

jh150049-NA27

環オホーツク圏の海洋・大気シミュレーション

中村知裕（北海道大学）

概要 環オホーツク圏では、オホーツク海起源の海洋熱塩循環・潮汐混合・栄養物質（特に鉄）循環に伴い、世界でも最大規模の基礎生産が生じ、豊富な水産資源や炭素循環に影響している。また下層雲は北海道の気候に影響する。最近ではこれらに長期変動が生じていることも明らかになってきた。本研究では、こうした現象の理解と数値モデルによる再現性の向上に向け、環オホーツク圏の海洋・大気シミュレーションと使用する数値モデルの高速化チューニングを行う。本年度は、(I) 計算機科学分野の課題として、高分解能・海洋「鉄」循環モデルの高速化チューニングを行い、(II) 環オホーツク圏大気・海洋シミュレーションとして、(a) 高分解能での海洋鉄循環シミュレーションの実施および気候学的季節変動の再現性の検討、(b) 様々な力学レジームにおける内部重力波と渦の相互作用の高分解能数値実験、(c) オホーツク海沿岸冬季下層雲の様々な事例についてのシミュレーションを行った。

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

(2) 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

(3) 参加研究者の役割分担

中村知裕：海洋と大気のシミュレーションおよびプログラムの高速化

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・熱塩循環シミュレーション

吉成浩志：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

成される。形成された高密度水は、オホーツク海そして北太平洋の中層に広がっていく。

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]。

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が大陸棚海底に沈み、やがて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）および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）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

2. 研究の目的と意義

環オホーツク圏（オホーツク海とその周辺地域）は、日本の気候に多大な影響を与えるだけでなく、北太平洋における海洋循環や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、それにより形成される下層雲は、日本海側で発生する筋状雲のように、多くの降水（降雪）をもたらす、生活・経済に影響する。

吹き出した寒気は、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、海水中の塩が排出されるため、高密度の海水が形

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および大気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、環オホーツク圏の気候・環境に重要な 3 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、(c) オホーツク海周辺の下層雲—について数値シミュレーション研究を行う。加えて、これら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。

以上の研究を進めていくため本年度は下記を目的とする。

(I) 高速化チューニング：前年度に「熱塩」循環の高分解能モデルに対して高速化チューニングを行ったので、本年度は「鉄」循環の高分解能モデルに対して HITACHI SR16000/M1 用の高速化チューニングを検討する。

(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：前年度までの研究から、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]。一方、これまで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い。そこで、本年度から鉄循環モデルを高分解能化し、移流をより詳細にシミュレーションする。

(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が示唆された。この相互作用は渦のサイズなどの力学パラメタによって振舞が大きく異なる。そこで本年度は、前年度までの実験と解析から明らかになった重要な無次元の力学パラメタに注目し様々なパラメタ・レンジにおける振舞を調べる。

(II-c) オホーツク海周辺の下層雲：冬季、オホーツク海側では大量の降雪をもたらす下層雲（帯状雲）が頻繁に形成・維持される。前年度までに強風を特徴とする事例についてシミュレーションと感度実験を行い形成・維持機構を調べた。本年度は、弱風時に形成されるという異なる特徴を持つ事例を中心に複数事例のシミュレーションを行う。

研究の意義

現在気候・現在環境の再現とそれらの形成・変動メカニズム解明は、地球温暖化や長周期変動に伴う環オホーツク圏の変化の信頼性の高い予測の必要条件である。中でも、環オホーツク圏太平洋側では近年表層の栄養物質そして基礎生産が減少傾向にあり、温暖化が原因ではないかとの示唆もある。もしこの示唆が正しければ、温暖化が進むと基礎生産がさらに減少し、ひいては水産資源・炭素循環も大きく影響を受けることから、先行きが懸念されている。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

本共同研究により、計算科学の専門家と共同研究を行えたことが当共同研究ならではの事項の第一である。このことは、北海道大学情報基盤センターの大型計算機システムでの高速化チューニングにとどまらず、報告書に記していない細かな情報交換においても顕著であった。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。

