

2022年度堀内賞の受賞者決まる

受賞者：建部洋晶（海洋研究開発機構）

研究業績：気候モデルの開発および全球海洋モデルの高度化と気候変動メカニズム研究の推進

選定理由：

過去の気候変動の理解、近未来の気候変動予測、および将来の人為起源温室効果ガスの排出経路に応じた気候システム変化の推定には、全球気候モデルのように大規模なシミュレーションツールの活用が不可欠である。

建部洋晶氏は、日本の大学/研究機関ベースの全球気候モデルである MIROC6 (Model for Interdisciplinary Research on Climate version 6) の開発を統括し、CMIP6実験実施およびデータ創出をとりまとめることで、IPCC 報告書のみならず多様な気象・気候研究に活用できるデータを国内外に広く提供し、気象学の発展に大きく貢献してきた。また、気象学に隣接する海洋物理学分野においても、MIROC6を自ら用いて数値実験を実施することで、以下に述べるような優れた研究成果をあげている。

建部氏は、学位を取得して以来、海洋モデリングを中心に北太平洋の海洋循環の力学に関する研究を行ってきた [業績 1, 2]。その後、気候モデル MIROC の開発チームに加わり、海洋海水データ同化技術を開発し [3, 8]、観測データで初期値化されたモデルを用いた事後予測実験でエルニーニョの予測可能性に関する新たな知見を得た [5]。2013年からは、MIROC 開発の中心となって大気モデル・海洋モデルの高度化だけでなく、それらを結合した際の調整作業を行い、系統誤差の低減に尽力して現実的な気候変動が再現できるモデルに仕上げた。

建部氏はこのモデルを用いて自ら多様な数値実験を実施し、海洋物理学の観点から長期気候変動に関する多くの研究成果をあげている。まず、太平洋十年規模変動のメカニズムについて、南太平洋低緯度亜表層の変動が熱帯太平洋における十年規模および二十年規模の変動の起源となっていることを示し、十年規模変動に対しては南太平洋上の風応力変化に対する海洋波動伝播が、二十年規模変動に対しては南太平洋東部亜熱帯モード水形成領域からの移流が主要なコントロール要因であること、また、西岸境界流による熱輸送と海面水温フロントへの大気応答

がもたらす海洋熱輸送の間に負のフィードバックが存在することを示した [4, 6]。一方、大西洋の数十年規模変動に関しては、人為起源硫酸エアロゾルの寄与が重要であること、亜寒帯域に限っては北大西洋振動に関連した海面水温変動が支配的であることを示した [10]。さらに北太平洋の海面水位変動について、北太平洋における海面水位上昇の局所性に関する要因分析を行い、西部亜熱帯北太平洋（日本南岸）では従来の指摘と異なり、亜熱帯モード水の昇温と移流が支配的であることを示した [12]。以上に加えて、海洋深層の混合過程が気候に与える影響について、最新の観測と理論に基づいて得られた乱流混合強度分布を大気海洋結合大循環モデルに取り入れることにより、南大洋深層の乱流混合が太平洋深層循環への影響を通して南大洋上の海水分布に作用し、さらにその影響が海洋にとどまらず全球平均気温や南半球偏西風などにも有意に及ぶことを示した [7]。近年は、CMIP6実験のための正式版モデルである MIROC6の開発を完了し、これを用いて近未来気候変動予測や気候変動メカニズム研究などを行っている [9, 11, 14]。

建部氏は、MIROC6の開発にあたって、並行して開発されていた地球システムモデル MIROC-ES2L と物理気候部分を共通化し、気候科学から地球システム科学までを統一的に研究できるフレームを整備した。その結果、MIROC6の初期値化システムを MIROC-ES2L へ移植して事後予測実験を実施することで、気温・水温のような物理変数だけでなく、炭素フラックスなどまで予測する国内で初めてとなる地球システム予測を可能にした [13]。こうした境界領域の研究は今後も発展することが期待される。

このように、建部氏が行ってきた海洋物理学の知見に基づく気候モデルの開発は、今後の気候研究の発展につながるものであり、それらのモデルを用いた気候システムのシミュレーションデータは、広い範囲のユーザーに研究の機会を提供することで気象学に重要な貢献をすると認められる。

以上の理由により、日本気象学会は建部洋晶氏に2022年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト (年代順):

