

jh170027-NAJ

メニーコア型大型計算機での海洋シミュレーション (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 近年、スーパーコンピュータのアーキテクチャとしてメニーコア型の割合が増加しているが、海洋モデリング分野ではその利用が広まっていない。本研究では、海洋モデルをメニーコア型スパコンへ移植し性能評価を行った。また、前年度までのチューニングの成果を利用して「環オホーツク圏の海洋シミュレーション」を改良するため、(a) 海洋鉄循環モデルにおける陸棚域での鉄供給量のコントロール、および(b)海洋非静水圧モデルによる「傾圧」渦と内部波の相互作用による混合の数値実験を行った。

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
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
- 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：海洋シミュレーション、研究全般
および統括
岩下武史：非静水圧モデルの移植と性能比較
松村義正：KNL (Oakforest-PACS) 向けの移植
と性能評価・比較
中島研吾：KNL (Oakforest-PACS) 向けの移植
とチューニング
三寺史夫：海洋循環シミュレーション
大宮学：高速化チューニング
西川はつみ：海洋物質循環シミュレーション
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

近年、Oakforest-PACS をはじめスーパーコンピュータ (以下、スパコン) のアーキテクチャとして、メニーコア型の占める割合が増えてきている。北海道大学情報基盤センターにおいても次期大型

計算機としてメニーコア型スパコンの導入が計画されている。そこで、計算科学分野の研究者の協力の下、既に導入されている東京大学情報基盤センターのメニーコア型スパコンへ海洋シミュレーションに使う数値モデルの移植を行う。

当研究課題ではこれまでHITACHI SR16000/M1での高速化チューニングを行ってきており、メニーコア型を使用した実績がない。実際、海洋分野全体を見てもメニーコア型スパコンの利用はまだ進んでいない。そこで将来的なメニーコア型スパコンでの効率的な計算を目指すとともに、北海道大学情報基盤センターの次期スパコンへの移行準備として、本年度は、

- (1) 先ず、海洋非静水圧モデルについてメニーコア型スパコンへ移植し性能評価を行う。
- (2) 移行作業に並行して、海洋鉄循環モデルおよび海洋非静水圧モデルによる「環オホーツク圏の海洋シミュレーション」の改良を、前年度まで高速化チューニングを行ってきた HITACHI SR16000/M1 にて行う。

(2)の環オホーツク圏海洋シミュレーションは、環オホーツク圏 (オホーツク海とその周辺地域) における気候の形成と変動の鍵となる2つの現象、(a)オホーツク海を起源とする鉄 (栄養物質) 循環と熱塩循環、(b)潮汐による鉛直混合に注目する。

(a)の鉄は、海洋の生物基礎生産 (海洋植物プランクトン増殖) の主な制限要因である。しかし鉄は、海水には非常に溶けにくい一方で船や機材か

ら混入しやすいため測定に手間が掛かり、観測データが少ない。そのため数値シミュレーションが重要な研究手段となる。申請者らは鉄循環モデルを構築、高分解能化し、後者を改良中である。今年度は最新の観測データを用いて、鉄濃度の主な決定要因である陸棚域での供給量のコントロールを試みる。

(b)の鉛直混合は、海洋の流れ場に影響し(熱塩循環)、栄養物質を下層から光の届く表層へ供給するなど、海洋の循環・物質循環・生態系の形成における基本要素である。潮汐起源の内部重力波は鉛直混合の主なエネルギー源であり、内部重力波と渦の相互作用は鉛直混合を引き起こす重要だが未解明の過程である。これまで渦が順圧(鉛直一様)の場合について数値実験とそれに基づく理論構築を進めてきた。今年度は渦が傾圧(鉛直構造を持つ)の場合について数値実験を行う。

研究の意義

計算科学分野における意義として、海洋モデリング分野でのメニーコア型スパコン使用へのさきがけとなることが挙げられる。海洋科学の分野ではメニーコア型スパコンの使用がまだ広がっていない。本研究の成果として海洋モデルがメニーコア型スパコンで高速に実行できるようになれば、当該分野への普及に繋がると期待される。