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、(c)下層雲についても、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、現象の解明も進められ、その成果として国際学術誌に 9 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。

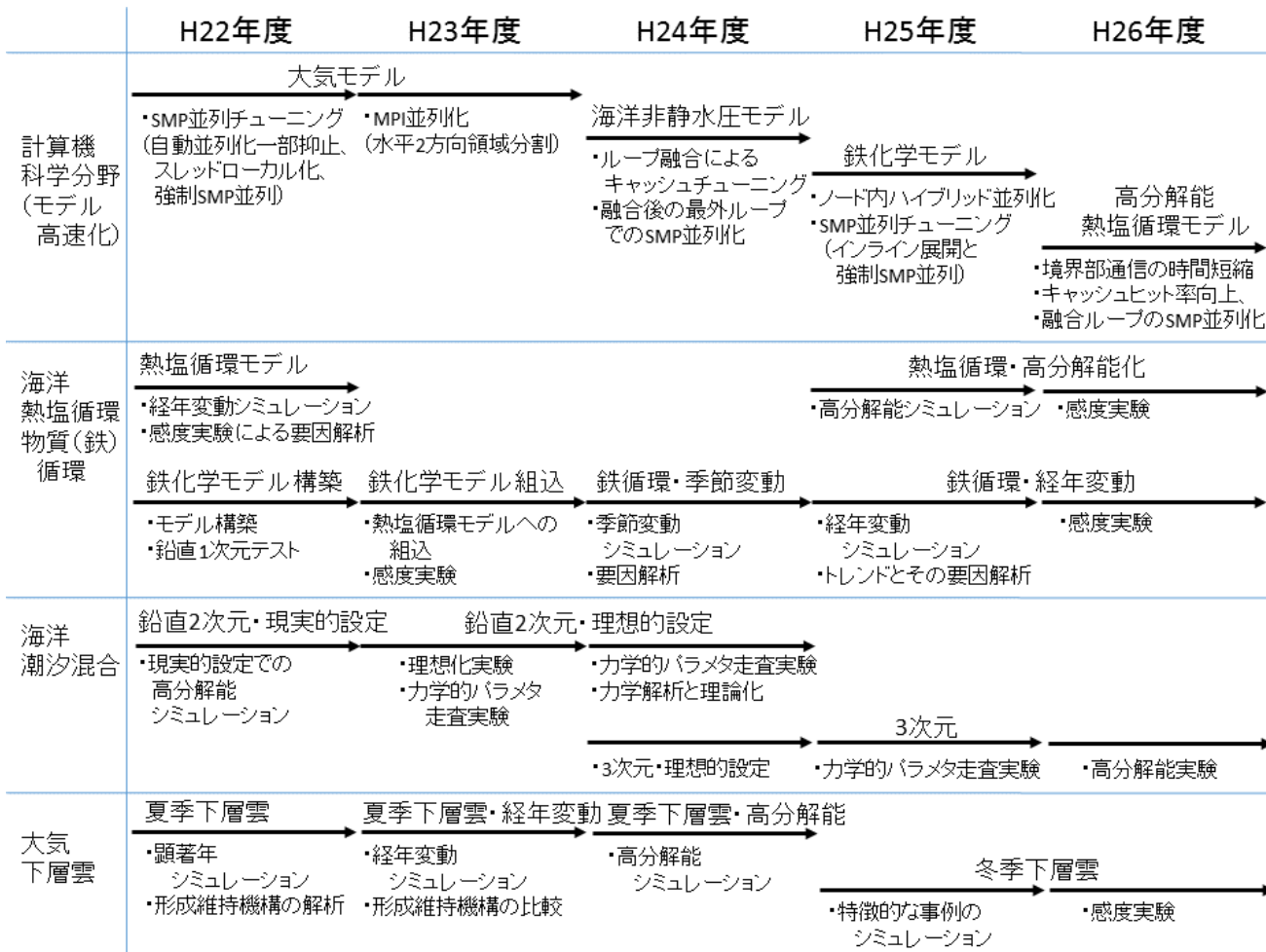


図 1：前年度までの成果概要

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、鉄循環の高分解能モデルに対して SR16000/M1 用の高速化チューニングのため、専門家の助力により(1)通信部の改良、(2)キャッシュヒット率向上のためのループ融合、(3)SIMD 演算用の変更、(4) fma の適用の検討を行った。このモデルには前年度にチューニングした熱塩循環モデルとの共通部分が多く、その成果に上積みする形になっている。

(1)の通信部改良については、対象となる配列には鉛直 1 層の場合と複数層の場合があるのだが、通信のための配列コピーの際この鉛直層数で分割して SMP 並列を適用していたため、鉛直層数が少ないと SMP 並列処理の負荷不均等が生じてコピー時間の短縮が図れていなかった。そこで、鉛直層数が少ないときには水平格子に対して SMP 並列を適用するように改善した。また、通信関数の実行と配列コピーの順序を変更して通信と配列コピーが同時に実行し易いように調整した。

(3)では SIMD 演算適用に向けたループ修正および SIMD 化により性能が低下する演算部で SIMD 化を抑止するようにした。(4)の fma 適用だが、稀に発生する不安定が fma を抑止すれば防げたので、これまでは保険のために抑止していた fma を高速化のために適用することを検討した。