1. Tatebe, H. and H. Hasumi, 2010: Formation mechanism of the Pacific equatorial thermocline revealed by a general circulation model with a high accuracy tracer advection scheme. *Ocean Modelling*, **35**, 245-252.
2. Tatebe, H., I. Yasuda, H. Saito and Y. Shimizu, 2010: Horizontal transport of the calanoid copepod *Neocalanus* in the North Pacific: The influences of the current system and the life history. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, **57**, 409-419.
3. Tatebe, H., *et al.*, 2012: The Initialization of the MIROC climate Models with hydrographic data assimilation for decadal prediction. *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A**, 275-294.
4. Tatebe, H., Y. Imada, M. Mori, M. Kimoto and H. Hasumi, 2013: Control of decadal and bidecadal climate variability in the tropical Pacific by the off-equatorial South Pacific Ocean. *J. Climate*, **26**, 6524-6534.
5. Imada, Y., H. Tatebe, M. Watanabe, M. Ishii and M. Kimoto, 2016: South Pacific influence on the termination of El Niño in 2014. *Sci. Rep.*, **6**, 30341, doi:10.1038/srep30341.
6. Tatebe, H., M. Kurogi and H. Hasumi, 2017: Atmospheric responses and feedback to the meridional ocean heat transport in the North Pacific. *J. Climate*, **30**, 5715-5728.
7. Tatebe, H., Y. Tanaka, Y. Komuro and H. Hasumi, 2018: Impact of deep ocean mixing on the climatic mean state in the Southern Ocean. *Sci. Rep.*, **8**, 14479.
8. Ono, J., Tatebe, H., Y. Komuro, M.I. Nodzu and M. Ishii, 2018: Mechanisms influencing seasonal to inter-annual prediction skill of sea ice extent in the Arctic Ocean in MIROC. *The Cryosphere*, **12**, 675-683.
9. Tatebe, H., T. Ogura, T. Nitta, Y. Komuro, K. Ogochi, T. Takemura, K. Sudo, M. Sekiguchi, M. Abe, F. Saito, M. Chikira, S. Watanabe, M. Mori, N. Hirota, Y. Kawatani, T. Mochizuki, K. Yoshimura, K. Takata, R. Oishi, D. Yamazaki, T. Suzuki, M. Kurogi, T. Kataoka, M. Watanabe and M. Kimoto, 2019: Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geosci. Model Dev.*, **12**, 2727-2765, doi:10.5194/gmd-12-2727-2019.
10. Watanabe, M. and H. Tatebe, 2019: Reconciling roles of sulphate aerosol forcing and internal variability in Atlantic multidecadal climate changes. *Clim. Dyn.*, **53**, 4651-4665.
11. Kataoka, T., H. Tatebe, H. Koyama, T. Mochizuki, K. Ogochi, H. Naoe, Y. Imada, H. Shiogama, M. Kimoto and M. Watanabe, 2020: Seasonal to decadal predictions with MIROC6: Description and basic evaluation. *J. Adv. Model. Earth Syst.* **12**, e2019MS002035, doi:10.1029/2019MS002035.
12. Suzuki, T. and H. Tatebe, 2020: Future dynamic sea level change in the western subtropical North Pacific associated with ocean heat uptake and heat redistribution by ocean circulation under global warming. *Prog. Earth Planet. Sci.*, **7**, doi:10.1186/s40645-020-00381-9.
13. Watanabe, M., H. Tatebe, H. Koyama, T. Hajima, M. Watanabe and M. Kawamiya, 2020: Importance of El Niño reproducibility for reconstructing historical CO₂ flux variations in the equatorial Pacific. *Ocean Sci.* **16**, 1431-1442, doi:10.5194/os-16-1431-2020.
14. Ono, J., M. Watanabe, Y. Komuro, H. Tatebe and M. Abe, 2022: Enhanced Arctic warming amplification revealed in a low-emission scenario. *Communications Earth & Environment*, **3**, 27, doi:10.1038/s43247-022-00354-4.

