科学研究費助成事業 研究成果報告書



平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号: 10101 研究種目:基盤研究(S) 研究期間: 2010~2014

課題番号: 22221001

研究課題名(和文)オホーツク海と北太平洋亜寒帯域をつなぐ熱塩/物質循環システムの実態解明

研究課題名(英文) Elucidation of thermohaline/biogeochemical circulation systems connecting the Sea of Okhotsk with subarctic North Pacific Ocean

研究代表者

若土 正曉(Wakatsuchi, Masaaki)

北海道大学・-・名誉教授

研究者番号:60002101

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 167,700,000円

研究成果の概要(和文):オホーツク海から親潮域の豊かな水産資源を支える"奇跡ともいえる仕組み"を明らかにするため、オホーツク海と北太平洋をつなぐ熱塩/物質循環システムの実態解明を進めた。熱塩循環の強さを決めるオホーツク海北部の高密度水(DSW)の塩濃度は、亜寒帯循環を跨ぐ塩濃度偏差の長距離伝播、海氷生産量変動、降水量変動との「せめぎ合い」により決まる。アムール川河口・オホーツク北部陸棚上に堆積する光合成に必須の栄養物質・鉄は、このDSWに取り込まれ、北太平洋の広範囲に供給される。DSWと潮汐混合を介し強く結合した熱塩循環と物質循環が生物生産を北太平洋規模で規定するという、絶妙なシステムが本研究により明らかとなった。

研究成果の概要(英文): We investigated the thermohaline/biogeochemical circulation systems, connecting the Sea of Okhotsk with the North Pacific, to elucidate a 'miraculous mechanism' that supports abundant fisheries resources in the Okhotsk and Oyashio regions. Salinity of the dense shelf water (DSW) over the northern shelf of the Okhotsk Sea controls the strength of the thermohaline circulation of the North Pacific Ocean. DSW salinity is determined by relative contribution among the salinity anomaly that propagates long distance from the subarctic gyre, freshwater anomaly by precipitation, and saline water anomaly rejected during sea ice formation. DSW entrains nutrients such as iron, originating in the Amur River and deposited over the continental shelf, and spreads these materials to the North Pacific Ocean. This study has revealed an exquisite thermohaline-biogeochemical system coupled through DSW and tidal mixing, which controls primary production in the large area of the subarctic North Pacific.

研究分野: 海洋物理学

キーワード: 熱塩循環 物質循環 鉄 高密度水 オホーツク海 親潮 植物プランクトン

1. 研究開始当初の背景

2. 研究の目的

オホーツク海から親潮域を世界でも稀にみる豊かな水産資源域にしているこの "奇あるとれえる仕組み"の全体像を明らかにするるとを、本研究の目的とする。中でも最大悪題である、オホーツク海と北太の実態である、オホーツク海と北太の実態である。データ空内により未知であれた、河川塩水供給、海水生成に伴う高塩水供給である。とは、海水生成に伴うる熱塩循環との結合により制御される鉄循環との結合系の生産をコントロールする鉄循環との結合系の三次元構造を解明する。

3. 研究の方法

- (1) ロシア極東海洋気象研究所 (FERHRI) 所属の観測船を用いた、オホーツク海東部・カムチャツカ半島沖のロシア経済水域観測 (2011 年、2014 年に実施)。また、これまで実施してきたアムール川河口・オホーツク海西部における観測のデータ解析。
- (2) **FERHRI** が管理するロシア経済水域内 未公表データを含む海洋データセットの解析。 (3) 北太平洋全域の物理・地球化学・生物デ ータのアーカイブなどを用いたデータ解析。
- (4) 数値モデリングを用いた熱塩循環/物質循環結合システムの解明。

4. 研究成果

(1) オホーツクー北太平洋熱塩循環システム 凍る海では塩濃度が海水密度を決めるため、 熱塩循環の強度を決めるキーパラメータは 「DSW の塩濃度」である。したがって、定量 的な実態解明には、まず、DSW 塩濃度の時系 列を明らかにすることが肝要である。しかし、 DSW 形成域であるオホーツク海北西部(図1) はロシア経済水域であり、特に塩濃度データ はほとんど無く DSW の変動は未解明であった。

そこで、我々は FERHRI 所有のロシア未公 開データを含む大量のデータセットを解析し (図 1)、50 年間を超える長期の DSW 塩濃度 時系列の抽出に成功した。その結果、DSW が $0.12 \mathrm{psu}/50$ 年間の割合で低塩化しており、熱 塩循環の弱化が明らかとなった。また、10 年 規模変動も顕著であった(図 $2\mathrm{a}$)。

