

平成 22 年 4 月 20 日現在

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2007～2009

課題番号：19681001

研究課題名 (和文) 環オホーツク海域における化学的変質過程を含めた鉄移送量の定量的評価

研究課題名 (英文) Iron transformation and transportation in the Pan-Okhotsk region

研究代表者

西岡 純 (NISHIOKA JUN)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号：90371533

研究成果の概要 (和文)：本研究で行ったオホーツク海および親潮域・西部北太平洋亜寒帯域における観測の結果、オホーツク海の北西部大陸棚を起源とする鉄が、海水生成によって駆動される中層水循環によって、北太平洋外洋域の広範囲へ移送されていることが示された。このプロセスで移送される鉄の定量的な評価を行うと、親潮域中層では $3.1 \times 10^5 \sim 6.3 \times 10^5 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$ の鉄分が運ばれ、そのうち $28.6 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$ が中層から表面に供給されていると見積もられた。この中層循環によって移送される鉄が、西部北太平洋亜寒帯域や親潮域の植物プランクトンの増殖と生物地球化学的物質循環に大きく寄与していることが明らかになった。

研究成果の概要 (英文)： We found extremely high concentrations of dissolved and particulate iron in the Okhotsk Sea Intermediate Water (OSIW) and the North Pacific Intermediate Water (NPIW), which are affected by water ventilation processes caused by sea ice formation in the north-western continental shelf region of the Sea of Okhotsk. We can estimate the amount of diss-Fe in the intermediate layer. The Fe flux section cross the Oyashio is as $3.1 \times 10^5 \sim 6.3 \times 10^5 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$. The estimated annual upward flux is $28.6 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$ in this region. Our data suggests that the consideration of this source of iron is essential in our understanding of the spring biological production and biogeochemical cycles in the western subarctic Pacific.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	9,800,000	2,940,000	12,740,000
2008年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	19,200,000	5,760,000	24,960,000

研究分野：化学海洋学

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：鉄、環オホーツク、中層循環、生物生産

1. 研究開始当初の背景

鉄が海洋の基礎生産の制限要因になり得

ることから、基礎生産の変動メカニズムを解明するためには、海洋表層への鉄の供給量と基礎生産者である植物プランクトン増殖との関係を定量的に評価していく必要がある。一般に陸から離れた外洋域の表層では、鉄の供給源は大気中のエアロゾルと考えられているが、近年それに加え、河川や大陸棚を經由して海洋循環によって外洋へ輸送される鉄によって高い基礎生産が支えられている可能性が指摘されている。

2. 研究の目的

本研究は、オホーツク海大陸棚から親潮域や西部北太平洋亜寒帯域へ移送される鉄分に着目し、供給・移送過程における存在状態とその変質および各存在状態の海水中での挙動を踏まえて鉄の移送量を定量的に評価する事を目的とする。アムール川河口が位置するオホーツク海北西陸棚域では、海水生成量が非常に多く、この海水生成に伴って多量の低温・高密度水（ブライン）が陸棚に排出され、高密度陸棚水（DSW: Dense Shelf Water）が形成される。この水はサハリン東岸沖の中層等密度面（ $26.8 - 27.0 \sigma_\theta$ ）を南下し、南部オホーツク海さらにはブツソル海峡を經由して北太平洋の中層（400-800m）へと広がっていく。この陸棚底層起源の中層水と、その影響を受けて形成される北太平洋中層水（NPIW: North Pacific Intermediate Water）には、大陸棚上の堆積物等の多くの物質がとりこまれ、オホーツク海から親潮域・西部北太平洋へ有機炭素などの物質を移送する役割を持つことが明らかになっている。本研究では、このような環オホーツク海域特有のプロセスで運ばれると考えられる鉄分に着目し、その移送プロセスの実証と定量的評価、北太平洋亜寒帯域、特に親潮域に及ぼす影響を評価することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究は、研究船による現場観測と船上実験、室内実験、試料分析から成る。北大・低温研ではロシア極東水文気象局（FERHRI: Far Eastern Hydro-meteorological Research Institute）と共同研究を行っており、平成19年度には、ロシア研究船「クロモフ号」を用いたオホーツク海における研究航海（2007年8~9月）を実施し（図1）、親潮海域、千島列島海域、西部オホーツク海域の観測をおこなった。この航海は、DSWやその影響を受けて形成されるNPIWが、鉄など植物プランクトン増殖に必要な微量栄養物質の移送にどのように関わり、環オホーツク海域の生物生産にどのように影響を与えているのかを明らかにすることを目的として取り組まれた。ロシアの研究観測船でクリーン採水を行

