

TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE No. 59

REFERENCE MANUAL FOR THE  
METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE  
COMMUNITY OCEAN MODEL  
(MRI.COM)  
VERSION 3

BY

Hiroyuki Tsujino, Tatsuo Motoi, Ichiro Ishikawa,  
Mikitoshi Hirabara, Hideyuki Nakano, Goro Yamanaka,  
Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki

気象研究所技術報告

第59号

気象研究所共用海洋モデル  
(MRI.COM)  
第3版解説

辻野博之、本井達夫、石川一郎、平原幹俊、中野英之、  
山中吾郎、安田珠幾、石崎廣



気象研究所

METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE, JAPAN

FEBRUARY 2010

# METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Established in 1946

Director-General: Mr. Nobuo Sato

Forecast Research Department	Director: Dr. Tadashi Tsuyuki
Climate Research Department	Director: Dr. Akio Kitoh
Typhoon Research Department	Director: Dr. Mitsuru Ueno
Physical Meteorology Research Department	Director: Mr. Ryusuke Taira
Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department	Director: Dr. Nobuo Yamazaki
Meteorological Satellite and Observation System Research Department	Director: Dr. Masahito Ishihara
Seismology and Volcanology Research Department	Director: Dr. Sumio Yoshikawa
Oceanographic Research Department	Director: Dr. Hiroshi Ishizaki
Geochemical Research Department	Director: Mr. Nobuo Sato

1-1 Nagamine, Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan

## TECHNICAL REPORTS OF THE METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE

Editor-in-chief: Sumio Yoshikawa

Editors:	Masahiro Hara	Yuhji Kuroda	Akihiko Murata
	Shigenori Haginoya	Hiroaki Naoe	Tomohiro Nagai
	Yutaka Hayashi	Satoshi Matsumoto	Yousuke Sawa
Managing Editors:	Takahito Nishimiya, Tsuyoshi Watanabe		

The *Technical Reports of the Meteorological Research Institute* has been issued at irregular intervals by the Meteorological Research Institute (MRI) since 1978 as a medium for the publication of technical report including methods, data and results of research, or comprehensive report compiled from published papers. The works described in the *Technical Reports of the MRI* have been performed as part of the research programs of MRI.

---

©2009 by the Meteorological Research Institute.

The copyright of reports in this journal belongs to the Meteorological Research Institute (MRI). Permission is granted to use figures, tables and short quotes from reports in this journal, provided that the source is acknowledged. Republication, reproduction, translation, and other uses of any extent of reports in this journal require written permission from the MRI.

In exception of this requirement, personal uses for research, study or educational purposes do not require permission from the MRI, provided that the source is acknowledged.

REFERENCE MANUAL FOR THE  
METEOROLOGICAL RESEARCH INSTITUTE  
COMMUNITY OCEAN MODEL  
(MRI.COM)  
VERSION 3

気象研究所共用海洋モデル  
(MRI.COM)  
第3版解説

HIROYUKI TSUJINO, TATSUO MOTOI, ICHIRO ISHIKAWA,  
MIKITOSHI HIRABARA, HIDEYUKI NAKANO, GORO YAMANAKA,  
TAMAKI YASUDA, AND HIROSHI ISHIZAKI  
(OCEANOGRAPHIC RESEARCH DEPARTMENT)

辻野博之・本井達夫・石川一郎・平原幹俊・中野英之・  
山中吾郎・安田珠幾・石崎廣  
(気象研究所海洋研究部)



# Preface

It has long been recognized that the role of the ocean in the earth's climate system is conclusively important in such issues as the climate warming, the long-term variability in the air-sea coupled system, meteorological extreme phenomena, and so forth. In these situations, modeling of the ocean has become an indispensable method of studying the climate variability and predicting its future state as well as studying the mechanisms of the oceanic variability itself.

