

jh160060-NAJ

環オホーツク圏の海洋シミュレーション

中村知裕（北海道大学）

概要 環オホーツク圏（オホーツク海とその周辺地域）は日本の気候や北太平洋の海洋環境を左右しているが、近年は地球温暖化にさらされて変化しつつある。本課題では、その理解と再現に向けて数値シミュレーションとモデルの高速化チューニングを実施している。今年度は昨年度までの成果をもとに、(I)計算機科学分野の課題として海洋非静水圧モデルについて HITACHI SR16000/M1 向けの高速化チューニングを行い、(II)環オホーツク圏の海洋シミュレーションとして、(a) 高分解能化した海洋鉄循環シミュレーションを用いて海底堆積物由来の鉄供給に関する感度実験、(b) 海洋潮汐混合過程の 1 つ「渦と内部波の相互作用」について異なる水平形状の渦（ランキン渦と、ガウシアン型の渦）を対象とした数値実験を実施した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同研究を実施した拠点名

北海道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
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

(3) 参加研究者の役割分担

中村知裕：海洋のシミュレーションおよびプログラムの高速化チューニング
大宮学：プログラムの高速化チューニング
三寺史夫：海洋シミュレーション
中野渡拓也：海洋物質循環シミュレーション
伊藤薫：海洋鉛直混合過程シミュレーション

2. 研究の目的と意義

環オホーツク圏は、北太平洋における海洋循環や海洋生態系を左右している。冬季にはシベリアから寒気が吹き出し、オホーツク海で大規模に海水を生成する。その際、海水が冷却される上に、海水中の塩が不純物として排出され高塩化するため、高密度の海水が形成される。形成された高密度水は中層へ沈み込み、オホーツク海そして北太平洋に広がっていく（例えば、中村，2015）。

また、千島列島域のように海底地形上を強い潮流が流れる海域では、内部重力波の生成と砕波に

より激しい鉛直混合が生じる [Nakamura et al., 2000; 2010; Abe and Nakamura, 2013]。鉛直混合により、表層～中層～深層の間で海水や物質の輸送が引き起こされる。

これら高密度水形成と千島列島域での潮汐鉛直混合により、オホーツク海起源の熱塩循環（密度差に由来し、鉛直方向の輸送で特徴付けられる海洋循環）が駆動される [Nakamura et al., 2014; 2006]。熱塩循環に伴い、大気に接していた海水や大陸棚海底の海水が、海洋中層に潜り込む。このため、大気から種々の気体（温室効果気体やフロンなど）が、そして河川や海底堆積物から陸起源物質が、北太平洋中層に運ばれる [Uchimoto et al., 2014; 2011; 2009]。

環オホーツク圏はまた、世界最大規模の基礎生産（海洋植物プランクトン増殖等に伴う有機物の生産）で知られている。高い基礎生産は、水産資源の基礎となるとともに、二酸化炭素の海洋内取込など炭素循環にも重要な役割を果たす。この高い基礎生産を支える上で、上述の熱塩循環によりアムール川から運ばれて来た「鉄」が重要であることが分かってきた [Nishioka et al., 2007]。鉄は植物プランクトン増殖に欠かせないが、海水には溶けにくいいため多くの海域において基礎生産を律速している。例外的に環オホーツク圏では、熱塩循環に伴う鉄供給のおかげで鉄律速がかかりづらく、それが水産資源の豊さに繋がっている。

環オホーツク圏におけるこうした現象には数年から数十年規模の変動があるのに加えて、シベリアを中心に顕著な温暖化が進行している。温暖化に伴いオホーツク海の海水面積も減少傾向にあることから、上述の熱塩循環が弱まっていく可能性も危惧されている [Nakanowatari et al., 2015; 2007; Matsuda et al., 2009]。

このように、環オホーツク圏では科学的に興味深くかつ社会的に重要な気候・環境の形成とその長期周期変動があり、これらのより良い理解と数値シミュレーションによる再現・予測が求められている。そこで代表者らのグループでは、環オホーツク圏を対象とした海洋の数値シミュレーション研究を行っている。本研究ではその一環として、シミュレーションの効率化と長期積分・大規模化に向けて、北海道大学情報基盤センター大型計算機での高速化チューニングを検討する。加えて、環オホーツク圏の気候・環境に重要な 2 つの現象—(a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環、(b) 潮汐による鉛直混合過程—について数値シミュレーション研究を行う。