また、海洋科学分野における意義も大きい。オホーツク海では冬季に海水が生成される際、冷却と塩の排出のため、高密度の海水が形成される(例えば、中村, 2015)。加えて、千島列島などでは潮汐・潮流が強く、内部重力波の生成を通して激しい鉛直混合が生じる[Nakamura et al., 2000; 2010; Abe and Nakamura, 2013]。これらの過程により形成された水塊はオホーツク海そして北太平洋全域の中層に広がり、オホーツク海起源の「熱塩循環」が駆動される[Nakamura et al., 2014; 2006]。この熱塩循環に伴い、大気中の様々な気体や「鉄」など陸起源の物質が北太平洋中層に取り込まれ循環する[Uchimoto, Nakamura et al., 2014; 2011; 2009]。環オホーツク圏ではまた、海洋熱塩循環によりオホーツク海陸棚域から輸送さ

れる「鉄」により、世界最大規模の生物基礎生産が生じている。この高い基礎生産は、食物連鎖を通し豊富な水産資源の基礎となり、CO₂の海洋内貯留など炭素循環にも重要な役割を果たす。しかも、以上全てが長期的な変化を示しつつある[Nakanowatari et al., 2015; 2007; Matsuda, Mitsudera 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社会的に重要な気候・環境の形成およびそれらの長期変動が生じており、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。本研究の成果は、こうした変動の要因解明と予測の重要な基礎となる。

3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

第一に、メニーコア型は従来のスパコンとアーキテクチャが大きく異なるため、海洋モデルのメニーコア型への移植とチューニングにおいては、計算科学分野の研究者との協力が大事となる。第二に、複数拠点構成機関のスパコンを使用させて戴くことで、今回のように各拠点のスパコンの更新に備えて、導入予定のアーキテクチャを持つ別の拠点のスパコンで予め移植・チューニングを行えることは、更新後のシミュレーションを効率よく進める上で重要である。こうした機会を提供して戴ける点が、当拠点公募型共同研究ならではの意義であった。また、各拠点の資源を使用させて戴き、そのサポートも戴けることも当共同研究の利点であった。