The Oceanographic Research Department of the Meteorological Research Institute (MRI) developed its original, general-purpose numerical ocean model, the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM), in the early 2000s for both the research work in MRI and operational work in the Japan Meteorological Agency (JMA) by combining two ocean models developed for their research work. The ocean modeling activities are maintained under MRI research programs "Development of a high-resolution (eddy-resolving) ocean general circulation model and study on formation, maintenance, and variation mechanisms of water masses based on the model" (fiscal years 2003 through 2007), "Development of an ocean environmental model and assimilation system and study on variation mechanisms of the ocean environment -feasibility study-" (fiscal year 2008), and "Development of ocean environmental forecasting methods" (started from fiscal year 2009). The present publication is the first English version of the MRI.COM manual and has been improved from the Japanese version published in 2005 by including newly developed parts.

The ocean modeling study in MRI began in the late 1970s for investigating the variability of the Kuroshio south of Japan. First, an ocean model with the primitive-equation system developed by former Prof. K. Takano in UCLA, USA, was introduced. Another ocean model was then introduced slightly later in 1981. It was similar to the former but developed by an ocean research group in the University of Tokyo. Since that time, the two ocean models with different codes have been improved in parallel in MRI for various purposes. The former model from UCLA has been vigorously optimized to exhibit a high computational efficiency in vector machines, and has been used in experiments with long-term integrations. The latter model from the University of Tokyo incorporated many options from the early stage, such as a surface mixed layer model, an isopycnal diffusion scheme, and a simple sea ice process, for various research and operational purposes.

In the early 1990s, the first coupled ocean-atmosphere model experiment was conducted through cooperation between the Oceanographic Research Department and the Climate Research Department, MRI, to simulate El Nino phenomenon. Since then, construction of a climate model synthesizing atmosphere, ocean, sea ice, and land surface has been strongly desired both for research and operational work associated with climate warming projection and seasonal forecasts, including the ENSO cycle prediction. To this end, development of a new, general-purpose ocean model, MRI.COM, which could provide the oceanic part of the synthetic climate model, has been initiated based on the two ocean models used so far to achieve efficiency in model improvement and management and to integrate their merits. In designing the new model, the main frame of the former model and the various physical options of the latter model were transferred to the new model, and many newly developed physical processes and schemes were added.

The first Japanese version of the MRI.COM manual was published in 2005 and the model has been continuously updated through further improvements in physical processes and addition of new processes. One of the most

pronounced improvements is the introduction of the chemical and biogeochemical processes associated with the oceanic carbon cycle. This is continuing even now and will be finished in a few years.

MRI.COM has been developed along with its own usage as a part of the climate model and the ocean data assimilation system in MRI as well as stand-alone experiments and has already achieved many satisfactory results. Based on our experiences, we believe MRI.COM is one of the best ocean models in the world. We thank the present and past participants in the model development for their great deal of efforts and help. We hope MRI.COM and the present manual will contribute to research work in the fields of climatology, oceanography, and environmental sciences in domestic and foreign institutions as well as to the research and operational work in MRI and JMA.

Hiroshi Ishizaki  
Director  
Oceanographic Research Department

# 前文

地球規模の気候温暖化、大気海洋結合系の長期変動、異常気象等、地球の気候システムにおける、海洋の役割の重要性は古くから認識されてきた。このような状況の下、海洋数値モデリングは、海洋自体の変動メカニズムの解明のみならず、気候変動の研究やその将来予測を行うにあたっての不可欠な手段となっている。

気象研究所海洋研究部では 2000 年代前半に、それまで研究業務に開発・使用されてきた二種類の海洋モデルを統合して、高い汎用を持つ気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) を独自に開発し、気象研究所の研究業務や気象庁における現業運用に供してきた。その後も海洋モデル開発研究は、気象研究所経常研究、「高解像度（渦解像）海洋大循環モデルの開発とそれによる水塊の形成、維持、及び変動機構の解明」（平成 15 年度～平成 19 年度）、「海洋環境モデル・同化システムの開発と海洋環境変動機構の解明に関する研究—フィジビリティ・スタディー—」（平成 20 年度）、「海洋環境の予測技術の開発」（平成 21 年度～平成 25 年度）において継続されている。本技術報告は、2005 年に出版された日本語版の解説書の内容を改訂し、日本語版出版後新たに付加された開発項目に関する解説を加えた、最初の英語による解説書である。