以上の研究を進めていくため本年度は下記を目的とした。

(I) 高速化チューニング：前年度まで、鉄化学モデル・高分解能熱塩循環モデル・高分解能鉄循環モデルと、鉄循環シミュレーションに関わるモデルの高速化チューニングを順次行い、これ以上の高速化は容易でないところまでチューニングした。そこで今年度は、(II-b) 潮汐による鉛直混合過程の数値実験に用いる 3 次元非静水圧モデルについて HITACHI SR16000/M1 用の高速化チューニングを検討した。

(II-a) オホーツク海を起源とする栄養物質循環と熱塩循環：これまでの研究から、環オホーツク圏の鉄収支には、移流による海洋輸送が重要であることが明らかになった [Uchimoto et al. 2014]。しかし、従来の鉄循環モデルでは中規模渦や沿岸流等の流れの詳細構造が解像されていなかった。そこで前年度に、鉄循環モデルを高分解能化したものの、一部海域で鉄濃度が過大評価されるなど

改善の余地があった。この解決に向けて、今年度は、最も不確定な要素である「海底堆積物からの鉄供給」の感度実験を行った。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程：前年度までの結果から（潮汐起源の）内部重力波が鉛直混合を引き起こす過程として、渦との相互作用も重要であること、および、この相互作用はパラメタ・レンジによって振舞が大きく異なることが示された。加えて、理論的解析の結果、渦の形状も相互作用に影響しうることも分かった。そこで今年度は、異なる形状の渦の場合について数値実験を行った。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

本共同研究により、計算科学の専門家の助力を戴けたことが当共同研究ならではの事項の第一である。また、北海道大学情報基盤センターの大型計算機システムを使用させて戴き、さらにそのサポートを戴くことで、数値シミュレーションとその結果の解析を円滑に且つ高速に実施できるのも当共同研究の利点である。加えて、報告書に記していない細かな情報交換においても有意義であった。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度までに得られた研究成果を図 1 にまとめた。計算機科学分野の課題として、高速化チューニングを大気モデル、海洋非静水圧モデル、鉄化学モデル、高分解能熱塩循環モデル、高分解能鉄循環モデルについて実施し、その成果は本年度を含めその後の数値シミュレーションに活かされている。

また、研究対象である環オホーツク圏の(a)熱塩循環と物質（鉄）循環、(b) 潮汐による混合、についても、順次、モデルの開発やシミュレーションの期間長期化・高解像度化を進めると共に、現象の解明も進めて来た（参加研究者の都合で大気シミュレーションについては今年度一時中断している）。以上の成果として国際学術誌に 10 本の査読付論文が掲載された。本年度の研究は以上を踏まえたものとなっている。

