

jh140046-NA26

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、先ず(I)計算機科学分野の課題として、海洋鉄循環モデル全体の高速化チューニングを行った。次に(II)環オホーツク圏大気・海洋シミュレーションとして、(a) 海洋鉄循環の経年変動シミュレーションと高分解能熱塩循環シミュレーションそれぞれについての感度実験、(b) 内部重力波による鉛直混合過程の高分解能 3 次元数値実験、(c) オホーツク海沿岸冬季下層雲の形成過程についての感度実験を行った。

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

(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
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
松田淳二：海洋熱塩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
Yagnesh, R. Y.：大気シミュレーション

2. 研究の目的と意義

研究の目的

環オホーツク圏（オホーツク海とその周辺地域）は、季節変動や気候変動に顕著な特徴を持ち、日本とりわけ北日本の気候に大きな影響を与えている。冬季には、北半球の寒極となるシベリアから寒気が吹き出す。吹き出した寒気により形成される冬季の下層雲（筋状雲）は、日本海側で発生す

る筋状雲に見られるように、多くの降水（降雪）をもたらす、生活・経済に影響する。寒気はまた、オホーツク海で大規模な海氷生成を引き起こす。

オホーツク海における海氷生成は北海道沿岸の気候や産業に影響するだけでなく、北太平洋ほぼ全域の海洋中層循環に影響を与えている。海氷生成の際には、海水が結氷点まで冷却される上に、海水が凍る際に不純物として塩が排出されるため、高密度の海水が生成される。生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る。

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]。これら的高密度水生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., 2006]。熱塩循環に伴い、大気に接していた海水が海洋中層に潜り込むので、大気中の酸素、温室効果気体、フロンといった様々な気体が北太平洋中層に取り込まれ、それら物質の循環に影響する [Uchimoto et al., 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、食物連鎖を通し豊富な水産資

源の基礎となるとともに、二酸化炭素の海洋内貯留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最近の研究から分かってきた [Nishioka et al., 2007]。すなわち、鉄は 2 価と 3 価のイオンを持つことから光合成等における電子伝達に使われているが、海水には極めて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、このこと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れらの現象は、顕著な数年から数十年規模の変動を持つのに加えて、シベリアを中心に顕著な温暖化が進行している。温暖化の特に著しい地域では、平均して 10 年間に 2°C のペースで冬季の気温が上昇している。温暖化に伴うようにオホーツク海の水氷面積も減少傾向にあることから、上述のオホーツク海起源の熱塩循環が弱まっていく可能性が危惧されている [Nakanowatari et al., 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。そこで代表者らのグループでは、環オホーツク圏の気候および環境変動のより良い理解のために、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。より具体的には、4 節に記す前年度までの成果を基に、本年度は下記を目的とした：

- (I) 熱塩循環の高分解能モデルの高速化、
- (II-a) 低分解能モデルで再現された鉄循環の経年変動、および高分解能モデルで再現された熱塩循環、それぞれの支配要因の評価、
- (II-b) 内部重力波と渦の相互作用による鉛直混合についての 3 次元高分解能シミュレーション、
- (II-c) 冬季オホーツク海沿岸帯状雲の形成維持機構の検討。

研究の意義

現在気候・現在環境のシミュレーションとそれらの形成・変動メカニズム解明は、地球温暖化に伴う環オホーツク圏の変化の理解および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、温暖化がその主な原因ではないかと示唆されている。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重要な基礎となる。

対象とする環オホーツク圏は上述のように日本にとって重要な地域である。しかしながら、大半がロシア領ないしロシア経済水域に含まれているため、大気・海洋・陸面全てにおいて公開されている観測データが限られている。そのため環オホーツク圏の気候・環境研究には、数値シミュレーションとそれに基づくメカニズム解明、そして解明されたメカニズムに基づく数値シミュレーションの改良が欠かせない。

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おいて助力を得たことにとどまらず、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。

および上述の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熱塩循環と栄養物質（鉄）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、それぞれについて前年度までに得られた研究成果を図1に記す。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

