

---

## 特集「新海洋データ同化システム (MOVE/MRI.COM) による海洋情報の高度化」

---

### 気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM) 最新版 (バージョン 3) と実施中の実験の紹介\*

辻野 博之 \*\*

#### 要 旨

気象研究所共用海洋モデルの最新版 (バージョン 3) と、これを用いて実施中、あるいは実施予定の実験の概要を紹介する。最新版では、気象庁の現業用 (MOVE/MRI.COM) に使用されたバージョン (バージョン 2) に対し、別途紹介する生物地球化学モデルに加えて次の新たなスキームの導入を行った。

- トレーサーに対する、数値拡散の少ない移流スキーム Second Order Moment
- 海氷モデルに対する、高精度の移流スキーム、熱容量、厚さによるカテゴリ分け

さらに、上記の移流スキームと整合性を持たせるために主要変数を定義する鉛直レベルを各鉛直層の中心に変更した。長期間のモデル積分による性能試験において、移流スキームの更新により日本海表層の高温バイアスの改善、海氷モデルの更新により北極海やオホーツク海の海氷分布に良好な再現性が確認された。これらに加え、文部科学省「21 世紀気候変動予測革新プログラム」の中で行っている高解像度北太平洋モデルの計算結果、及び気象研究所の経常研究で今後実施予定の実験の概要を紹介する。

#### 1. はじめに

気象研究所海洋研究部では、海洋の平均状態形成や変動メカニズムの解明に関する研究目的のみならず、気象庁における現業運用や、大気-海洋結合モデルによる温暖化予測、及びエルニーニョ・季節予測研究などにも資する汎用性を持つ海洋モデル、気象研究所共用海洋モデル (MRI.COM)

の開発を行っている。気象庁の現行の現業システム (MOVE/MRI.COM ; 石崎ら, 2009) 用に開発したバージョン (石川ら, 2005) の作成後も開発を継続しており、最近では、特に気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第 5 次評価報告書への貢献を目指した、気象研究所における気候変動予測用地球システムモデル (MRI-ESM1 ; Yukimoto

---

\* Introduction of the latest version (version 3) of Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) and on-going experiments

\*\* Hiroyuki Tsujino

Oceanographic Research Department, Meteorological Research Institute (気象研究所・海洋研究部)

*et al.*, 2010) への供用を目的としたモデルの高度化を行ってきた。本報告では、これらの高度化のうち、別途中野 (2010) より報告のある、生物地球化学部分を除いた項目について、概要の紹介を行う。加えて、最近実施している高解像度モデルの実験や、今後行う予定の実験について紹介を行う。

## 2. バージョン 3 の概要と主な改善点

バージョン 2 (石川ら, 2005) 以降実施した主な開発項目は以下のとおりである。

- 移流スキーム Second Order Moment (Prather 1986)
- 海水モデルに対する、高精度の移流スキーム、熱容量、厚さによるカテゴリ分けの導入
- 平均場の鉛直粘性・拡散スキームと整合性を持つ、乱流混合層スキーム
- 植物・動物プランクトンを陽に表現する生物地球化学モデル
- トレーサーの時間発展を物理場 (水温・塩分・流速場) とは別途 (あらかじめ計算された物理場をファイルから読み込んで) 計算可能にする
- オンライン、双方向ネスティング
- 入出力関連、特に履歴出力の改訂

なお、上記の移流スキームと整合性を持たせるために主要変数を定義する鉛直レベルを各鉛直層の midpoint に変更した。なお、これら新スキームを導入したバージョンを version 3 として性能試験、及び英文マニュアル作成を行っている (Tsuji no *et al.*, 2009)。各種スキームの詳細については英文マニュアルを参照していただきたい。

長期間のモデル積分による性能試験において、移流スキームの更新による日本海の表層の高温バイアスの改善、新海氷スキームの使用時における北極海やオホーツク海の海水分布に良好な再現性が確認された。これらについて、以下に紹介する。

