

平成21年 5月15日現在

研究種目： 基盤研究（A）
 研究期間： 2006～2008
 課題番号： 18201002
 研究課題名（和文） 環オホーツク海域における中層循環と物質輸送のモデリング
 研究課題名（英文） Modeling of the Intermediate Circulation and Material Transfer in the Pan-Okhotsk Region
 研究代表者
 江淵 直人（EBUCHI NAOTO）
 北海道大学・低温科学研究所・教授
 研究者番号： 10203655

研究成果の概要： オホーツク海および北西北太平洋親潮域の高い海洋生物生産性を支えている物質循環のメカニズムを、海洋中層（400～800 m）の循環と鉄の輸送過程に注目して、現場観測と数値モデルによる研究を行った。その結果、オホーツク海北西大陸棚起源の鉄分が、海氷の生成とともに作られるオホーツク海中層水によって移送され、千島海峡で広い深度層に分配された後、西部北太平洋に送り出されている様子が定量的に明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2007年度	14,600,000	4,380,000	18,980,000
2008年度	10,800,000	3,240,000	14,040,000
年度			
年度			
総計	39,600,000	11,880,000	51,480,000

研究分野： 海洋物理学

科研費の分科・細目： 環境学・環境動態解析

キーワード： オホーツク海、中層循環、物質輸送、鉄仮説、北太平洋中層水、海洋循環モデル、東樺太海流、高密度水

1. 研究開始当初の背景

亜寒帯の外洋域では、冬季の鉛直対流によって下層から表層へ栄養塩が大量に供給されるにもかかわらず、夏季の生物生産によってその栄養塩が全て消費されることはなく、生物変動の季節変化はほとんど見られない。このような海域では、栄養塩の供給が生物生産の制限要因ではないことが知られている。近年の研究によって、微量栄養物質である鉄の不足が植物プランクトンの増殖を制限していることが明らかとなってきた。これに対して、オホーツク海や隣接する親潮海域およ

び西部北太平洋亜寒帯域からなる「環オホーツク海域」は、生物生産に季節変動が見られ、一部では表層の栄養塩が枯渇するまで生物生産が進み、他の亜寒帯海域とは明らかに異なる特徴を持つことが知られている。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、環オホーツク海域においてはそれに加え、アムール川から大陸棚を經由して中層水によって外洋へ輸送される鉄によって高い生物生産性が支えられている可能性が指摘され始めていた。

1997年から2002年まで行われた戦略的基礎研究「オホーツク海氷の実態と気候システムにおける役割の解明」(研究代表者:若土正暁 北海道大学低温科学研究所 教授)の集中観測によって、今までほとんど観測が行われていなかったオホーツク海の海洋循環の実態が明らかになりつつあった。アムール川河口が位置するオホーツク海北西陸棚域は海氷生産量が非常に多く、この海氷生成にともなって多量の高塩分水(ブライン)が排出されることにより、高密度陸棚水が生成される。この水は北太平洋の表層でできる水では最も重く、サハリン東岸沖の中層を南下し、オホーツク海さらには北太平洋の中層(水深400-800 m)へと広がっていく。この陸棚底層起源の低温・高塩分・高密度の中層水(DSW: Dense Shelf Water)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、大陸棚で鉄を含む多くの物質が取り込まれ、オホーツク海から親潮域・西部北太平洋へ物質を輸送する役割を持つ可能性が指摘されていた。また、西部北太平洋亜寒帯域や親潮海域は、冬季の表層混合過程を介してNPIWに含まれる鉄が表層に供給され、一次生産の季節的変動を生み出している可能性が考えられていた。しかしながら、オホーツク海および西部北太平洋亜寒帯域の中層循環およびそれが鉄などの物質循環に果たす役割の詳細な実態は明らかではなかった。また、鉄は海水中で多種の存在状態をとり、粒子となって除去されやすいため、鉄が中層循環によって運ばれる量を求めるためには、海水中で鉄が保持されている時間と中層循環の時間スケールの関係を踏まえて研究を進める必要があった。

2. 研究の目的

上述のような背景の中で、本研究課題では、オホーツク海のDSWやその影響を受けてNPIWが形成される中層循環の物理過程、およびそれが鉄など生物生産に必要な微量栄養物質の輸送にどのように関わり、環オホーツク海域の物質循環と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た。そのために本研究期間内に以下の3項目について研究を行うこととした。(1)環オホーツク海域の中層循環の実態とその経年変動のデータ解析による解明、(2)環オホーツク海域の中層循環の数値モデルによる再現、(3)環オホーツク海域における鉄などの微量栄養物質の挙動の解明。

