially Resolved Evaluation of Earth System Models with Satellite Column Averaged CO₂. June.*
- Global Soil Data Task Group (2000) Global Gridded Surfaces of Selected Soil Characteristics (IGBP-DIS). ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORN LDAAC/569>
- Griffies, S. M., Danabasoglu, G., Durack, P. J., Adcroft, A. J., Balaji, V., et al. (2016) OMIP contribution to CMIP6: Experimental and diagnostic protocol for the physical component of the Ocean Model Intercomparison Project. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3231–3296. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3231-2016>
- Hajima, T., Kawamiya, M., Watanabe, M., Kato, E., Tachiiri, K., et al. (2014a) Modeling in earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0029-y>
- Hajima, T., Tachiiri, K., Ito, A. and Kawamiya, M. (2014b) Uncertainty of concentration-terrestrial carbon feedback in earth system models. *Journal of Climate*, 27(9), 3425–3445. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00177.1>
- Hajima, T., Watanabe, M., Yamamoto, A., Tatebe, H., Noguchi, M. A., et al. (2020) Development of the MIROC-ES2L earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geoscientific Model Development*. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-2197-2020>
- Hall, A., Cox, P., Huntingford, C. and Klein, S. (2019) Progressing emergent constraints on future climate change. *Nature Climate Change*, 9(4), 269–278. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0436-6>
- Hoffman, F. M., Randerson, J. T., Arora, V. K., Bao, Q., Cadule, P., et al. (2014) Causes and implications of persistent atmospheric carbon dioxide biases in Earth System Models. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(2), 141–162. <https://doi.org/10.1002/2013JG002381>
- Hugelius, G., Tarnocai, C., Broll, G., Canadell, J. G., Kuhry, P., et al. (2013) *The Northern Circumpolar Soil Carbon Database: Spatially Distributed Datasets of Soil Coverage and Soil Carbon Storage in the Northern Permafrost Regions*, 3–13. <https://doi.org/10.5194/essd-5-3-2013>
- IGBP-DIS (International Geosphere-Biosphere Program, Data and Information Services) (2020) *Global Soil Data Products*. https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=565 (2021年12月27日確認)
- IPCC (2001) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. and Miller, H. L. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2021) Summary for policymakers. *In*: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C. (eds.) *Climate Change. 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University

