

## Preface

Climate models are used in various fields, for example, to study the mechanisms of the modern climate and its interannual variability, to make climate projections for the near future and for hundreds of years to come, and to conduct paleoclimate simulations. As our knowledge of climate processes has grown over the past few decades, the complexity of climate models has increased, and additional physics has been incorporated into them. In addition to atmospheric chemical processes such as those related to aerosols and ozone, feedback processes between the carbon cycle and climate change have now been incorporated into a climate model, called the Earth System Model (ESM).

The Meteorological Research Institute (MRI) of Japan has been developing models for many years, beginning with an atmospheric general circulation model (AGCM) developed in the 1980s. In the 1990s, we developed a global atmosphere–ocean coupled climate model (MRI-CGCM1) and performed climate projection experiments under an idealized global warming scenario. In the early 2000s, a new version of this CGCM (MRI-CGCM2) was developed by incorporating the spectral dynamical framework of the Japan Meteorological Agency operational model. A revised version of this model (MRI-CGCM2.3) was used in the 3rd phase of the Coupled Modeling Intercomparison Project, the results of which contributed to the 4th Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Global climate change projection data produced by MRI CGCMs have also been used to derive the lateral boundary conditions for MRI regional climate models.

The first version of the MRI Earth System Model (MRI-ESM1) has now been developed. This model enables us to represent both the climate system and terrestrial and oceanic material transport, as well as their interaction. MRI-ESM1 is the base model for the fifth phase of the Coupled Modeling Intercomparison Project (CMIP5). It is my great pleasure to announce the completion of MRI-ESM1 and the publication of this technical report describing the model. MRI-ESM1 was developed at MRI under the special research program “Comprehensive Projection of Climate Change around Japan due to Global Warming (FY2005–FY2009).” Its development was made possible by the collaboration of participating scientists from several research laboratories and departments of the MRI. I would like to express here my deep gratitude for the huge efforts put forth by all of those who participated in the development of the model and the cooperation displayed among them. I expect that this model will produce many important scientific results.

Akio Kitoh

Director

Climate Research Department

## 序

将来の気候変動予測を行う道具である気候モデルは地球システムモデルへと発展を遂げ、現在の気候の再現と気候変動のメカニズム研究、温暖化予測さらには古気候研究など幅広い分野で用いられている。この 20 年間に、気候変動のメカニズム研究や気候予測に使われる気候モデルは、大気大循環のみのモデルから、海洋混合層を付加したモデル、大気海洋結合大循環モデル、植生モデルやエアロゾルモデル・大気化学モデルの付加、炭素循環モデルとの結合などがあり、今では地球システムモデルへと大いに発展してきた。最近では、エアロゾルが放射・雲・降水過程に及ぼす直接効果・間接効果を導入し、オゾンをはじめとした大気化学プロセスがオンラインで同時計算できるモデルが登場している。さらに温室効果ガスの排出シナリオを与え、海洋による二酸化炭素の吸収や陸上植生との炭素交換過程を計算し、大気中の二酸化炭素濃度の変化とそれによる気温・降水量変化から炭素交換過程へのフィードバックが見積もられるようになってきている。

気象研究所では、これまで長期にわたって全球気候モデルの開発を行ってきた。1980 年代には大気大循環モデルを開発し大気モデリング相互比較実験には当初から参加してきた。1990 年代にはいると、大気大循環モデルに全球海洋大循環モデルを結合した全球大気海洋結合モデル MRI-CGCM1 を開発し、温暖化予測実験を行った。その後、2000 年代初頭には、それまでの格子モデルから、新たに気象庁現業モデルを基に開発したスペクトル大気大循環モデルを導入し、全球大気海洋結合モデル MRI-CGCM2 を開発し、温室効果気体と硫酸エアロゾルの直接効果のシナリオ実験を行った。その MRI-CGCM2 にいくつかの改良が加えられた MRI-CGCM2.3 では、第 3 期気候モデル比較プロジェクト CMIP3 に参加し、気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第 4 次評価報告書に貢献してきた。これら各世代の全球気候モデルによる気候変化予測の結果は、気象研究所における地域気候モデルによるダウンスケーリングにも用いられ、日本付近の気候変化予測に役立ってきた。

これらの歴史を背景に、気象研究所では気象庁気候変動予測研究費による特別研究「温暖化による日本付近の詳細な気候変化予測に関する研究」（平成 17 年度～平成 21 年度）を立ち上げ、その副課題として「温暖化予測地球システムモデルの開発」を、気候研究部、環境・応用気象研究部、海洋研究部の担当者により行ってきた。ここに気象研究所地球システムモデル MRI-ESM1 の完成を迎え、モデルの解説を気象研究所技術報告として出版できることは大なる喜びである。地球システムモデル開発は、多くのコンポーネントモデルを一つの目的のためにたばねる共同作業である。モデル開発関係者の多大な努力と協力に深く感謝の意を表す。今後、温暖化予測実験に留まらず、このモデルを用いた数多くの成果が出てくることを期待する。