3. 研究の方法

(1)環オホーツク海域の中層循環の実態とその経年変動のデータ解析による解明
海洋観測のデータを解析し、DSWの形成

からオホーツク海内での移流、千島列島周辺の海峡域での潮汐混合、西部北太平洋でのNPIWの形成などの環オホーツク海域の中層循環の物理過程を明らかにするとともに、地球温暖化などに伴う中層循環の経年変動を調べた。

(2)環オホーツク海域の中層循環の数値モデルによる再現

データ解析によって明らかとなったオホーツク海および北西太平洋の中層循環を数値モデルを用いて再現した。また、条件を変えた数値実験を行い、この海域の中層循環のメカニズムについて考察を行った。

(3)環オホーツク海域における鉄などの微量栄養物質の挙動の解明

研究船による現場観測、試料分析により、環オホーツク海域の鉄など微量栄養物質の挙動を調べた。特に、オホーツク海の大陸棚およびブツソル海峡での潮汐混合域を集中的に観測し、大陸棚や海底より鉄など微量栄養物質が中層水に取り込まれる、あるいは除去される過程を明らかにすることを試みた。

4. 研究成果

(1)環オホーツク海域の中層循環の実態とその経年変動のデータ解析による解明

①オホーツク海と北太平洋の海水交換の季節・経年変動

オホーツク海と北太平洋の海水交換は、北太平洋のオーバーターニングの源となるオホーツク海での重い水の出来具合やその北太平洋へのフラックスを決める最重要ファクターの一つである。本研究から、二海の海水交換は冬季に卓越すること、北の海峡からオホーツク海へ流入し南の海峡から流出するパターンが卓越することが明らかになった。また、海水交換は北太平洋での風応力によって決まり、オホーツク海中層水の経年変動も、この風応力変動に伴う海水交換の強弱によって決まる部分が大きいことが示唆された。

②オホーツク海の低塩化と海氷・高密度水生成弱化に関する研究

オホーツク海特にその北西部では、北太平洋で最大の低塩化が生じているが明らかになった。過去の気候値データセット(1930-1980年)と、近年北大低温研を中心として取得してきたデータセット(1990-2004年)との比較から、低塩化は水深500m付近まで顕著に起こり、平均すると0.05psu程度の低塩化となる。この低塩化はオホーツク海全域平均で約0.5mの淡水供給に相当する。塩分変化の水平分布を見ると(図1)、低塩化はオホーツク海の西部域、特に低気圧性ジャイヤの中心で大きいことがわかる。オホーツク海内での平均滞留時間が長い海域で低塩化がより顕著であることと、太平洋側ではこの

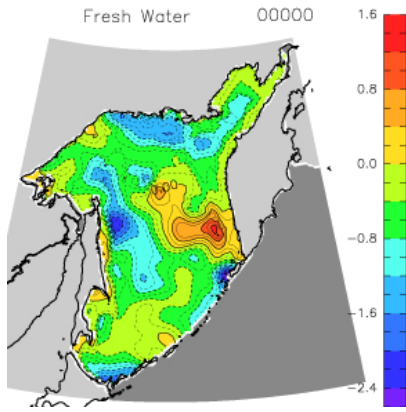


図1. 塩分変化[(1990-2004年)-(1930-1980年)]の水平分布. 0 m・600 mまでの塩分変化を淡水 (m) に換算した. 負 (シェード域) は塩分低下域.

ような顕著な低塩化が生じていないことを考えると、低塩化の起源はオホーツク海にあると考えられる。この低塩化に伴って、北太平洋の中層に潜り込む高密度陸棚水の生成量も減少し、両期間（約30年間）で、およそ30%減少していると見積られた。また、 $26.8\sigma_\theta$ 付近の中層水の量が増加、 $27.0\sigma_\theta$ 付近の中層水の量が減少、つまり重い中層水が減った分、軽い中層水が増えていることも明らかになった。これらの原因は、温暖化による海氷生成量の減少が引き金になっていることを提案する。低塩化は、北部で生成された海水が南部へ輸送・融解することで生じている塩（淡水）輸送の働きが弱まったことで生じているという考えである。高密度陸棚水の生成量減少により北太平洋規模のオーバーターニングの弱が生じており、これは物質循環・生物生産にも多大な影響を及ぼす可能性がある。