受賞者：羽島知洋 (海洋研究開発機構)

研究業績：地球システムモデルの開発と陸域生態系を含む気候-炭素循環相互作用の研究

選定理由：

気候変動のメカニズムの理解や将来予測を行う全球気候モデルは気候を形成する物理過程を主対象としてモデル化したものであり、温室効果ガスの濃度は所与のものとしてシミュレーションが行われてきた。しかしながら、大気中の温室効果ガス、特にCO₂の大気中濃度変動は、人為排出量だけでなく、海洋・陸域の生態系・物質循環が支配するCO₂吸収・放出に強く制御され、気候変化の影響を受ける。したがって包括的な気候変動メカニズムの理解と予測のためには、このような生物地球化学過程も組み込んだ気候と炭素循環の相互作用を陽に扱うことのできるモデル、すなわち地球システムモデル(以下、ESM)が必要となる。

羽島知洋氏は、全球～地域規模にまたがる陸域生態系モデリングおよび気候-炭素循環相互作用に関する卓抜した視点と優れたマネジメントセンスならびにモデリングスキルをもって、国内におけるESM開発に多大な貢献をしてきた。また羽島氏は、気候モデル・地球システムモデルのマルチモデル相互比較国際プロジェクト(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP)にかかる主要な国内研究プログラムをリードし、多数の予測情報を創出した。

CMIP に提供したデータは、世界の気候変動予測研究や気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の評価報告書などを通じ気象学の発展に大きく貢献してきた。さらに、以下に述べるように、自らも ESM を駆使して数値実験研究を展開し、陸域炭素循環を中心とした気候-炭素循環相互作用研究を通じ、IPCC 評価報告書等に引用されるような優れた研究成果をあげてきている。

羽島氏は、より様々な人間活動の影響や地球システム内の相互作用を気候変動予測に反映できるように、炭素・窒素循環をはじめとする様々な物質循環を組み込んだ CMIP6 版 ESM “MIROC-ES2L” の国内開発を主導的に行ってきた [2, 10]。世界でもまだ数の少ない炭素循環への窒素制限を取り入れた陸域生態系モデルを導入するなど、生態学・生物地球化学など学際的素養を持つ気候モデル研究者として、ESM 高度化に重要な役割を果たしている。そして ESM を用いた気候-炭素循環フィードバックに関する研究 [3, 8] や、気候-土地利用変化に関する研究 [6, 7] を手がけ、隣接分野である炭素循環や陸域生態系の観点から気候変動予測に関する重要な研究成果をあげている。炭素循環フィードバックに関する国際モデル相互比較実験 (CMIP6-C4MIP) では、MIROC-ES2L を用いた実験からデータ提供、解釈まで日本のモデル研究グループの代表として貢献した。CO₂ 増加による陸域、海洋による炭素吸収の変化に関する研究 [3] では全体を統括し、不確実性が大きいとされる陸域生態系の炭素循環について、大気 CO₂ 濃度上昇に対する生産力や炭素貯留量の応答感度を、ESM シミュレーションと独自の解析法により要因分離することに成功した。また、長期的な気候変動対策に不可欠な累積人為 CO₂ 排出量と全球平均気温との関係についても研究を深めてきた。ESM の特性を活かしてフィードバック効果を考慮した長期計算を実施することで、ゼロ排出時の過渡的応答や累積排出量と気温上昇の間の非線形関係を示すなど、社会科学と自然科学をつなぐ重要な成果をあげている [1, 5, 9]。

また羽島氏は、モデル開発にあたって、物理気候モデル MIROC をシームレスに ESM に導入するための開発環境を整備し、気候科学から地球システム科学までを統一的に研究できるような研究開発体制を実現した。その結果、例えば気候モデル向けに開発された初期値化システムを ESM へ容易に移植で

きるようになり、炭素循環も含めた精緻な近未来予測を行う「地球システム予測」を国内で初めて可能にした [4]。羽島氏のモデル開発とそれを活用した研究活動は、その対象に様々な研究領域が含まれることから、多様な研究領域間を橋渡しする“ハブ”として機能し始めており [2, 10]、特に観測を主体とした炭素循環研究コミュニティとの連携は、これまで困難であった ESM の全球炭素循環の詳細検証に飛躍をもたらす成果につながっている [11]。

このように、羽島氏が行ってきた地球システムモデルの研究開発は、気候研究を中心とした様々な学際研究に代表される新たな研究の派生・萌芽を育むプラットフォームを形成し発展させることによって、気象学ならびにその隣接分野の発展に大きく貢献してきたといえる。

以上の理由により、日本気象学会は羽島知洋氏に 2022 年度堀内賞を贈呈するものである。

主な論文リスト (年代順) :