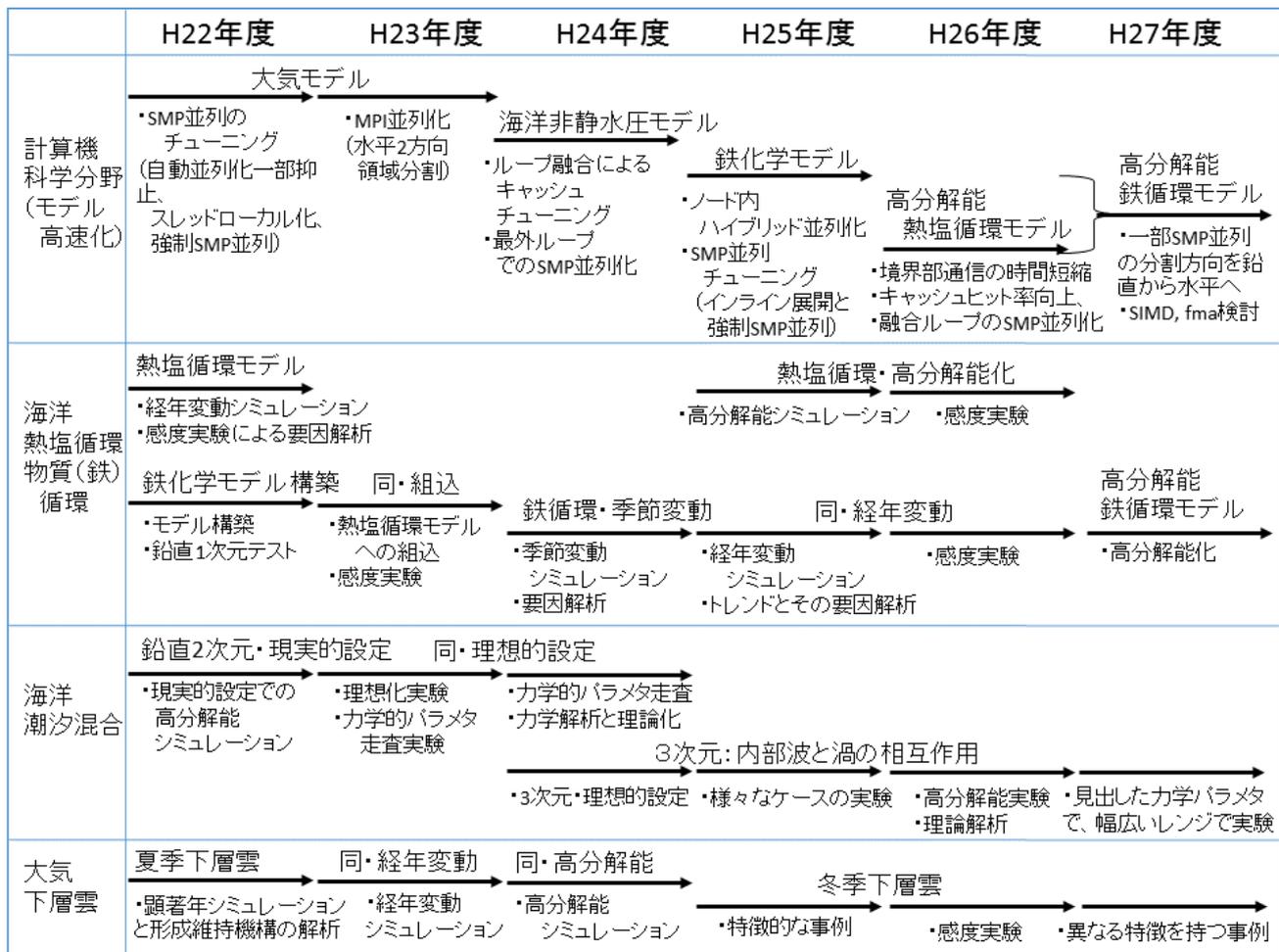


図 1 : 前年度までの成果概要

5. 今年度の研究成果の詳細

(I) 計算機科学分野の検討課題

今年度の計画として申請した、3次元非静水圧モデルの HITACHI SR16000/M1 に向けた高速化チューニングを、専門家の助力により行った。このモデルは、もともと MPI 並列化など高速化チューニングが施されており、加えて平成 24 年度に一度高速化チューニングを行っている。とはいえ、その後に海面や圧力の取り扱いなど支配方程式や解法を新しくした部分があるため、今年度はそこを中心に検討する計画であった。

今回検討の対象としたのは、平成 24 年度のチューニング後さらに、OpenMP による並列化や他の機種に合わせた高速化チューニングを施した最新版である。この最新版について HITACHI SR16000/M1 で計算時間を計測したところ、OpenMP による並列

実行部分が約 6 割、OpenMP 並列実行でない部分(演算の一部、通信、I/O など)が約 4 割あり、実行効率 3.26%と HITACHI SR16000/M1 では十分な性能が出せなくなっていた。

そこで、解法等の新しくなった部分だけでなく全体を対象として高速化チューニングを検討することにした。検討したのは、(1) コンパイルオプションの最適化 (特に SIMD 適用の有無)、(2) CPU 時間が最も長かった演算部について、配列のインデックス入れ替えによるループ演算時の連続アクセス化、およびループ融合、(3) OpenMP 化されていない初期化部分に OpenMP 並列を適用、(4) SMT 機能を含めプロセス数の最適化を行った。その結果、全体として 28.8%の実行時間短縮を達成できた。