うため、航海に先駆けて船体の塗装を行い、採水ワイヤーとウインチの整備、船上のクリーン実験室の整備、クリーンな採水機材や実験道具、超純水の確保など、採水から分析環境に至る広範囲にわたって甲板上や船内の設備を改良・改善した。クリーン採水によって得られたサンプルは、船上で孔径 $0.22 \mu\text{m}$ フィルターでろ過した。ろ過サンプルおよび未ろ過サンプルは、蒸留塩酸を加えて持ち帰り、6ヶ月以上放置後に化学発光検出法にてFe(III)の鉄を測定した。また、2008年には水産総合研究センターの研究船と東京大学海洋研究所の研究船を利用し、親潮域・西部北太平洋亜寒帯域においても観測を行った。これら航海では、オホーツク海から供給された鉄分が北太平洋にどのように広がっていくかを確認するデータを取得した。また、船上で、実海域に存在する鉄が利用可能なものであるかどうかを確認するための、植物プランクトン培養実験を行った。さらに、「現場ろ過粒子採取装置」を利用し、海水中に存在する懸濁粒子態鉄の分布を明らかにするとともに、その生物利用能を培養実験を用いて評価した。また、大気エアロゾルを介して海洋表層に供給される鉄も評価するため、エアロゾルの溶解率に関する実験的検討を実施した。これらのデータを統合することで、オホーツク大陸棚から海洋循環に取り込まれ、親潮域・北太平洋亜寒帯域まで移送されて基礎生産に寄与し得る鉄量を定量的に見積もることを試みた。

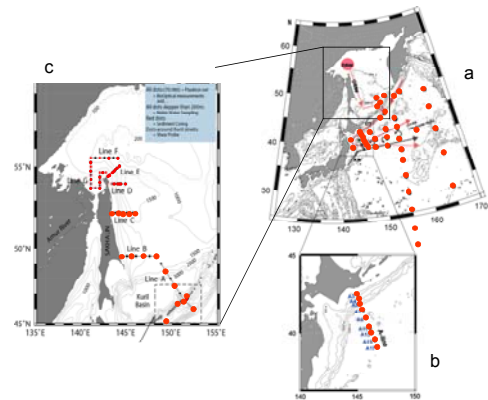


図1. 本研究で実施したオホーツク海、親潮域、西部北太平洋における観測点

4. 研究成果

(1) 大陸棚から中層の循環によって移送される鉄

サハリン北部の大陸棚上の測点（図2）には、低温で密度 $26.8 - 27.0 \sigma_\theta$ で特徴付けられるDSWが、深度約300mから海底（約490m）に至るまでの海底上の鉛直的に広い範囲で確認された。このDSWは濁度が高く、高い濃

度で酸可溶性全鉄 (59~115 nM) が含まれており、溶存鉄濃度も 3.8~6.2 nM と明らかに周囲の水塊より高いことが確認された。

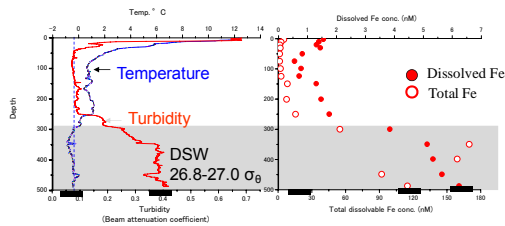


図2 オホーツク海大陸棚上の全可溶性および溶存鉄濃度、水温、濁度の鉛直分布 (ハッチに高密度陸棚水(DSW)を示す)