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

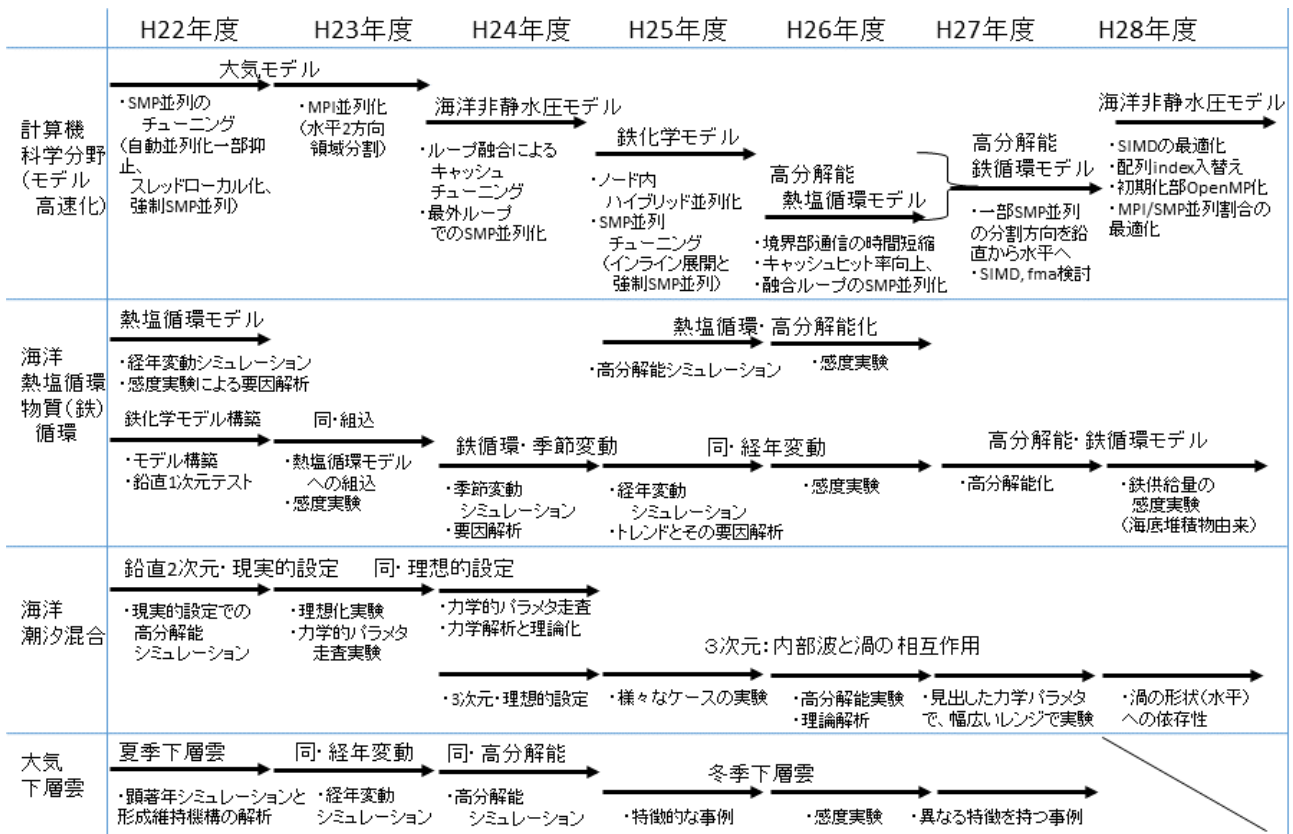


図 1 : 前年度までの成果

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一時中断している）。以上の成果として Impact Factor 付き国際学術誌に 11 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。

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

海洋非静水圧モデル kinaco について、メニーコア型スパコンである東京大学情報基盤センター Oakforest-PACS への移植を行った。移植した後、1 ノード（ノード内 MPI-OpenMP 並列）の場合について主な実行時オプション・コンパイルオプションのテスト、およびグリッド数を変更してのテストを行い、そして複数ノードでのテストを行った。最初に 1 ノードで行ったのは、昨年度 SR16000/M1 で行った高速化チューニングと同じ設定で比較するためである。

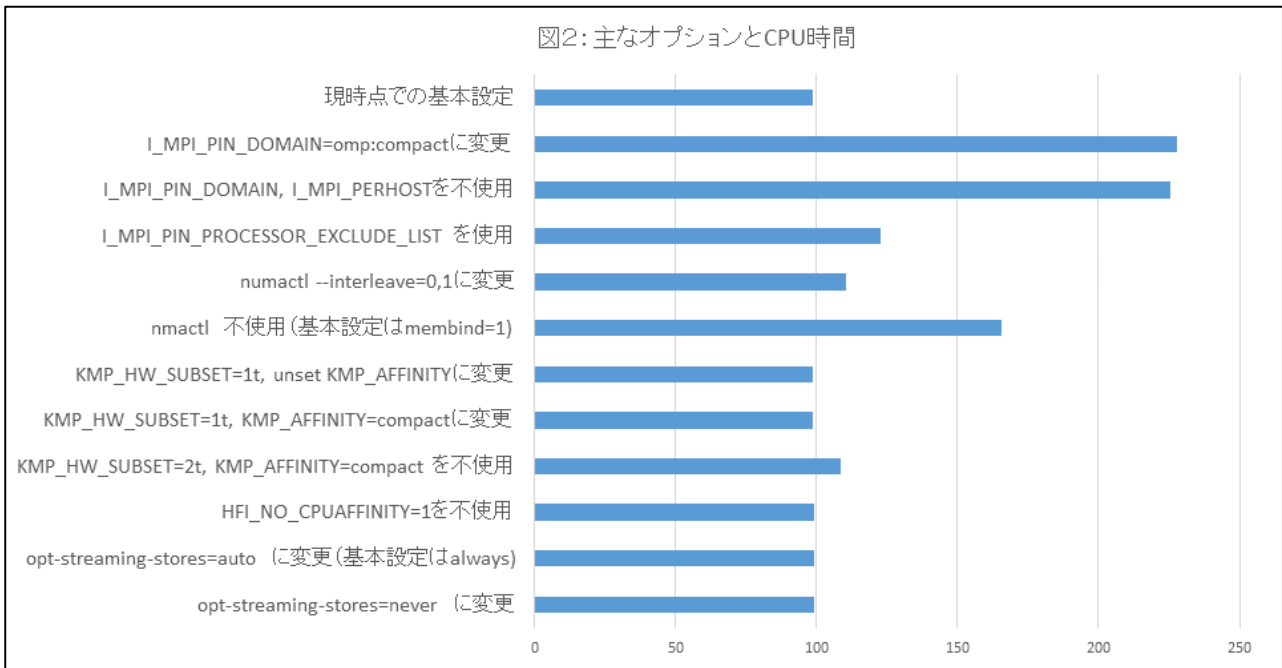
先ず、チューニングガイドで推奨されている主なオプションについてテストした結果を、図 2 にまとめる。特に効果的であったオプションは、