(1)のコンパイルオプション最適化で、主な変更は一部の主要ループで SIMD 適用を外したことで

ある。CPU 時間の長い主要部において、キャッシュヒット率向上とストリーム数削減のためのチューニングが SIMD 化の要件と競合していたので、SIMD 化のオプションを外した。該当部のコードを SIMD 化を適用できるように変更すれば、さらに高速化できる可能性もあるが、それは将来の検討課題とする。

(2) の配列のインデックス入れ替えによる連続アクセス化とループ融合は、(1) と同様の理由で最内側ループのインデックスと配列の連続アクセスのインデックスを変えている部分に適用した。図 2 (上) に示すように、最内側ループのインデックスは i なのに対し、配列 vdt 等の連続アドレスは $k3$ の制御となっている。後者の配列のインデッ

クスを入れ替えて、ループ演算で連続アクセスとなるようにした (図 2 下)。また、内から 2 番目のループ (インデックス j) の範囲を区切ることで、ループ融合を行い、キャッシュヒット率を向上した。これについては、他の機種に合わせた高速化チューニングが HITACHI SR16000/M1 に合っていない可能性が高く、他機種では最適化前の方が性能を引き出せる可能性もある。

(3) の OpenMP 並列のチューニングとして、(3-1) 適用し損ねていた初期化部分について、スレッド起動のオーバーヘッド削減のためまとめられる部分はまとめて、OpenMP 並列を適用し、(3-2) 条件分岐中の初期化にも OpenMP 並列を適用した。

(4) として SMT 機能 (1 物理コアで複数スレッド

```

DO j= 0, jsize+1
DO i=-1, isize+2
  vdt(k3,i,j) = mask(i,j-1,km3)*mask(i,j,km3)*mask(i,j+1,km3) * (v(i,j-1,k+2)+v(i,j,k+2))*0.5 *
  dttime * idy2(i,j)
  a_y(k3,i,j) = a(i,j,k+2) - vdt(k3,i,j) * (a(i,j+1,k+2)-a(i,j-1,k+2))
END DO
END DO

DO j=1, jsize
DO i=1, isize
  a_xy(k3,i,j) = (a(i,j,k+2) + a_x(k3,i,j) + a_y(k3,i,j) - 0.5*vdt(k3,i,j)*(a_x(k3,i,j+1)-a_x(k3,i,j-1)) &
0.5*udt(k3,i,j)*(a_y(k3,i+1,j)-a_y(k3,i-1,j))) / 3.0
END DO
END DO
(以下略)

```

```

j=0
! DO j= 0, jsize+1
DO i=-1, isize+2
  vdt(i,j,k3) = mask(i,j-1,km3)*mask(i,j,km3)*mask(i,j+1,km3) * (v(i,j-1,k+2)+v(i,j,k+2))*0.5 * dttime *
idy2(i,j)
  a_y(i,j,k3) = a(i,j,k+2) - vdt(i,j,k3) * (a(i,j+1,k+2)-a(i,j-1,k+2))
END DO
! END DO

DO j=1, jsize
DO i=-1, isize+2
  vdt(i,j,k3) = mask(i,j-1,km3)*mask(i,j,km3)*mask(i,j+1,km3) * (v(i,j-1,k+2)+v(i,j,k+2))*0.5 * dttime *
idy2(i,j)
  a_y(i,j,k3) = a(i,j,k+2) - vdt(i,j,k3) * (a(i,j+1,k+2)-a(i,j-1,k+2))
END DO
DO i=1, isize
  a_xy(i,j,k3) = (a(i,j,k+2) + a_x(i,j,k3) + a_y(i,j,k3) - 0.5*vdt(i,j,k3)*(a_x(i,j+1,k3)-a_x(i,j-1,k3)) &
- 0.5*udt(i,j,k3)*(a_y(i+1,j,k3)-a_y(i-1,j,k3))) /
3.0
END DO
END DO
j=jsize+1
DO i=-1, isize+2
  vdt(i,j,k3) = mask(i,j-1,km3)*mask(i,j,km3)*mask(i,j+1,km3) * (v(i,j-1,k+2)+v(i,j,k+2))*0.5 *
dttime * idy2(i,j)
  a_y(i,j,k3) = a(i,j,k+2) - vdt(i,j,k3) * (a(i,j+1,k+2)-a(i,j-1,k+2))
END DO
(以下略)