計算機科学分野の課題（高速化チューニング）

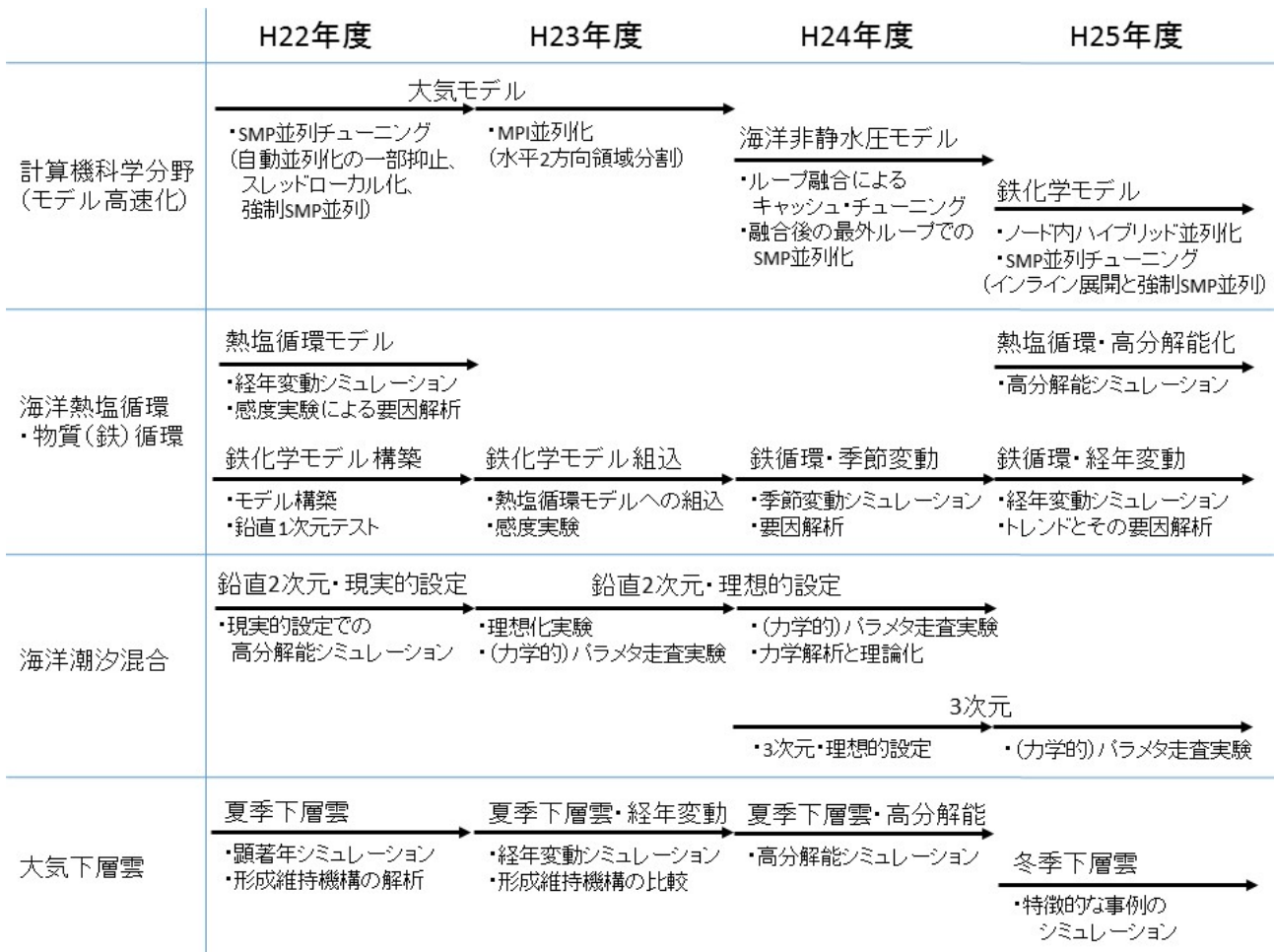


図1：前年度までの成果概要

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

今年度は熱塩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を実施した。既に高速化を念頭に置いて書かれたコードであったが、専門家の助力のおかげで、(1)演算量の多いMPIプロセスの実行時間の長い関数の実行時間短縮、(2)境界部(袖)の通信における時間短縮、(3)その他の最適化により、少しずつ高速化できた。