気候研究部長

鬼頭昭雄

## Abstract

The Meteorological Research Institute (MRI) of Japan developed the Earth System Model MRI-ESM1 to enable us to simulate both the climate system and global material transport, along with their interaction. Its core component, the atmosphere–ocean coupled global climate model MRI-CGCM3, represents a substantial advance from the previous model, MRI-CGCM2.3, which made important contributions to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The global atmospheric model MRI-AGCM3, used as the atmospheric component of MRI-CGCM3, incorporates various new physical parameterizations, including a cumulus convection scheme, a high-accuracy radiation scheme, a two-moment bulk cloud model that explicitly represents aerosol effects on clouds, and a new, sophisticated land-surface model, into the dynamics framework by a conservative semi-Lagrange method. MRI.COM3, also newly developed at MRI, is used for the global ocean-ice component of MRI-CGCM3. We adopted for MRI.COM3 a tripolar grid coordinate system, in which the North Pole is not a singular point, because MRI.COM3 supports general orthogonal curvilinear coordinates. The sea-ice model has also been updated; it now represents the sub-grid ice-thickness distribution by thickness categories, and incorporates ice rheology dynamics in addition to detailed thermodynamics. The MASINGAR mk-2 aerosol model takes into account five kinds of atmospheric aerosols, sulfate, black and organic carbon, mineral dust, and sea salt. The MRI-CCM2 atmospheric chemistry climate model (ozone model) is used to treat chemical reactions and the transport of atmospheric species associated with both tropospheric and stratospheric ozone. To represent the global carbon cycle, terrestrial ecosystem carbon cycle and ocean biogeochemical carbon cycle processes are incorporated into the land-surface model and the ocean model, respectively. The Scup coupler developed at MRI is used to integrate each component model, the atmospheric, ocean, aerosol, and ozone models, into MRI-ESM1. This flexible coupler can couple models with different resolutions and grid coordinates with variable coupling intervals. This advantage not only leads to efficient execution of the earth system model but also allows the efficient and independent development of the component models.

## 要旨

気象研究所において、気候システムと地球全体の物質循環、およびそれらの間の相互作用を再現する地球システムモデルが開発された。その中核となるコンポーネントである大気海洋結合全球気候モデル MRI-CGCM3 は、気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の第4次評価報告書に大きく貢献した以前のモデル MRI-CGCM2.3 から大きく進歩した。MRI-CGCM3 の大気部分としては、全球大気モデル MRI-AGCM3 が用いられており、積雲対流スキーム、高精度な放射スキーム、エーロゾルの雲への影響を陽に表現する2モーメントバルク雲モデル、さらに、新しく精緻な陸面モデルなど、種々の新しい物理過程パラメタリゼーションが、セミ・ラグランジュ法による力学フレームに組み込まれている。MRI-CGCM3 の海洋・海水部分として、これも新しく気象研究所で開発された MRI.COM3 が用いられている。MRI.COM3 では一般直交曲線座標をサポートしているため、ここでは北極が特異点にならない3極座標系を採用している。海氷モデルも新しくなり、詳細な熱力学過程に加え、格子内の氷厚分布をカテゴリーで表現し、また氷の粘塑性体力学も取り入れている。エーロゾルモデルの MASINGAR mk-2 は、硫酸、黒色炭素、有機炭素、鉱物ダスト、および海塩の5種類の大気エーロゾルを扱っている。大気化学気候モデル（オゾンモデル）である MRI-CCM2 は、成層圏および対流圏オゾンに関連する大気化学種の反応および輸送を扱うために用いられている。全球の炭素循環を表現するため、陸域炭素循環および海洋生物地球化学炭素循環過程が、それぞれ陸面モデルおよび海洋モデルに組み込まれている。カップラーScup は気象研究所で開発され、大気、海洋、エーロゾル、およびオゾンの各コンポーネントモデルを統合して MRI-ESM1 として構成するために用いられている。この柔軟性のあるカップラーは異なる解像度、格子座標を様々な結合間隔で結合することを可能にしている。このような特長は、地球システムモデルの効率的な実行を可能にするだけでなく、コンポーネントモデルを効率的に独立して開発することも可能にしている。

## Contents

1. Introduction	1
2. Outline of MRI-ESM1	4
3. Atmospheric model (MRI-AGCM3)	8
3.1. Dynamics framework	8
3.2. Cumulus convection	15
3.3. Radiation	22
3.4. Cloud model	25
3.5. Planetary boundary layer	28
3.6. Land surface models	30
3.7. Ocean surface processes	33
3.8. River and lake model	36
4. Ocean-ice model (MRI.COM3)	38
4.1. Ocean model	38
4.2. Sea ice model	42
4.3. Exchange of properties with the atmospheric component	47
5. Aerosol model (MASINGAR mk-2)	50
5.1. Coupling with the atmospheric general circulation model MRI-AGCM3	50
5.2. Coupling with the chemistry climate model MRI-CCM2	51
5.3. Processes in the global aerosol model	51
6. Atmospheric (Ozone) chemistry model (MRI-CCM2)	57
7. Ice-sheet and Iceberg discharge	60
8. Carbon cycle	61
8.1. Terrestrial carbon cycle	61
8.2. Oceanic Carbon Cycles	64
9. Coupler (Scup)	69
References	71