- ・ I_MPI_PIN_DOMAIN=4:compact
- ・ numactl --membind=1

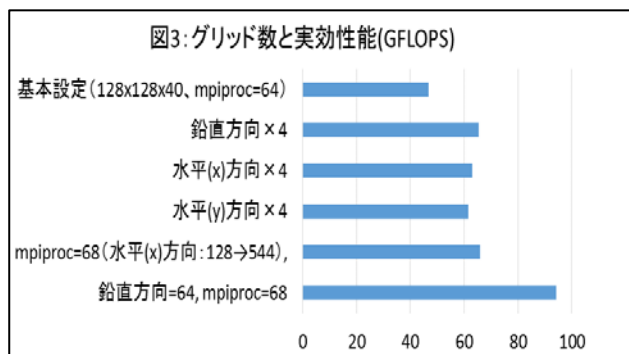
の 2 つだった。予想外なのは Tickless 設定 (I_MPI_PIN_PROCESSOR_EXCLUDE_LIST) を適用すると遅くなったことである。その理由は現時点では不明で、テスト設定に依存した何かがあるのかもしれない。Hyperthreading に関する実行時オプションと streaming-stores に関するコンパイルオプションは、今回の設定では影響が小さかった。オプション・テストの後に、共に 1 ノードで同じグリッド数の場合について、Oakforest-PACS と SR16000/M1 で比較した結果を表 1 に示す。実行性能は同程度となったが、後者の方が若干速かった。

	実効性能 (GFLOPS)	実行効率 (%)
SR16000/M1	44.9	4.6
Oakforest-PACS	46.9	1.5
Oakforest-PACS (グリッド数変更後)	94.2	3.1

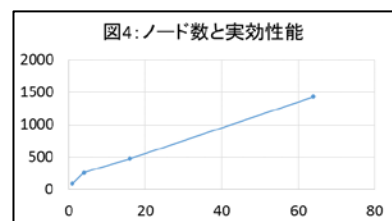
表 1



次に、グリッド数を変更して実効性能の変化を見た。これは同じグリッド数ではSR16000/M1の方がMPIプロセス数が少なく、1プロセス当たりのグリッド数が多いので、その影響を見るためである。単純にグリッド数を4倍にするだけでも実効性能は約1.3倍になったが、何よりも鉛直方向のグリッド数を2の累乗(40→64)にすると実効性能が大きく向上した(基本設定の約2倍、グリッド数4倍ケースの約1.5倍)。これは非静水圧を求める際の解法(MGCG)または鉛直方向にOpenMP化していることのどちらかが理由と思われる。なお、Oakforest-PACSは1ノード当たりのコア数が68と2の累乗ではないため、SR16000/M1との比較に用いた設定では使われないコアがあった。そこでノード内を68MPIプロセスに分割した所、ほぼ使用したコア数に比例する程度の増加(68/64倍)が見られた。以上の結果として、SR16000/M1の約2.1倍の実効性能となった(表1)。



最後に、複数ノードでのテストを行った結果を図4に示す。グリッド数変更後の設定を元に、ノード数と比例して水平グリッド数を増やした(weak scaling)。64ノード(64×68MPIプロセス)までは実験できたが、16ノードのケースで既に計算速度の低下が見られた。他のアーキテクチャのスパコンでは遙かに多くのノードまでスケールしたので、何か不適当な設定があったのかもしれない。また、ノード数(MPIプロセス数)を増やすと、MPIの初期化か何かで、極端に時間が掛かった(64ノードでelapsed timeが半日近く掛かった。ただしこれはcpu timeにはカウントされていない)。この原因は特定できていない。設定かオプションに不適当なものがあつたのかもしれない。また確認できていないが、この間にelapsed timeの制限で停止したジョブについては、tokenがelapsed timeではなくcpu timeで加算されているようだった。このelapsed timeとcpu timeの乖離のためもあり、256, 1024ノードのケースは、計算が始まる前にelapsed timeの制限に引っかかり計算が実行できなかった。



(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

一部海域における溶存鉄濃度の過大評価の原因が、東シナ海・南シナ海の陸棚堆積物からの供給にあることが昨年度の実験で判明したので、今年度は先ず、これら陸棚における溶存鉄濃度について、昨年度取得された最新の観測結果を用いて、コントロールを試みた。その結果を図 3 に示す。オホーツク海とその周辺およびベーリング海東部陸棚を除き、鉄が枯渇に近いという特徴を再現できた。