(1)についてはループ融合によるキャッシュヒット率の向上、およびループ融合とそのループに

対するSMP並列化による演算負荷均等化を行った。その結果、図2のようにCPU時間が短くなり、トータルでは演算性能が8.6GFlopsから8.8GFlopsに、実行効率が14.1%から14.4%に向上した。

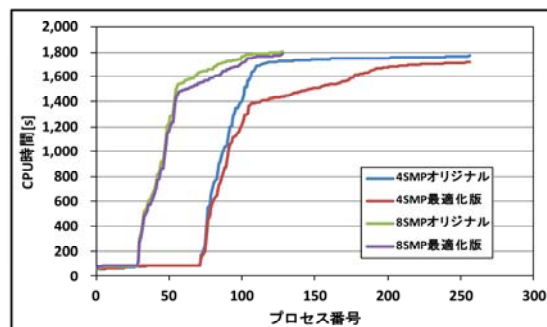


図 2：各 MPI プロセスの CPU 時間。横軸は短い順に並べたプロセス番号。4SMP（青が元、赤がチューニング後）はノード内 16MPIx4SMP 並列を指す。

(2)の境界部通信については、元は水平 x 方向と y 方向を順番に通信していたコードを、x 方向と y 方向の通信を同時に行う用に変更し、通信の重ね合わせによる実行時間の短縮を図った。その結果、図 3 のように時間が短縮された。各 MPI プロセスの境界部通信時間を、通信待ち時間の影響が最も少ない最短時間で評価すると、約 10%の時間短縮となった。

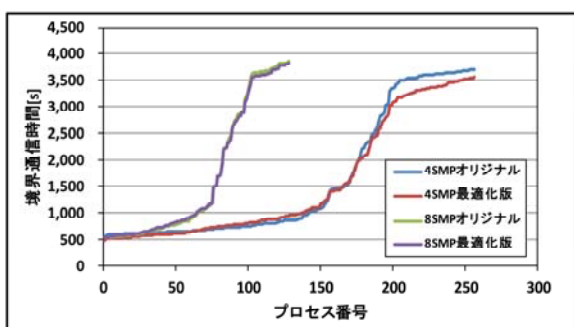


図 3：各 MPI プロセスの境界部通信時間。横軸等は図 2 と同様。

(3)その他に、SMP 並列化の位置調整および、一部関数での SIMD オプション抑止や FMA によりさらに演算時間を短縮できたが、これらについては演算精度に影響したため、目的に合致した精度の検証が必要である。

(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

本年度は鉄循環の経年変動および熱塩循環の支配要因を探るための感度実験をそれぞれ実施した。

鉄循環の経年変動を引き起こす主要要素として挙げられる、大気場の変動と潮汐による鉛直混合の変動について、両方・大気場のみ・潮汐のみを含む場合について計算した結果が図 4 である。両方の場合、10 年規模変動は観測結果(Tadokoro et al., 2009)の変動と定性的に合っている。大気場と潮汐はそれぞれ同程度の寄与であった。

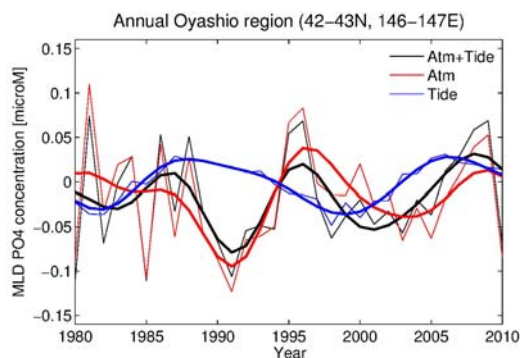


図 4：親潮域における年平均の混合層内リン酸濃度の経年変動。大気場と潮汐の両方（黒）、大気場のみ（赤）、潮汐のみ（青）変動する場合。太線はローパスフィルターを掛けたもの。

オホーツク海起源の熱塩循環を高分解能モデルで再現し、その感度実験をした結果、図 5 に示すように風応力に対して想像以上に敏感であることが明らかになった。経年変動で見られる変化幅で熱塩循環は 2 倍程度も変化した。

