

**Meteorological Research Institute
Community Ocean Model
(MRI.COM)
Manual**

**気象研究所共用海洋モデル
(MRI.COM)
解説**

**Ichiro Ishikawa, Hiroyuki Tsujino, Mikitoshi Hirabara,
Hideyuki Nakano, Tamaki Yasuda, and Hiroshi Ishizaki**

石川一郎・辻野博之・平原幹俊・中野英之・安田珠幾・石崎廣

序文

地球温暖化、気候・海洋変動、異常気象等、今日の喫緊の課題に対して、大気のみでなく海洋の重要性が一層認識されてきている。海洋の基礎研究や情報提供技術の開発は着実かつ精力的に進められているが、周知のように、海洋データは時間的・空間的に偏在しており絶対量も不足している。このため、海洋の現況把握、変動メカニズムの解明、将来予測には数値モデルが中核的な研究手段の一つとなりつつある。

気象研究所海洋研究部では、研究および気象業務における利用のために、長年個別に開発を進めてきた海洋大循環モデルを、「気象研究所共用海洋モデル」(MRI Community Ocean Model、略称 MRI.COM)として一つの汎用モデルシステムにまとめ、そのマニュアルを今回出版する運びとなった。

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小長俊二氏(当時海洋研究部)により、経常研究「海況の研究：黒潮変動の数値実験」(1979~1982年度)において開始された。当初は簡単な順圧モデルから始められたが、やがて、米国 UCLA で開発されたプリミティブ方程式系モデルが時岡達志氏(当時予報研究部)によって導入された。一方、海洋研究部に赴任(1981年)した遠藤昌宏氏により、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、目的に応じて利用に供されてきた。

UCLA 系列モデルは改良を加えられ、水平の高解像度実験や全球深層循環実験等に使用された。その特徴は、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った。一方、東大系列モデルは改良され、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実験に幅広く用いられた。その特徴は、実験目的のために初期の段階から、海面混合層や等密度面拡散、海氷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った。現在、エルニーニョ予報等で使用されている「海洋データ同化システム(ODAS)」と「空海」および海況予報に使用されている「海洋総合解析システム(COMPASS-K)」の海洋モデル部分は東大系列モデルから派生したものである。

1990年代、エルニーニョ現象再現のための初めての気候・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、大気・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、モデル開発の効率化、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。

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。

本マニュアルに記載した内容は、気候、海洋、環境の業務に従事する研究・技術職員、さらには海洋モデルに興味を持っている職員の方々のニーズに応えられるものであると考えている。執筆は各章に相当する開発担当者が行った。このため、全体としての表記の統一性に欠けるきらいもあるが、各執筆者の開発意図を尊重し、敢えて統一は図らなかった。記述内容は現時点での最新の内容としたが、数値モデル研究は常に新しい知見や開発が成されており、本書の記述が永遠不変なものであるとは思っていない。皆様の忌憚のないご意見、ご提案により、よりよいものに改訂していきたいと思っている。

終わりに、本マニュアル作成を担当した関係職員の努力と、長年にわたる海洋モデル開発関係者に深く感謝の意を表す。今後、本モデルシステムとマニュアルが気象庁における研究活動と気候、海洋、環境関連業務に大きく貢献することを祈念している。