- Press. (in press)
- Ito, A., Hajima, T., Lawrence, D. M., Brovkin, V., Delire, C., et al. (2020) Soil carbon sequestration simulated in CMIP6-LUMIP models: Implications for climatic mitigation. *Environmental Research Letters*, 15(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abc912>
- Ito, T. and Follows, M. J. (2005) Preformed phosphate, soft tissue pump and atmospheric CO₂. *Journal of Marine Research*, 63(4), 813–839. <https://doi.org/10.1357/0022240054663231>
- Jones, C. D., Arora, V., Friedlingstein, P., Bopp, L., Brovkin, V., et al. (2016) The C4MIP experimental protocol for CMIP6. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1, 1–52. <https://doi.org/10.5194/gmd-2016-36>
- Jung, M., Reichstein, M., Margolis, H. A., Cescatti, A., Richardson, A. D., et al. (2011) Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116(3), 1–16. <https://doi.org/10.1029/2010JG001566>
- Kato, T., Ito, A. and Kawamiya, M. (2009) *Multiple Temporal Scale Variability during the Twentieth Century in Global Carbon Dynamics Simulated by a Coupled Climate: Terrestrial Carbon Cycle Model*. 901–923. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0548-1>
- Kattge, J., Diaz, S., Lavorel, S., Prentice, I. C., Leadley, P., et al. (2011) TRY—a global database of plant traits. *Global Change Biology*, 17(9), 2905–2935.
- Kawamiya, M., Hajima, T., Tachiiri, K., Watanabe, S. and Yokohata, T. (2020) Two decades of Earth system modeling with an emphasis on Model for Interdisciplinary Research on Climate (MIROC). *Progress in Earth and Planetary Science*, 7(1), 1–13.
- Kawamiya, M., Yoshikawa, C., Kato, T., Sato, H., Sudo, K., Watanabe, S. and Matsuno, T. (2005) *Development of an Integrated Earth System Model on the Earth Simulator*, 4(December), 18–30.
- Keller, D. P., Lenton, A., Scott, V., Vaughan, N. E., Bauer, N., Ji, D. and Jones, C. D. (2018) *The Carbon Dioxide Removal Model Intercomparison Project (CDRMIP): Rationale and Experimental Protocol for CMIP6*. 1133–1160.
- Kindermann, G. E., Mccallum, I., Fritz, S. and Obersteiner, M. (2008) A global forest growing stock, biomass and carbon map based on FAO statistics. *Silva Fennica*, 42(3), 387–396.
- Kwiatkowski, L., Torres, O., Bopp, L., Aumont, O., Chamberlain, M., et al. (2020) Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper ocean nutrient decline from CMIP6 model projections. *Biogeosciences Discussions*, 1–43. <https://doi.org/10.5194/bg-2020-16>
- Landschützer, P., Gruber, N., Bakker, D. C. E. and Schuster, U. (2014) Recent variability of the global ocean carbon sink. *Global Biogeochemical Cycles*, 28, 927–949.
- Lauvset, S. K., Key, R. M., Olsen, A., van Heuven, S., Velo, A., et al. (2016) A new global interior ocean mapped climatology: the 1° × 1° GLODAP version 2. *Earth System Science Data*, 8, 325–340.
- Lawrence, D. M., Hurtt, G. C., Arneth, A., Brovkin, V., Calvin, K. V., et al. (2016) The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: Rationale and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 2973–2998. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016>
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Hauck, J., et al. (2018) Global carbon budget 2018. *Earth System Science Data*, 10, 2141–2194.
- Liddicoat, S. K., Wiltshire, A. J., Jones, C. D., Arora, V. K., Brovkin, V., et al. (2020) Compatible fossil fuel CO₂ emissions in the CMIP6 earth system models' historical and shared socioeconomic pathway experiments of the 21st century. *Journal of Climate*, 1–72. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0991.1>
- Manabe, S. and Bryan, K. (1969) Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26, 786–789.
- Manabe, S., Smagorinsky, J. and R, S. (1965) Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. *Monthly Weather Review*, 93(12), 769–798. <https://doi.org/10.1109/TIM.1986.6499065>
- Manabe, S. and Stouffer, R. J. (1980) Sensitivity of a global climate model to an increase of CO₂ concentration in the atmosphere. *Journal of Geophysical Research*, 85(C10), 5529–5554. <https://doi.org/10.1029/JC085iC10p05529>
- Manabe, S. and Wetherald, R. T. (1975) The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 32(1), 3–15. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2)
- Moore, C. M., Mills, M. M., Arrigo, K. R., Berman-Frank, I., Bopp, L., et al. (2013) Processes and patterns of oceanic nutrient limitation. *Nature Geoscience*, 6, 701–710.
- Ogunro, O. O., Elliott, S. M., Wingenter, O. W., Deal, C., Fu, W., Collier, N. and Hoffman, F. M. (2018)

