

11-NA11

高並列海洋モデルの開発を通じた海洋循環のプロセス研究

羽角博康（東京大学）

概要 海洋の大規模循環形成における小規模物理現象の役割を明らかにすることを目的とした数値海洋モデルの開発と実行を行う。モデル開発においては、次世代の超高並列クラスタ型大型計算機を念頭に、既存の海洋大循環モデル COCO 及び非静力学海洋モデル kinaco に対して、高並列環境において最大限の性能が得られるような改良を施す。本課題は平成 22 年度に採択された同一名の課題を継続するものであり、昨年度行った大規模 I/O の効率化に引き続き、本年度は通信最適化を主たる開発ターゲットとする。また、東京大学情報基盤センターで開発されている自動チューニングコンパイラを適用した最適化の検討も実施し、数値海洋モデルの更なるチューニングおよび自動チューニングコンパイラの性能向上を図ることも目的とする。開発されたモデルを用いて、日本近海において黒潮等に伴う中小規模(水平数 km)現象が大規模循環に及ぼす影響や、南極大陸棚上の海水過程によって形成された高密度水が大規模海洋深層循環を駆動する深層水として輸送される過程について、それらの解明を目的としたシミュレーションを実施する。

1. 研究の目的と意義

海に存在する流れは、我々の生活環境に大きな影響を及ぼしている。日本の南岸の表層海洋に存在する黒潮を例にとると、これは全世界を代表する強い海流のひとつであるが、低緯度から運ぶ熱が日本の気候や気象に多大な影響を及ぼすとともに、海洋生物の棲息環境や輸送の面から日本近海の水産資源にとっても極めて重要である。この黒潮は主に風によって駆動されるが、日本付近の風は直接的に重要ではなく、北太平洋全体の海上風分布が決める北太平洋全域の流れとの関係の中で形作られている。したがって、黒潮の性質や変動を解き明かそうとするならば、日本付近の流れとしてのみならず、大規模な海洋循環という視点から黒潮を捉える必要がある。また、沿岸付近には黒潮のような強い海流以外にも様々な流れが存在し、それらは時として黒潮以上に我々の生活と密接に関わる。そうした小規模な流れは、付近に存在する黒潮のような強い海流の影響を大きく受け、それを通して海洋大循環ともリンクしている。特に全地球的な気候変動のもとでは、沿岸の小規模な流れやその変動を考える場合においても、海洋大循環の変動との関わりを無視するわけにはいかない。

一方、海洋の深層にも流れは存在する。それは

我々の生活環境からは非常に遠くに位置し、しかもその流れの速さは黒潮に比べれば何十分の一に過ぎないのであるが、実は根本的なところで我々の生活環境を大きく左右している。深層海洋の流れは深層だけに閉じておらず、表層海洋の流れとリンクしている。海水の密度は温度と塩分に依存し、海面付近で冷却されて低温化(もしくは蒸発等により高塩分化)した海水は、高密度のために深層へ沈む傾向が強くなる。現在の海洋の状態において、深さ数千メートルの深海に存在する水はいたるところで 0°C 近くの低温であり、これは高緯度の海面付近にある低温水が沈降して深層を占めていることを示す。図 1 はそうした海洋の深層と表層をつなぐ循環の概略を模式的に示したものであるが、その大きな特徴は、海面付近から深層海洋への沈降が、北大西洋高緯度と南極周囲の極めて限られた場所でのみ生じていることである。深層水形成と呼ばれるこの沈降過程は水平 1 km 程度のスケールで生じる対流現象に端を発している。その意味では、極めて限られた領域における微小規模の現象が全海洋規模の循環をコントロールしている。そしてこの循環は、地球上の熱を大規模に再配分する。その働きがあればこそ、例えばヨーロッパ北部は 70 度を越えるような高緯度にも関わらず人が居住できる環境にある。氷期等の過去に

生じた大規模な気候変動はこの海洋大循環の変動と大きな関わりがあることが知られており、今後起こり得る気候変動の中でも、特に大規模かつ長期に及ぶものに関しては、この循環の振舞がひとつの焦点になる。その振舞を知るということは、すなわち、水平 1 km 程度のスケールにおける沈降現象と水平 10 万 km スケールに及ぶ海洋大循環がどのように相互に関わっているかを解き明かすということである。