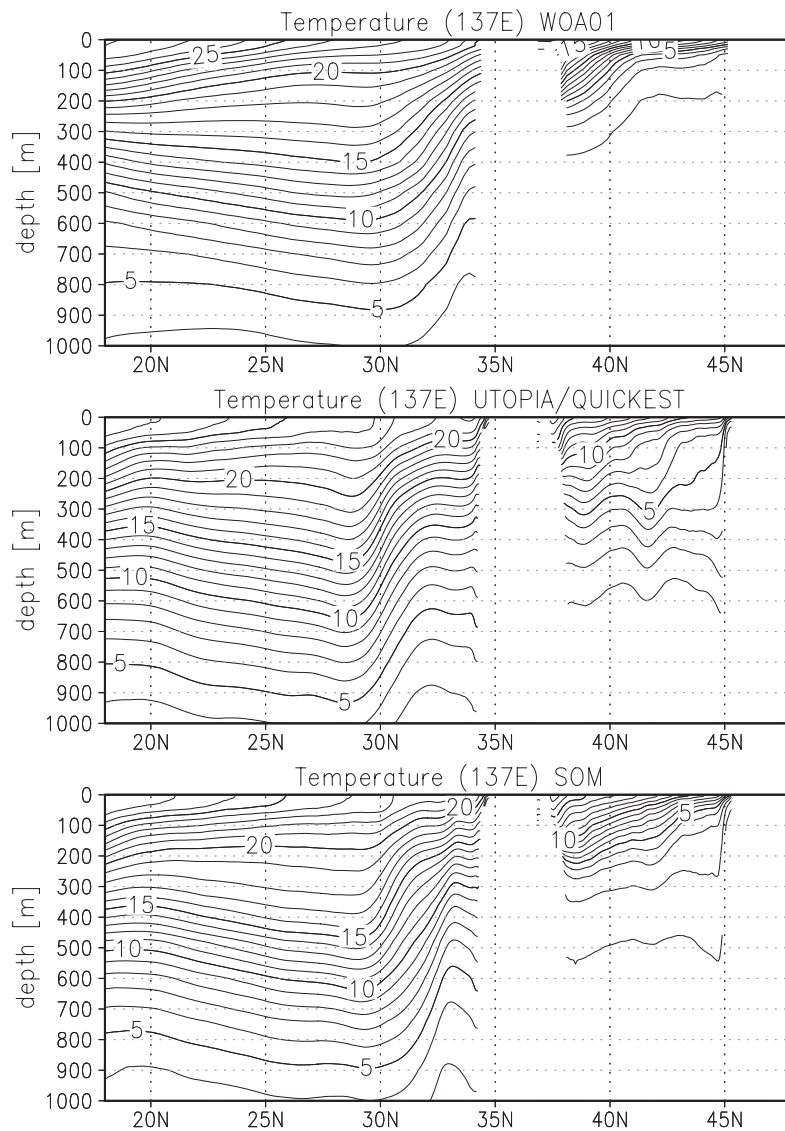
### 2.1 トレーサー移流スキーム : Second Order Moment

運動方程式やトレーサーの移流拡散方程式を有限差分法で解くにあたっては、移流項が著しい分散性や拡散性を示すため、これらを克服して安

定的に精度良い解を得るための努力が長年続けられてきている。MRI.COM では、運動方程式には Ishizaki and Motoi (1999) による、エネルギーと準エントロフィーを保存するスキームを、トレーサーに対しては、水平方向に Uniformly Third-Order Polynomial Interpolation Algorithm (UTOPIA ; Leonard *et al.*, 1993)、鉛直方向に Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics with Estimated Streaming Terms (QUICKEST ; Leonard, 1979) を用いてきた。中規模渦を解像するモデルにおいては、エネルギーだけでなくエントロフィーを保存することが重要であるため、現状の運動量移流スキームはおおむね満足できるものである。それに対し、従来使用してきた、格子幅の 3 次の精度を持つ UTOPIA や QUICKEST など、奇数次の精度を持つ移流スキームには、多くの場合数値拡散が含まれ (拡散係数は流速と格子幅に比例して大きくなる)、特に渦を解像するモデルでは解像しないモデルよりも流速が一桁大きくなるため、数値拡散が大きくなり、計算の精度に問題が生じていた。

トレーサーの輸送量を多数の格子点の値を用いて精度良く求める従来のスキームと異なり、Second order moment スキーム (Prather, 1986) は、各トレーサーに対し、格子内部の分布を互いに直交する 2 次関数で表現し、これらを簡単な上流差分スキームで移流させる。3 次元格子の場合、トレーサーごとに 10 個の格子内分布表現関数が生じるため、計算時間、記憶容量ともに膨大となるが、昨今の計算機技術の進歩により、このスキームを用いた計算も可能となってきた。

第 1 図は、従来のトレーサー移流スキームと Second Order Moment スキームを用いた渦解像モデル (第 3 節で紹介する水平解像度 6km の北西太平洋領域モデル) の結果の東経 137 度の水温南北断面における比較である。Second Order Moment スキームでは、水温 17°C から 20°C に見られる亜熱帯モード水のコア水温構造がよりはっきり現れること、日本海の上層 100 ~ 1000m に見られた高温バイアスが、著しく改善されることが分かる。



第1図 トレーサーの移流スキームの違いによる、水温構造の相違

東経137度に沿った水温の緯度-深度断面(単位℃).

(上) World Ocean Atlas 2001 (Conkright *et al.*, 2002) の年平均気候値.

(中) 従来の移流スキーム(水平 UTOPIA, 鉛直 QUICKEST) を用いたケース.

(下) 新たに導入したスキーム, Second Order Moment を用いたケース.

いずれの図も同じ初期値から同じ境界条件で計算を行い, 7年目から11年目の5年間平均値.

## 2.2 海氷スキームの高度化

従来の海氷モデルは, Mellor and Kantha (1989) に対して海氷に対し潜熱は持つが熱容量を無視するなどの簡略化を施した熱力学過程, Hunke and Dukowicz (1997; 2002) による弾粘塑性体 (EVP) レオロジーを使用した力学過程, 中央差分による移流と拡散によって構成されていた. このモデル

は気象研究所で実施された IPCC 第4次評価報告書向けの実験をはじめとする各種の温暖化予測実験, MOVE / MRI.COM-WNP に組み込まれるなど, 一定の成果を上げてきた.