チューニングの結果、実行時間は(1)と(2)、(3)により同程度に短縮され、fma 適用により大幅に短縮され、全てを合わせると 4.6%短縮を達成できた。(ループ融合(2)は前年度に大部分が行われており、今回はごく一部のみなので、図には(1)とまとめて記す。)なお、(3)および fma 適用により、出力結果が僅かながら変わったが、検討した結果、本研究の目的に対しては許容範囲内であった。

今回のチューニング結果が 5%弱の実行時間短縮にとどまったことについてはコメントが必要かもしれない。主な理由として、今回高速化した鉄循環モデルと、H25 年度と H26 年度に高速化チューニングを行った鉄化学モデルおよび熱塩循環モデルとはコードの大部分が共通しているため、効率的に高速化できる余地があまり残っていなかったことがあると考えている。実際、実行効率を通信時間も含めて計算するとほぼ 10% (9.83%) となったので、それなりに高い効率が出ていると考えられる。ただし、上の実行効率は演算量の最も多い MPI プロセスについて計算したものであり、MPI プロセス間の演算量は大きく偏っている。この偏りは、海洋モデルによく見られる「陸の分布の不均衡さ」に起因する。理論的にはこれも改善可能で、そうするとかなりの高速化が見込めるが、それには MPI 並列化部分について抜本的な変更が必要となるため、現在の体制で実施するのは少々困難と思われる。その意味で、現時点で鉄循環モデルは SR11000 用に十分に高速化チューニングが施されたものとなっており、高速化は一段落付いたと言えるだろう。

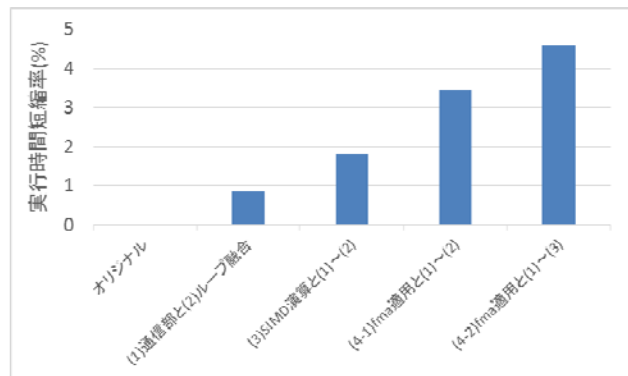


図 2：高速化チューニングによる実行時間の短縮率 (%)。

(II) 環オホーツク圏海洋・大気シミュレーション (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

本年度の計画は、鉄循環の高分解能・気候学的季節変動シミュレーションの実施と、その再現性の検討である。シミュレーションで得られた中層における溶存鉄の分布を図 3 に示す。亜寒帯域、特にオホーツク海、ベーリング海、ならびに北米沿岸で鉄濃度が高い様子がシミュレーションされている。