```

図 2 : 最適化 (2) の例。(上) 変更前、(下) 変更後。

起動) を含めプロセス数の最適な組み合わせも検討した。このコードでは OpenMP を鉛直方向の分割に適用し、分割すると OpenMP プロセスにつき鉛直 4 グリッド分計算が増える。このため、鉛直方向の総グリッド数に依存して、最適な OpenMP プロセス数が決まる。今回のチューニング用設定では、鉛直方向は 40 グリッドと少なかったため、OpenMP プロセス数は 2 の時が最も速かった。SMT 機能も高速化に寄与した。

(II) 環オホーツク圏海洋シミュレーション

(II-a) オホーツク海を起源とする熱塩循環と栄養物質(鉄)循環

本年度の計画として、前年度に高分解能化し領域も拡大した鉄循環モデルの再現性向上を目指し、海底堆積物からの鉄供給フラックスについて感度実験を行った。昨年度の再現性検討によると、日本海をはじめとする一部の海域で鉄濃度が過大評価されており、その原因として最も可能性が高いのが、陸棚域における海底堆積物からの鉄フラックスの大きさであった。

そこで、北太平洋の陸棚域を 6 つに分け(東シナ海、日本海、南シナ海、オホーツク海、ベーリング海、北米西海岸)、各海域でのみ堆積物由来の鉄供給を与える実験を行った。

図 3 に日本海、東シナ海、南シナ海のケースを上から順に示す。東シナ海と南シナ海のケースでは、高濃度の鉄がそれぞれ日本海と東シナ海へ輸送され、さらに下流側の亜熱帯へ影響する。つまり、この両者が過大評価の主原因であることが明確になった。実際、日本海ケースでも北部で過大評価なもの、鉄濃度は他 2 ケースより低い。全体に過大評価気味な主な理由として、(1) これまでのパラメタ調整において、前モデルに入っていない海域(東シナ海など)の影響が考慮されていないこと、(2) 潮汐混合の効果を千島列島だけでなくモデル領域全体で考慮していること(海底から海面へのフラックスが強まる)が考えられる。