(2) 環オホーツク海域の中層循環の数値モデルによる再現

海水が生成されるときには、氷にとって不純物である塩分が排出されるため、低温（結氷温度）で高塩分の重い水が形成される。オホーツク海では、シベリアからの寒気により北西陸棚域にポリニヤが形成され、そこで低温高塩分水が大量に作られている。一方、オホーツク海の出口には千島列島があるが、そこでは非常に強い潮汐混合が起こっていることが知られている。これが、高塩分の中層水を表層へ運ぶ効果を持っており、海水の融解で低塩化している表層水に塩分を補っている。これがオホーツク海の風成（表層）循環に乗ることによって北方へ移流され、高密度陸棚水が作られる北西陸棚域に達する。このように、北西陸棚域の高密度水→オホーツク海中層水→潮汐混合→北方への表層循環、が一連の流れとなって、3次元的な循環

を形成している。

0.5度格子の解像度を持つ海洋海水モデルを用いて数値実験することにより、高密度水形成に伴うオホーツク海の3次元循環過程を現実的に再現することができた。図2はシミュレーション結果のひとつで、 $26.8\sigma_\theta$ という等密度面（200m深前後）に沿った水温である。(c)がコントロール実験であり、(a), (b), (d), (e)は風を0, 0.5, 1.5, 2倍にしたものである。また、(f)に観測データの解析結果を示している。(c)のコントロール実験では、観測結果をおおむね再現することに成功した。面白いのは、風が変化することによって水温が変化することである。これは風が強くなることによって表層北向きの塩分輸送が大きくなり、海氷生成域の塩分強化をもたらしたためである。このように、オホーツク海の熱塩循環は風と強く結合している可能性が高い。気温を変化させた実験では、海氷生成量に大きな変化が生じ、オホーツク海中層水温の変動に寄与した。シミュレーションでは気温が 3°C 上昇したときに中層水

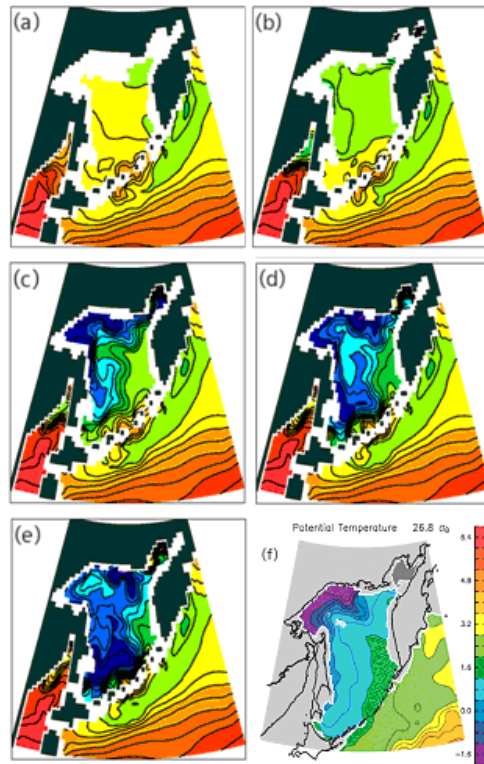


図2. 風の強さを変化させることによって生じる中層水温の変化。(c)がコントロール実験。(a), (b), (d), (e)は、コントロール実験に比べて風を0, 0.5, 1.5, 2倍にしたものである。また、(f)に観測データ (Itoh et al., 2003) の解析結果を示す。

温が約 0.6 °C 上昇していた。これは、データ解析により明らかとなったここ 50 年の水温上昇傾向と同程度であった(Nakanowatari et al., 2007)。

(3) 環オホーツク海域における鉄などの微量栄養物質の挙動の解明

①環オホーツク海域における鉄の挙動

鉄が海洋の植物プランクトン増殖の制限要因になり得ることから、生物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。本研究では、極東ロシア水文気象局との共同観測を 2006 年、2007 年夏季に実施し、「環オホーツク海域」特有の中層循環が大陸棚起源の鉄の移送に与える影響を明らかにするために、クリル諸島周辺を含むオホーツク海内で直接観測を行った(「クロモフ号」航海 (Kh06 航海))。また、2008 年夏季には東京大学海洋研究所白鳳丸 KH08-2 航海に参加し、北太平洋中層水(NPIW)にどれだけオホーツク海から鉄分が流出しているかを明らかにするために、夏季の西部北太平洋亜寒帯域で東経 155 度線に沿った断面観測を実施した。