一方, 2007年夏季に北極海で見られた記録的な海氷面積の減少など, 地球規模の気候変動に関連した海氷の変動は大きな注目を集めつつあり,

今後の気候変動予測モデルにおいては海水分布の再現性の向上が従来以上に求められることが想定される。また、北海道のオホーツク海沿岸で冬季に流氷が接岸する我が国においては、流氷の挙動によって経済社会生活が影響を受けるため、これらの短期的変動の予測に耐え得るような海水モデルの開発も重要な課題である。今回全般的な高度化を行ったため、その内容と現在気候再現実験におけるふるまいについて紹介を行う。

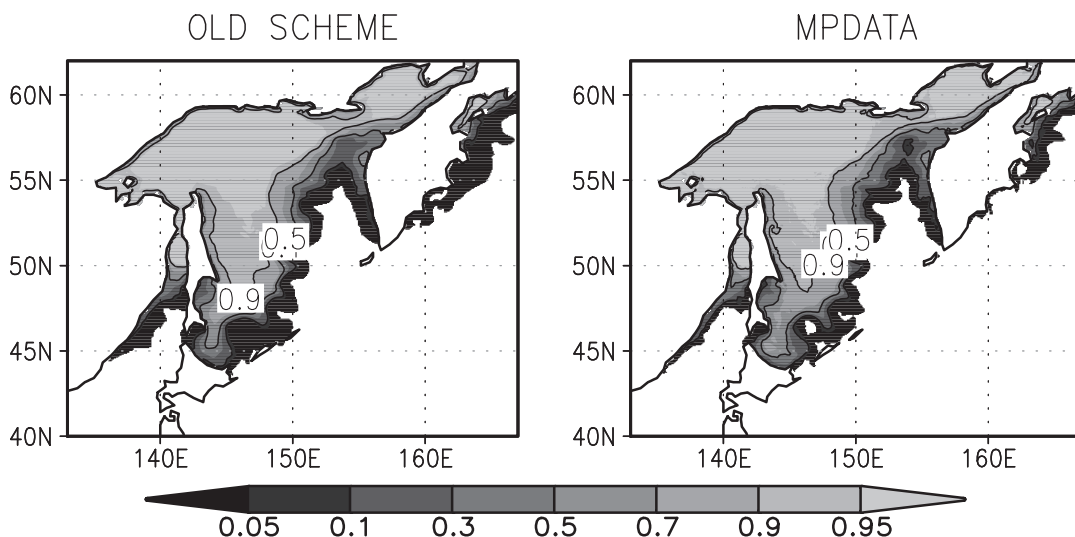
今回行った高度化は、厚さカテゴリー、海水どうし乗り上げ(リッジング)、海水の熱容量(1層)、高精度の移流スキーム Multidimensional Positive Definite Advection Transport Algorithm (MPDATA ; Smolarkiewicz, 1984) の導入、及びアルベドスキームの変更などである。今回の変更の多くは、米国ロスアラモス研究所の海水モデル CICE (Hunke and Lipscomb, 2006) を参考にした。厚さのカテゴリーは5つとし、0.6, 1.4, 2.4, 3.6[m] で区切っている。

海洋研究部では、北極域とオホーツク海における現在気候再現性を指標として、スキームの性能試験を行っている。北極海については今後の温暖化予測実験等に使用される全球モデルを用いて

いる。解像度は東西 1.0 度、南北 0.5 度で、北極の特異点を回避するために一般直交曲線座標を組み合わせたトライポラー (tripolar ; 三極) 座標を採用している。詳しくは気象研究所の地球システムモデルについて解説した技術報告 (Yukimoto *et al.*, 2010) を参照のこと。オホーツク海用には日本近海の解像度を水平約 10 km とした領域モデル (MOVE/MRI.COM-WNP とほぼ同等の構成) を使用している。これらのモデルを Common Ocean-ice Reference Experiments (CORE ; Griffies *et al.*, 2009 ; Large and Yeager, 2008) の normal year forcing に従って駆動した。CORE については、第 4 節で改めて紹介するのでそちらを参照していただきたい。

第 2 図に示すように、移流スキームに数値拡散が小さく拡散スキームを併用する必要のない、MPDATA スキームを用いることにより、オホーツク海では、北海道のオホーツク沿岸部への海水の接岸がより正確に表現されるようになったり、氷縁域において海流を反映した分布が見られるようになったりするなどの改善が見られた。

第 3 図には、全球モデルにおいて 1958 年から 2006 年まで CORE によって駆動して得られた



第 2 図 オホーツク海における、3 月の平均海水密接度分布の海水移流スキームによる相違  
 (左) 従来のスキーム (中央差分スキームと拡散スキームの併用) を用いたケース。  
 (右) 新たに導入したスキーム, MPDATA を用いたケース。