大陸棚上に存在する DSW は、還元的な海底の影響による硝酸塩の脱窒効果によって低い N^* 値を示す。この低 N^* 値は、DSW の影響を受けた中層に広がる水塊の良いトレーサーとなることが報告されている (Yoshikawa et al., 2006)。東サハリン海流下流の南部オホーツク海の測点 (図 3) では、中層に存在する低 N^* 水塊に高濃度の酸可溶性鉄 (約 10 nM) および溶存鉄 (約 1 nM) が含まれている事が確認された (図 3)。また、同様の特徴を持つ水柱データはクリル海盆地でも確認されている。これらの結果より、DSW には大陸棚上に存在していた鉄がとりこまれ、オホーツク海内の中層循環によって、鉄が南部オホーツク海域にまで移送されている事が示された。

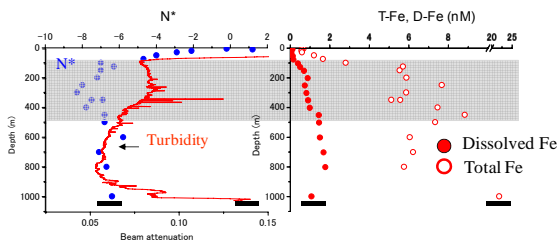


図3 南部オホーツク海における全可溶性鉄、溶存鉄、 N^* 濁度の鉛直分布

(2) 西部北太平洋亜寒帯域への鉄移送

西部北太平洋亜寒帯域中層 (400-1000 m) の鉄濃度が、東部北太平洋亜寒帯域中層の鉄濃度と比べて高いことはこれまでもいくつか報告されている (Nishioka et al., 2003)。我々の観測の結果でも同様の傾向がみられ、各測点で中層 (400-1000 m) に高铁濃度の水塊が観測されている。図 4 に北緯 35 度、東経 165 度で得られた代表的な観測結果を示す。この酸可溶性鉄と溶存鉄の鉛直プロファイルより、未ろ過と溶存態の鉄濃度の差に見られ

る粒子態の鉄が中層に高い濃度で存在していることが分かる。さらに鉄濃度と塩分の鉛直分布を見ると (図 4)、塩分極小で示される NPIW と、鉄が高い濃度で含まれている水塊は一致していることが分かる。北緯 35 度付近の中層 800-1000 m 付近には親潮系水のリターンフローが潜りこんでいることが過去の研究で示されており (Mitsudera et al., 2004)、図 4 の酸可溶性全鉄の鉛直分布にみられる中層 800 m 付近の高濃度の鉄は、この水塊を捕らえていると考えられた。

これらの観測の結果から、NPIW には比較的高い濃度で粒子態、溶存態の鉄が取り込まれており、鉄が中層水の循環によってオホーツク海から北太平洋の外洋の広範囲へ移送されていることが示唆された。

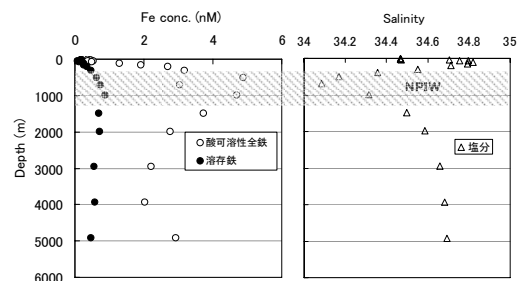


図4 西部北太平洋の北緯35度、東経165度で観測した酸可溶性全鉄、溶存鉄と塩分の鉛直分布

(3) 千島海峡の混合過程の生物地球化学的重要性

ブッソル海峡上の測点の表層から中層にかけての溶存鉄濃度は、クリル海盆地付近や親潮域表層の溶存鉄濃度 (0.1~0.5 nM) に比べて明らかに高く、水温・塩分・栄養塩同様に、水深 500 m 以深まで鉛直的に良く混ざった分布をしている (図 5)。このように、海峡付近で表層から中層まで溶存鉄濃度が高いのは、海峡付近の強い潮汐混合 (Nakamura et al., 2004) の影響で、中層循環によって移送されてきた鉄が幅広い深度層に再分配され、表層にも回帰していた結果と考えられる。