我々は今、地球温暖化という全地球規模の長期気候変動に直面している。その中で海洋がいかに変化し気候変動をどのようにコントロールするか、またその結果が沿岸海況や水産資源への影響を通してどのようなインパクトを人類社会に及ぼすのかを知ることは喫緊の課題である。そのためには、上述のように幅広いスケールに渡る現象の相互作用として存在する海洋大循環を理解し、その物理プロセスを適切に表現した数値モデルによる海洋大循環シミュレーションが必要とされる。こうしたシミュレーションは必然的に大規模計算となるため、その実現のためには高い効率を持った数値計算アプリケーションの開発が必須である。

こうした背景のもと、本研究では、海洋の大規模循環形成における小規模物理現象の役割を明らかにすることを目的とした数値海洋モデルの開発と実行を行う。モデル開発においては、次世代の超高並列クラスタ型大型計算機を念頭に、既存の海洋大循環モデル COCO 及び非静力学海洋モデル kinaco に対して、高並列アーキテクチャにおいて最大限の性能が得られるような改良を施す。特に 10 万を越えるような並列規模を想定し、モデルに十分なスケーラビリティを発揮させるために通信の最適化や並列分割手法の最適化等を行う。また、ペタフロップクラスの次世代スーパーコンピュータ上の実験規模は総格子数が 10^{11} を越えることが想定されるが、これは例えば倍精度実数で入出力すると 1 変数・1 スナップショットあたりおよそ 1 TB のデータ量となる。数値モデルによる海洋物理研究では流速や各種トレーサー（温度・塩分およびその他必要に応じた溶存物質濃度）分布等、多数の変数を高い頻度で記録する必要があり、これらのデータの入出力や解析および可視化における負荷も今後研究を遂行する上で解決すべき課題として挙げられる。これらの事前・事後処理に

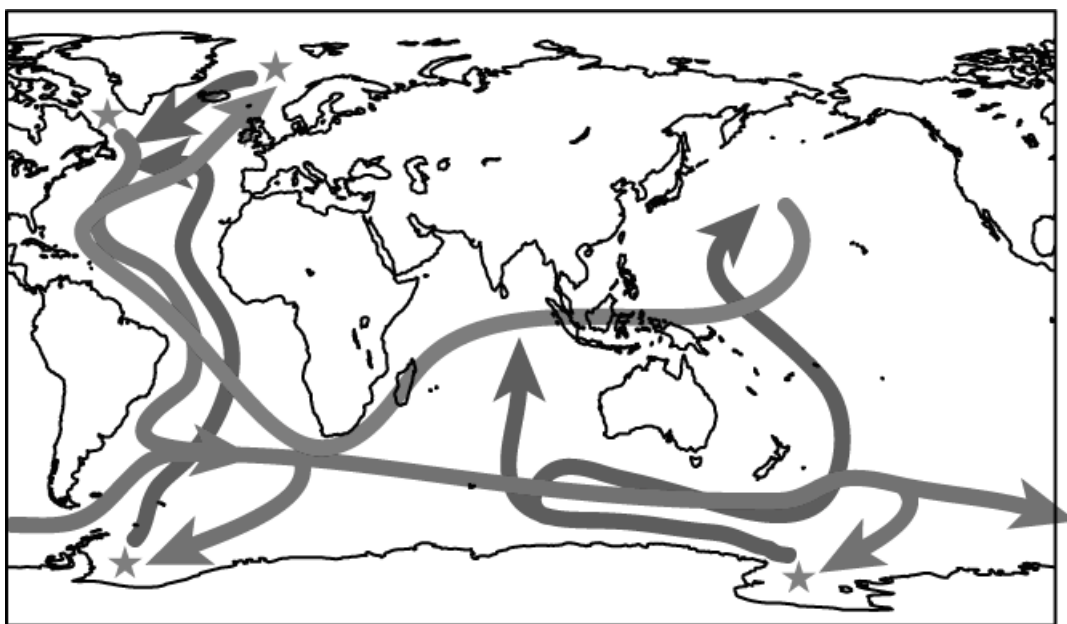


図 1: 全球規模熱塩循環の概略図。星印は深層水形成場所を示し、矢印は色が淡いものから順に表層（温度躍層から上）・深層（温度躍層から深度 3,000 m 程度）・底層（深度 4~5,000 m 程度）の水平流を示す。深層・底層の流れは徐々に上昇して表層の流れとなる。