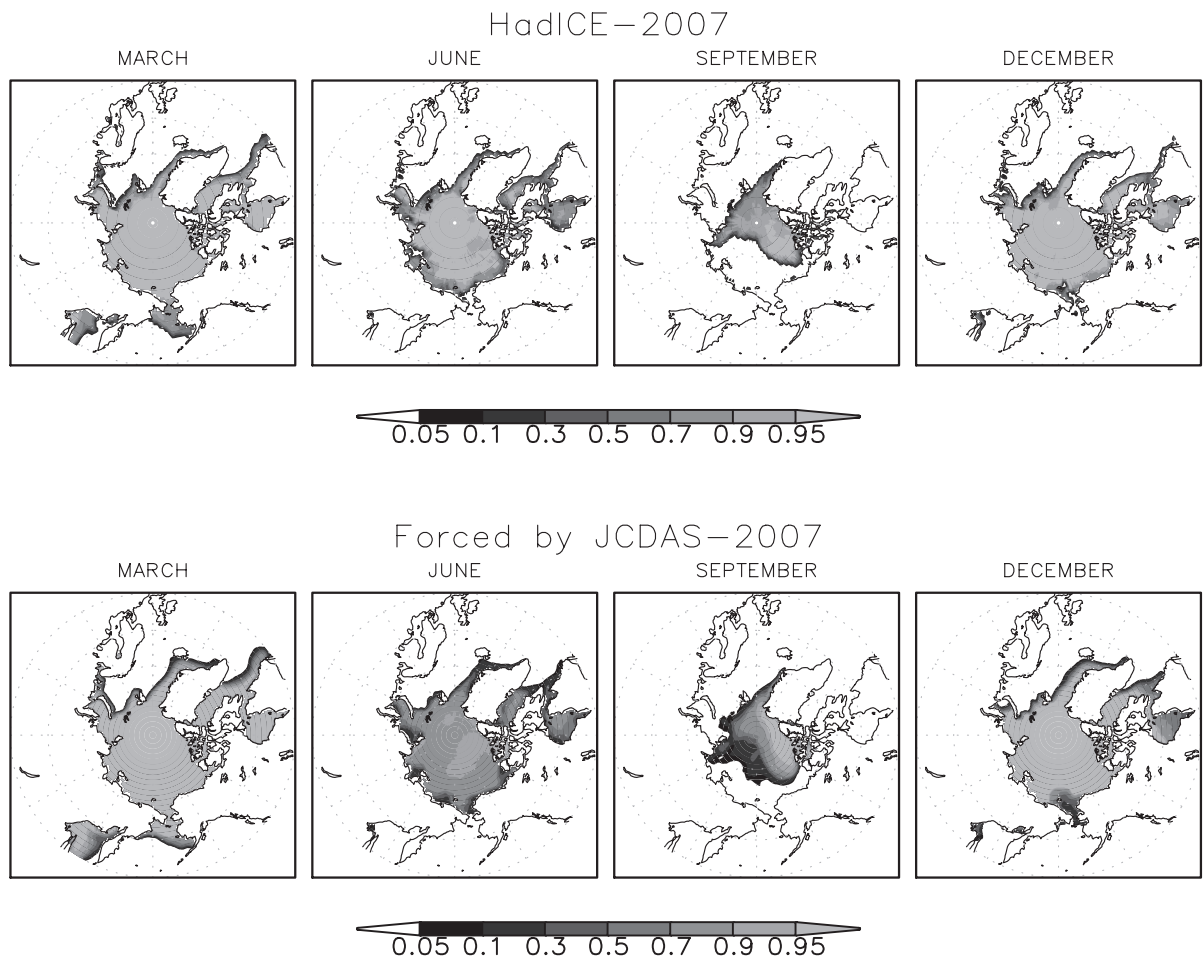
いずれの図も、同じ初期値から、同じ境界条件で 1 月 1 日から計算を開始し、同年 3 月の平均値。



2006 年末の状態から，JRA-JCDAS (Onogi *et al.*, 2007) による 2007 年の大気状態により引き続きモデルを駆動した結果を観測結果とともに示した。2007 夏季の海水面積の激減が再現されている。

なお，2006 年までのシミュレーション結果では，北極海における海水厚は徐々に薄くなってはいるものの，北極点付近で 2-3m と観測された厚

さが維持されており，2007 年のような海水域の後退が生じることはなかった。現在の気候状態における，北極点付近の海水厚 2-3m の維持は従来のモデルにおいて再現に難があった点であり，今回行った厚さによるカテゴリー分けと海水どうしの乗り上げ過程を導入したことにより大きく改善されたものである。



第 3 図 北極域における，2007 年の海水密接度分布に関する，観測とモデルの比較  
 (上) HadISST (UK Meteorological Office, 2006)，(下) JCDAS より得られた大気状態により駆動した全球海洋モデルの結果。

### 3. 高解像度モデル実験

#### - 21 世紀気候変動予測革新プログラムから -

日本付近をはじめとする、北西太平洋域の海洋再現性の向上を目的として、文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム「海洋モデルの高精度化による気候変動予測の向上に関する研究」(研究代表者：羽角 博康，東大気候センター) を東京大学気候システム研究センターと共同で行っている。実験の概要と、その結果明らかになりつつある事柄について紹介を行う。

