

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。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。最近では、その適用可能範囲を沿岸の小スケール現象に広げつつある。

MRI.COM は 2000 年頃に開発が開始された。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より、基本型であるバージョン 1 が作成された。バージョン 2 (2000 年代前半) は、気象庁の現業システムへの供用を目的とした。このバージョンに対する日本語の詳細な解説書が 2005 年に出版され (Ishikawa et al., 2005)、本解説書の原型となっている。バージョン 3 は、気象研究所地球システムモデル (MRI-ESM1; Yukimoto et al., 2011) の海洋部分への供用を主な目的としたものである。気象研究所は MRI-ESM1 を用いて、国際的なプロジェクトである「結合モデル相互比較プロジェクト第 5 フェーズ (CMIP5)」に参加した。このため、解説書も英語で改訂された (Tsujino et al., 2010)。バージョン 4 は 2015 年にリリースされた。これは気象庁における現業海洋予測システム、並びに結合モデル相互比較プロジェクト第 6 フェーズ (CMIP6) 用の新地球システムモデル (MRI-ESM2) の海洋部分としての供用を意図したものである。このバージョンでは鉛直座標系の刷新 (いわゆる z^* coordinate 系 (Adcroft and Campin, 2004) の採用) も行われた。モデル開発の詳しい歴史については、MRI.COMv4 マニュアル (Tsujino et al., 2017) の「概要」を参照されたい。

本解説書は、2021 年にリリースされたバージョン 5 の解説書である。このバージョンには、2020 年から気象庁で現業運用されている「日本沿岸海況監視予測システム」のために施された様々な改善が含まれている。主要な改良点は以下のとおりである。

- Leapfrog Matsuno method から Leapfrog Adams Moulton method への時間積分スキームの刷新。これにより、保存性の向上、時間精度の向上、計算コストの削減が実現された。
- 様々な高速化の導入 - OpenMP 導入、MPI-IO の利用、ネスティング通信軽量化など。
- 安定性向上のためのオプション
- 大気モデル及び海水モデルとの結合の改善 - 気象庁現業大気モデルと整合するバルク式の導入や、海水プロセスの高度化など。
- モデリング研究のための解析機能の強化 - 等密度面解析、粒子追跡、netCDF 出力など
- その他、多くの物理スキームの導入や、精度向上のための調整など多数の修正

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に関する知見が簡潔にまとめられている。

開発管理

MRI.COM は開発が始まってから 20 年が経過し、気象研究所と気象庁の様々な部門で利用されるようになってくるとともに、ソースコードの大規模化・複雑化が進んだ。このような状況の下でも、バグの混入や意図しない影響を抑えながらモデルを効率的に開発するため、現代的なソフトウェア開発で用いられるツールと手法を取り入れ、開発管理を

行っている。例えば、ソースコードのバージョン管理ツール「Git」が導入され、複数の開発者が複数の課題に同時に取り組む並行開発が可能になった。プロジェクト管理システム「Redmine」の導入により、開発状況は開発者全員で共有されている。これらのツールを基盤として開発チーム内の情報共有とコードレビューが日常的に行われており、コード品質の維持に寄与している。我々の開発管理の詳細については、[Sakamoto et al. \(2018\)](#) を参照せよ。

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、及び単位格子の面積や体積計算方法の解説を第 3 章で行う。時間積分の手法を第 4 章で説明する。

第 II 部では、診断式について説明を行う。第 5 章は海水の状態方程式の定義を示す。第 6 章は単位格子に対する連続方程式の差分式の定義を示す。

第 III 部ではモデルの運動方程式の解説を行う。運動方程式の順圧成分と傾圧成分の解法を第 7 章と第 8 章でそれぞれ述べる。

第 IV 部ではトレーサーに対する移流拡散方程式の解法を述べる。第 9 章で方程式の概要をまとめたあと、トレーサー移流スキームについて第 10 章で解説する。サブグリッドスケールの水平方向と鉛直方向の混合に対するパラメタリゼーションについて、第 11 章および第 12 章でそれぞれ解説する。第 13 章はトレーサーパッケージの使用法を説明する。

第 V 部では境界プロセスの解説を行う。海面フラックスの取り扱いを第 14 章で、海面混合層内の小スケール過程を表現する「乱流クロージャーモデル」を第 15 章で説明する。海底境界層モデルを第 16 章で説明する。

第 VI 部では他モデルとの結合について概説する。第 17 章では海水モデルとの、第 18 章では潮汐モデルとの結合を解説する。生物地球化学モデルを第 19 章で、クロロフルオロカーボンなどいくつかのパッシブトレーサー・モデルを第 20 章で解説する。これらのモデルのソースコードは MRI.COM 内に同梱され、一体となって開発されている。第 21 章では大気海洋結合モデル実験時の、MRI.COM の設定方法を記述する。最後に、第 22 章では、複数の MRI.COM モデルを結合した「入れ子モデル」の作成と使用法について解説する。

第 VII 部では上記に分類できない項目について取り上げる。差分解法の基本について第 23 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 24 章で、最後にモデルの作成と実行方法の解説を第 25 章で行う。

各章はほぼ他の章から独立している。そのため、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、参考にしていただきたい。

本解説書では、プログラムコードと直接に対応した式の導出を心がけた。一方で、プログラムコード自体に関する記述は最小限にとどめている。コーディングに関する説明については、日本語の web サイト <https://mri-ocean.github.io/mricom/> を参照してほしい。本書の内容は、2021 年リリースの version 5.0 に基本的に即している。ただし、version 5.1 以降に開発された内容も一部含まれていることに注意してほしい。

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願いたい。