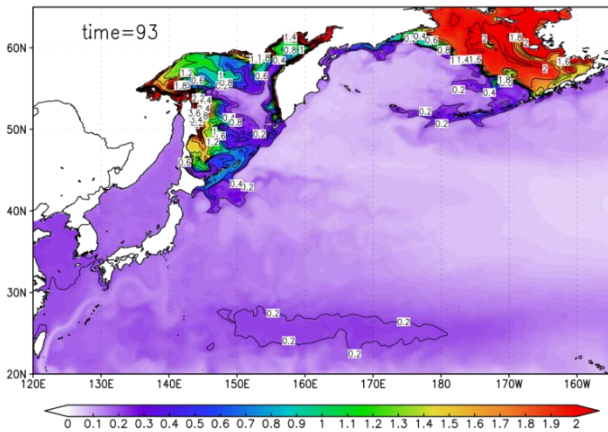


図 3：海洋表層の溶存鉄濃度（9 月の月平均値）

次に、表層における鉄の枯渇をよりよく再現するため、感度実験を、生物による取込速度のパラメタ： α (maximum export rate)、生物等に由来する沈降粒子に伴うスキャヴェンジングのスケールリングファクター： τ 、溶存鉄の安定度係数： K_{feL} について行った。 α と τ は大きいほど、 K_{feL} は小さいほど、表層の鉄は取り除かれやすくなり、溶存鉄濃度が下がる。感度実験の結果を図 4 に示す。減少幅は溶存鉄濃度の高いオホーツク海陸棚域でより顕著だったが、外洋でも有意に減少した。

これらの感度実験と東シナ海・南シナ海の陸棚上の溶存鉄濃度をコントロールすることで、再現性を向上することが出来た。

(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、鉛直構造を持つ渦（傾圧渦）の場合について数値実験を行った。