海洋研究部部長
大山 準一

目 次

序 章	1
第 1 章 支配方程式 (辻野・中野)	5
1.1 定式化	5
1.1.1 一般直交曲線座標系でのベクトル・微分演算・運動方程式	5
1.1.2 基本方程式 (海洋モデルにおける近似)	7
1.1.3 境界条件	9
1.1.4 加速法	11
1.2 解く手続き	12
1.2.1 運動方程式	12
1.2.2 水温 (温位)・塩分方程式	16
第 2 章 微分方程式の差分法の基礎 (石川)	23
2.1 拡散方程式の例	23
2.2 時間差分の方法	24
2.3 空間差分の方法 (移流方程式)	24
2.4 移流拡散方程式の差分	26
2.5 鉛直拡散方程式の陰解法	26
2.5.1 3重対角行列の解法	27
第 3 章 空間格子点配置と連続式 (石崎・辻野)	29
3.1 水平格子点配置	29
3.2 鉛直格子点配置	29
3.3 連続式; サブルーチン <code>cont</code>	32
3.4 面積計算	35
第 4 章 順圧渦度方程式 (石川)	39
4.1 非斉次解; サブルーチン <code>rlxitr</code>	39
4.2 島の取り扱い; サブルーチン <code>relax</code>	41
4.3 並列化の問題	41
第 5 章 自由表面方程式 (辻野・中野); サブルーチン <code>surfce</code>	45
5.1 支配方程式	46
5.2 時間積分について	46
5.3 一層目の各物理量の予報	49
5.3.1 標準スキーム	49
5.3.2 局所的な保存を考慮するスキーム (オプション <code>FSMOM</code>)	50
5.4 σ -layer モデルの導入	50
5.4.1 σ -layer 導入の準備	50
5.4.2 運動方程式、連続の式、トレーサーの予報式	51
5.4.3 σ -layer 間でのトレーサーの再配分	53

第 6 章	運動方程式 [傾圧成分](石崎・平原); サブルーチン clinic	55
6.1	移流項	55
6.1.1	鉛直流速	55
6.1.2	水平流速	58
6.2	粘性項	64
6.2.1	水平粘性	64
6.2.2	水平粘性における Smagorinsky のパラメタリゼーション	65
6.2.3	粘性項の差分	65
6.2.4	鉛直粘性	66
6.2.5	底面摩擦	68
第 7 章	水温・塩分方程式 (石川・石崎); サブルーチン tracer	69
7.1	フラックス形式	69
7.2	移流	69
7.3	拡散	73
7.3.1	Laplacian 型水平拡散	73
7.3.2	biharmonic 型水平拡散	73
7.3.3	鉛直拡散	73
7.3.4	等密度面拡散	74
7.3.5	Gent and McWilliams のパラメタリゼーション	75
7.3.6	等密度面拡散の差分化の問題点	76
7.4	対流調節; サブルーチン cnvajs	78
7.4.1	アルゴリズム	79
7.4.2	作業手順	80
第 8 章	混合層モデル (辻野・安田)	85
8.1	Mellor and Yamada's Turbulence Closure Model; サブルーチン mysl25	85
8.1.1	乱流モデル	85
8.1.2	The level-2.5 Model	87
8.1.3	解く手続き	89
8.2	Noh and Kim (1999) の乱流混合層モデル; サブルーチン nkoblm	90
8.2.1	基本方程式	90
8.2.2	解く手続き	91
8.3	K Profile Parameterization (KPP); サブルーチン kpp-coff	92
8.3.1	概要	92
8.3.2	Monin-Obukhov の相似則	92
8.3.3	鉛直粘性拡散係数	93
8.3.4	混合層基底での鉛直粘性拡散係数	96
8.3.5	混合層厚	96
8.3.6	Nonlocal 輸送	97
第 9 章	海面フラックス (安田・辻野); サブルーチン mkflux	101
9.1	海面風応力	101
9.1.1	MRI.COM における計算手続き	101
9.2	海面熱フラックス	101

9.2.1	はじめに	101
9.2.2	熱フラックス型 (OGCM_HFLUX)	102
9.2.3	海面水温緩和 (default)	105
9.2.4	MRI.COM における計算手続き	105
9.3	海面淡水フラックス	106
9.3.1	はじめに	106
9.3.2	淡水フラックス型 (OGCM_WFLUX)	106
9.3.3	海面塩分緩和 (default)	107
9.3.4	MRI.COM における計算手続き	107
9.4	おわりに	108
第 10 章	海氷 (辻野); サブルーチン simain	111
10.1	海氷モデルの概要	111
10.1.1	概要	111
10.1.2	氷塊に対する運動方程式	112
10.1.3	質量保存の式	112
10.1.4	被覆率に対する式	113
10.2	熱力学	113
10.2.1	海氷の生成	113
10.2.2	海氷-大気境界	113
10.2.3	海氷-海洋境界面	116
10.2.4	frazil ice の取り扱い	119
10.3	力学	120
10.3.1	氷塊に対する運動方程式再掲	120
10.3.2	上下の境界における応力	120
10.3.3	海氷の内部応力	120
10.3.4	境界条件	122
10.3.5	解く手続き	122
10.4	差分法	123
10.4.1	質量保存式、被覆率に対する式	123
10.4.2	運動方程式	124
10.5	海氷モデル使用時のための情報や注意点	125
10.5.1	技術的なこと	125
10.5.2	海氷部分を解くプログラム	125
第 11 章	実行手順 (石川・辻野)	131
11.1	読み込み用ファイルの準備	131
11.1.1	地形データ	131
11.1.2	気候値データ	134
11.1.3	body forcing データ	134
11.1.4	順圧渦度方程式用データ	136
11.1.5	大気外力データ	136
11.2	コンパイル用スクリプトファイルの準備	138
11.3	実行用ファイルの準備	141

