

令和元年6月13日現在

機関番号：82708

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K21586

研究課題名(和文)極域海洋における海水生成・融解に伴う鉄輸送プロセスとその変動機構

研究課題名(英文) Dissolved iron transport process and its mechanism driven by sea ice formation and melting in polar oceans

研究代表者

中野渡 拓也 (Nakanowatari, Takuya)

国立研究開発法人水産研究・教育機構・北海道区水産研究所・主任研究員

研究者番号：20400012

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：海氷・海洋結合物質循環モデルを用いて、オホーツク海・北太平洋亜寒帯域における鉄や栄養塩や基礎生産量の季節から経年変動の要因を調査した。親潮海域や北太平洋亜寒帯域における表層の溶存鉄や栄養塩濃度の変動には、その場の海面冷却による鉛直的な輸送プロセスだけでなく、その上流域であるオホーツク海からの水平的な輸送が同程度に影響していることが明らかになった。このような水平的な物質輸送プロセスは、数十年スケールで北太平洋亜寒帯域の広範囲の栄養塩や基礎生産の変化にも実質的に影響を及ぼしていることがわかった。一方で、海氷の生成・融解に伴う鉄輸送の影響は、オホーツク海南部で1-2%と有意な影響は見られなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまで、北太平洋亜寒帯域における表層の鉄や栄養塩濃度の変化は、主に冬季の海面冷却による密度不安定による混合によって、下層から輸送されるいわゆる1次元的な枠組みで理解されてきた。本研究では、オホーツク海と北太平洋亜寒帯域の風成循環、及び海氷形成プロセスを考慮した3次元モデルを用いることによって、新たに水平的な栄養塩供給プロセスの重要性を明らかになった。特に、我が国周辺の親潮海域における栄養塩や鉄の輸送において、オホーツク海を起源とした風成循環場やクリル海峡周辺で卓越する潮汐混合による下層から栄養塩供給は、これらの水平的な物質輸送において本質的な役割を担うことが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：By using an ice-ocean coupled model with an biogeochemical model, the transport process of dissolved iron and its variability in the subarctic North Pacific including the Sea of Okhotsk were investigated. Seasonal to interannual variability of dissolved iron and macro nutrient concentration in the Oyashio and northwestern subarctic North Pacific is controlled by the wind-driven transport from the Okhotsk Sea and the Bering Sea as well as the local transport from the subsurface layer due to winter convection. Such lateral transport process has an essential role on the determination of primary production in the subarctic North Pacific. On the other hand, the impact of sea ice formation and melting process on the primary production is limited to the Sea of Okhotsk.

研究分野：海洋物理学

キーワード：物質循環モデル 海氷・海洋結合モデル 季節・経年変動 風成循環 リン酸塩 沿岸親潮 潮汐混合  
オホーツク海

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

近年、北極海の海水面積は顕著な減少傾向を示しており、夏季の海水融解水の増加に伴う海洋酸性化や我が国を含む北半球の中緯度冬季の寒冷化への影響が指摘されている。季節海水域であるオホーツク海は、植物プランクトンの増殖に必要な微量金属元素である鉄の主要なソースである（引用文献①）。海洋生態系への影響が懸念されている。近年、オホーツク海中層水が過去 50 年間で 0.6℃の有意な上昇トレンドが観測されており（引用文献②）、そのような海洋環境の変化が極域海洋やその周辺海域の鉄や栄養塩などの物質循環や基礎生産に対してどの程度の影響を持つのかについては明らかになっていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、二つの異なる空間解像度（中解像度と高解像度）の海水・海洋結合物質循環モデルを併用することによって、北半球の季節海水域の南限であるオホーツク海における海水の生成・融解に伴う鉄や栄養塩などの物質の輸送プロセスや変動機構の解明、及びその下流域に位置する親潮海域や北太平洋亜寒帯域における基礎生産量の変動メカニズムを、大気強制場の変化、大気由来のダストによる添加、そしてクリル海峡で卓越する潮汐による鉛直混合の影響に着目し、定量的に明らかにすることを目的として研究を行った。特に、冬季に卓越する沿岸流や中規模渦などの海洋物理環境の再現性を重視することによって、外洋域で従来から指摘されている鉛直一次元の海洋混合プロセスによる栄養塩供給理論を脱し、水平二次元的な海流の持つ役割の影響を調査した。