においても大型計算機上での分散処理が可能となるようなシステムを構築することも視野に入れる。

本研究が対象とする開発項目は、計算アルゴリズムの開発とチューニング・通信最適化・大規模 I/O の効率化・可視化と多岐に渡り、1 箇年で完了するものではない。本課題は昨年度からの継続課題であり、昨年度は大規模 I/O の効率化を主として行った。本年度はそれに引き続き、ループの並列計算チューニングと通信最適化を主たるターゲットとする。並列計算チューニングでは東京大学情報基盤センターで開発されている自動チューニングコンパイラの適用による最適化の検討を実施し、数値海洋モデルの更なるチューニングおよび自動チューニングコンパイラの性能向上を図る。この自動チューニングコンパイラとは、ループ展開やブロック化などの一般的なチューニング手法について、展開数やブロック化の大きさなどを様々に変化させたコードとその実行手続きを生成し、特定の計算機および設定のもとでそれを一度実行することによって最適なチューニングパラメータを得ることができるものである。

開発されたモデルを用いて、日本近海において黒潮等に伴う中小規模(水平数 km)現象が大規模循環に及ぼす影響や、南極大陸棚上の海水過程によって形成された高密度水が大規模海洋深層循環を駆動する深層水として輸送される過程について、それらの解明を目的としたシミュレーションを実施する。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

(1) 共同研究を実施した大学名と研究体制

共同研究を実施した大学名：東京大学

代表者：羽角博康（東京大学大気海洋研究所）

副代表者：片桐孝洋（東京大学情報基盤センター）

参加者：松村義正，川崎高雄，浦川昇吾（以上，東京大学大気海洋研究所），黒木聖夫，建部洋晶（以上，海洋研究開発機構），鴨志田良和（東京大学情報基盤センター）

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

前述の目的に対しては、例えば全海洋を 1 km 以下の水平格子で表現した上で、数千年にわたる時間発展をシミュレートすることがひとつの直接的な解決方法となるであろう。しかし、ペタフロップスクラスの計算機を用いたとしても、その実現には程遠い。海洋の数値モデリング研究の進展は、これまでと同様今後も、計算機性能の進展に大きく制約を受けることは間違いない。有限の計算資源を用いて最大限の研究成果を得るためには、使用する計算機の特徴を把握し、それに合わせて計算手法や実験設定を適切に選択することが極めて重要である。海洋物理を専門とする研究者と数値計算手法の開発を専門とする研究者が共同して課題に取り組み、知識を共有することによって、海洋物理学と計算機科学双方の発展に大きな貢献があると期待される。

また、次世代スーパーコンピュータに代表されるように、今後の計算機環境ではスカラ型プロセッサを多数接続した高並列クラスタが主流になることは疑い得ない。数万プロセスを越える高並列アーキテクチャ上で、その資源を十分に使い切るような大規模海洋シミュレーションを行うには、通信の最適化や並列分割の最適化のみならず、力学コアにおける各種アルゴリズムの再検討やチューニング、さらにはデータ入出力と解析及び可視化といった事前・事後処理に至るまで、数値モデルのあらゆる部分で対応が必要とされる。各要素とも高い専門性が要求されるものであり、それぞれのエキスパートたる研究者が共同して取り組むことが必要である。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

ここでは、海洋大循環モデル COCO のチューニングと並行して進めている、黒潮の変動性に関するシミュレーション研究の成果について述べる。

黒潮は、日本南岸に沿って流れる、世界を代表

する強海流のひとつであり、大きな流速によって大量の熱や物質を数千 km にわたって速やかに輸送するため、北太平洋全域におよぶ気候や水産環境において大きな役割を果たす。黒潮に類する強海流は大西洋・インド洋等に他にもいくつか存在するが、その中で黒潮が特徴的であるのは、その流路が大きな変動を示すことである。図 2 に示すように、黒潮は日本南岸に沿ってほぼ直線的に流れる場合と大きく蛇行して流れる場合があり、過去の観測によるとそれらが数年程度のサイクルで繰り返されることが知られている。しかしながら、この「直進」流路と「大蛇行」流路の繰り返しを適切に再現したシミュレーションは過去に存在しない。