11.4 実行	145
付録 A 海底境界層モデル [Bottom Boundary Layer (BBL)](中野)	149
A.1 概要	149
A.2 Grid 配置	149
A.3 圧力勾配の計算	150
A.4 渦の効果	151
A.5 BBL の使い方	152
A.6 使用上の注意	153
A.6.1 適用範囲の制限	153
A.6.2 地形、初期値の制限	153
A.6.3 鉛直移流	153
A.7 補足	153
A.7.1 子午面流線関数の書き方	153
A.7.2 コード上の注意	154
付録 B 高精度移流スキーム (石川)	155
B.1 鉛直移流スキーム QUICKEST	155
B.2 水平移流スキーム UTOPIA	157
付録 C 一般直交曲線座標格子の使用 (平原)	165
C.1 概要	165
C.2 モデルの極を任意の位置に移動して直交座標系を生成する	165
C.3 ベクトルの回転角	167
C.4 地理座標格子からモデル座標へ物理量を移す	168
付録 D ネスティング (辻野)	169
D.1 特徴	169
D.2 親モデル	169
D.3 子モデル	170
D.3.1 用意するデータ	170
D.3.2 作成	171
D.4 実行	172
D.4.1 コンパイル	172
D.4.2 実行	173
D.5 サブプログラムの関係	175
付録 E 変数名解説	177

序章

はじめに

本技術報告は、気象研究所共用海洋モデル (Meteorological Research Institute Community Ocean Model; MRI.COM) の解説である。MRI.COM は、気象研究所で開発・維持されてきた海洋大循環モデルで、「大循環モデル」の文字通り、大スケールの海洋現象の研究や大気-海洋結合モデルの海洋部分などに利用されてきた。このような事情から、本モデルの利用者は気象研究所の海洋関係の研究者に限られる傾向であったが、近年では、気象庁における気候や海流などの予報現業に用いることを想定した開発も求められるようになり、今後利用者の大幅な増加が見込まれることから、解説書を作成することとなった。本章では、海洋大循環モデルの概説を行う。より詳しく、海洋大循環モデルについて知りたい場合には、Griffies (2004), Kantha and Clayson(2000) などを参照するとよい。前者は非常に詳しく、後者は海洋大循環モデルの範疇外である潮汐モデルなどを含めて全体を概観するのに適している。

海洋大循環モデルの適用範囲

海洋大循環モデル (Ocean General Circulation Model, OGCM) は、海洋で生じる現象の中でも、比較的大スケールの現象、世界規模の熱塩循環や、大洋スケールの水平循環および中規模渦を主に扱うことを想定している (図 1)。それよりも小さな現象はパラメタリゼーションという形で間接的に取り込まれることになる。将来的には、潮汐、鉛直対流、などの現象を直接表現できるように、適用範囲は時間及び空間スケールの小さい領域に拡張されていくであろうが、現在の所それらは直接のターゲットではない。中規模渦から熱塩循環までをカバーできるといっても、現在のコンピュータ資源では中規模渦を十分解像する解像度 (数 km) で、モデル内ではほぼ定常な熱塩循環が形成するまで (最低でも数百年、理想的には千年以上) 積分を行うことは困難である。そのため、全球レベルの現象を長い時間かけて積分する場合には解像度を粗くした (数百 km) 気候モデルを用い、中規模渦を含む現象を表現したい場合には、領域を太平洋などの海盆レベルに限定し、数十年程度の時間積分する渦解像モデルを用いることが普通である (西暦 2004 年現在)。地球シミュレーターなどの超大型スーパーコンピュータを用いて、中規模渦を表現できる解像度で数百年計算するプロジェクトは存在するものの、手軽に行える計算ではない。