サハリン北部の大陸棚付近には、低温で密度 26.8-27.0 σ_θ で特徴付けられる DSW が深度約 300 m から海底に至るまでの海底上の鉛直的に広い範囲で確認された(図 3)。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。また、DSW には大陸棚上に存在していた鉄が取り込まれ、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東サハリン海流に沿った観測結果より明らかとなった(図 3)。西部北太平洋の東経 155 度

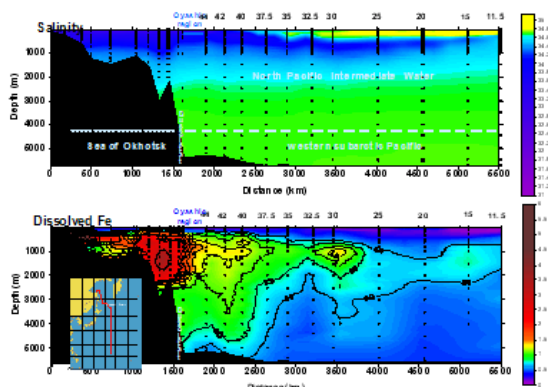


図 3. オホーツク海および西部北太平洋(東経 155 度線)における溶存鉄濃度(nM)および塩分の鉛直断面図。

ラインの鉄濃度観測結果をみると、中層(400-1000 m)に高铁濃度の水塊が確認されている。鉄濃度と塩分の分布を見ると、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(図 3)。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、オホーツク海起源の鉄が、中層水の循環によって北太平洋の外洋の広範囲へ移送されていることが示された。

②鉄の表層回帰過程

アムール川から供給されオホーツク海中層を通過して北太平洋亜寒帯に輸送された鉄を、基礎生産に使用するには表層への輸送過程が必要である。そこで、ここでは冬季混合層における過程に注目し、親潮域において表層鉄濃度の広域観測と XCTD よる水塊構造観測を同時に行い、表層への鉄供給過程を調べた。その結果、表層鉄濃度が水塊構造に応じて変動していることが確認された。外洋域では、亜熱帯水の影響を適度に受けた高塩・高温域で鉄濃度が高い(図 4 上)。この理由は水塊構造(図 4 下)からすると亜熱帯水が亜寒帯水の上に乗る、塩分を供給した結果、混合層が深まり、鉄濃度の高い亜寒帯表層水が表層に出てきたためと解釈できる。対照的に、上から下まで亜寒帯水の海域、あるいは亜熱帯循環に近く亜熱帯水が上に乗るすぎている海域(図は略)では混合層が浅く、表層鉄濃度も低い。このように鉄濃度の違いは、

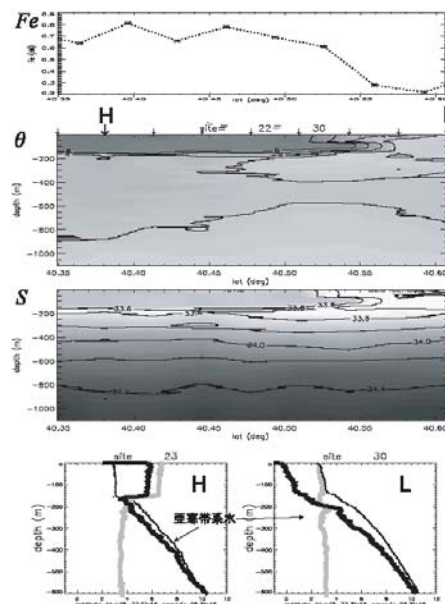


図 4. 上から表層鉄濃度(Fe)、ポテンシャル水温(θ)と塩分(S)の鉛直断面、点 H と L における θ (灰色)、S (黒太線)、 σ_θ (黒細線) の鉛直分布。

混合層が亜表層の亜寒帯系水まで届くほど発達していたかどうかは依存しており、混合層の発達には亜熱帯水の流入と冬季の海面冷却により引き起こされていたことが示唆された。

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 35 件)