黒潮流路変動のシミュレーションが困難であることは、この変動が黒潮に付随して存在する水平

スケール 10 km 程度の小規模な渦運動と黒潮という大規模海流の相互作用に支配されるという側面を持つためである。この相互作用は当然のことながら 10 km 程度の水平格子を適用したシミュレーションでなければ表現することができないが、同時に黒潮のシミュレーションにおいては最低でも北太平洋全域を数十年スケールにわたって取り扱う必要がある。ただし、この相互作用が重要となるのは北太平洋全域ではなく、日本南岸から日本東方の日付変更線あたりまでにかけての領域に限られるため、高解像度を適用する領域を限定することで計算量を抑制しながら目的を達することが可能である。

本研究では、北太平洋全域に対する比較的低解像度のモデル（今後「外モデル」と呼ぶ）と、日本近海に対する比較的高解像度のモデル（今後「内

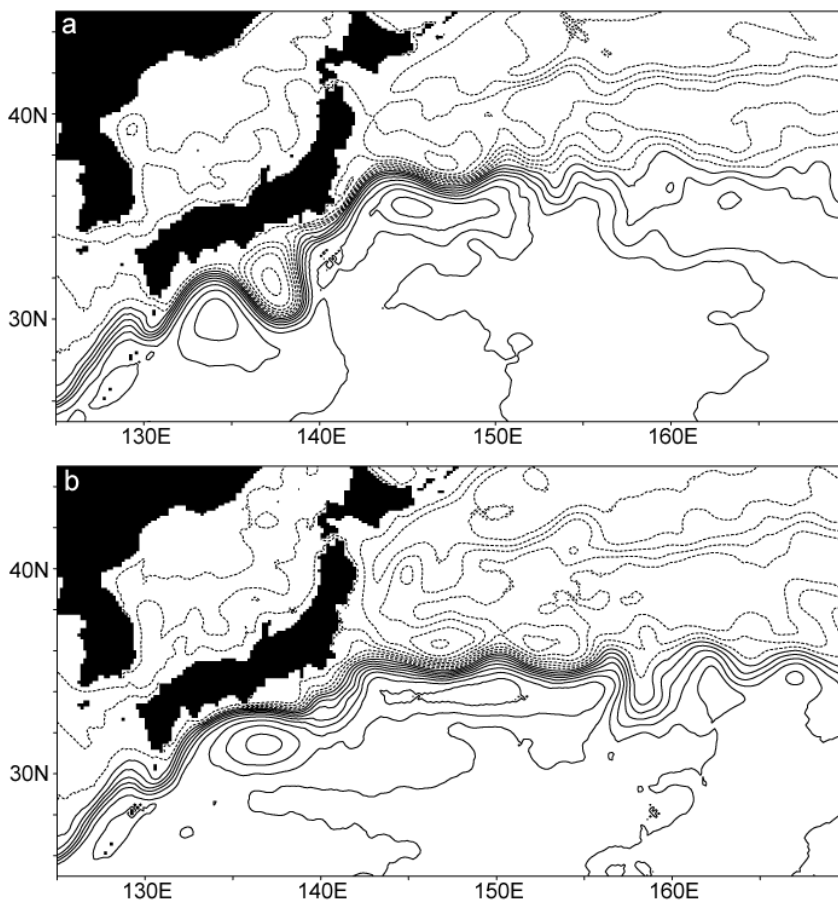


図 2: シミュレーションによって得られた日本近海の年平均海面高度分布（等値線間隔 0.1 m）。海面高度の等値線は海面付近の海流の流線におよそ一致し、図中で等値線が集中している部分が黒潮を表す。(a) は大蛇行時、(b) は直進時。