#### 3.1 実験の概要

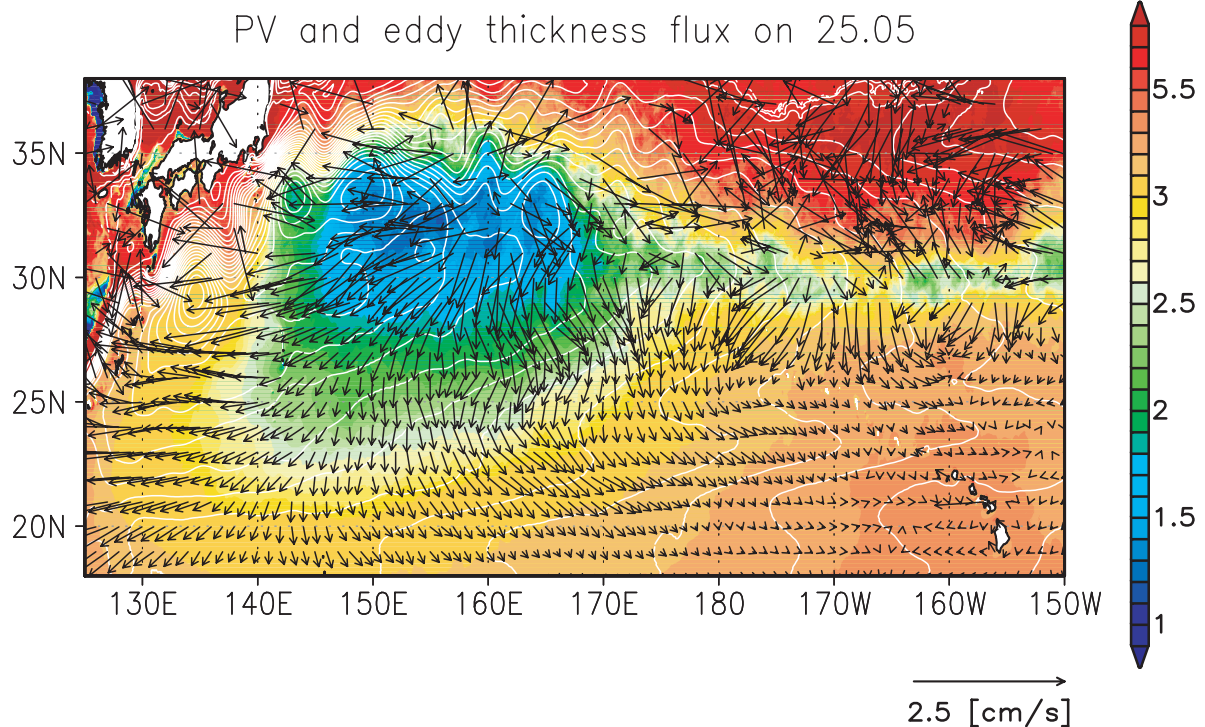
地球シミュレータを用いて水平解像度 18 km, 6 km, 2 km の北太平洋海洋モデル実験の実施、及び解析を行っている。実験から、6 km の解像度により、中規模渦のはたらきが重要となる現象(黒潮の流路、亜熱帯モード水や北太平洋中層水の分布) が十分に再現されること、2 km の解像

度により、さらに小スケール(サブメソスケール)の現象(黒潮の沿岸側に現れる波動、沿岸親潮など、後ほど示す第 6 図、第 7 図を参照) がはっきりと現れることが分かった。これらのすべてを本稿で紹介することはできないが、海洋気象業務と関連すると思われる 2 点について新たに得られた知見の概要を紹介する。

#### 3.2 亜熱帯モード水のサブダクションに対する中規模渦の寄与

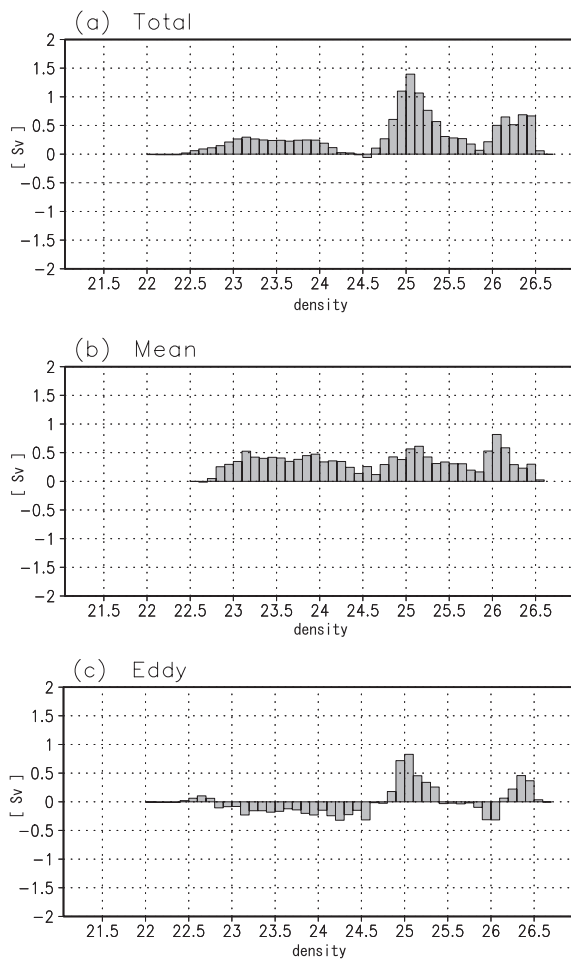
第 4 図には、モデルに再現された亜熱帯モード水の密度における、渦位、流線(モンゴメリポテンシャル)、及び層厚渦フラックス(渦輸送)を示す。北緯 35 度の黒潮続流前線の南側に低渦位域が広がり、低渦位水は流線の方向だけでなく、流線を横切る方向にも渦輸送により広がっている。