海面における溶存鉄とリン酸の分布を、オホーツク海から親潮域について拡大して図 4 に示す。鉄が、アムール川から東サハリン海流により北海道の方へ輸送され、海流や渦・ストリーマーによって北太平洋に広がる様子が再現されている (図 4 左)。リン酸を見ると、千島列島域の潮汐混合により下層から供給され、それが親潮や渦などで広がっている (図 4 右)。

こうした鉄の分布は大きくは観測的知見と整合的している。しかし、値は一部海域で多少過大評価されており、今後、堆積物からの供給率などを検討する必要があるだろう。

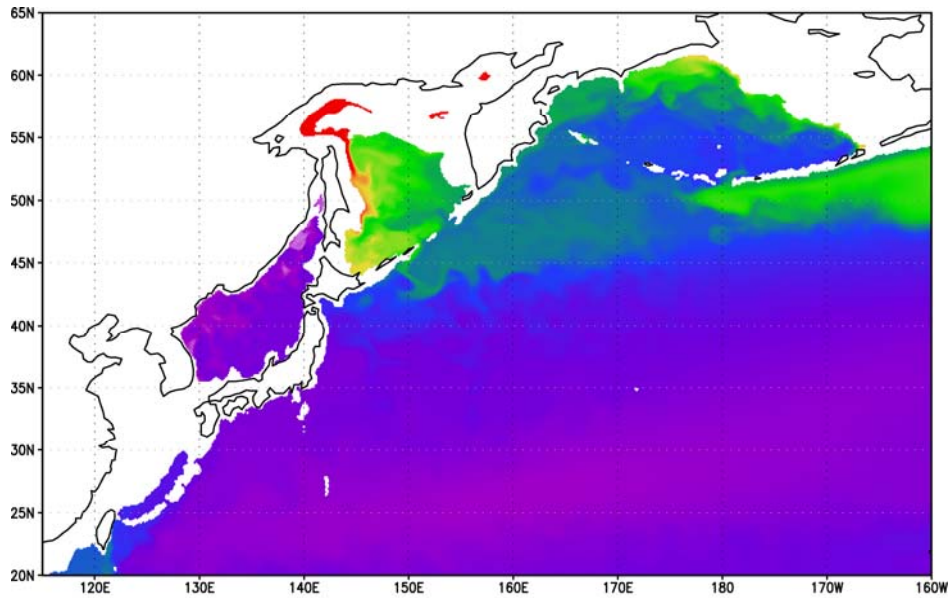


図 3：高分解能・鉄循環シミュレーションの結果。中層（ $27.0\sigma_\theta$ 等密度面上）における溶存鉄（nM）濃度。図は北太平洋北西部を中心に示しているが、モデル領域は太平洋の大部分をカバーしている。