モデル」と呼ぶ)を連成結合(双方向ネスト)した数値海洋モデルを用いてこの問題を取り扱っている。内モデルと外モデルでは、格子サイズが異なること(およびそれに伴って時間刻み幅が異なること)に加えて、設定された格子サイズでは表現できないサブグリッドスケール現象のパラメータ化について異なる手法を用いる。その意味では別種のモデルを連成結合しており、これら 2 種類のモデルは MPI のもと MPMD 方式で並列に実行される。図 3 に示すように、海洋大循環においては運動方程式(Navier-Stokes 方程式)を解く際に、流速を鉛直平均成分とそこからはずれに分解する。これは、海流の速度が高々 1 m/s であるのに対して、海面高度変動に現れる重力波の伝播速度が 100 m/s であるため、重力波の伝播に関わる部分のみを分離して短い時間刻み幅で解くことで計算の効率化を図ることを目的とした手法である。その一方で、この分離を行ったことにより、両モデルのデータ交換のタイミングに関して、物理量の保存性を保証するために特別の考慮が必要となる。その考慮の詳細は割愛するが、具体的なデータ交換のタイミングについて図 3 に示す。外モデルから内モデルへは内モデルの側面境界におけるデータを内挿して渡して境界条件として用い、内モデルか

ら外モデルへは外モデルの 1 水平格子に含まれる内モデルのデータを平均したものを渡して上書きする。

実施したシミュレーションにおいては、外モデルの水平格子は $0.5^\circ \times 0.5^\circ \cos\phi$ (それぞれ東西・南北方向で、 ϕ は緯度) であり、内モデルの水平格子は $0.1^\circ \times 0.1^\circ \cos\phi$ で東経 $116^\circ \sim 180^\circ$ ・北緯 $15.6^\circ \sim 53.6^\circ$ を覆う。初期状態には過去の海洋観測の蓄積データから導かれた年平均の水温・塩分分布を用い(流速はいたるところ 0)、20 世紀後半の平均的な季節サイクルを持つ海上大気の状態(気温・湿度・風速等)を海面境界条件とし、40 年間の海洋シミュレーションを行った。その結果、図 4 に示す通り、黒潮の直進流路と大蛇行流路がそれぞれ数年の持続期間をもって繰り返すという、現実的な流路変動性が得られた。科学的にはこの準周期的変動性をもたらす物理プロセスの解明が重要であるが、それについてはここでは割愛する。従来の黒潮流路変動シミュレーションで直進→大蛇行→直進という単発的な流路遷移が再現された例はあるが、その例では大蛇行流路の持続期間が非現実的に短く、また比較的長期間にわたるシミュレーションを行ったにも関わらず準周期的な流路変動は得られなかった。本研究のシミュレーション