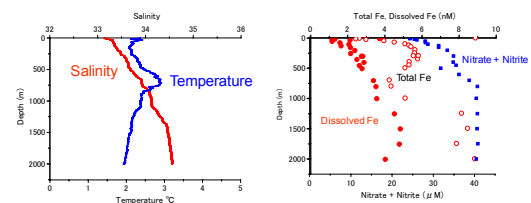


図5 ブッソル海峡における全可溶性鉄、溶存鉄、硝酸塩、水温、塩分の鉛直分布

図6にはオホーツク海から西部北太平洋亜寒帯域の東経155度および165度ラインにかけての溶存鉄濃度の鉛直断面図を示す。親潮域や西部北太平洋亜寒帯域では、混合層下の鉄の鉛直濃度勾配が東部北太平洋亜寒帯域と比べて顕著に大きい。これは、ブッソル海峡で混合を受け幅広い深度層に再配分された高鉄濃度の水塊が、親潮域および西部北太平洋中層(NPIW)に広がった結果であることが図6の断面図から示唆される。また、親潮域および西部北太平洋亜寒帯域の冬季鉛直混合層は、125-200 mに達する。親潮域ではこの冬季の鉛直混合が活発な時期に、下層から栄養塩とともに鉄が供給されていた。これは、ブッソル海峡で幅広い深度層に再配分されたオホーツク起源の高鉄濃度の亜表層水塊が、冬季の混合過程によって表層にアウトクロップされている結果ではないかと考えられる。

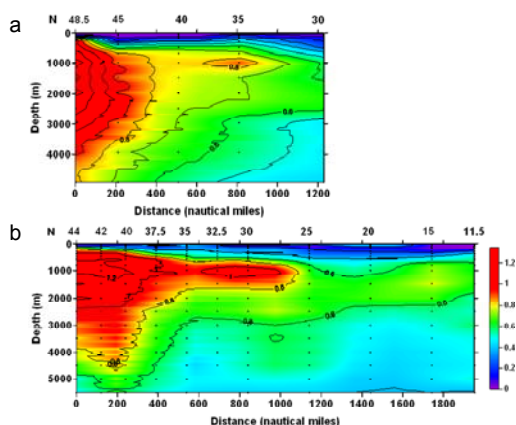


図6 北太平洋亜寒帯域(東経165度ライン(上段)および東経165度ライン(下段))の溶存鉄濃度断面観測結果

北太平洋亜寒帯域で行われた過去の時系列観測による栄養塩濃度の季節変動をみると、春季から夏季にかけての硝酸塩の減少量は東部北太平洋亜寒帯域アラスカ湾(St. P, 北緯50度, 西経145度)の約 $7 \mu\text{M}$ (Whitney et al., 1999)に比べて、親潮域では倍以上の約 $20 \mu\text{M}$ (Saito et al., 2002), 西部北太平洋亜寒帯域(KNOT, 北緯44度, 東経155度)はほぼ倍の約 $15 \mu\text{M}$ (Tsurushima et al., 2002)と報告されている。植物プランクトンが硝酸塩を利用するためには、体内で硝酸を還元するために鉄が必須となる。親潮域や西部北太平洋亜寒帯域で2倍以上の高い硝酸塩の消費が起こるためには、生物種などの違いを考慮する必要があるものの、東部北太平洋亜寒帯域のおよそ2倍以上の鉄分が供給されている必要がある。ただし、このとき供給さ