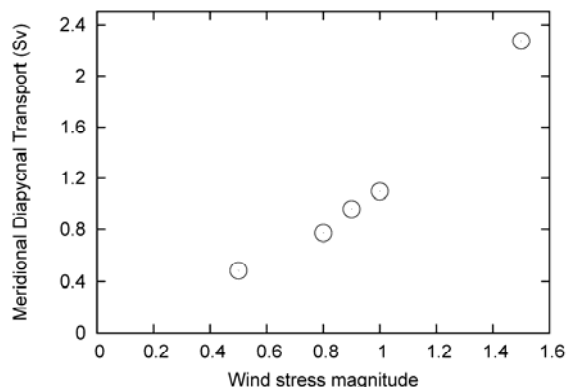


図 5：「東西」に積算した「南北」循環の流量。横軸の数値を風応力（気候値）に掛けて強化／弱化した実験の結果。

(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が渦による屈折と散乱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理想的設定の下、前年度までより高分解能で数値実験を行った。

図 6 に示すように、図左奥から入射した波は図中央の渦中で屈折等により増幅され砕波し、渦そのものにも影響を与えている。高分解能化により屈折から砕波に至る過程がより詳細にシミュレーションされた。

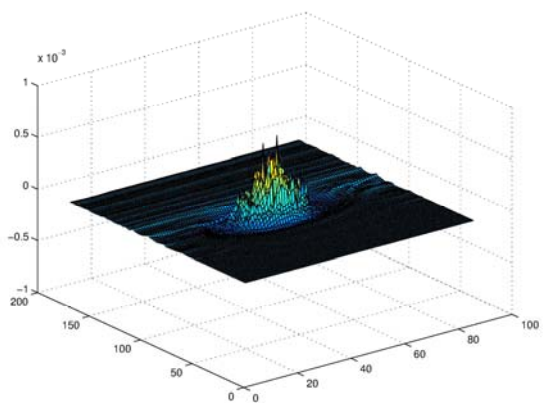


図 6: 中央の水深における渦度の鉛直成分。

(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）の感度実験を、昨年度行った特徴的な事例について実施し、形成維持機構を調べた。その結果、従来考えられていた北海道からの陸風だけでなく、サハリン島の効果が重要であることが明らかになった。

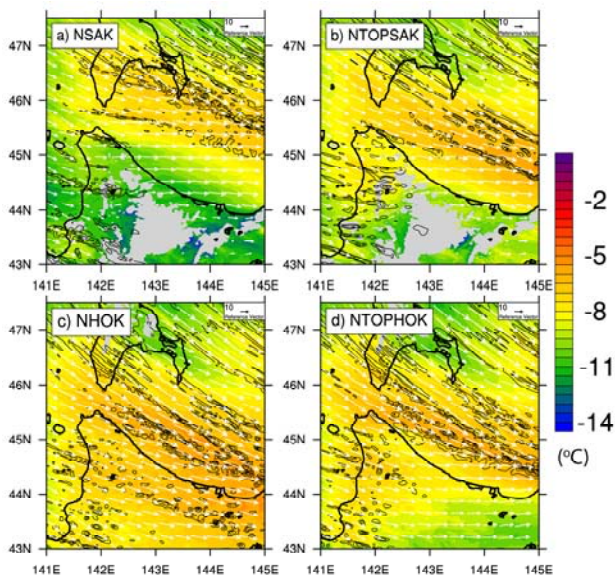


図 7: 北海道オホーツク海沿岸帯状雲の感度実験。コンターは鉛直積分した雪混合比、色は 940hPa 気温、矢印は 960hPa 風。a) サハリン島が無い、b) サハリン島が平坦、c) 北海道が無い、d) 北海道が平坦な場合。

6. 今年度の進捗状況と今後の展望

まず、計算資源は割当総量全てを使用した。次に、5 節に記した各課題の成果を踏まえて、以下に課題毎に申請時の計画から見た進捗状況と今後

の展望を含めてまとめていく。

(I) 計算機科学分野の検討課題

計画通り熱塩循環の高分解能モデルの高速化チューニングを実施したので、今年度の計画目標は達成したと判断する。来年度は、鉄循環の高分解能モデルを構築し、その高速化チューニングを検討したい。