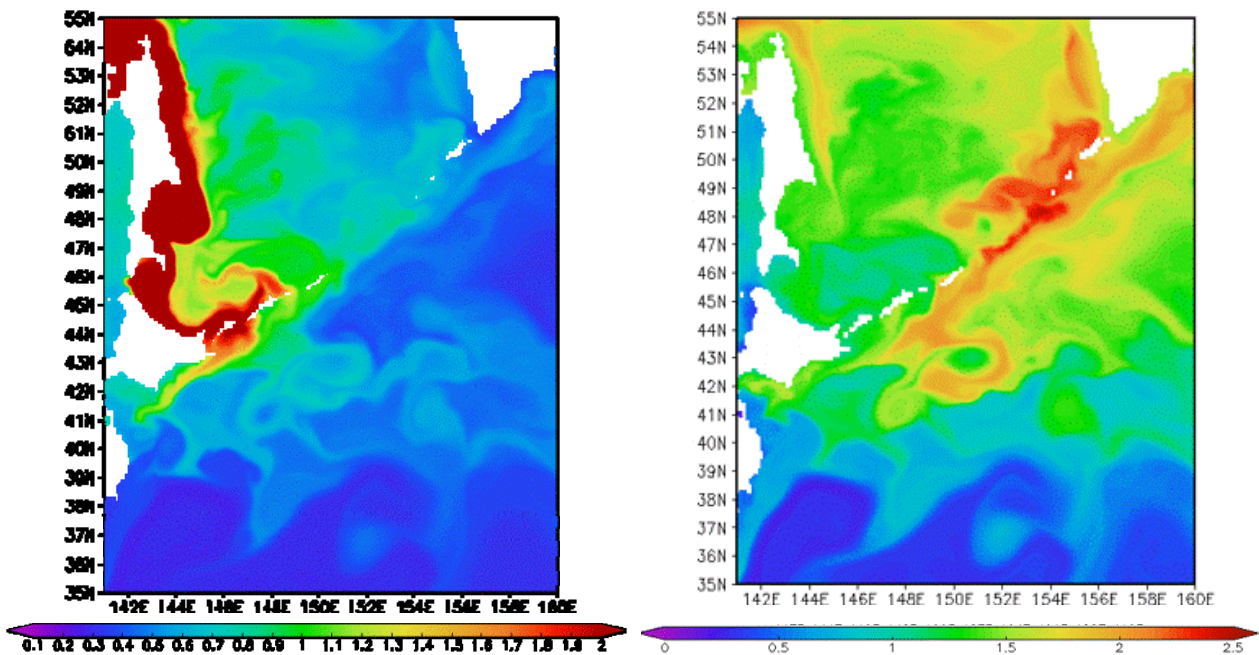


図 4：冬季の海面（左）溶存鉄（nM）と（右）リン酸濃度（mM）。

(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を行った。本年度は、相互作用の力学レジームの指標となる力学パラメタ ϵ （本研究で提唱しているもの）の値を幅広く変えて、複数（6ケース）の高分解能数値実験を計画し実施した。

図 5 の右側から入射した波が、黒丸で示した渦の中心部を通る際に変形されるのだが、力学パラメタ ϵ の値に応じて、応答が変わる。 ϵ が小さいときは屈折するだけなのだが（図 5 上）、少し大きくなると後方へも散乱されるようになり（図 5 中）、大きくなると極度に変形され渦に捕捉されてしまう（図 5 下）ことが明らかになった。また、解析的に取り扱えるように近似をした場合について理論