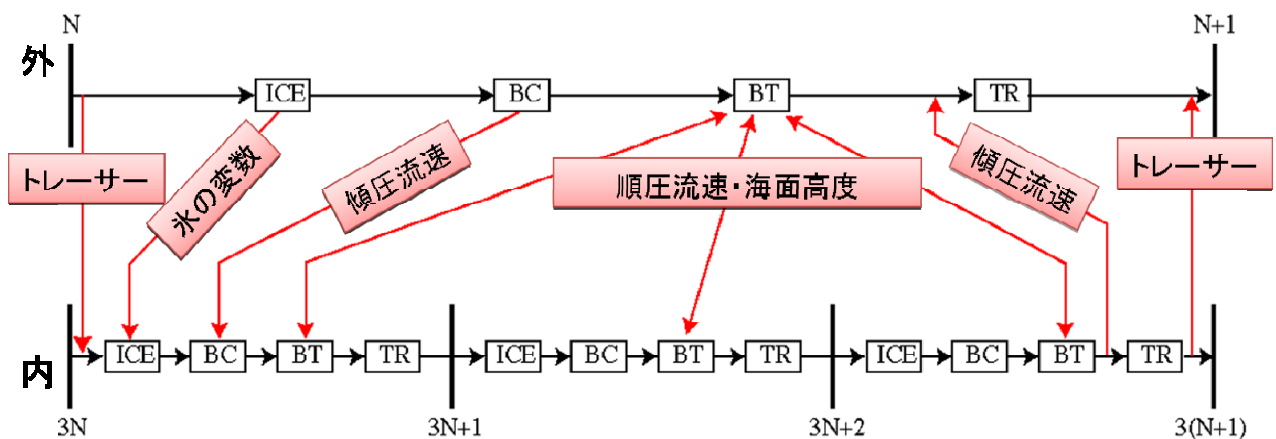


図 3: 双方向ネスト海洋大循環モデルにおける時間進行と外モデルー内モデル間のデータ交換。いずれのモデルにおいても 1 時間ステップ中に ICE (海水)・BC (傾圧流速: 流速のうち鉛直平均からのずれの部分)・BT (順圧流速: 鉛直平均流速)・TR (トレーサー: 水温・塩分およびその他溶存物質)の順で計算が進行する。ここでは外モデルが 1 時間ステップの計算が進行する間に、内モデルでは 3 時間ステップの計算が行われる場合を例にとり、両者のデータ交換のタイミングを示した。

結果に基づくことにより、黒潮流路の変動性をもたらすメカニズムに関して、従来と比べて格段に理解を深めることが可能となった。これは科学的な面から見てももちろん画期的なものであるが、従来行われてきたシミュレーションと大差ない計算量によってそれが達成されたこともまた画期的なことであり、本報告ではその点を特に強調しておく。

(2) 当初計画の達成状況について

これまでのところ主に、海洋大循環モデル COCO への自動チューニングコンパイラの適用に向けたプログラムの整備を行ってきた。COCO では静水圧近似を施した流体の運動方程式と熱および塩分の輸送方程式を数値時間積分によって解くことが主要な部分だが、その中でも特に SOM (Second Order Moment) アルゴリズムによるトレーサー輸送部分の計算負荷が高い。これに対して、

ループのブロック化や OpenMP 指示行挿入などを行った。

SOM の計算に現れる変数は最大 3 次元であり、配列の 1 次元目は水平 2 次元を 1 次元化したもの、2 次元目は鉛直次元、3 次元目はトレーサーの次元に対応している。プログラム中では、水平次元が IJ、鉛直次元が K、トレーサー次元が N によるループで表されており、デフォルトのコーディングでは IJ が最内・N が最外ループとなっている。ループ長は、IJ については並列数（モデルは基本的に水平的に領域分割する）に依存するが通常は最も長く、次いで K が 50~100 程度、N が 2~10 程度である。ループ内では、水平座標の計量など、K, N に依存しない変数が多数用いられる。その事情に鑑み、IJ および K によるループについて、それぞれ次のようなチューニングを行った。