### 3. 研究の方法

親潮海域における表層の鉄濃度、及び栄養塩の季節から経年変動メカニズムを明らかにするために、オホーツク海・亜寒帯域で整備された海水・海洋結合モデル(Iced COCO ver. 3.4, 引用文献③)の中解像度領域モデル（水平解像度：～50km）に、鉄や栄養塩サイクルを考慮した物質循環モデル(引用文献④)を結合させたモデル（中解像度物質循環モデル）を用いて、季節から経年変動の数値シミュレーションを実施した。特に、鉄の供給源として、大気経路であるダストの影響に加えて、オホーツク海北西陸棚やベーリング海の堆積物由来の鉄の影響を調査した。また、海水の生成・融解に伴う鉄輸送プロセスによる海洋鉄供給のインパクトを評価するために、海水鉄を考慮した低次生態系モデルによる数値シミュレーションを実施した。また、表層鉄濃度に対する海洋循環場の再現性の影響を評価するために、高解像度（水平解像度：2～10 km）の海水・海洋結合モデル(Iced COCO ver. 4.2, 引用文献⑤)に基づいた低次生態系モデル（高解像度物質循環モデル）による数値シミュレーションも実施した。

### 4. 研究成果

#### (1) 親潮・亜寒帯域の表層鉄濃度の季節変動

##### ①中解像度モデルによる数値シミュレーション

大気の大気ダスト、及びオホーツク海やベーリング海における大陸棚の堆積物由来の鉄フラックスを考慮した中解像度物質循環モデルに基づいて、北太平洋、及び北極海表層における鉄と栄養塩の季節変動のシミュレーションを行った。大気の外力は ECMWF の大気再解析データを基に作成された OMIP の日平均データを用いた。その結果、オホーツク海の下流域である親潮海域では、表層の溶存鉄濃度が、冬季（3月）に最大値、夏季（9月）に最小値を示す季節変動が定性的に再現された。このモデルの出力データに基づいて、表層鉄濃度の季節変動メカニズム（冬季の表層鉄濃度の増加）を診断的に調べた結果、冬季の海面冷却に伴う鉛直混合に加えて、風成循環に伴う水平的な移流が実質的に影響していることが明らかになった。このことは、親潮海域や亜寒帯西部では、従来から指摘されている鉛直一次元的な物理プロセスに加えて、水平二次元的な溶存鉄の移送も同程度に影響していることを示唆する。

さらに、親潮域における溶存鉄の起源に関する感度実験を実施した結果、従来から指摘されているオホーツク海北西陸棚の堆積物からの直接的な溶存鉄の移流に加えて、ベーリング海起源の溶存鉄が間接的にクリル海峡における潮汐混合によって、湧昇する影響も同程度に影響していることも明らかになった。一方で、親潮海域における表層の鉄濃度の季節変動の振幅は観測データに比べて小さい傾向がみられた。その要因として、海水由来の鉄フラックスを考慮していないこと（(1) - (2)）やモデルの解像度が不十分であることに起因する移流速度の過小評価が考えられる（(1) - (3)）。そこで、これらの2つの可能性を評価した。

##### ②オホーツク海・北太平洋亜寒帯西部の海水鉄モデル

オホーツク海南部における海水融解に伴う溶存鉄のフラックスの影響を評価するために、海水生成・融解に伴う海水・海洋間の鉄フラックスを考慮した物質循環モデルを構築し、海水鉄を考慮しないモデルとの比較を行った。

海氷への取り込みプロセスとして、海水結氷時による取り込みに加え、堆積物由来の鉄添加と積雪上に沈降する大気ダストの影響を考慮した。最も不確定要素が大きい堆積物由来の海水鉄のソースに関しては、感度実験に基づいて、オホーツク海南部で観測された海水中の鉄濃度 (3.5nM) に最も近づく 0.01 nM/m<sup>2</sup>/yr を採用した(図 2a)。海水鉄を考慮しないモデルと比較した結果、海水融解期 (3-5 月) においてオホーツク海南部において 0.1-0.2 nM の濃度増加が見られた (図 2b)。一方で、親潮海域においては、鉄濃度の増加は 0.01-0.02 nM と 1 オーダーほど小さく、実質的な影響は少ないことが示唆された。