れる鉄量が過剰である場合は、硝酸塩の消費量がさらに多くなることが予測され、西部北太平洋亜寒帯域のHNLC海域の主要栄養塩が枯渇してしまうことになる。つまり、西部北太平洋亜寒帯域では、東部北太平洋亜寒帯域の約2倍の硝酸塩を消費するが、枯渇はさせない程度で鉄が供給されている必要がある。実際に、我々の観測の結果では、西部北太平洋亜寒帯域の溶存鉄：硝酸塩比は東部北太平洋亜寒帯域に比べて約2倍～、親潮域で約3倍～となっていた。我々が提示した中層水循環によるオホーツク海からの鉄の移送経路では、オホーツク海の大陸棚の影響を受けたDSWで高い溶存鉄：硝酸塩比が観測され(約0.19)、ブッソル海峡の混合過程で溶存鉄：硝酸塩比は減少する。しかし、それでもこの海峡付近で決定される溶存鉄：硝酸塩比は東部北太平洋亜寒帯域(0.005-0.02)にくらべて十分に高く(0.04-0.08)、親潮域中層の溶存鉄：硝酸塩比に影響を与える。鉄は非保存成分であるため、その後の水塊の移送過程で鉄のみが除去され、溶存鉄：硝酸塩比を減少させると考えられる。さらには、この溶存鉄：硝酸塩比を持つ中層の水塊が冬季鉛直混合などの過程によって表層に回帰される。本研究で示した中層循環による鉄の移送プロセスは、東部北太平洋亜寒帯域に比べて十分に高いが硝酸塩を枯渇するには至らない、西部北太平洋亜寒帯域の溶存鉄：硝酸塩比の値や、約3倍の硝酸塩を消費させる親潮域の溶存鉄：硝酸塩比の値を説明することができる。これらの事から、千島海峡付近で起こる混合過程は、親潮域や西部北太平洋亜寒帯域の栄養塩消費量を決定する重要なプロセスであることが示唆される。

(4) 鉄の化学形態と利用能の変化

中層水によって移送される主要な画分である粒子態鉄の生物利用能を確認するために、夏季の北太平洋亜寒帯域において現場実験を実施した。その結果、大陸棚起源の粒子態鉄は生物利用能を有すること、外洋においても粒子態鉄自体は生物利用能を保持していることが確認された。しかし、粒子態鉄濃度には空間的に大きな違いがあった。各海域の濃度レベルと植物プランクトンの要求量から検討すると、大陸棚付近とオホーツク海内部では、粒子態鉄が植物プランクトンの増殖を十分に支えるだけの鉄分を有しているが、北太平洋亜寒帯外洋域では、粒子態鉄の濃度は植物プランクトンの増殖を支えるには十分でないことが分かった。この結果は、大陸棚起源の鉄分がオホーツク海から西部

北太平洋亜寒帯域にかけて輸送される際、主に外洋で利用されるのは溶存態であること、粒子態鉄の生物生産活動への寄与率が空間的に変化していることを示唆する結果である。

(5) まとめ

本研究で得られたデータを基に、オホーツク北西部大陸棚から中層水を介して北太平洋亜寒帯親潮海域に供給される鉄の定量的な評価を行うと、親潮域中層では $3.1 \times 10^5 \sim 6.3 \times 10^5 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$ の鉄分が運ばれ、そのうち $28.6 \mu\text{mol Fe/m}^2/\text{yr}$ が中層から表面に供給されていると見積もられた。また、年間の移送量を図7に示す。