本研究の成果として、英文論文査読有 18 編、査読無 7 編、和文論文査読有 2 編、査読無 8 編の計 35 編を公表した。紙数の制限のため、以下には、査読有の英文論文のみを列記した。

- ①Matsuda, J., H. Mitsudera, T. Nakamura, K. Uchimoto, T. Nakanowatari, and N. Ebuchi, 2009: Wind and buoyancy driven intermediate-layer overturning in the Sea of Okhotsk. *Deep-Sea Res.* (印刷中) .
- ② Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, S. Riser, and M. Wakatsuchi, 2009: Seasonal variation in the in- and outflow of the Okhotsk Sea with the North Pacific. *Deep-Sea Res.* (印刷中) .
- ③ Fukamachi, Y., K. Shirasawa, A. M. Polomoshnov, K. I. Ohshima, E. Kalinin, S. Nihashi, H. Melling, G. Mizuta, M. Wakatsuchi, 2009: Direct observations of sea-ice thickness and brine rejection off Sakhalin in the Sea of Okhotsk, *Continental Shelf Res.* (印刷中) .
- ④Toyota, T., K. Nakamura, S. Uto, K. I. Ohshima, and N. Ebuchi, 2009: Retrieval of sea ice thickness distribution in the seasonal ice zone from air-borne L-band SAR. *Int' J. Remote Sens.* (印刷中) .
- ⑤Liu, H., K. Suzuki, J. Nishioka, R. Sohrin and T. Nakatsuka, 2009: Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in the Sea of Okhotsk during late summer of 2006. *Deep-Sea Res. J.*, vol. **56**, 561-570.
- ⑥Ebuchi, N., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi, 2009: Subinertial and seasonal variations in the Soya Warm Current revealed by HF radars, coastal tide gauges, and bottom-mounted ADCP. *J. Oceanogr.*, vol. **65**, 31-43.
- ⑦Ono, J., K. I. Ohshima, G. Mizuta, Y. Fukamachi, and M. Wakatsuchi, 2008: Diurnal coastal-trapped waves on the eastern shelf of Sakhalin in the Sea of Okhotsk and their modification by sea ice. *Continental Shelf Res.*, vol. **28**, 697-709.
- ⑧Kawaguchi, Y., and H. Mitsudera, 2008: Numerical study of ice-drift divergence by a cyclonic wind with a Lagrangian ice model. *Tellus A*, vol. **60**, doi:0.1111/j.1600-0870.2008.00321.x.
- ⑨Saitoh, Y., K. Kuma, Y. Isoda, H. Kuroda, H. Matsuura, T. Wagawa, H. Takata, N. Kobayashi, S. Nagao and T. Nakatsuka, 2008: Processes influencing iron distributions in the coastal waters of the Tsugaru Strait, Japan. *J. Oceanogr.*, vol. **64**, 815-830.
- ⑩Fukamachi, Y., I. Tanaka, K. I. Ohshima, N. Ebuchi, G. Mizuta, H. Yoshida, S. Takayanagi, and M. Wakatsuchi, 2008: Volume transport of the Soya Warm Current revealed by bottom-mounted ADCP and ocean-radar measurement. *J. Oceanogr.*, vol. **64**, 385-392.
- ⑪Ohshima, K. I., and D. Simizu, 2008: Particle tracking experiments on a model of the Okhotsk Sea: toward oil spill simulation. *J. Oceanogr.*, vol. **64**, 103-114.
- ⑫Nishioka, J., Tsuneo Ono, H. Saito, T. Nakatsuka, S. Takeda, T. Yoshimura, K. Suzuki, K. Kuma, S. Nakabayashi, D. Tsumune, H. Mitsudera, W. K. Johnson, and A. Tsuda, 2007: Iron supply to the western subarctic Pacific: Importance of iron export from the sea of Okhotsk. *J. Geophys. Res.*, vol. **112**, doi: 10.1029/2006JC004055.
- ⑬Nakanowatari T., K. I. Ohshima, 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.*, vol. **34**, doi:10.1029/2006GL028243.
- ⑭Uchimoto, K., H. Mitsudera, N. Ebuchi, and Y. Miyazawa, 2007: Clockwise eddy caused by the Soya Warm Current in an OGCM. *J. Oceanogr.*, vol. **63**, 379-391.
- ⑮Toyota, T., S. Takatsuji, K. Tateyama, K. Naoki, and K. I. Ohshima, 2007: Properties of sea ice and overlying snow in the southern Sea of Okhotsk. *J. Oceanogr.*, vol. **63**, 393-411.
- ⑯Ono, K., K. I. Ohshima, T. Kono, M. Itoh, K. Katsumata, Y. N. Volkov, and M. Wakatsuchi, 2007: Water mass exchange

and diapycnal mixing at Bussol' Strait revealed by water mass properties. *J. Oceanogr.*, vol. **63**, 281-291.