基礎生産量への影響については、冬季の海水が最も厚い知床半島沖で約 2%、親潮海域で約 1%であった。この値は先行研究で指摘されている値と同程度の寄与率であるが、その海域は先行研究と異なり東樺太海流や沿岸親潮などに沿った海域であった。このことから、オホーツク海の海水鉄はオホーツク海南部だけでなく、親潮海域など比較的広い範囲の基礎生産に影響しうることが示唆された。

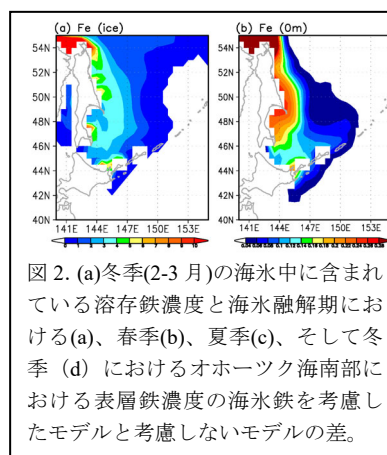


図 2. (a)冬季(2-3 月)の海水中に含まれている溶存鉄濃度と海水融解期における(a)、春季(b)、夏季(c)、そして冬季 (d) におけるオホーツク海南部における表層鉄濃度の海水鉄を考慮したモデルと考慮しないモデルの差。

### ③高解像度モデルによる数値シミュレーション

中解像度モデルの実験で得られた親潮海域における表層鉄濃度の過小評価に対する海洋循環場の再現性の影響を調べるために、北太平洋高解像度モデル (引用文献⑤) に鉄サイクルを含んだ物質循環モデル (引用文献④) を結合して、溶存鉄の季節変動に関する数値シミュレーションを実施した。堆積物由来の鉄フラックスに関しては、中解像度鉄モデルの感度実験の結果に基づいて、オホーツク海の北西陸棚に加え、ベーリング海の大陸棚や深層付近の海底にも適用した。

WOA05 の気候値を初期値として、40 年間積分した結果、中解像度モデルと同様に、オホーツク海とカムチャッカ半島西岸で比較的高い濃度分布が再現された (図 3a)。このような西岸付近の高い鉄濃度は、先行研究で明らかになった中解像度モデルの結果 (研究業績①) と整合的である。興味深い点は、高解像度モデルの場合、オホーツク海北西陸棚から表層鉄の高濃度の水塊が北海道沿岸まで伸びていることである。このことは、東樺太海流や沿岸補足流(引用文献⑦)の再現性の向上によって移流のタイムスケールが短縮したと関係していることが示唆される。親潮海域 (42°N, 144°E) における表層鉄濃度の時系列を調べた結果、3 月において >1 nM と A-line の観測値(引用文献⑧)と同程度の値であった (図 3b)。この冬季の鉄濃度は中解像度鉄モデルの値に比べて 2 倍程度高く、堆積物由来の鉄輸送量を 2 倍にしたときよりもはるかに大きい (図 3b)。このことから、親潮海域における表層鉄濃度の再現性には、オホーツク海を含む上流域の海洋循環場の再現性が特に重要であることがわかった。最近の研究成果によれば、冬季のオホーツク海南部の海水中にはアムール川起源の溶存鉄が既に多量に含まれていることも指摘されており(引用文献⑨)、この数値実験の結果はそのような観測結果と整合的である。

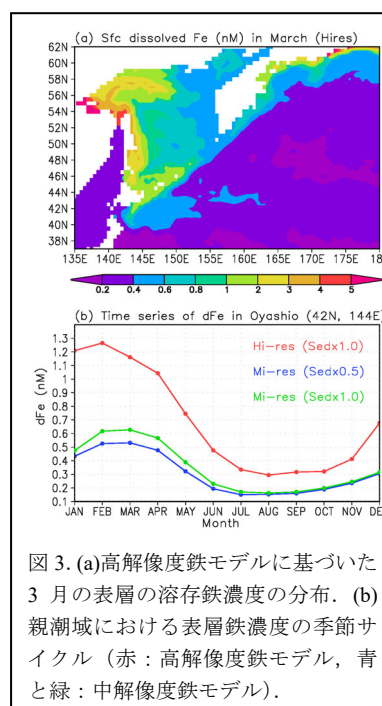


図 3. (a)高解像度鉄モデルに基づいた 3 月の表層の溶存鉄濃度の分布. (b) 親潮域における表層鉄濃度の季節サイクル (赤: 高解像度鉄モデル, 青と緑: 中解像度鉄モデル).