- Evaluating Uncertainties in Marine Biogeochemical Models: Benchmarking Aerosol Precursors*. 1–21. <https://doi.org/10.3390/atmos9050184>
- Patra, P. K., Hajima, T., Saito, R., Chandra, N., Yoshida, Y., et al. (2021) Evaluation of earth system model and atmospheric inversion using total column CO₂ observations from GOSAT and OCO-2. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00420-z>
- Sabine, C. L., Feely, R. A., Gruber, N., Key, R. M., Lee, K., et al. (2004) The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682), 367–371. <https://doi.org/10.1126/science.1097403>
- Séférian, R., Berthet, S., Yool, A., Palmiéri, J., Bopp, L., et al. (2020) Tracking improvement in simulated marine biogeochemistry between CMIP5 and CMIP6. *Current Climate Change Reports*, 6(3), 95–119. <https://doi.org/10.1007/s40641-020-00160-0>
- Tarnocai, C., Canadell, J. G., Schuur, E. A. G., Kuhry, P., Mazhitova, G. and Zimov, S. (2009) Soil organic carbon pools in the northern circumpolar permafrost region. *Global Biogeochemical Cycles*, 23. <https://doi.org/10.1029/2008GB003327>
- Tatebe, H., Ogura, T., Nitta, T., Komuro, Y., Ogochi, K., et al. (2019) Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12, 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>
- Tatebe, H., Tanaka, Y., Komuro, Y. and Hasumi, H. (2018) Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Scientific Reports*, 8, 14479.
- Tebaldi, C., Debeire, K., Eyring, V., Fischer, E., Fyfe, J., et al. (2021) Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6. *Earth System Dynamics*, 12, 253–293.
- Todd-Brown, K. E. O., Randerson, J. T., Post, W. M., Hoffman, F. M., Tarnocai, C., Schuur, E. A. G. and Allison, S. D. (2013) Causes of variation in soil carbon simulations from CMIP5 earth system models and comparison with observations. *Biogeosciences*, 10(3), 1717–1736. <https://doi.org/10.5194/bg-10-1717-2013>
- Watanabe, M., Tatebe, H., Koyama, H., Hajima, T., Watanabe, M. and Kawamiya, M. (2020) Importance of El Niño reproducibility for reconstructing historical CO₂ flux variations in the equatorial pacific. *Ocean Science*, 16(6), 1431–1442.
- Watanabe, S., Hajima, T., Sudo, K., Nagashima, T., Takemura, T., et al. (2011) MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 845–872. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-845-2011>
- Wenzel, S., Cox, P. M., Eyring, V. and Friedlingstein, P. (2016) Projected land photosynthesis constrained by changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂. *Nature*, 538, 449–501. <https://doi.org/10.1038/nature19772>
- Zhao, M., Heinsch, F. A., Nemani, R. R. and Running, S.W. (2005) Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote Sensing of Environment*, 95, 164–176.
- Yoshikawa, C., Kawamiya, M., Kato, T., Yamanaka, Y. and Matsuno, T. (2008) Geographical distribution of the feedback between future climate change and the carbon cycle. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(3), G03002. <https://doi.org/10.1029/2007JG000570>



羽島 知洋 / Tomohiro HAJIMA

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター 地球システムモデル開発応用グループ グループリーダー代理。炭素循環をはじめとする陸域生態系の物質循環とそのモデリングを専門とする。また、陸域生態系

モデル等を気候モデルに導入した地球システムモデルの開発及び温暖化予測研究に従事。



伊藤 昭彦 / Akihiko ITO

国立研究開発法人 国立環境研究所地球システム領域 物質循環モデリング・解析研究室長。海洋研究開発機構 地球環境フロンティア研究センター研究員、国立環境研究所地球環境研究センター主任研究員を経て、2018年4月より現職。専門は

植物生態学、生物地球化学、生態系モデリング。主な著書に『地球環境変動の生態学』(分担執筆、共立出版)、『森林と地球環境変動』(分担執筆、共立出版)等がある。



野口 真希 / Maki NOGUCHI-AITA

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 地球環境部門 地球表層システム研究センター グループリーダー。2012年北海道大学大学院水産科学院 海洋生物資源科学専攻修了、博士(水産科学)。民間企業での

鉄道システム開発を経て、地球フロンティア研究システム・地球温暖化予測研究プログラム(現・海洋研究開発機構)に着任。海洋物理レベルから低次-高次生態系に至る一連の変動プロセスの包括的な理解のため、全球海洋生態系モデル：COCO-NEMURO等を用いて海洋物質循環研究を推進している。近年は、大気物質(エアロゾル)の海洋沈着に伴う海洋物質循環への影響評価や安定同位体比を用いた海洋の食物連鎖構造解析など多岐に渡る。