海洋大循環モデルの種類

海洋研究者や、気候や海洋の予報現業等に用いられている、海洋大循環モデルはいずれも基本的にはほぼ同等の方程式系を数値的に解くものである。基本となる方程式は、流体の運動方程式 (ブシネスク近似、静水圧平衡を仮定)、水温・塩分の移流・拡散方程式、海水の状態方程式、質量保存式 (非発散を仮定) (primitive equations: 第 1 章参照) である。必要に応じて、付加的な物理過程 (混合層、海氷、海底境界層など) を解く方程式が加えられることになる。大部分の海洋モデルは、方程式の空間微分に差分式を用いて表現する。大気モデルで広く使われるスペクトルを用いる方法は、陸地の取り扱いに困難があるため、汎用的な海洋モデルには使われない。

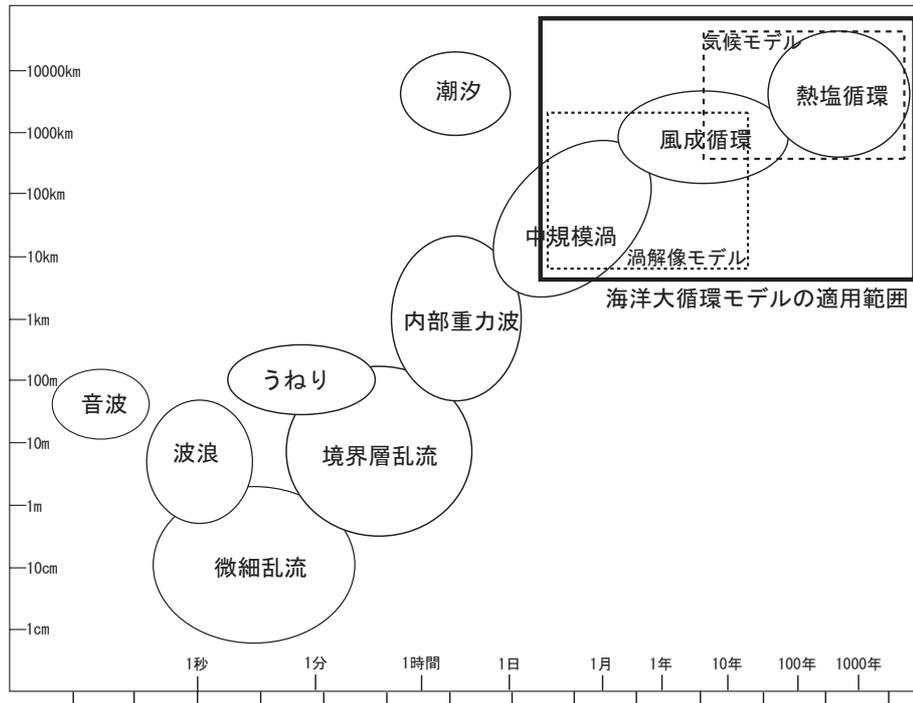


図 1: 海洋中の様々な現象および海洋大循環モデルの適用範囲。海洋中の様々な現象の図の作成には von Storch and Zwiers (2001) を参考にした。

鉛直座標の採り方は海洋大循環モデルで大きく異なり、これが海洋大循環を類別することになる。等水深面をとる z -座標モデル、海面から海底までの距離でスケールした座標系を用いる σ -座標モデル、そして、等ポテンシャル密度面をとる ρ -座標モデルの三つに大別される。そして、近年ではそれぞれの利点をうまく組み合わせた hybrid-鉛直座標モデルが開発されてきている。