## (2) 親潮域の表層リン酸塩濃度の経年・10 年規模変動

### ①表層リン酸塩濃度の季節から経年変動

親潮海域における主栄養塩の一つであるリン酸塩濃度の季節から経年変動メカニズムを明らかにするために、中解像度鉄・栄養塩モデルを用いた数値実験を行った。経年変動実験では、大気の外力として ERA interim の大気再解析データを使用し、1979 年から 2010 年までの 32 年間積分を行った。また、潮汐の 18.6 年周期変動の影響を評価するために、クリル海峡に人工的に付与した鉛直拡散係数を 2 割の振幅で増減させた。さらに、大気の大気ダストの経年変動も考慮するために、複数の大気再解析データに基づいて推定されたダストの月平均データも使用した。混合層内のモデルと観測のリン酸塩濃度の時系列を比較した結果、モデルは冬季の季節的なリン酸塩の増減、及びその経年変動を定性的に再現していた。特に、冬季のリン酸塩濃度の経年変動は年々変動が卓越しており、10 年規模変動によって説明される分散の割合は小さかった。

この冬季のリン酸塩の季節から経年変動の要因を明らかにするために、混合層内のリン酸塩濃度の収支解析を行った。その結果、冬季のリン酸塩濃度の増加は、主に海面冷却に伴う鉛直混合によるエントレイメントと水平移流で説明されることがわかった。水平移流については、主に地衡流の影響が大きく、その変動にはオホーツク海のサハリン沿岸の北東風によって励起される沿岸捕捉流が関係していることが明らかになった。

## ②表層リン酸塩濃度の10年規模変動

北太平洋亜寒帯域における表層リン酸塩濃度の観測データに見られる十年規模変動や基礎生産量に対する長期的な気候変動の影響を評価するために、オホーツク海の海水生産量や潮汐の18.6年周期変動を考慮した中解像度鉄・栄養塩モデルによる数値シミュレーションの出力データの統計解析を実施した。その結果、モデルは親潮海域で観測された表層リン酸塩濃度の年平均値に類似した10年規模の長期変動を定性的に再現することを確認した(図4)。特に、リン酸塩濃度の年平均値には1990年代以降に10年周期の変動成分が目立っており、潮汐の18.6年周期変動の位相と異なる特徴を示していた。また、大気強制、潮汐混合、そして大気ダストの経年変動に関する感度実験を実施した結果、リン酸塩濃度の10年規模変動は主に大気強制によって説明されることが明らかになった(図4)。大気強制場の感度実験データに基づいて、リン酸塩濃度の収支解析を行った結果、このリン酸塩濃度の10年規模変動は、数年前にオホーツク海の北部陸棚域で湧昇した栄養塩が亜表層に沿って移流されてきたものであることがわかった。オホーツク海北部陸棚域の表層では、冬季に $2\mu\text{M}$ 以上の高い栄養塩濃度の水塊がエクマン湧昇によって維持されており、それが経年的に変動することによって下流域における栄養塩の輸送量をコントロールしていることが分かった。オホーツク海はこれまで冬季の海水形成によるブライン排出によって比重の重い水塊の沈み込み域として指摘されてきたけれども、栄養塩の湧昇域としても重要な役割を担っていることが示唆される。

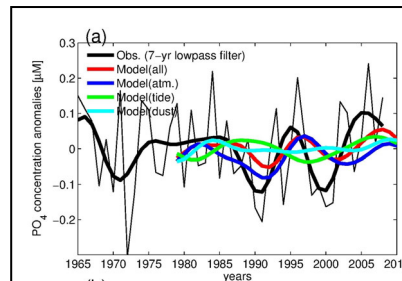


図4. 親潮海域(42.5°N, 146°E)における観測(黒線)と鉄サイクルを含んだ低次生態系モデルのシミュレーション(赤線)の年平均リン酸塩濃度の偏差。太線は7年のローパスフィルターをかけたもの。青、緑、そして水色の線はそれぞれ、大気強制、潮汐混合、そして大気ダストの変動のみを与えた数値実験の結果。