数値実験の結果、鉛直構造のある傾圧渦でも、鉛直構造のない順圧渦のときに見出した「渦と内部波の相互作用の指標」が大まかには使えること

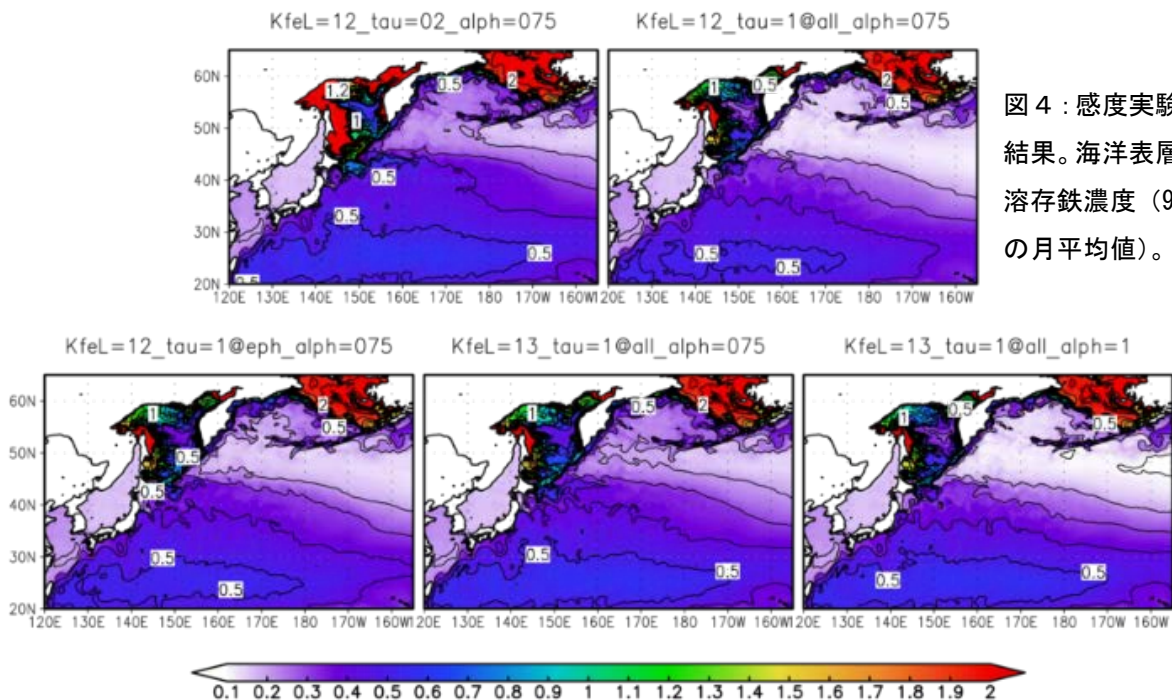


図 4：感度実験の結果。海洋表層の溶存鉄濃度（9 月の月平均値）。

が分かった（少なくとも今回実験した範囲では）。順圧渦の時と同様に、渦により散乱された内部波を図 5a に示す。そうは言うものの、渦の鉛直シアを原因とする面白い現象も新たに見つかった。図 5b はその一例で、散乱された内部波に渦から放射された内部波が重なって見られる。

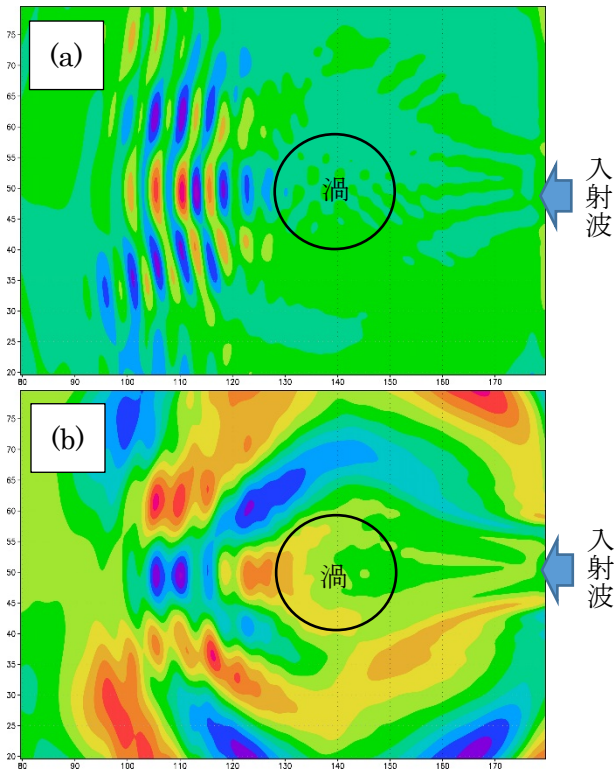


図 5 : 傾圧渦に図の右側から入射した内部重力波（平面波）による密度偏差の水平分布。赤色・青色が波による等密度面上昇・下降を示す。(a) 順圧渦の場合と同様の散乱、(b) 同様の散乱に加え、傾圧渦特有の現象も見られた場合。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

(I) 計算機科学分野の検討課題

今年度の目標は、メニーコア型大型計算機への移植を行った後、性能評価、アーキテクチャの異なる SR16000/M1 での性能との比較、そして主要な計算核に焦点をあてた分析を行うことであった。主目標である移植および簡単な性能評価と SR16000/M1 での性能との比較、そして基本的なテストは終了したものの、主要な計算核の分析については VTune Amplifier XE で試み始めた所で時間切れとなってしまった。したがって進捗状況は

7 割程度と考えている。

現時点で明らかな具体的課題として、上記の主要計算核の分析に加えて、OpenMP がある。SR16000/M1 等の従来型スパコンでは OpenMP を有効に用いて高速化できていたが、Oakforst-PACS ではまだ OpenMP を有効に使えていない。こちらについては今後検討したい。

また、来年度には (II-a) に用いた海洋物質循環モデルの次期スパコンへの移植と高速化チューニングを行う。

(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

申請時に計画していた「最新の観測データを用いた陸棚上の溶存鉄濃度のコントロール」および「生物への取込等の溶存鉄を減少させる過程の感度実験」を終了した。進捗状況は 10 割と判断する。

今後は、経年変動のシミュレーションとその要因解析および、鉄濃度の高い海域で重要となる潮汐混合の影響を調べていく計画である。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程

こちらにも、申請時に計画していた「渦が鉛直構造を持つ場合についての数値実験」を終了したので、進捗状況は 10 割とする。今後は、今年度に見出した「渦の鉛直構造に由来する、渦と内部波の相互作用」に注目した数値実験を来年度以降に行いたい。

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 (2017). 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*, 122, 4364-4391, doi:10.1002/2016JC012354.