海洋研究部におけるモデリング研究は、海洋変動のメカニズムを解明することを目的に 1970 年代の終わり頃に開始された。その初期段階で、米国 UCLA で高野健三教授により開発されたプリミティブ方程式系モデルが導入された。一方、その直後に東京大学の海洋グループによって開発された別のプリミティブ方程式系モデルも導入された。それ以降、海洋モデルとしてコードの全く異なる 2 系列のモデルが併存し、それぞれのモデルに独自の改良が加えられ、目的に応じて利用に供されてきた。UCLA 系列モデルの特徴は、当時のベクトル計算機に適合させた計算効率性の高さであり、水平的高解像度実験や全球深層循環実験等に使用された。一方、東大系列モデルの特徴は、海面混合層や等密度面拡散、海水過程といった多彩な物理過程をオプションとして含んでいることであり、ENSO や中層水形成等、表層・中層の時間変動性をターゲットとする種々の研究や気象業務にも幅広く用いられた。

1990 年代初期、エルニーニョ現象再現のための初めての大气・海洋結合モデル実験が、海洋研究部と気候研究部との共同研究として行われて以来、ENSO サイクルはもちろんのこと、地球温暖化予測、季節予報等に関連した研究および気象業務での利用にとって、大气・海洋・海氷・陸域等を総合した気候モデル構築の必要性が急速に高まってきた。このため、海洋研究部では、モデル開発・管理の効率化とそれぞれのモデルの長所の統合を目的として、従来の 2 系列の海洋モデルをもとに広範な種々の目的に供し得る新たな汎用的海洋モデルシステムを開発することとした。2 系列モデルの統合に当たっては、海洋モデルとしての大枠は UCLA 系列のものを扱い、東大系列の多彩な物理過程モデルを融合させるとともに、最新の物理過程やスキームを取り入れることとした。

最初の日本語による解説書が 2005 年に出版された後も物理プロセスのさらなる改良と新たなプロセスの付加が続けられた。特筆すべきは、海洋炭素循環に関連して、化学過程および生物地球化学過程が付加されたことである。生物地球化学過程の開発は現在も継続中で今後数年で完了すると思われる。

MRI.COM システムはすでに海洋モデル単独実験のみならず、気候モデル実験の海洋パートおよび海洋データ同化システムのモデルパートとしても数多くの研究上の実績を積み上げてきたものである。その経験から、本モデルシステムは世界に幾つかある他の海洋モデルシステムに十分伍して行ける性能を持っていると確信している。長年にわたる海洋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、本モデルシステムと解説書が気象庁と気象研究所における気象業務や研究活動のみならず、日本国内、諸外国における気候、海洋、環境科学の研究の推進に大きく貢献することを祈念している。

海洋研究部長  
石崎 廣



# Abstract

## About this manual and MRI.COM

This technical report is a manual of the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM). MRI.COM is an ocean general circulation model developed and maintained at the Meteorological Research Institute (MRI) of the Japan Meteorological Agency (JMA). As the name suggests, it has been used for studying large scale oceanic phenomena and as the oceanic part of the coupled climate models developed at MRI.

The current version of MRI.COM is version 3. Version 1 (developed around 2000) was intended to present a prototype. Efforts were devoted to combining the two ocean models used until then in MRI. For this reason, users at that time tended to be restricted to MRI research scientists who were committed to the development. Thus, users were deeply knowledgeable about the model.

Version 2 (early 2000s) was intended for use in the operational forecasting system in JMA. Since the number of users without direct experience in developing models was expected to increase, the developers decided to write a detailed manual for that version. The Japanese version was published in 2005 (Ishikawa et al., 2005) and eventually became the prototype of this manual.

Version 3 was intended for use as an oceanic component of the Earth System Model of MRI (MRI-ESM1; Yukimoto et al., 2010). One of the reasons for creating a new version was that the definition of vertical grid arrangement was modified during the development. MRI plans to participate in the phase five of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) using MRI-ESM1, and its results on the future projection are expected to be used by a wide range of communities, so we decided to prepare a detailed description of its oceanic component in English.