## ③オホーツク海の中層循環の弱化と基礎生産量の長期変化について

中解像度モデルによる経年変動実験で得られた $\text{PO}_4$ の取り込み速度( $\Gamma$ )に基づいて、基礎生産量の過去32年間の長期変化傾向を調べた。モデルの平面的な $\Gamma$ の分布は、オホーツク海西部や亜寒帯西部で高く、衛星のクロロフィル画像から推定された基礎生産量の空間分布に類似した結果が得られた(図5)。1980年から2010年までの線形トレンドを計算した結果、オホーツク海では正、北太平洋亜寒帯西部では負の傾向が得られた。季節別に調べた結果、オホーツク海では秋季(9月)に増加傾向が顕著であり、北太平洋亜寒帯西部では春季(6月)に減少する傾向が見られた。 $\Gamma$ の律速因子として、リン酸塩濃度、鉄濃度、そして光強度の変化を調べた結果、オホーツク海では、リン酸塩濃度が減少するものの、鉄濃度の増加と光環境の改善が $\Gamma$ の上昇に寄与していることが分かった。このことは、海水の広がりが抑えられることによって、光環境が改善していることを意味する。一方で、北太平洋亜寒帯では、 $\Gamma$ の減少はリン酸塩と鉄濃度が共に減少することに関係しており、光環境の影響は小さいことがわかった。このことは北太平洋亜寒帯西部の基礎生産量は表層鉄濃度の減少によっておよそ10%減少していることを示唆する。

北太平洋亜寒帯域における表層鉄濃度の減少の主な要因の一つとして、オホーツク海の熱塩循環の弱化に伴う中層鉄の減少に加えて、亜熱帯系の水塊移流の影響が考えられる。実際、 $\Gamma$ の減少が著しい海域は亜熱帯循環と亜寒帯循環のフロントに位置しており、モデルの水温、塩分、そして流速データの解析から、過去30年間で亜熱帯系の水塊が増加していることが指摘されている(引用

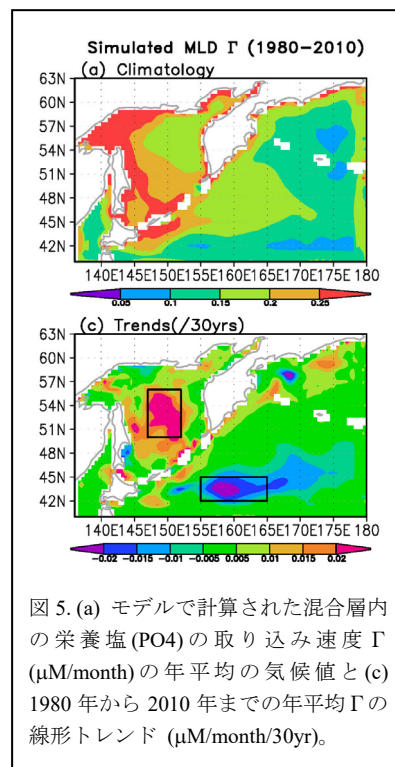


図5. (a) モデルで計算された混合層内の栄養塩( $\text{PO}_4$ )の取り込み速度 $\Gamma$ ( $\mu\text{M}/\text{month}$ )の年平均の気候値と(c) 1980年から2010年までの年平均 $\Gamma$ の線形トレンド( $\mu\text{M}/\text{month}/30\text{yr}$ )。

文献⑩)。より定量的な $\Gamma$ の変化の要因については、さらに詳細な数値実験データの解析に加えて、高解像度モデルを用いた経年変動シミュレーションの実施が望まれる。