- ⑰ Ebuchi, N., 2006: Seasonal and interannual variations in the East Sakhalin Current revealed by the TOPEX/POSEIDON altimeter data. *J. Oceanogr.*, vol. **62**, 172-183.
- ⑱ Yoshikawa, C., T. Nakatsuka, and M. Wakatsuchi, 2006: Distribution of N* in the Sea of Okhotsk and its use as a biogeochemical tracer of Okhotsk Sea Intermediate Water formation process. *J. Marine Sys.*, vol. **63**, 49-62.

[学会発表] (計 109 件)

本研究の成果として、国際学会 51 件、国内学会 58 件、計 109 件の学会発表を行った。紙数の制限のため、主要なもののみを記した。

- ① Nishioka, J., T. Nakatsuka, K. Kuma, Y. W. Watanabe, T. Ono, K. I. Ohshima, and N. Ebuchi, 2009: The importance of sea-ice formation in the Sea of Okhotsk for supplying iron to the western subarctic Pacific. *ASLO Aquatic Sciences Meeting 2009*, 29 Jan. 2009, Center de Congres Acropolis, Nice, France.
- ② Ohshima, K. I., T. Nakanowatari, T. Nakatsuka, J. Nishioka, and M. Wakatsuchi, 2008: Changes in the Sea of Okhotsk due to global warming -Weakening pump function to the North Pacific. *Fourth PICES Workshop on "The Okhotsk Sea and Adjacent Areas,"* 27 Aug. 2008, Tokyo University of Agriculture, Abashiri, Japan.
- ③ Ebuchi, N., Y. Fukamachi, K. I. Ohshima, and M. Wakatsuchi, 2008: Subinertial variations in the Soya Warm Current revealed by HF radars, coastal tide gauges, and a bottom-mounted ADCP. *2008 IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*, 10 July 2008, John B. Hynes Veterans Memorial Convention Center, Boston, Massachusetts, U.S.A.
- ④ Nakatsuka, T., J. Nishioka, and T. Shiraiwa, 2008: Linkage between inland and open ocean ecosystems by iron transport through river and intermediate water flows -Huge but vulnerable system in the Amur River watershed and the Sea of Okhotsk-. *Fourth IGBP Congress*, 8 May 2008, Cape

Town international Convention Centre, Cape Town, South Africa.

- ⑤ Mitsudera, H., Y. Ikumi, Y. Kawaguchi, T. Nakamura, 2008: Numerical modeling and parameterization of dense shelf water formation due to brine rejection over a gentle slope, with an application to the Sea of Okhotsk. *2008 Ocean Sciences Meeting*, 5 Mar. 2008, Orange County Convention Center, Orlando, Florida, U.S.A.
- ⑥ Nakamura, T., J. P. Matthews, T. Awaji, and H. Mitsudera, 2008: Small-scale eddies around the Kuril Straits generated by barotropic tidal flow. *2008 Ocean Sciences Meeting*, 4 Mar. 2008, Orange County Convention Center, Orlando, Florida, U.S.A.

[図書] (計 1 件)

- ① 大島慶一郎：第 1 章「東北アジア」の自然環境概説, 3. オホーツク海と海氷: その特殊性と重要性, 「朝倉世界地理講座-大地と人間-2 巻: 東北アジア」, 朝倉書店(印刷中).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

江淵 直人 (EBUCHI NAOTO)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 10203655

(2) 研究分担者

中塚 武 (NAKATSUKA TAKESHI)
北海道大学・低温科学研究所・准教授
研究者番号: 60242880
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
三寺 史夫 (MITSUDERA HUMIO)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 20360943
大島 慶一郎 (OHSHIMA KEIICHIROU)
北海道大学・低温科学研究所・教授
研究者番号: 30185251
中村 知裕 (NAKAMURA TOMOHIRO)
北海道大学・低温科学研究所・講師
研究者番号: 60400008