水平方向のトレーサー輸送計算では、K ループを一番外に出し、このループを OpenMP でスレッ

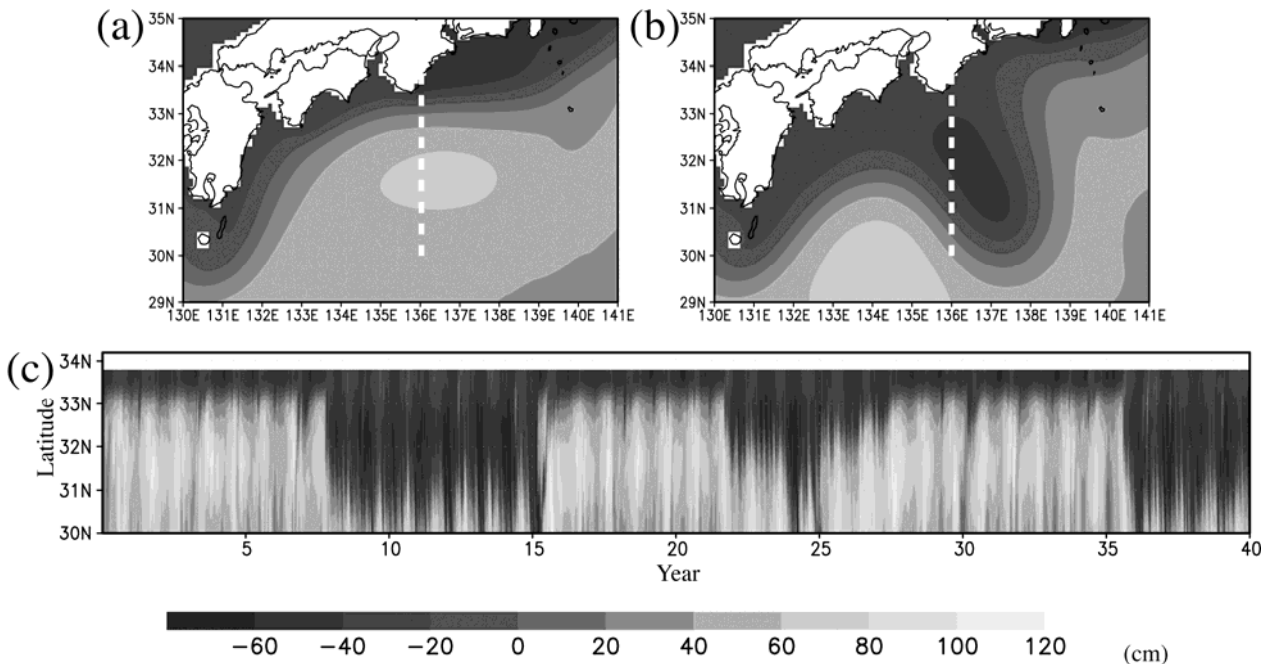


図 4: シミュレーション期間のうち、(a) 30~35 年目、(b) 36~40 年目について平均した海面高度分布。図 2 で見たように、(a) は黒潮が直進流路をとっていることを示し、(b) は黒潮が大蛇行流路をとっていることを示す。(c) は東経 136° ((a), (b) 中の点線) に沿う海面高度分布の全シミュレーション期間にわたる時系列。淡い色が北緯 33° 付近に達している場合には (a) に相当する海面高度分布になっており、黒潮が直進流路をとっていることを示す。一方、濃い色が北緯 30° 付近まで達している場合には (b) に相当する海面高度分布になっており、黒潮が大蛇行流路をとっていることを示す。

ド並列化した上で、IJ ループを可能な限り統合した。一方、鉛直方向のトレーサー輸送計算では、メモリアクセスの局所化を狙って IJ ループをブロック化し、配列サイズも可能な場合は小さくした。また、そのブロック化された IJ ループを OpenMP でスレッド並列化した。

上記の水平方向に関するチューニングは、鉛直 1 層分の変数が L2 キャッシュのサイズ (512 KB) に収まることを前提に行われている。その条件の適否は当然 1 プロセスあたりの水平格子数、すなわち問題サイズと並列数に依存する。HA8000 の 64 ノードを用いて 64 プロセス 4 スレッドのハイブリッド並列化を行う場合について、この条件が満たされる問題サイズのモデルを設定して、チューニングの性能を調べたところ、2.2 倍の高速化が実現された。

COCO に対する自動チューニングコンパイラの適用、および通信最適化に関する作業までは、残念ながら到達しなかった。

4. 今後の展望

本研究課題でやり残した項目については、今後引き続き実施していく予定である。すなわち、COCO と自動チューニングコンパイラ双方の整備を進め、COCO の実行における自動チューニングコンパイラの有効性を検証する。また、COCO の並列計算性能測定を行い、プログラム中の通信部分のそれぞれについて、最適化の必要性の検討と、必要と判断された場合には対応策を検討する。ただし、別の枠組みの共同研究が本研究課題のメンバーで進行していることもあり、拠点共同研究という形は平成 23 年度で終了する。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Kurogi, M., H. Hasumi and Y. Tanaka, Development of a nested-grid general circulation model for parallel computers, *Computers and Fluids*, submitted.

(2) 国際会議プロシーディングス
なし

(3) 国際会議発表

Kurogi, M., H. Hasumi and Y. Tanaka, Development of a nested-grid general circulation model for parallel computers, *International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics*, Barcelona, May 20, 2011.

Hasumi, H., M. Kurogi and H. Tatebe, Development of a coupled climate model with a two-way nested ocean component, *Development and Application of Regional Climate Models*, Seoul, October 11, 2011.

(4) 国内会議発表

黒木聖夫, 羽角博康, 田中幸夫: 双方向ネストモデルを用いた黒潮流路変動の研究, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011 年 9 月 27 日.

建部洋晶, 黒木聖夫, 坂本天, 鈴木立郎, 田中幸夫, 羽角博康, 望月崇, 石井正好, 木本昌秀: 高解像度気候モデルによる黒潮続流十年規模変動と結合ネストモデルの開発, 日本海洋学会秋季大会, 福岡, 2011 年 9 月 27 日.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)
なし