z -座標モデル

z -座標モデルは、米国地球流体研究所 (GFDL) で 1960 年代に Kirk Bryan 博士らによって開発された、世界最初の海洋大循環モデルである。MRI.COM もこのモデルの範疇にある。海洋では、ブジネスク近似、静水圧近似がよくなりつつため、圧力は第 0 近似では深さの関数で表される性質を利用している。地形も最も直感的に取り込むことができ、結果の描画も容易であり、汎用性の高さから世界で最も広く用いられており、いち早く大気-海洋結合モデルにも利用されている。代表的なものとして、現在は GFDL-MOM (Modular Ocean Model) がある。MRI.COM の他、東京大学気候システム研究センターの COCO、九州大学応用力学研究所の RIAMOM などこの系統のモデルである。欠点として、海底がごく浅いところでは、海底までを少ない格子点でしか表現できず、海岸や海底付近で生じる現象の再現性が期待できないこと、及び、等密度線が水平面を横切る場合には、水塊の性質が数値的に変質しやすいことなどが挙げられる。前者、後者の欠点の改善を目指したものが、それぞれ、 σ -座標モデル、 ρ -座標モデルである。ただし、無条件で改善されるわけではなく、 z -座標モデルでは現れなかった問題が生じている。

-座標モデル

-座標モデルは、George Mellor 博士らにより、プリンストン大学において開発された。このモデルは急峻な海底地形をもつ領域を対象にしても、鉛直格子点数が変わらないため、沿岸用モデルとして広く利用されている。しかしながら、急峻な海底地形をもつ領域における、圧力の水平勾配の表現に問題がある。また、浅い大陸棚の上の暖水と、深層の冷水がモデル上の同一の鉛直レベルにある場合、両者が非現実的に混合しやすいなどという問題があり、大西洋全体など大洋を対象とした大循環モデルとしては適していない。

-座標モデル

-座標モデルは、Rainer Bleck 博士らにより、米国マイアミ大学において開発された。これは、海洋内部においては、海水はポテンシャル密度をほぼ保存して移動するという性質に基づいて開発されたもので、海洋内部の水塊の維持・形成に非常に優れている。海洋物理では、理論は -座標モデルで組み立てることが多いので、理論とモデルの対応が良いのも大きな利点である。問題点としては、各層の密度を予め決めてしまっているため、年ごとに形成される代表的な水塊の密度が異なる場合や、大気-海洋結合モデルなどにおいて、現在と気候が異なり、代表的な水塊の密度が異なる海洋をシミュレートする場合の利用にはあまり適していないと考えられる。

海洋モデルの今後

海洋物理学的興味などから、理想化された設定の下で用いられることもあるが、現実的な設定の下で動かすことができるということが、海洋大循環モデルの大前提である。そのためには、複雑な海底地形及び、海面での様々な外力の影響、海面付近の特殊な混合層を表現できる必要がある。

開発初期のコンピュータ資源の少ない時代では、粗い解像度(300-400km)ながら海陸分布を表現でき、風応力、水温塩分の効果を簡便な方法で取り込むことができるモデルが開発された。以後、モデルは、コンピューター流体力学から、特に水温塩分方程式の移流項の表現に、より洗練された数値スキームを取り込んでいった。同時に、混合層過程、等密度面拡散など複雑なパラメタリゼーションを組み込み、より現実的な海洋のシミュレーションが可能になってきている。高解像度化に伴い、将来的には、潮汐、鉛直対流、などの現象を直接表現できるように、拡張されることが予想される。

本解説書の構成

第1章で定式化を行い、第2章では数値流体力学の差分化についての基礎を述べる。第3章では第1章に現れた微分方程式の具体的な差分化を行うための格子配置を解説する。第4章から第7章までは海洋大循環モデルにおける解く手続きを、それぞれの構成要素にわけて解説する。第4,5章ではそれぞれ、順圧の運動方程式を解く二つの方法、順圧渦度方程式を解く方法(第4章)、自由表面方程式を解く方法(第5章)について解説する。第6章では傾圧の運動方程式を解く方法について、第7章では水温・塩分の方程式を解く方法について述べる。第8章から第10章では、海面付近の物理過程に関連する事項について解説する。この中のいくつかは必ずしも海洋大循環モデルを動かすのに必要ではないが、現実的な海洋を再現するのに必要不可欠である。第8章では、混合層を、第9章では海面フラックスの処理を第10章では、海水を解説する。実際の実行手順は第11章に述べてある。とりあえず使ってみたい場合、どのような準備が必要かを知りたい場合には、最初にこの章を参照することになる。さらに、海洋モデルの主要部分を構成するものではないものの、まとまった説明を要するスキーム、及び本文中の流れから逸脱する個々の事例について付録