Note that the purpose of this manual is to present a detailed description of a particular model system. The mathematical expressions of processes, the parameterization methods, and the numerical algorithms presented here follow those adopted in the latest code. They are largely state-of-the-art, but this does not necessarily mean that they are the complete reflections of physical, mathematical, and numerical integrity. Every method is subject to possible sophistication. We welcome critical comments and suggestions from any reader or user, which we believe are necessary for further improvement.

For a more general or detailed description of OGCMs, please refer to textbooks by Griffies (2004) and Kantha and Clayson (2000). The former thoroughly describes the fundamentals of OGCMs, and the latter concisely summarizes the modeling of various oceanic processes such as tide and sea ice.

## Organization

Chapter 1 introduces OGCMs and MRI.COM. It also presents the classification of OGCMs and the status of MRI.COM with respect to the state-of-the-art OGCMs.

Part I describes the model configuration. Governing equations are derived in Chapter 2, and the spatial grid arrangement and definition of continuity equations for unit grid cells are presented in Chapter 3.

Part II describes the dynamical core. The method of solving the barotropic and the baroclinic part of the momentum equation are presented in Chapters 4 and 5, respectively. The method of solving the advection-diffusion equation for tracers (temperature and salinity) is presented in Chapter 6.

Part III describes additional processes. Surface mixed-layer models are presented in Chapter 7, surface fluxes in Chapter 8, sea ice in Chapter 9, bottom boundary layer parameterization in Chapter 10, and biogeochemical models are presented in Chapter 11.

Part IV contains miscellaneous topics. Basics of the finite difference method are presented in Chapter 12, some high-accuracy advection schemes are presented in Chapter 13, general orthogonal curvilinear coordinates and related calculus are introduced in Chapter 14, how to construct a pair of nested-grid models is presented in Chapter 15, and user's guide to construct and run a model is presented in Chapter 16.

Each chapter is almost independent from other chapters. Thus the readers might be able to understand the contents of each chapter without referring to other chapters. However, reading Part I will give the readers the background to help understand the remainder of this manual.

The following are some comments about the notations used throughout this manual. The characters and expressions in Courier fonts are adopted from program codes. The subscripts and indices used in discrete equations are intended to express staggered grid arrangements. They do not necessarily correspond to the array indices in program codes.

## References

- Griffies, S. M., 2004: Fundamentals of ocean climate models, Princeton University Press, 518pp.
- Ishikawa, I., H. Tsujino, M. Hirabara, H. Nakano, T. Yasuda, and H. Ishizaki, 2005: Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Manual, Technical Reports of the Meteorological Research Institute, No.47, 189pp.
- Kantha, L., and C. Clayson, 2000: Numerical models of ocean and oceanic processes, International Geophysics Series, Vol. 66, 940pp.
- Yukimoto, S., and coauthors, 2010: Meteorological Research Institute-Earth System Model v1 (MRI-ESM1) - Model Description -, Technical Reports of the Meteorological Research Institute, No.64, in press.

# 概要

## MRI.COM と本解説書について

本技術報告は、気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) の解説書である。MRI.COM は気象庁気象研究所で開発、維持されてきた海洋大循環モデルである。海洋大循環モデルの名の通り、本モデルは、大きなスケールの海洋現象に関する研究や気象研究所で開発された気候モデルの海洋部分として使用されてきた。

MRI.COM の最新バージョンは 3 である。バージョン 1 (2000 年頃) は基本型を作成することを目的としたものであった。それまで気象研究所で使用されてきていた 2 系統の海洋モデルを統合することに精力が注がれた。それ故、当時の利用者は開発に直接携わる気象研究所の研究者に限定されていた。言い換えれば、利用者が本モデルに関する深い知識を有していた。

バージョン 2 (2000 年台前半) は、気象庁の現業システムへの供用を目的としたものであった。モデル開発に直接関与しない利用者数の増加が見込まれたため、当時の開発者らはこのバージョンに対する詳細な説明書の執筆を決め、日本語による解説書が 2005 年に出版された (石川他、2005)。この日本語版は、その英語版である本解説書の原型となっている。