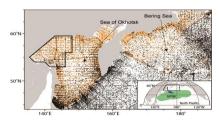


図 1 海洋データの測点。黒は従来データの測点。 オレンジはロシアデータによる増分。DSW はオホーツク海北西部(黒枠)で生成する。

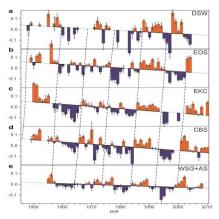


図2 塩濃度変動の時系列。ここで、DSW;高密度水形成域、EOK;オホーツク東部、EKC;東カムチャツカ海流、CBS;ベーリング海、WSG+AS;西部亜寒帯循環とアラスカ循環。低塩化に加え、WSGと ASから DSW 生成域に向かい塩濃度偏差の伝搬が見える。

DSW 塩濃度は、北太平洋からの高塩水供給、 海氷生産に伴う高塩水供給、アムール川など からの淡水供給、の3つの要因の「せめぎ合 い」で決まる。この「せめぎ合い」を明らか にするために時系列を他の様々な時系列と比 較すると、DSW 変動に対して最も重要な過程 はアラスカ循環や西部亜寒帯循環から発し、 ベーリング海を経由して、4~5年かけてオホ ーツク海北部に到達する、表層塩偏差の長距 離伝搬であることを発見した(図2b-e)。す なわち亜寒帯循環における表層塩濃度偏差の 長距離伝搬が DSW を変え、それが沈み込ん で最終的には中層循環の変動を引き起こすと いう、北太平洋を跨ぐ大規模な熱塩循環の三 次元構造を、本研究は明らかにしたのである (Uehara, Wakatsuchi et al., 2014; 図 3)。

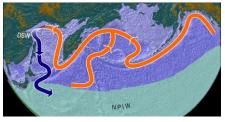


図3 本研究で得られた北太平洋熱塩循環像 の模式図

しかしながら、この伝搬経路上におけるオホーツク東部海域で流れの情報が空白であったため、2011年にロシア観測船ゴルディエンコ号を用いて現場観測を行った。海面高度計デ

ータと合成した結果、表層 100m の流量は年平均 1.0Sv、冬季平均 1.6Sv であり、DSW 生成域に向かって流れていることが明らかとなり、図 3 の伝搬経路が妥当であることを示した。

DSW 塩濃度は降水によっても影響を受ける。海洋表層の低塩化は亜寒帯循環全体で生じており(図 2b-e)、温暖化に伴う降水量の増加傾向を反映している。また、降水は DSW 塩濃度の十年規模変動にも有為な寄与があった(図 4)。特にオホーツク海北部とカムチャツカ半島上で両者は高い相関があることが見出された(Uehara, Wakatsuchi et al., 2014)。陸上でも高い相関があることから、海上への降雨に加え、河川を通した降雨の影響も含まれていると考えられる。

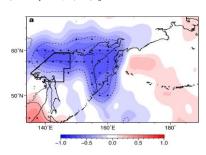


図4 DSW の塩濃度と降水の相関

海氷生成の影響も有為である。DSW は薄氷域 (ポリニヤ) における活発な海氷生産に伴う高塩水供給によって生成される。マイクロ波衛星 (SSM/I) を用いてポリニヤにおける海氷厚を推定し、熱収支計算を組み合わせて海氷生産量を計算した。その結果、海氷の高生産年では、DSW が中層水下部 27.00% まで潜り込んでいることを見出した。海氷生産量はこの34年間で11%減少しており、DSW の低塩化は、北太平洋流入水の低塩化に加え、海氷減少の影響も受けていることを指摘した (Ohshima, Wakatsuchi et al., 2014)。

以上のように、北太平洋からの流入水、降水による淡水、海氷生産に伴う高塩水が有為な影響を及ぼしつつ「せめぎ合う」ことで、熱塩循環を駆動する DSW の塩濃度は決定されることが明らかとなった。これは、数値シミュレーションによっても定量的に確認された(Nakanowatari, Wakatsuchi et al., 2015)。