1. Hajima, T., T. Ise, K. Tachiiri, E. Kato, S. Watanabe and M. Kawamiya, 2012: Climate change, allowable emission, and earth system response to representative concentration pathway scenarios. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 90, 417-434, doi:10.2151/jmsj.2012-305.
2. Hajima, T., M. Kawamiya, M. Watanabe, E. Kato, K. Tachiiri, M. Sugiyama, S. Watanabe, H. Okajima and A. Ito, 2014a: Modeling in Earth system science up to and beyond IPCC AR5. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 1, 1-25, doi:10.1186/s40645-014-0029-y.
3. Hajima, T., K. Tachiiri, A. Ito and M. Kawamiya, 2014b: Uncertainty of concentration-terrestrial carbon feedback in earth system models. *J. Climate*, 27, 3425-3445, doi:10.1175/JCLI-D-13-00177.1.
4. Watanabe, M., H. Tatebe, H. Koyama, T. Hajima, M. Watanabe and M. Kawamiya, 2020: Importance of El Niño reproducibility for reconstructing historical CO₂ flux variations in the equatorial Pacific. *Ocean Sci*, 16, 1431-1442, doi:10.5194/os-16-1431-2020.
5. MacDougall A. H., T. L. Frölicher, C. D. Jones, J. Rogelj, H. D. Matthews, K. Zickfeld, V. K. Arora, N. J. Barrett, V. Brovkin, F. A. Burger, M. Eby, A. V. Eliseev, T. Hajima, P. B. Holden, A. Jeltsch-Thömmes, C. Koven, N. Mengis, L. Menviel, M. Michou, I. I. Mokhov, A. Oka, J. Schwinger, R. Séférian, G. Shaffer, A. Sokolov, K. Tachiiri, J. Tjiputra, A. Wiltshire and T. Ziehn, 2020: Is there warming in the pipeline? A multi-model analysis of the Zero Emissions Commitment from CO₂. *Biogeo-*

- sciences, 17, 2987–3016, doi:10.5194/bg-17-2987-2020.
6. Ito, A. and T. Hajima, 2020: Biogeophysical and biogeochemical impacts of land-use change simulated by MIROC-ES2L. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, doi:10.1186/s40645-020-00372-w.
 7. Boysen, L., V. Brovkin, J. Pongratz, D. M. Lawrence, P. Lawrence, N. Vuichard, P. Peylin, S. Liddicoat, T. Hajima, Y. Zhang, M. Rocher, C. Delire, R. Séférian, V. K. Arora, L. Nieradzik, P. Anthoni, W. Thiery, M. M. Laguë, D. Lawrence and M.-H. Lo, 2020: Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models. *Biogeosciences*, 17, 5615–5638, doi:10.5194/bg-17-5615-2020.
 8. Arora, V. K., A. Katavouta, R. G. Williams, C. D. Jones, V. Brovkin, P. Friedlingstein, J. Schwinger, L. Bopp, O. Boucher, P. Cadule, M. A. Chamberlain, J. R. Christian, C. Delire, R. A. Fisher, T. Hajima, T. Ilyina, E. Joetzjer, M. Kawamiya, C. D. Koven, J. P. Krasting, R. M. Law, D. M. Lawrence, A. Lenton, K. Lindsay, J. Pongratz, T. Raddatz, R. Séférian, K. Tachiiri, J. F. Tjiputra, A. Wiltshire, T. Wu and T. Ziehn, 2020: Carbon-concentration and carbon-climate feedbacks in CMIP6 models and their comparison to CMIP5 models. *Biogeosciences*, 17, 4173–4222, doi:10.5194/bg-17-4173-2020.
 9. Hajima, T., A. Yamamoto, M. Kawamiya, X. Su, M. Watanabe, R. Ohgaito and H. Tatebe, 2020a: Millennium time-scale experiments on climate-carbon cycle with doubled CO₂ concentration. *Prog. Earth Planet. Sci.*, 7, doi:10.1186/s40645-020-00350-2.
 10. Hajima, T., M. Watanabe, A. Yamamoto, H. Tatebe, M. A. Noguchi, M. Abe, R. Ohgaito, A. Ito, D. Yamazaki, H. Okajima, A. Ito, K. Takata, K. Ogochi, S. Watanabe and M. Kawamiya, 2020b: Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. *Geosci. Model Dev.*, 13, 2197–2244, doi:10.5194/gmd-13-2197-2020.
 11. Patra, P. K., T. Hajima, R. Saito, N. Chandra, Y. Yoshida, K. Ichii, M. Kawamiya, M. Kondo, A. Ito and D. Crisp, 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, 1–18, doi:10.1186/s40645-021-00420-z.
-