(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：予定より早く、計画していた鉄循環の経年変動および（高分解能モデルにおける）熱塩循環の支配要因を探るための感度実験の計算を終え、解析を進めた。来年度は、高分解能熱塩循環モデルに鉄化学モデルを組み込み、高分解能での鉄循環シミュレーションを行いたい。

(II-b) 潮汐による鉛直混合過程：今年度計画していた超高分解能での実験を終了した。来年度は結果の力学解析を行うとともに、重要な力学的パラメータを変更した高分解能実験を行っていきたい。

(II-c) オホーツク海周辺の下層雲：計画より早く、昨年度シミュレーションに成功した事例についての感度実験を終了した。来年度は、他の事例についての実験と解析を行いたい。

なお今後の研究のロードマップを示すよう要望を受けたが、学生数や研究予算・ポスドクなどに応じて流動する部分が大きく、具体的に示すことが難しい。現時点においては今後 1～3 年は、研究分担者や代表者らの発見した「北太平洋熱塩循環の表層ルート」に注目しつつ、オホーツク海を起源とする熱塩循環と栄養物質（鉄）循環の高分解能シミュレーションにより力を注ぎ、最終的には定量的理解と評価に繋がればと考えている。

7. 研究成果リスト

(1) 学術論文

Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Uehara, H. Mitsudera, K.I. Ohshima, H. Hasumi, M. Wakatsuchi. Causes of the warming trend of the intermediate water in the Sea of Okhotsk and western subarctic North Pacific from 1980 to 2008.

Journal of Climate, 28, 714-736.

Yagnesh, R. Y., T. Nakamura, H. Mitsudera, and M. Kawashima (2014) Formation and maintenance mechanisms of a thick snow band along the Okhotsk Sea coast of Hokkaido Island, Japan. *Hydrological Research Letters*, 8 (2), 84-89.

Uchimoto, K., T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, K. Misumi, D. Tsumune (2014) Simulation of high concentration of iron in dense shelf water in the Okhotsk Sea. *Progress in Oceanography*, 126, 194-210.

Nakamura, T., Y. Takeuchi, K. Uchimoto, and H. Mitsudera (2014) Effects of temporal variation in tide-induced vertical mixing in the Kuril Straits on the thermohaline circulation originating in the Okhotsk Sea. *Progress in Oceanography*, 126, 135-145.

Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, Y. Sasajima, H. Hasumi and M. Wakatsuchi. (2015) Overturning circulation that ventilates the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: The role of salinity advection. *Journal of Geophysical Research*, 120 (3), 1462-1489

(2) 国際会議プロシーディングス

(3) 国際会議発表

Abe, S., T. Nakamura, H. Mitsudera. Unstable Modes of Jets on the Bottom. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, Jul 28 - Aug 1, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.

Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, H. Hasumi, M. Wakatsuchi. Overturning circulation ventilating the intermediate layer of the Sea of Okhotsk and the North Pacific: the role of salinity advection. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, Jul 28 - Aug 1, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.

Nakanowatari, T., K. Uchimoto, T. Nakamura, J. Nishioka, H. Mitsudera, M. Wakatsuchi. Seasonal variability of dissolved iron in the western subarctic

North Pacific: Importance of lateral advection processes. Asia Oceania Geosciences Society (AOGS) 2014, Jul 28 - Aug 1, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan.

Abe, S., T. Nakamura, H. Mitsudera. An Unstable Mode Formed by Combination of Kelvin-Helmholtz Waves and Tollmien-Schlichting Waves in Jets on the Bottom. Fall Meeting of American Geophysical Union (AGU) 2014, Dec 15 - 19, Moscone Center, San Francisco, USA.

(4) 国内会議発表

中野渡拓也, 吉成浩志, 内本圭亮, 松田淳二, 三寺史夫, 中村知裕, 西岡純, 津旨大輔, 三角和弘, 羽角博康, 若土正暁. 北太平洋物質循環モデルの結合～鉄-栄養塩実験～. 2014 年度 日本海洋学会 秋季大会, 2014 年 9 月 13-17 日, 長崎大学文教キャンパス, 長崎.

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)