混合層底から主水温躍層への流れこみ(サブダ



第 4 図 水平解像度約 6 km のモデルにおける、等ポテンシャル密度面  $\sigma_{\theta} = 25.05$  上の(陰影)ポテンシャル渦度 ( $10^{-10} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ), (矢印)渦層厚フラックス ( $\text{cm s}^{-1}$ ), (白実線)モンゴメリポテンシャル (Pa) 計算開始後 24 年目から 35 年目までの 12 年間平均。

クシオン) を、月別気候値により算出した平均的な場によるものと、5日平均値の時系列データによるものに基づいて算出し、これらを用いて平均、及び渦による寄与に分解すると、双方半分ずつの寄与があることが示された(第5図)。これは、亜熱帯モード水の形成と分布に対する中規模渦の大きな寄与を示すものであり、従来の観測気候値や低解像度のモデルにより得られた知見を再評価する必要性を示唆しているものともいえる。



第5図 水平解像度約6 kmのモデルにおける、東経130度から西経160度、北緯17度から北緯45度の範囲(ただし、東シナ海と日本海を除く)で混合層底から主水温躍層に入りこむ海水の流量(単位 Sv,  $1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ )  
 (上) 5日平均データに基づいて算出した総流量。  
 (中) 月別気候値データに基づいて算出した、平均流量。  
 (下) 総流量と平均流量の差として算出した、変動成分(渦成分)による流量。

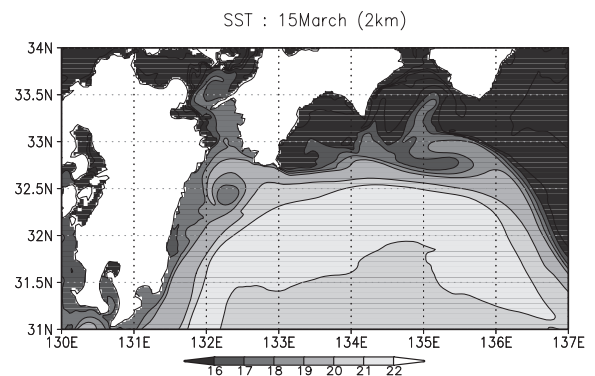
計算開始後24年目から35年目までの12年間のデータを用いて算出した。

### 3.3 水平解像度約2kmモデルにおける、日本付近の海況再現性の向上

水平解像度6km、及び2kmモデルの結果は平均場に関して大きくは異なっておらず、水平百kmスケール中規模渦を十分表現する解像度で計算を行うことにより、特に外洋域の海流や水温・塩分構造が十分に再現されることが示された。

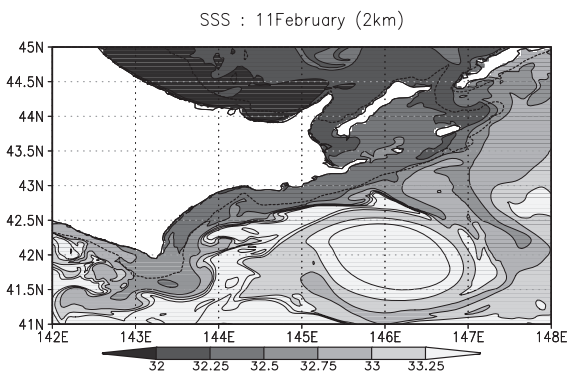
一方、水平2kmの解像度のモデルでは、大規模な水温前線に沿って表層に生じる水平スケール数十kmの擾乱や、水平スケール10km程度のさらなる微細構造を持った前線など、6kmモデルには見られなかった現象が現れた。これらは一般的にサブメソスケール現象などと称される。実際、海況予測などを考慮すると、こうしたサブメソスケール現象は海況情報としての利用価値が高いと考えられる。水平解像度を2kmとすることで初めて得られたサブメソスケール現象の例をここでは紹介する。

第6図には、日本南岸における、ある年の3月15日の海面水温分布を示した。黒潮の沿岸側に波長数十kmの擾乱が生じている。この擾乱は衛星による海面水温画像には頻繁に見られるものの、現行の現業システムである、MOVE/MRI.COM-WNPの中には表現されなかったものである。実際に見られる擾乱自体はスケールがもう少し小さいものようであるが、今後はモデルに現れた擾乱の力学的性質を調査することなどにより、予測可能性の調査や必要な解像度の選定などに役立てたい。



第6図 水平解像度約2kmのモデルに表現された、ある年の3月15日の日本南岸における海面水温分布  
 黒潮の沿岸側に小規模の擾乱が見られる。

第7図には、北海道東部太平洋岸における、ある年の2月11日の海面塩分分布を示した。オホーツク海から低温・低塩の海水が根室海峡や国後水道を通して太平洋側へ流出し、陸棚斜面に沿って沖側の海水との間に水温・塩分前線が生じている。この前線は海面から海底まで達しており、沿岸親潮と呼ばれる。著者の知る限り、本実験は現実的な設定の大循環モデルでその再現に成功した初めての事例である。詳細な解析によると、北米大陸北東岸の陸棚斜面沿いに見られる shelfbreak frontal jet と呼ばれる塩分フロントについて Chapman and Lentz (1994) が提唱したものと同様の力学的性質を有していることが分かってきている。