バージョン 3 (本バージョン) は、気象研地球システムモデル (MRI-ESM1; Yukimoto et al., 2010) の海洋部分への供用を主な目的としたものである。新バージョン作成理由のひとつは、開発段階で、鉛直格子点の定義位置を変更したことである。MRI-ESM1 は第 5 次結合モデル相互比較プロジェクト (CMIP5) への参加を予定しており、同モデルによる将来予測結果などは、幅広い分野の人々に使用されることが見込まれるため、著者らは、その海洋部分についての詳細な説明を英語で執筆することとした。

読者には、本解説書の目的が、特定のモデルシステムに関する詳細な説明を与えることである点に注意していただきたい。本解説書に示す、海洋に生じる現象の数学的表現、パラメタリゼーションの方法、数値アルゴリズムは、最新のプログラムコードに則ったものである。これらは概ね最先端の知見を反映したものであるが、それがすなわち物理的、数学的、計算機科学的手法の完全性を表現していることを意味するわけではない。あらゆる手法も改良の対象となり得る。従って、著者らは読者ならびに利用者からの忌憚なきコメントや助言を歓迎する。これらはモデルのさらなる改良には不可欠なものである。

海洋大循環モデルに関するより包括的で詳細な解説に興味のある読者は Griffies (2004) や Kantha and Clayson (2000) による教科書を参照することを勧める。前者には海洋大循環モデルの原理的な面についての詳細な記述が、後者には潮汐や海水といった、様々な海洋現象のモデリングの関する知見が簡潔にまとめられている。

## 本解説書の構成

第 1 章では、海洋大循環モデルと MRI.COM を紹介する。海洋大循環モデルの分類と、最先端の海洋モデルに対する MRI.COM の位置づけについて述べる。

第 I 部では、モデルの基本設定について述べる。第 2 章では支配方程式の定式化を行う。空間格子配置と、単位格子に対する連続方程式の差分式の定義を第 3 章で行う。

第 II 部ではモデルの核心部分の解説を行う。運動方程式の順圧成分と傾圧成分の解法を第 4 章と第 5 章でそれぞれ述べる。トレーサー（水温と塩分）に対する移流拡散方程式の解法を第 6 章に述べる。

第 III 部では付加的物理プロセスの解説を行う。幾つかの海面混合層モデルを第 7 章で、海面フラックスの取り扱いを第 8 章で、海氷モデルを第 9 章で、海底境界層モデルを第 10 章で、幾つかの生物地球化学モデルを第 11 章で解説する。

第 IV 部では上記に分類できない項目について取り上げる。差分法の基本について第 12 章で、幾つかの高精度トレーサー移流スキームについて第 13 章で、一般直交曲線座標とそれに関連した計算法について第 14 章で、入れ子モデルの作成と使用方法について第 15 章で解説する。最後にモデルの作成と実行方法の解説を第 16 章で行う。

各章はほぼ他の章から独立しており、読者は他の章を参照しなくとも各章の内容を理解できるはずである。但し、第 I 部を読んでおくと、それが背景的知識となって、本解説書の残りの部分の理解が容易になるので、参考にさせていただきたい。

最後に本解説書で用いる表記法についての注意点を述べる。本文中タイプライター (Courier) 活字体が用いられている部分はプログラムコードからの抜粋である（綴り間違いなどではない）。差分式に現れる添え字や指数はスタガード (千鳥状) 格子配置を表現するように意図している。しかし必ずしもプログラムコードの配列番号とは対応していないので注意が必要である。

## References

- Griffies, S. M., 2004: Fundamentals of ocean climate models, Princeton University Press, 518pp.
- 石川一郎・辻野博之・平原幹俊・中野英之・安田珠幾・石崎廣, 2005: 気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 解説, 気象研究所技術報告第 47 号, 189pp.
- Kantha, L., and C. Clayson, 2000: Numerical models of ocean and oceanic processes, International Geophysics Series, Vol. 66, 940pp.
- Yukimoto, S., and coauthors, 2010: Meteorological Research Institute-Earth System Model v1 (MRI-ESM1) - Model Description -, Technical Reports of the Meteorological Research Institute, No.64, in press.