で解説する。最後に、プログラム中の変数名の中で、Fortran 90 の Module で定義されているものについて、単位、モデル格子点の座標も含めて解説を載せた。この解説は特に習得段階で役に経つものと思われる。

モデル内における単位系は理想的には MKS で統一することが望ましいが、歴史的事情により、海洋大循環モデルでは一般的に CGS 単位系を使う。ただし、海氷モデルおよび一部のバルクモデルでは MKS を使い、海洋モデルに値を渡すときに単位変換を行っている。詳しい単位系については各章で述べる。

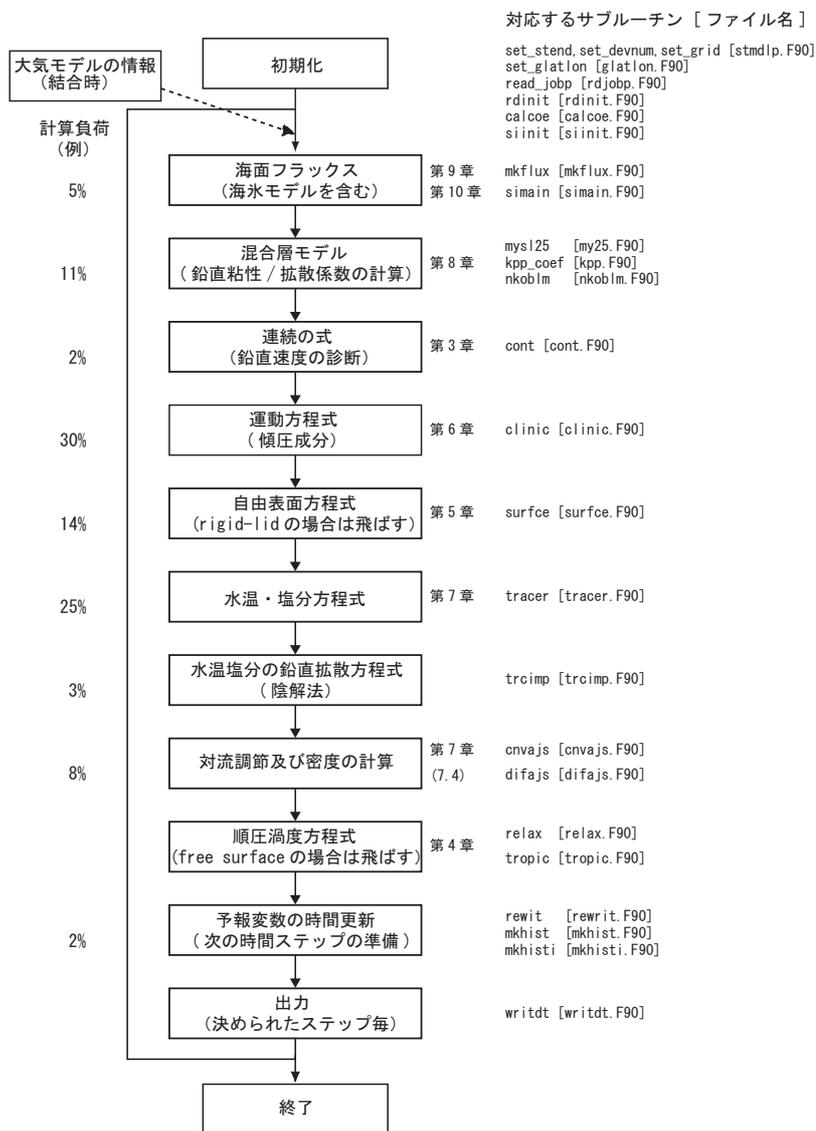


図 2: MRI.COM における解く手続き

References

- Griffies, M. 2004, Fundamentals of ocean climate models, Princeton University Press, 518p.
- Kantha, L. and C. Clayson 2000: Numerical models of ocean and oceanic processes, *International Geophysics Series*, Volume 66, 940p.
- von Storch, H. and F. Zwiers 2004, Statistical Analysis in climate research, Cambridge university press, 484p.