<引用文献>

- ① Nishioka, J., et al. (2007), Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk, *J. Geophys. Res.*, 112, C10012, doi:10.1029/2006JC004055.
- ② Nakanowatari, T., K. Ohshima, and M. Wakatsuchi (2007), Warming and oxygen decrease of intermediate water in the northwestern North Pacific, originating from the Sea of Okhotsk, 1955–2004, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04602, doi:10.1029/2006GL028243.
- ③ Hasumi, H. (2006), CCSR ocean component model (COCO) version 4.0, Tech. Rep. 25, Cent. for Clim. Syst. Res., Univ. of Tokyo, Chiba, Japan.
- ④ Parekh, P., M. J. Follows, and E. A. Boyle (2005), Decoupling of iron and phosphate in the global ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB2020, doi:10.1029/2004GB002280.
- ⑤ 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, *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, 1462–1489, doi:10.1002/2014JC009995.
- ⑥ Wang, S., D. Bailey, K. Lindsay, J. K. Moore, and M. Holland (2014), Impact of sea ice on the marine iron cycle and phytoplankton productivity. *Biogeosciences*, 11, 4713–4731. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-11-4713-2014>.
- ⑦ Nakanowatari, T., and K. I. Ohshima (2014), Coherent sea level variability in and around the Sea of Okhotsk. *Prog. Oceanogr.*, 126, 58–70.
- ⑧ Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, K. Sakaoka, and T. Yoshimura (2011), Oceanic iron supply mechanisms which support the spring diatom bloom in the Oyashio region, western subarctic Pacific, *J. Geophys. Res.*, 116, C02021, doi:10.1029/2010JC006321.
- ⑨ Kanna N., Y. Sibano, T. Toyota, and J. Nishioka (2018), Winter iron supply processes fueling spring phytoplankton growth in a sub-polar marginal sea, the Sea of Okhotsk: Importance of sea ice and the East Sakhalin Current, *Marine Chemistry*, 206, 109–120.
- ⑩ Nakanowatari, T., T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Uehara, H. Mitsudera, K. I. Ohshima, H. Hasumi, and M. Wakatsuchi (2015), Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific, *J. Climate*, 28, 714–736.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① Mitsudera, H., T. Miyama, H. Nishigaki, T. Nakanowatari, H. Nishikawa, T. Nakamura, T. Wagawa, R. Furue, Y. Fujii, and S. Itoh (2018), Low ocean-floor rises regulate subpolar sea surface temperature by forming baroclinic jets, *Nat. Comm.*, 9, 1190, doi:10.1038/s41467-018-03526-z (査読有).
- ② Nakanowatari, T., K. I. Ohshima, V. Mensah, Y. Mitani, K. Hattori, M. Kobayashi, F. Roquet, Y. Sakurai, H. Mitsudera, and M. Wakatsuchi (2017), Hydrographic observations by instrumented marine mammals in the Sea of Okhotsk, *Polar Sci.*, 13, 56–65, doi: 10.1016/j.polar.2017.06.001 (査読有).
- ③ 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, *J. Geophys. Res.*, 4364–4391, 122, doi:10.1002/2016JC012354 (査読有).
- ④ 中野渡拓也, 三寺史夫, 中村知裕 (2016), 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*, 74, 127–141 (査読無).

[学会発表] (計13件)

- ① Nakanowatari, T., J. Inoue, J. Zhang, Influence of autumn ocean heat flux on sea ice advance in the Chukchi Sea, The 34th International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2019, Feb. 2019.
- ② Nakanowatari, T., T. Nakamura, H. Mitsudera, J. Nishioka, Seasonal to interannual variations in surface PO<sub>4</sub> concentration in Oyashio region: Role of wind-induced coastally trapped current, JPGU meeting 2018 annual meeting, May 2018.
- ③ Nishikawa, H., H. Mitsudera, K. Yoshinari, T. Nakanowatari, T. Nakamura, K. Uchimoto, H. Hasumi, High resolution biogeochemical modelling in the North Pacific, JPGU meeting 2018, May 2018.
- ④ Mensah, V., K. I. Ohshima, T. Nakanowatari, and S. Riser, Seasonal variability of hydrographic

properties and of the circulation in the Kuril Basin, The 33rd International Symposium on the Okhotsk Sea & Polar Oceans 2018, February 2018.

- ⑤ 中野渡拓也, 三寺史夫, 田口文明, 見延庄士郎, 北太平洋亜寒帯フロントに見られる準定常ジェットの10年規模変動, 日本海洋学会, 2016年9月.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年:  
国内外の別:

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年:  
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

- ① 大島慶一郎, 西岡純, 中野渡拓也, オホーツク海「北太平洋の心臓」～海氷減少生態系に影響も, 朝日新聞 (朝刊・くらしサイエンス), 2018年3月18日.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名:

所属研究機関名:

部局名:

職名:

研究者番号 (8桁):

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名: 三寺史夫

ローマ字氏名: Mitsudera Humio

研究協力者氏名: 中村知裕

ローマ字氏名: Nakamura Tomoyuki

研究協力者氏名: 内本圭亮

ローマ字氏名: Uchimoto Keisuke

研究協力者氏名: 西岡 純

ローマ字氏名: Nishioka Jun

研究協力者氏名: 渡邊英嗣

ローマ字氏名: Watanabe Eiji

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。