# Contents

<b>Chapter 1</b>	<b>OGCMs and MRI.COM</b>	<b>1</b>
1.1	What do OGCMs cover? . . . . .	1
1.2	Classification of OGCMs . . . . .	1
1.2.1	Z-coordinate models (z-models) . . . . .	2
1.2.2	Sigma-coordinate models ( $\sigma$ -models) . . . . .	3
1.2.3	Isopycnal-coordinate models ( $\rho$ -models) . . . . .	3
1.3	About MRI.COM . . . . .	3
1.4	Future of OGCMs and MRI.COM . . . . .	5
<b>Part I</b>	<b>Configuration</b>	<b>7</b>
<b>Chapter 2</b>	<b>Governing Equations</b>	<b>9</b>
2.1	Formulation . . . . .	9
2.1.1	Coordinate System . . . . .	9
2.1.2	Momentum Equation . . . . .	9
2.1.3	Continuity equation . . . . .	11
2.1.4	Temperature and salinity equation . . . . .	11
2.1.5	Equation of state of sea water . . . . .	13
2.1.6	Boundary conditions . . . . .	13
2.1.7	Acceleration method . . . . .	15
2.2	Numerical Methods . . . . .	16
2.2.1	Discretization . . . . .	16
2.2.2	Momentum equation . . . . .	17
2.2.3	Continuity equation . . . . .	20
2.2.4	Temperature and salinity equation . . . . .	20
2.2.5	Equation of state . . . . .	21
2.3	Appendix . . . . .	24
2.3.1	Physical constants . . . . .	24
<b>Chapter 3</b>	<b>Spatial grid arrangement and definition of continuity equation</b>	<b>27</b>
3.1	Horizontal grid arrangement . . . . .	27
3.2	Vertical grid arrangement . . . . .	27
3.3	Indices and symbols . . . . .	28
3.4	Continuity equation . . . . .	29
3.5	Calculation of area . . . . .	32
3.5.1	General orthogonal coordinates . . . . .	32
3.5.2	Geographic coordinate . . . . .	33

<b>Part II</b>	<b>Main Processes</b>	<b>37</b>
<b>Chapter 4</b>	<b>Equations of motion (barotropic component)</b>	<b>39</b>
4.1	Governing equations . . . . .	40
4.2	Time integration . . . . .	40
4.3	Prognostics of physical properties in the uppermost layer . . . . .	43
4.3.1	Standard scheme . . . . .	43
4.3.2	Locally conserved scheme (option FSMOM) . . . . .	44
4.4	Introduction of $\sigma$ -coordinates near the sea surface . . . . .	45
4.4.1	Formulation of $\sigma$ -layer model . . . . .	45
4.4.2	Governing equations in the $\sigma$ -coordinates . . . . .	46
4.4.3	Redistribution of tracers among the $\sigma$ -layers . . . . .	47
<b>Chapter 5</b>	<b>Equations of motion (baroclinic component)</b>	<b>49</b>
5.1	Advection terms . . . . .	49
5.1.1	Vertical mass fluxes and its momentum advection . . . . .	49
5.1.2	Horizontal mass flux and its momentum advection . . . . .	53
5.2	Viscosity . . . . .	59
5.2.1	Horizontal viscosity . . . . .	59
5.2.2	Horizontal anisotropic viscosity . . . . .	60
5.2.3	Smagorinsky parameterization for horizontal viscosity . . . . .	60
5.2.4	Discretization . . . . .	61
5.2.5	Vertical viscosity . . . . .	62
5.2.6	Bottom friction . . . . .	64
<b>Chapter 6</b>	<b>Temperature and salinity equations</b>	<b>65</b>
6.1	Flux form . . . . .	65
6.2	Advection . . . . .	65
6.3	Diffusion . . . . .	69
6.3.1	Vertical diffusion . . . . .	69
6.3.2	Harmonic horizontal diffusion . . . . .	70
6.3.3	Biharmonic horizontal diffusion . . . . .	70
6.3.4	Isopycnal diffusion . . . . .	71
6.3.5	Gent and McWilliams parameterization . . . . .	72
6.3.6	Anisotropic Gent-McWilliams scheme . . . . .	73
6.4	Convective adjustment . . . . .	74
6.4.1	Algorithm . . . . .	74
6.4.2	Numerical procedure . . . . .	77
<b>Part III</b>	<b>Additional Processes</b>	<b>81</b>
<b>Chapter 7</b>	<b>Mixed layer model</b>	<b>83</b>
7.1	Mellor and Yamada's Turbulence Closure Model . . . . .	83
7.1.1	Turbulence Closure Model . . . . .	83