モデルも構築している。

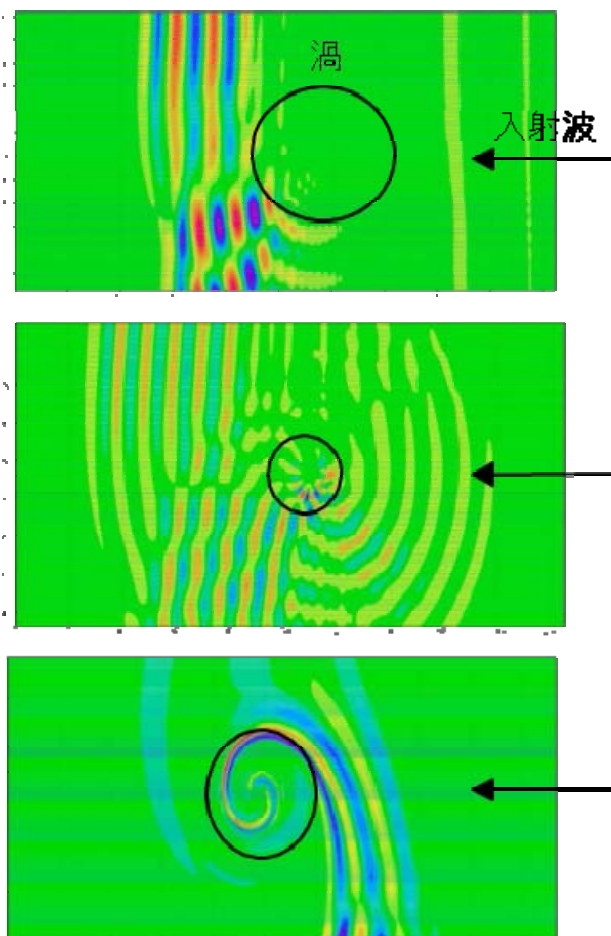


図 5：内部重力波と渦の相互作用の数値シミュレーション結果の例。波による鉛直変位（中層の密度変動）の水平分布。（上） $\varepsilon=0.08$ （中） $\varepsilon=0.16$ （下） $\varepsilon=1.2$ のケース。

(II-c) オホーツク海周辺の下層雲

本年度は、冬季にオホーツク海側に大量の降雪をもたらす下層雲（帯状雲）のシミュレーションを、強風と弱風の事例を含む一冬分の事例について行うことを計画し実施した。図 6 に示した弱風の事例では、夜間に冷えた陸面と暖かいままの海面の温度差が形成の主因であり、そのため昼になると弱まり、強風の場合と異なって長期間維持されにくいことが示された。

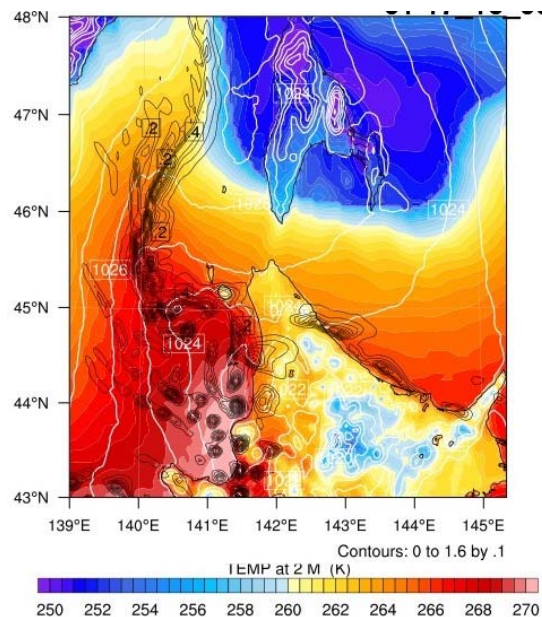


図 6：冬季の北海道オホーツク海沿岸帯状雲の弱風事例の数値シミュレーション結果。色：表面気温 (K)、黒線：鉛直積分した凝結物混合比（雲水・雪等）、白線：海面気圧 (hPa)。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

先ず、計算資源は全て使用し、計画していた計算は全て終了した。次に、課題毎の進捗状況についても、以下に順に記すように、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。今後の展望についても以下に進捗状況と合わせて課題毎に記す。

(I) 計算機科学分野の検討課題

計画していた高分解能・鉄循環モデルの高速化チューニングを実施し、実行時間の短縮を達成できた。計算精度についても検討し、問題ないことを確認した。これで平成 25 年度からコンポーネント毎に行ってきた鉄循環モデルの高速化も一段落した。そこで、来年度から一旦、別のモデルの高速化チューニングに移りたい。平成 28 年度は非静水圧モデルについて新しく開発した部分の高速化チューニングを検討する。

(II) 環オホーツク圏海洋・大気シミュレーション

(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：計画していた高分解能での鉄循環シミュレーションを実施できた。再現性の検討の結果、おそらく堆積物からの供給率といった

低解像度モデルで使っていたパラメタを再検討する必要があることが判明した。来年度は先ず、堆積物からの鉄供給率を中心に感度実験を行いたい。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程：超高分解能での実験 6 ケースを計画通り終了し、理論モデル構築も目処が付いた。来年度は、異なる形状の渦の場合についても数値実験を行い検討したい。