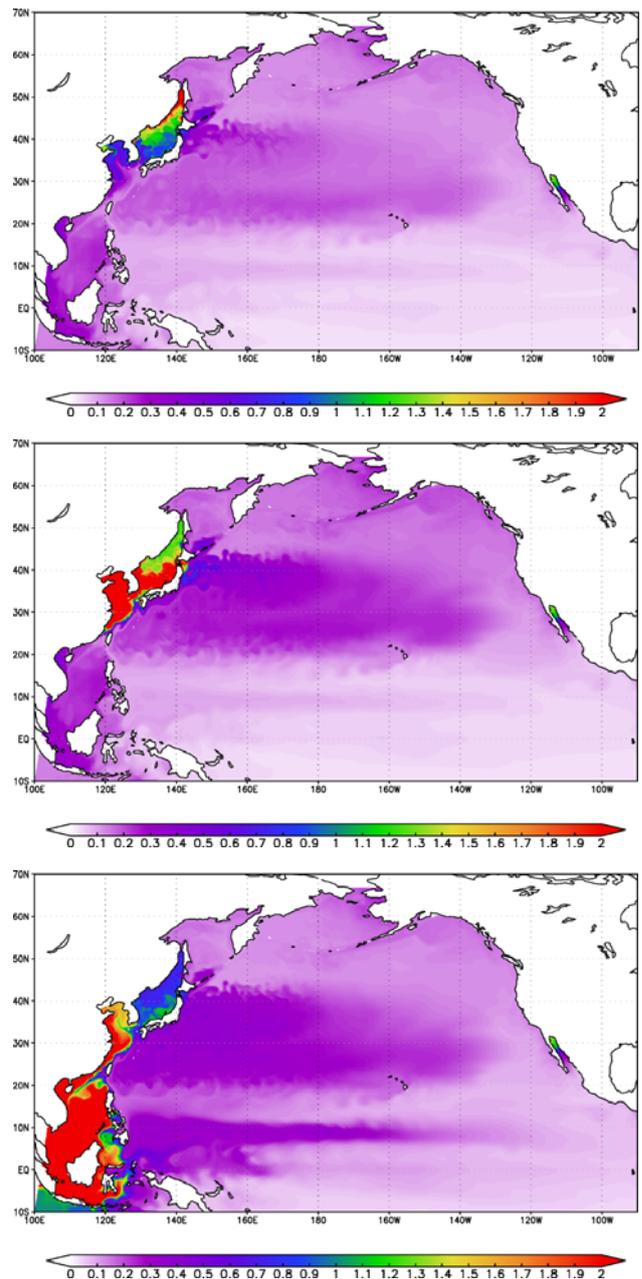


図 3 : 水深 1m の鉄濃度 (1 月月平均)。上から日本海、東シナ海、南シナ海の陸棚域でのみ海底堆積物由来鉄フラックスを与えたケース。

図 4 にオホーツク海、ベーリング海、北米西海岸のケースを順に示す。こちらも各海域で供給された鉄が移流により輸送されているが、鉄濃度が高まるのは主に亜寒帯であり、亜熱帯の鉄濃度が高くなった図 3 の 3 ケースと影響の広がる海域が異なる。図には示さないが図 4 の 3 ケースでは、鉄濃度が上昇した海域において基礎生産が増加し、海面における主要栄養塩が消費されてその濃度が下がり、観測値に近づいた。

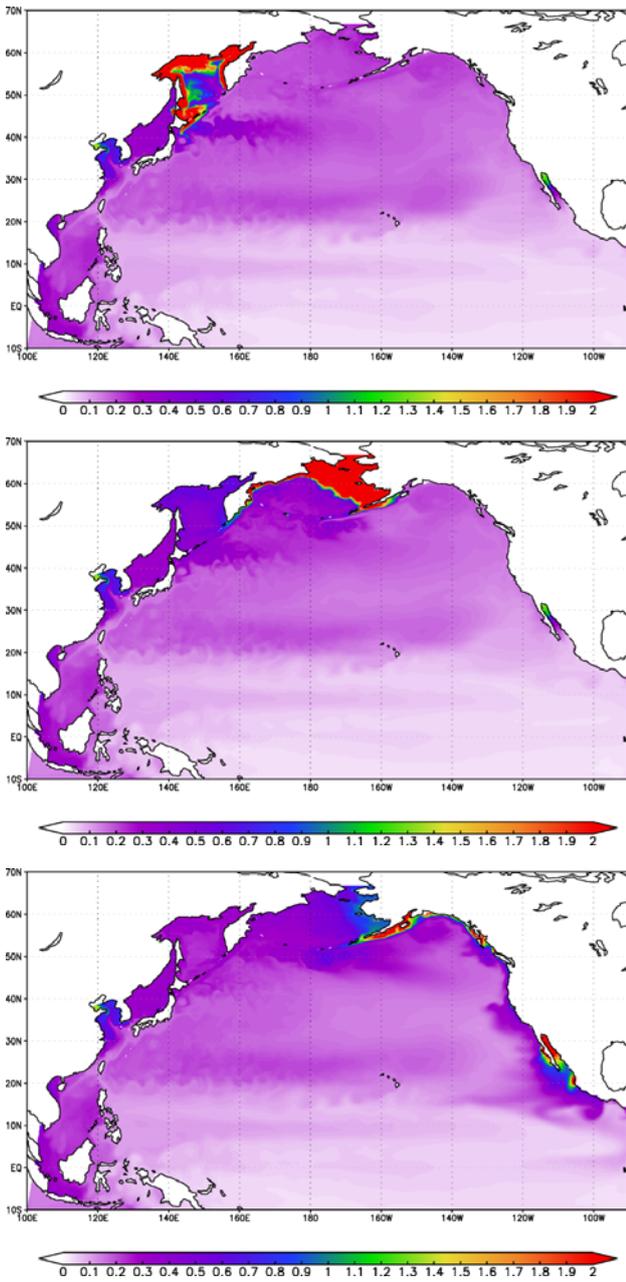


図 4：水深 1m の鉄濃度（1 月月平均）。上からオホーツク海、ベーリング海、北米西海岸の陸棚域でのみ海底堆積物由来鉄フラックスを与えたケース。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程