7.1.2	Level 2.5 Model . . . . .	85
7.1.3	Implementation . . . . .	88
7.2	Turbulent mixed layer model by Noh and Kim (1999) . . . . .	89
7.2.1	Fundamental equation . . . . .	89
7.2.2	Implementation . . . . .	91
7.3	K Profile Parameterization (KPP) . . . . .	91
7.3.1	Outline . . . . .	91
7.3.2	Monin-Obukhov similarity law . . . . .	92
7.3.3	Coefficients of vertical viscosity and diffusivity . . . . .	93
7.3.4	Coefficients of vertical viscosity and diffusion at the base of the mixed layer . . . . .	94
7.3.5	Thickness of the mixed layer . . . . .	95
7.3.6	Mixing due to shear instability . . . . .	95
7.3.7	Nonlocal Transport . . . . .	95
<b>Chapter 8 Sea surface fluxes</b>		<b>99</b>
8.1	Momentum flux (surface stress) . . . . .	99
8.1.1	Input of wind stress data . . . . .	100
8.1.2	Calculating wind stress using a bulk formula . . . . .	100
8.2	Sea surface forcing for temperature and salinity . . . . .	100
8.2.1	Temperature . . . . .	100
8.2.2	Salinity . . . . .	101
8.3	Heat flux . . . . .	102
8.3.1	Shortwave radiation flux . . . . .	102
8.3.2	Shortwave radiation flux based on chlorophyll concentration . . . . .	103
8.3.3	Longwave radiation flux . . . . .	103
8.3.4	Latent and sensible heat fluxes . . . . .	104
8.4	Freshwater flux . . . . .	105
8.4.1	Introduction . . . . .	105
8.4.2	Calculating freshwater flux . . . . .	105
8.5	Equivalent surface temperature and salinity fluxes for constant first layer volume . . . . .	106
8.6	Bulk transfer coefficient . . . . .	107
8.6.1	Formulation of bulk formula . . . . .	107
8.6.2	Kondo (1975) BULKKONDO2 . . . . .	110
8.6.3	Large and Yeager (2004) BULKNCAR . . . . .	112
8.6.4	Kara et al. (2002) BULKKARA . . . . .	113
8.6.5	Bulk coefficient over sea ice . . . . .	114
8.7	Work flow in MRI.COM . . . . .	114
8.7.1	Momentum flux . . . . .	114
8.7.2	Temperature (heat) flux . . . . .	115
8.7.3	Salinity and fresh water flux . . . . .	116
8.8	Remarks . . . . .	117
8.9	Appendix . . . . .	117
8.9.1	Unit of constants . . . . .	117
8.9.2	Unit of variables . . . . .	117

<b>Chapter 9</b>	<b>Sea ice</b>	<b>119</b>
9.1	Outline . . . . .	119
9.2	Thermodynamic processes . . . . .	121
9.2.1	Formation of new sea ice . . . . .	122
9.2.2	Air-ice interface . . . . .	122
9.2.3	Heat balance in the ice interior . . . . .	126
9.2.4	Ice-ocean interface . . . . .	126
9.2.5	Archimedes' Principle . . . . .	129
9.3	Remapping in thickness space . . . . .	130
9.4	Dynamics . . . . .	132
9.4.1	Momentum equation for ice pack . . . . .	132
9.4.2	Stresses at top and bottom . . . . .	132
9.4.3	Internal stress . . . . .	132
9.4.4	Boundary conditions . . . . .	134
9.4.5	Solution procedure . . . . .	134
9.5	Advection . . . . .	134
9.6	Ridging . . . . .	135
9.7	Discretization . . . . .	136
9.7.1	Advection (MPDATA) . . . . .	136
9.7.2	Momentum equation . . . . .	138
9.8	Technical issues . . . . .	140
9.8.1	Source codes . . . . .	140
9.8.2	Coupling with an atmospheric model . . . . .	141
9.8.3	Job parameters (namelist) . . . . .	141
9.9	Appendix . . . . .	144
9.9.1	Saturation water vapor pressure and latent heat . . . . .	144
9.9.2	Physical constant, parameters . . . . .	145
<b>Chapter 10</b>	<b>Bottom Boundary Layer (BBL)</b>	<b>147</b>
10.1	General description . . . . .	147
10.2	Grid arrangement . . . . .	147
10.3	Pressure gradient terms . . . . .	148
10.4	Eddy effects . . . . .	149
10.5	Usage . . . . .	150
10.6	Usage notes . . . . .	151
10.6.1	Limit of the area where BBL model should be applied . . . . .	151
10.6.2	Limits of the BBL . . . . .	151
10.6.3	Notes for the program code . . . . .	151
<b>Chapter 11</b>	<b>Biogeochemical model</b>	<b>153</b>
11.1	Inorganic carbon cycle and biological model . . . . .	153
11.2	Governing equations . . . . .	154
11.3	Carbon cycle component . . . . .	154
11.3.1	Air-sea gas exchange fluxes at the sea surface ( $J_g$ ) . . . . .	155