H. Mitsudera, T. Miyama, H. Nishigaki, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, T. Nakamura, T. Wagawa, R. Furue, Y. Fujii, S. Ito (2018). Low ocean-floor rises regulate subpolar sea surface temperature

- by forming baroclinic jets. *Nature Communications*, 9:1190, DOI: 10.1038/s41467-018-03526-z.
- (2) 国際会議プロシーディングス
- Mitsudera, H., Y. Hirano, H. Nishikawa. On the seasonal variations of the Bering Slope Current. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2018*, p. 211-214, (Feb. 18-21), Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Japan.
- Takahashi, Y., T. Nakamura, T. Nakanowatari. Impact of interannual variations of sea ice area in the Sea of Okhotsk on the atmosphere and ocean. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2018*, p. 234-237 (Feb. 18-21), Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Japan.
- Chou, H.-W., H. Mitsudera, H. Nishikawa. Hypothesis of dynamics of water exchange between the Sea of Okhotsk and the Pacific from a point of view of tidal effects. *Proceedings of the 33rd International Symposium on Okhotsk Sea and Polar Oceans 2018*, p. 230-233 (Feb. 18-21), Okhotsk Sea and Polar Oceans Research Association, Mombetsu, Japan. (Aota Masaaki Award 2018 受賞)
- (3) 国際会議発表
- Ito, K. and T. Nakamura. Mapping of vortex and internal waves interaction-induced mixing in the North Pacific from OFES30 output. JpGU-AGU Joint Meeting 2017, AOS15-12, May 20-25, 2017, Makuhari Messe, Chiba.
- Nakamura, T., H. Mitsudera, H. Yoshinari, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, K. Uchimoto. Effects of sedimentary supply on iron distribution in the North Pacific: Sensitivity experiments with a high-resolution model. 2018 Ocean Sciences Meeting, BN44D-1251, Feb. 11-16, 2018, Portland, USA.
- (4) 国内会議発表
- 三寺 史夫、平野 洋一、Bering Slope Current とそれに伴う高気圧性渦の季節変動について。幕張メッセ、千葉、日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 5 月 23 日、2017.
- 西川はつみ、三寺史夫、吉成浩志、中野渡拓也、中村知裕. 北太平洋亜寒帯域における物質循環の高解像度シミュレーション. 2017 年度日本海洋学会秋季大会, 17F09-P08, 2017 年 10 月 13-17 日, 仙台国際センター 会議棟、東北大学青葉山北キャンパス、仙台.
- 三寺史夫、平野洋一、西川はつみ、Bering Slope Current とその周辺で生成する渦の季節変動、2017 年度日本海洋学会秋季大会, 2017 年 10 月 13-17 日, 仙台国際センター 会議棟、東北大学青葉山北キャンパス、仙台、10 月 14 日-16 日、2017.
- 伊藤薫、中村知裕. OFES 出力を用いた渦・内部波相互作用による混合の解析. 2017 年度日本海洋学会秋季大会要旨集, 2017.
- 西川はつみ、三寺史夫、吉成浩志、中野渡拓也、中村知裕、内本圭亮、羽角博康. 北太平洋亜寒帯域における高解像度物質循環シミュレーション. 第 3 回新海洋混合学全体会議, 2018 年 3 月 15-16 日, 東京大学大気海洋研究所, 千葉. (若手ポスター賞受賞)
- Chou, H.-W.、三寺史夫、西川はつみ. Numerical simulation of overturning circulation in North Pacific: A. Hypothesis of Dynamics of Water Exchange between the Sea of Okhotsk and Pacific from a point of view of tidal effect. 第 3 回新海洋混合学全体会議, 2018 年 3 月 15-16 日, 東京大学大気海洋研究所, 千葉.
- Ito, K., T. Nakamura. Data analysis of mixing due to interaction of vortex and internal waves with OFES30. Japan Geophysical Union 2018. May 20-24, 2018. Makuhari Messe, Chiba, Japan (accepted).
- 中野渡拓也、中村知裕、三寺史夫、西岡 純. 親潮域の表層リン酸塩濃度の季節から経年変動メカニズム: 風応力で駆動される沿岸捕捉流の役割. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会. May 20-24,

2018. 幕張メッセ、千葉 (accepted).

Nishikawa, H., H. Mitsudera, H. Yoshinari, T. Nakanowatari, T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Hasumi. High resolution biogeochemical modelling in the North Pacific. Japan Geophysical Union 2018. May 20-24, 2018. Makuhari Messe, Chiba, Japan (accepted).

(5) 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 卷，第 5 号，246-249，2017.