第7図 水平解像度約2 km のモデルに表現された、ある年の2月11日の北海道東部太平洋岸における海面塩分分布  
沿岸親潮とそれに伴う波動が見られる。

#### 4. 今後の実験予定

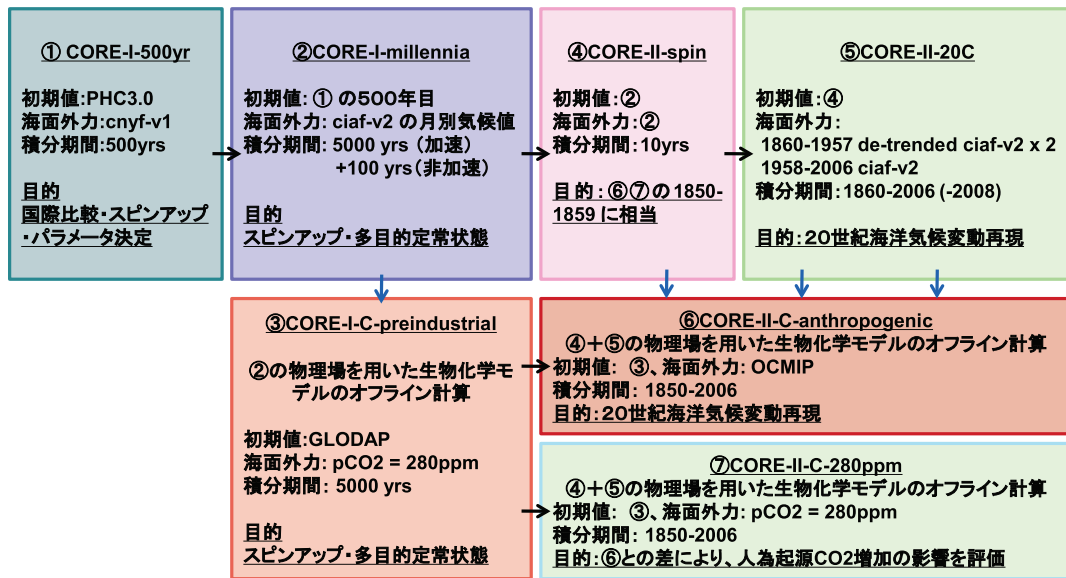
気象研究所海洋研究部では、今年度より5か年計画で、融合型経常研究「海洋環境の予測技術の開発」において、海洋モデリングを中心とした研究を開始した。本研究では、Coordinated Ocean-ice Reference Experiment (CORE ; Griffies *et al.*, 2009 ; Large and Yeager, 2008) に基づいた海洋モデル駆動実験を行うこととしている。CORE は、CLIVAR の海洋モデル開発ワーキンググループが推進している海洋-海氷モデル駆動標準実験であり、NCEP/NCAR の大気再解析データ (Kalnay *et al.*, 1996) をもとに衛星データなどを加味して再構成した海面付近の大気状態と、統一した海面フラックス計算用バルク式等を用いて実験を行うことにより、数値モデル実験の比較を実効性のあるものにすることを目指したものである。本実験により、物質循環も含めた過去50年間の海洋状態を再現し、十年規模気候変動から温暖化の影響の評価もターゲットとした研究を行う予定である(第8図)。モデルとしては、気象研究所で行う温暖化実験に用いられる全球モデルを単体で運用するものと、北西太平洋域を高解像度化してネスティング手法により全球モデルに埋め込んで運用するものとの二種類を用いる。本実験は大気-海洋結合モデルによる20世紀気候再現実験結果などとも比較可能となる実験とする予定である。

本実験の結果が長い時間スケールを持つ海洋変動現象のメカニズム解明に寄与するのみならず、気象業務推進にあたっての、基礎的な情報を提供するものとなれば幸いである。

#### 5. おわりに

以上の結果を踏まえ、現在気象庁で現業運用されている MOVE/MRI.COM-WNP の今後の高度化に関して私見を述べたい。水平解像度を2km、又はそれより高くすることにより、沿岸親潮や黒潮内側域の擾乱など、現行システムには表現されていないが、海況情報としてはより有用と考えられる現象が表現できるようになることが示された。またこの高解像度化により、東京湾や伊勢湾や瀬戸内海などの海岸線が十分に表現されるようになり、湾内の平均水位の短期変動なども海況情報と





CORE: Co-ordinated Ocean-ice Reference Experiments (CLIVAR-WGOMD)

cnyf : core normal year forcing

ciaf : core interannual forcing

第 8 図 気象研究所海洋研究部で実施を予定している、全球モデルによる過去 50 年間の海洋状態再現実験の模式図

これに加え、北西太平洋高解像度モデルを用いて過去 50 年間の再現実験 (⑤に相当する実験) を数例実施する予定である。

して活用可能となるのではないかと考えられる。これに、起潮力や高潮計算スキームが導入されれば、より高度な情報となろう。

従来の海洋モデルの枠にとらわれずに考えると、波浪モデルと結合されれば、海洋モデルにおける海面混合層、海面フラックスバルク式等、海面境界過程パラメタリゼーションの精密化により海面水温や表層混合層深の高精度化が見込まれる。逆に波浪モデル自体にも、海洋表層流速や水温の活用による高度化が可能ではないかと考えられる。