(II-c) オホーツク海周辺の下層雲：計画していた複数事例のシミュレーションを終了し、その解析を行うことができた。来年度は参加できる研究者の都合で現時点ではペンディングとなる予定である。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Kida, S., H. Mitsudera, S. Aoki, X. Guo, S. Ito, F. Kobashi, N. Komori, A. Kubokawa, T. Miyama, R. Morie, H. Nakamura, T. Nakamura, H. Nakano, H. Nishigaki, M. Nonaka, H. Sasaki, Y. N. Sasaki, T. Suga, S. Sugimoto, B. Taguchi, K. Takaya, T. Tozuka, H. Tsujino, and N. Usui. (2015) Oceanic fronts and jets around Japan: a review. *Journal of Oceanography*, DOI 10.1007/s10872-015-0283-7.

内本圭亮, 中村知裕, 西岡純, 三寺史夫, 三角和弘, 津旨大輔, 若土正暁: オホーツク海高密度陸棚水への鉄のポテンシャル供給域, *低温科学*, Vol. 74, 95-104, 2016.

中野渡拓也, 三寺史夫, 中村知裕: オホーツク海と北太平洋中層水の数十年スケール変動とそのメカニズム, *低温科学*, Vol. 74, 127-141, 2016.

西岡純, 三寺史夫, 白岩孝行, 関宰, 中村知裕, 的場澄人, 江淵直人: 日本周辺に存在する「陸海結合システム」の理解に向けて. *低温科学*, Vol. 74, 175-180, 2016.

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Nakamura, T., Y. Takeuchi, K. Uchimoto, H. Mitsudera, M. Wakatsuchi. Effects of temporal

variation in tide-induced vertical mixing on the thermohaline circulation: A case of the Okhotsk Sea. *26th IUGG General Assembly 2015*, Jun. 22- Jul. 2, Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic.

Ito, K. and T. Nakamura. Vortex-internal waves interaction in quasi-linear and nonlinear regimes. *26th IUGG General Assembly 2015*, Jun. 22- Jul. 2, Prague Congress Centre, Prague, Czech Republic.

Nakamura, T. Observations of submesoscale eddies in Oyashio and Kuril regions. 2015 Fall Meeting of the Oceanographic Society of Japan, *Symposium A: Submesoscale Oceanography -Prospect for a new world-*, 26-29, Sep. 2015, Matsuyama.

Ito, K. and T. Nakamura. Theoretical analysis of vertical mode internal waves affected by a vortex. 2016 Ocean Sciences Meeting, Feb. 21-26, Ernest N. Memorial Convention Center, New Orleans, LA, USA.

Nakamura, T., Y. Takeuchi, K. Uchimoto, H. Mitsudera, M. Wakatsuchi. Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing on thermohaline circulation: Numerical experiments for the case of the Okhotsk Sea. 2016 Ocean Sciences Meeting, Feb. 21-26, Ernest N. Memorial Convention Center, New Orleans, LA, USA.

(4) 国内会議発表

伊藤薫, 中村知裕. 準線形・非線形での渦と内部波の相互作用. 2015 年度 日本海洋学会 秋季大会, 2015 年 9 月 26-29 日, 愛媛大学城北キャンパス, 松山.

吉成浩志, 三寺史夫, 中野渡拓也, 中村知裕, 内本圭亮, 羽角博康, 若土正暁. 北太平洋高解像度海洋海水モデルと物質循環モデルの結合実験. 2016 年度 日本海洋学会 春季大会, 2016 年 3 月 14-18 日, 東京大学本郷キャンパス, 東京.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

中村知裕: 環オホーツク海域における海洋循環.

低温科学便覧 (北海道大学低温科学研究所編), 第 8 章, 第 2 節, 丸善出版株式会社, 2015.

中村知裕: オホーツク海の下層雲・霧と大気海洋

相互作用. *低温と環境の科学事典*, 第 10 章,
第 2 節, 朝倉書店 (印刷中)