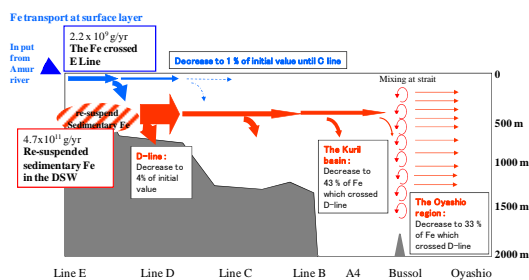


図7 オホーツク海から北太平洋亜寒帯域(親潮域)に移送される鉄の定量的評価

近年、オホーツク海の海氷生成量が減少し、この大陸棚起源の鉄を移送する中層循環の弱화가起こっていることが報告されている(Nakanowatari et al., 2007)。この中層循環の弱화는、親潮域や西部北太平洋亜寒帯域への鉄供給過程にどのような影響を与えるかは気になるところであり、さらにはこの海域の生物生産に影響している可能性もある。現に親潮域の生物生産がこの30年で減少傾向にあることが既に報告されている(Ono et al., 2002)。このような「環オホーツク海域」で確認されているいくつかの事象がどのように繋がっているのかは大変興味深いところである。本研究の結果から、「環オホーツク海域」の中層循環は、NPIWの及ぶ範囲の西部北太平洋の物質循環と、少なくとも親潮域の生物生産に大きな影響を与えていることが明らかとなった。また、千島海峡付近の混合過程は、「環オホーツク海域」で起こっているいくつかの事象を繋げるカギとなるプロセスであることが示された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計11件)

1. Nomura, D., J. Nishioka, M. A. Granskog, A. Krell, S. Matoba, T. Toyota, H. Hattori, K. Shirasawa, Nutrient distribution in sea ice in the southern Sea of Okhotsk., in press, Marine Chemistry, 119, 2010, 1-8. (査読有)

2. Hattori, A., J. Nishioka, T. Ono, R. M. L. McKay, K. Suzuki, Fe deficiency in micro-sized diatom in the Oyashio region of the western subarctic Pacific during spring, J. Oceanography, 66, 2010, 105-115. (査読有)

3. Nishioka, J., S. Takeda, Y. Kondo, H. Obata, T. Doi, D. Tsumune, C. S. Wong, W. K. Johnson, A. Tsuda, Changes in iron concentrations and bio-availability during an open ocean mesoscale iron enrichment experiment in the western subarctic Pacific, SEEDS II, Deep Sea Res. part II, 2009, doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.006. (査読有)

4. Suzuki, K., H. Saito, T. Isada, A. Hattori-Saito, H. Kiyosawa, J. Nishioka, R. M. L. McKay, A. Kuwata, A. Tsuda, Community structure and photosynthetic physiology of phytoplankton in the northwest subarctic Pacific during in situ iron fertilization experiment (SEEDS-II), Deep Sea Res. part II, 2009, doi:10.1016/j.dsr2.2009.06.001. (査読有)

5. Watanabe, Y. W., J. Nishioka, S. Shigemitsu, A. Mimura, T. Nakatsuka, Increases of alkalinity and pH in the Okhotsk Sea during the 1990s and 2000s, Geophys. Res. Lett., 2009, doi:10.1029/2009GL038520. (査読有)

6. Liu, H., K., Suzuki, J. Nishioka, R., Sohrin, T. Nakatsuka, Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the Sea of Okhotsk during late summer of 2006, Deep-Sea Research Part I, 56(4), 561-570, 2009, doi:10.1016/j.dsr.2008.12.003. (査読有)

7. Ooki, A., J. Nishioka, T. Ono, and S. Noriki, Size dependence of iron solubility of Asian mineral dust particles, Journal of Geophysical Research, 114, D03202, 2009, doi:10.1029/2008JD010804. (査読有)

8. 西岡 純・武田重信, 鉄の海洋内循環におけるコロイド態画分の重要性, 月刊海洋, 42, 2009, 14-19 (査読無)
9. 西岡 純, 中塚 武, 小野数他, 千島海峡の混合過程の生物地球化学的重要性—西部北太平洋亜寒帯域の鉄: 栄養塩比に与える影響—, 月刊海洋, 50, 2008, 107-114 (査読無)
10. Tsuda, A., Takeda, S., Saito, H., Nishioka, J., et al, Evidence for the grazing hypothesis: grazing reduces phytoplankton responses of the HPLC ecosystem to iron enrichment in the western subarctic Pacific (SEED II). *Journal of Oceanography*. 63, 2007, 983-994. (査読有)
11. Nishioka, J., T. Ono, H. Saito, et al., T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson, A. Tsuda, Iron input into the western subarctic Pacific, importance of iron export from the Sea of Okhotsk, *Journal of Geophysical Research*, 112, C10012, 2007, doi:10.1029/2006JC004055. (査読有)