さらに、生物地球化学モデルの導入により、特に沿岸域の物質循環に関する高度な情報を出すことも可能となる。沿岸域では生物生産も活発であるため、炭素循環などに関しても重要なプロセスをモデル内に表現できることになる。

これらモデル高度化は、現業用システムの構築、

及び利用しやすい情報提供の体制が整って初めて国民のニーズにこたえられるものとなる。今後も気象庁との緊密な連携が維持されることを希望する。

謝 辞

気象研究所共用海洋モデルは、海洋研究部第一研究室のメンバーの多大なる貢献によって、開発・維持が行われている。文部科学省 21 世紀気候変動予測革新プログラム「海洋モデルの高精度化による気候変動予測の向上に関する研究」は、研究代表者である東京大学気候システム研究センターの羽角博康准教授の総合的な支援のもと行われている。西川史朗氏、坂本圭氏からは公表前の貴重な解析結果の提供を受けた。ここに感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- Chapman, D. C., and S. J. Lentz, (1994) : Trapping of a coastal density front by the bottom boundary layer. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 1464-1479.
- Conkright, M.E., R. A. Locarnini, H.E. Garcia, T.D. O'Brien, T.P. Boyer, C. Stephens, J.I. Antonov, (2002) : *World Ocean Atlas 2001: Objective Analyses, Data Statistics, and Figures, CD-ROM Documentation*. National Oceanographic Data Center, Silver Spring, MD, 17 pp.
- Griffies, S. M., A. Biastoch, C. Böning, F. Bryan, G. Danabasoglu, E. P. Chassignet, M. H. England, R. Gerdes, H. Haak, R. W. Hallberg, W. Hazeleger, J. Jungclaus, W. G. Large, G. Madec, A. Pirani, B. L. Samuels, M. Scheinert, A. Sen Gupta, C. A. Severijns, H. L. Simmons, A. M. Treguier, M. Winton, S. Yeager and J. Yin, (2009) : Coordinated Ocean-ice Reference Experiments (COREs). *Ocean Modelling*, **26**, 1-46.
- Hunke, E. C, and J. K. Dukowicz, (2002) : The Elastic-Viscous-Plastic Sea Ice Dynamics Model in General Orthogonal Curvilinear Coordinates on a Sphere -- Incorporation of Metric Terms. *Mon. Wea. Rev.*, **130**, 1848-1865.
- Hunke, E. C, and J. K. Dukowicz, (1997) : An Elastic-Viscous-Plastic Model for Sea Ice Dynamics. *J. Phys. Oceanogr.*, **94**, 1849-1867.
- Hunke, E. C, and W. H. Lipscomb, (2006) : CICE: the Los Alamos Sea Ice Model Documentation and Software User's Manual, available at <http://climate.lanl.gov/source/projects/climate/Models/CICE/index.shtml>, 59pp.
- 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.
- Ishizaki, H., and T. Motoi, (1999) : Reevaluation of the Takano-Oonishi scheme for momentum advection on bottom relief in ocean models. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, **16**, 1994-2010.
- 石崎士郎・曾我太三・碓氷典久・藤井陽介・辻野博之・石川一郎・吉岡典哉・倉賀野連・蒲地政文 (2009) : MOVE/MRI.COM の概要と現業システムの構築. 測候時報, **76**, 特別号, S1-S15.
- Kalnay, E. and Coauthors, (1996) : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- Large, W.G. and S.G. Yeager, (2008) : The Global Climatology of an Interannually Varying Air Sea Flux Data Set, *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-008-0441-3, 24pp.
- Leonard, B. P. (1979) : A stable and accurate convective modeling procedure based upon quadratic upstream interpolation. *J. Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **19**, 59-98.
- Leonard, B. P., M. K. MacVean, and A. P. Lock, (1993) : Positivity-Preserving Numerical Schemes for Multidimensional Advection, *NASA Tech. Memo.*, 106055, ICOMP-93-05, 62pp.
- Mellor, G. L., and L. Kantha, (1989) : An Ice-Ocean Coupled Model. *J. Geophys. Res.*, **94**, 10,937-10,954.
- 中野 英之 (2010) : 気象研究所における海洋生態系モデリングの取り組み. 測候時報, **77**, 特別号, S11-S21.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji, and R. Taira (2007) : The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85**, 369-432.
- Prather, M. J., (1986) : Numerical advection by conservation of second-order moments. *J. Geophys. Res.*, **91**, 6671-6681.
- Smolarkiewicz, P. K. (1984) : A fully multidimensional positive definite advection transport algorithm with small implicit diffusion. *J. Comput. Phys.*, **54**, 325-362.
- Tsujino, H., T. Motoi, I. Ishikawa, M. Hirabara, H. Nakano, G. Yamanaka, T. Yasuda, and H. Ishizaki, Reference Manual for the Meteorological Research Institute Community Ocean Model (MRI.COM) Version 3., Technical Reports of the Meteorological Research Institute, No.59, 241pp.
- UK Meteorological Office, Hadley Centre. HadISST 1.1 - Global sea-Ice coverage and SST (1870-Present) , [Internet]. British Atmospheric Data Centre, 2006, Date of citation, Available from <http://badc.nerc.ac.uk/data/hadisst/>
- 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).