11.3.2	Dilution and concentration effects of evaporation and precipitation on DIC and Alk . . . .	157
11.4	Obata and Kitamura model . . . . .	158
11.5	NPZD model . . . . .	158
11.5.1	Description of each term . . . . .	159
11.5.2	Primary Production . . . . .	160
11.5.3	Variation of DIC and Alk due to biological activity . . . . .	161
11.6	Usage . . . . .	162
11.7	Program structure . . . . .	164
 <b>Part IV Miscellaneous</b>		<b>169</b>
 <b>Chapter 12 Basics of the finite difference method</b>		<b>171</b>
12.1	Diffusion equation . . . . .	171
12.2	Finite difference expressions for time derivatives . . . . .	172
12.3	Finite difference expression for space derivatives . . . . .	172
12.4	Finite differencing of advection-diffusion equation . . . . .	174
12.5	Implicit method for vertical diffusion equation . . . . .	174
12.5.1	A solution of tri-diagonal matrix . . . . .	175
 <b>Chapter 13 Tracer advection schemes</b>		<b>177</b>
13.1	QUICKEST for vertical advection . . . . .	177
13.2	UTOPIA for horizontal advection . . . . .	179
13.3	Second Order Moment (SOM) scheme . . . . .	185
13.3.1	Outline . . . . .	185
13.3.2	Calculating SOM advection in MRI.COM . . . . .	188
 <b>Chapter 14 Generalized orthogonal curvilinear coordinate grids</b>		<b>191</b>
14.1	Outline . . . . .	191
14.2	Generation of orthogonal coordinate system using conformal mapping . . . . .	192
14.3	Rotation of vector . . . . .	194
14.4	Mapping a quantity from geographic coordinates to transformed coordinates . . . . .	195
14.5	Vector operation and differentiation in a general orthogonal coordinate system . . . . .	197
 <b>Chapter 15 Nesting</b>		<b>199</b>
15.1	Feature . . . . .	199
15.2	Low-resolution model . . . . .	200
15.3	High-resolution model . . . . .	201
15.3.1	Required data . . . . .	201
15.3.2	Creating data . . . . .	201
15.4	Usage . . . . .	203
15.4.1	Compilation . . . . .	203
15.4.2	Running the models . . . . .	204
15.5	Program structure . . . . .	208

<b>Chapter 16</b>	<b>User's Guide</b>	<b>213</b>
16.1	Model setup . . . . .	213
16.1.1	Files needed for compilation . . . . .	214
16.1.2	Compilation of the model . . . . .	216
16.2	Preparation of input data files for execution . . . . .	216
16.2.1	Topographic and grid spacing data . . . . .	217
16.2.2	Climatological data . . . . .	219
16.2.3	Nudging (body forcing) data . . . . .	220
16.2.4	Atmospheric forcing data . . . . .	221
16.3	Execution . . . . .	224
16.4	Structure of output files . . . . .	230
16.4.1	Snapshot (restart) . . . . .	231
16.4.2	Averaged value (history) . . . . .	234
16.5	Appendix . . . . .	237
16.5.1	Model options . . . . .	237