潮汐によって励起された内部重力波と渦の相互作用により混合を引き起こす過程について、3 次元非静水圧海洋モデルを用いて数値実験により調べている。本年度は、渦の形状への依存性を検討するため、ガウシアン型の渦の場合について数値実験を行いランキン渦の場合と比較した。

図 5 にガウシアン型の渦に入射した内部重力波の典型例を 2 つ示す。定性的には前年度までに実

験したランキン渦の場合と同様の現象が生じた。すなわち、力学的無次元パラメタ $\epsilon \ll 1$ では線形的な散乱が生じるが鉛直構造は変化しないのに対し、 $\epsilon \sim 1$ では非線形的な応答（渦に捕捉され、らせん状に中心へ貫入）が生じ、鉛直波数が増加する。したがって、渦の形状への依存性はあるものの、 ϵ による分類は、少なくとも実験した範囲では、成立することが示された。

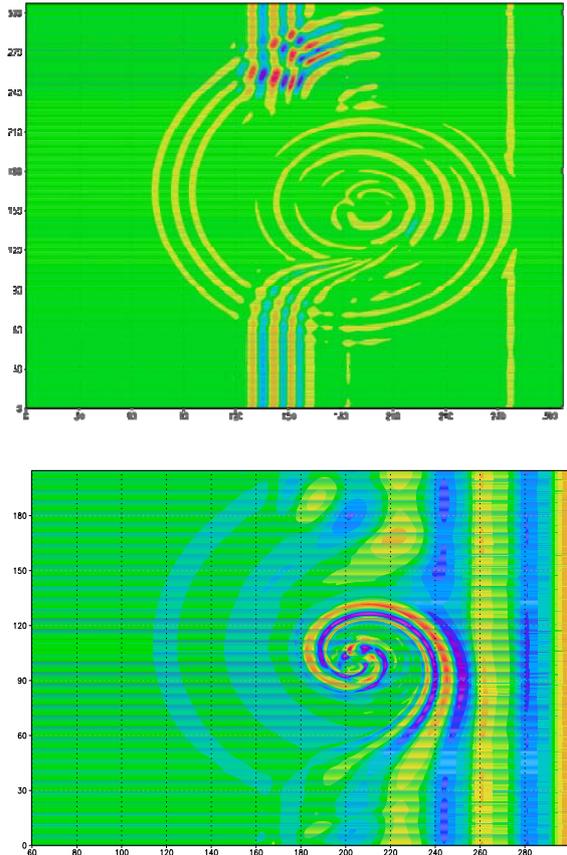


図 5：右側から入射した内部重力波による密度偏差の水平分布。(上) $\epsilon=0.02$ ，(下) $\epsilon=0.8$ のケース。

なお、この (II-b) 課題について今年度までの成果を国際シンポジウムで発表した共同研究者・伊藤薫（博士後期課程）が、そのシンポジウムにおける若手研究者（満 40 歳未満）を表彰する「Aota Masaaki Award 2017」を受賞した。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

課題毎の進捗状況については、5 節に記したように、課題申請時に設定した今年度の研究計画は順調に終了した。以下、それぞれの課題毎に進捗

状況と今後の展望についてまとめる。

(I) 計算機科学分野の検討課題

計画していた 3 次元非静水圧モデルの HITACHI SR16000/M1 向けの高速化チューニングを検討し、28.8%と大幅な実行性能向上を達成した。来年度は、メニーコア型スパコンへの移植と性能評価を行い、海洋モデルのメニーコア型への移行の可能性を検討する。