[学会発表] (計 11 件)

1. 金浜幸治、西岡 純、2010 年度日本海洋学会春季大会、大陸棚起源粒子態鉄の生物利用、2010 年 3 月 29 日、東京海洋大学、品川
2. Jun NISHIOKA, Takeshi Nakatsuka, Kenshi Kuma Yutaka W. Watanabe, Tsuneo Ono, Kay I. Ohshima, N. Ebuch, 2009 ASLO aquatic science meeting
The importance of sea-ice formation in the Sea of Okhotsk for supplying iron to the western subarctic pacific, Jan. 24 2009, Nice France,.
3. 西岡 純、中塚 武、2009 年度日本海洋学会春季大会、千島海峡の混合過程が西部北太平洋亜寒帯域の鉄: 栄養塩比に与える影響、2009 年 4 月 6 日、東京大学、東京
4. Jun NISHIOKA, Takeshi Nakatsuka, Hiroaki Saito, Tsuneo Ono, Takayuki Shiraiwa, 2008IMBER/IMBIZO workshop
The importance of sea-ice formation in the Sea of Okhotsk for supplying iron to the western subarctic pacific, Nov. 9, 2008, Miami, USA.
5. 西岡 純・小埜恒夫・紀本英志・中村知 裕・坂岡桂一郎, 2008 年度日本海洋学会秋季大会、親潮域表層における微量栄養物質 (鉄) の広域水平分布自動観測、2008 年 9 月 26 日、広島国際大学、広島
6. Jun NISHIOKA, Takeshi Nakatsuka, Kenshi Kuma Yutaka W. Watanabe, Tsuneo Ono, Kay I. Ohshima, 2008 PICES annual meeting
The importance of sea-ice formation in the Sea of Okhotsk for supplying iron to the western subarctic pacific, Oct. 25 2008, Dalian, China.
7. 西岡 純、久万健志、真鍋絵理、渡辺 W 豊、小野和也、坂岡桂一郎、中塚 武、2008 年度日本海洋学会春季大会、西部オホーツク海における鉄の供給と移送、2008 年 3 月 27 日、東京海洋大、東京
8. Jun NISHIOKA, Kenshi KUMA, Yutaka W. WATANABE, Tsuneo ONO, Takeshi NAKATSUKA, 2008 AOGS meeting,
Importance of lateral iron transportation from the Sea of Okhotsk to western subarctic Pacific, June 24, 2008, Busan, Korea
9. Jun Nishioka, Tsuneo Ono, Hiroaki Saito, Takeshi Nakatsuka, Shigenobu Takeda, Takeshi Yoshimura, Koji Suzuki, Kenshi Kuma, Shigeto Nakabayashi, Daisuke Tsumune, Humio Mitsudera, W. Keith Johnson, Atsushi Tsuda, Ocean Sciences Meeting, Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the Sea of Okhotsk, 8 March 2008, Orlando USA
10. J. Nishioka, T. Ono, H. Saito, 2007 PICES annual meeting, Seasonal variability of iron concentration in the Oyashio region, Oct. 24 2007, Victoria Canada
11. 西岡 純、津旨大輔、中塚 武、三寺史夫、津田 淳、2007 年度日本海洋学会春季大会、北太平洋中層水による鉄の移送、2007 年 3 月 25 日、東京海洋大、東京

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西岡 純 (NISHIOKA JUN)

北海道大学・低温科学研究所・准教授

研究者番号: 90371533