(II) 環オホーツク圏海洋シミュレーション

(II-a) オホーツク海を起源とする熱塩循環と栄養物質(鉄)循環：分担者が 1 人異動した際の引き継ぎや、(II-a)鉄循環モデルの実験設定に時間が掛かり、計算が予定より遅れたが、計画していた実験はほぼ終了した。得られた結果は、数値シミュレーションの再現性向上に役立つだけでなく、観測すべき海域や変数の抽出にも寄与する点で重要である。

来年度以降は、再現性向上のために、最新の観測データを用いた陸棚域における鉄供給量のコントロールの試みや、他の不確実な部分、例えば鉄化学モデルのスキャベンジング(溶存鉄の粒子への吸着による除去)など、についての感度実験などを順次行いたい。また、リーズナブルな再現性が得られた段階で、経年変動実験の実施を検討する。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程：渦の形に対する依存性を見るのに必要な実験は終了した。2つのかなり異なる形状で同様の結果が得られたことから、海洋で見られる渦の主な水平構造については、我々の提案した力学的分類とその指標が概ね成立すると言えるだろう。次は、渦が鉛直構造を持つ場合について検討していきたい。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, J. Nishioka, H. Mitsudera, and M. Wakatsuchi. Importance of Ekman transport and gyre circulation change on seasonal variation of surface dissolved iron in the western subarctic North

Pacific. Journal of Geophysical Research (査読有、accepted).

(2) 国際会議プロシーディングス

Ito, K. and T. Nakamura. Classification of interaction between a vortex and internal waves, and estimates of interaction-induced mixing in the North Pacific Ocean. *Proceedings of The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2017*, 184-186, (Feb. 19-22, 口頭), Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Japan. (Aota Masaaki Award 2017 受賞)

Nakamura, T., H. Mitsudera, H. Yoshinari, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, and K. Uchimoto. Effects of sedimentary supply on iron circulation in the North Pacific based on a high-resolution model. *Proceedings of The 32nd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2017*, 174-176 (Feb. 19-22, 口頭), Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Japan.

(3) 会議発表(口頭, ポスター等)

Ito, K. and T. Nakamura. Interaction of a vortex and internal gravity waves: classification by a non-dimensional parameter. *International Symposium "Ocean Mixing Processes: Impact on Biogeochemistry, Climate and Ecosystem"*, March 16-17, 2017 (ポスター), Sanjo Conference Hall, The University of Tokyo, Tokyo.

Ito, K. and T. Nakamura. An estimate of internal gravity wave trapping by vortices in the North Pacific using OFES 1/30deg output. *Meeting on Perspectives in Computational Atmosphere and Ocean Science and 8th OFES International Workshop*, March 13-14, 2017 (ポスター),

Environmental Studies Hall, Nagoya
University, Nagoya.

Nakamura, T., H. Mitsudera, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, J. Nishioka, and H. Nishikawa. Modeling of iron circulation around the Okhotsk Sea. *Ocean Material Circulation Modelling and Observations*, Mar. 13 (口頭), ILTS, Hokkaido University, Sapporo.

中野渡拓也, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 内本圭亮, 若土正暁. 北太平洋西部亜寒帯域のリン酸塩の経年変動. *西部北太平洋の微量元素の3次元循環像構築にむけたワークショップ*, 2016 年 11 月 14-15 日 (口頭), 北海道大学, 札幌.

立花義裕, 藤田啓, 宇田川祐介, 古関俊也, 中村知裕. 千島列島沿いの潮汐混合に伴う低水温がヤマセへ及ぼす遠隔影響. *2016 年度 日本海洋学会 秋季大会*, 2016 年 9 月 11-15 日 (口頭), 鹿児島大学郡元キャンパス, 鹿児島. (研究課題名と異なり大気の研究だが、過去に JHPCN で高速化チューニングを行ったモデルを用いた結果なので記載している)

(4) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

中村知裕, 三寺史夫, 内本圭亮, 中野渡拓也. 環オホーツク圏の海洋シミュレーション, *化学工学*, 第 81 巻, 第 5 号, 246-249, 2017.

中村知裕. オホーツク海の下層雲・霧と大気海洋相互作用. *低温環境の科学事典*, 第 10 章, 第 2 節, 朝倉書店, 2016.