(2) オホーツク―北太平洋物質循環システム

本研究では、日露の国境を超えた観測を実施し、生物・化学・物理パラメータを収集した。ロシア経済水域内の観測は、日露共同研究として、2011年度に FERHRI 所属ゴルディエンコ号を用いた東部オホーツク海および千島列島海域の航海を、2014年度にはマルタノフスキー号を用いた東カムチャツカ上流域の航海を実施した(図5)。後者の航海はロシア側の計画変更により大幅に予定が遅れ 2014年の実施となったが、日露双方の粘り強い対応により実現されたものである。同時に、北

太平洋の物質循環の全体像把握のため、2011

年度おしょろ丸航海、2012、2014年度白鳳丸

航海において広域のデータを収集した。さらに、これまで行ったロシア船による日露共同観測データや北海道区水産研究所が親潮域において取得している長期モニタリングデータも解析した。2014年度のロシア経済水域内データの公表は未だ制限されているものの、以上の解析結果から、オホーツク―北太平洋を跨ぐ物質循環システムと、この海域の生物生産の特徴が、数多く明らかになった。

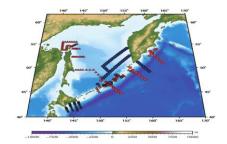


図5 オホーツク海 - 親潮海域の観測点。(赤丸) 2014 年度日露観測;(青丸) 2011 年度日露観測;(赤三角) 解析に用いた 2006、2007 年度日露観測;(+) 2014 年 度白鳳丸観測と A-ライン(長期モニタリングライン)。

オホーツク海北西陸棚域では、アムール川 由来の陸起源物質(有機物・鉄)などが堆積 している。その陸起源堆積物が DSW にとり こまれ、オホーツク海ー北太平洋の中層循環 によって移送されている実態を、化学パラメ ータの濃度分析(図6)や Sr/Nd 同位体をト レーサーとして追跡することで明らかにした (Nishioka et al., 2014; Shigemitsu, Nishioka et al., 2013)。また数値モデルも DSW とともに 移送される物質の経路を再現した(Uchimoto, Wakatsuchi et al., 2014)。

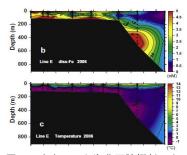


図6 オホーツク海北西陸棚斜面上において高濃度の鉄が低温の DSW に取り込まれている観測結果。 (上)溶存鉄濃度、(下)水温。

このようなアムール川からの物質供給は、オホーツク海や親潮域における世界でも有数の高い生物生産に寄与していると考えでらられまで科学的な根拠は希薄を空れた。本研究では大型珪藻類の生理状態を空間的に俯瞰することにより、オホーツク海の結果、夏季の北西陸棚はアムで、その結果、夏季の北西陸棚はアムで、と(Isada, Suzuki et al., 2013)、一方で、平洋のオホーツク海千島海盆付近では、北トレスを増えており、鉄が増殖を律速していることが増充をは、鉄が増殖を律速していることが

明らかとなった(Suzuki et al., 2014;図7)。 このように、西部亜寒帯海域を含め広範囲に 亘って鉄の利用とともに植物プランクトンの 増殖が生じ、生物種組成、有機炭素生成量を 規定する要因であることが明らかとなった。

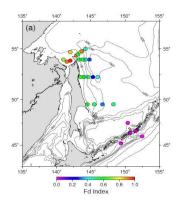


図7 鉄欠乏ストレスの指数 (Fd 指数)。数値 が小さいほど鉄欠乏ストレスの度合いが高い。

北太平洋の生物生産システムにおいて、従 来、ユーラシア大陸から大気経由で飛来する 陸起源粒子が鉄分の供給源として注目されて きた。しかし西部海域では、上述のように河 川水及び堆積物由来の鉄分供給が重要である。 そこで本研究では、北太平洋亜寒帯の全域に おける鉄の供給量と植物プランクトン増殖量 との関係の解明をさらに定量的に進め、西部 海域と東部のアラスカ湾との比較を実施した。 その結果、西部海域では表層直下から中層に かけて鉄濃度が東部海域よりも高く、西部海 域がより多く鉄の供給を受けている事が示さ れた。亜表層の高い鉄濃度は拡散過程を介し て表層に影響を与えているため、東部に比べ て西部では春季から夏季に消費される栄養塩 が2倍多く、植物プランクトンの増殖量もそ れに伴って大きいことがわかる。

ではなぜ親潮域や西部北太平洋の中層に高い鉄濃度層が形成されているのであろうか。 それを明らかにするために、FERHRIとの共同航海や我が国の研究船による観測航海を実施し、データを収集・解析した。その結果、北太平洋とオホーツク海をつなぐ新たな鉄供給過程を発見し、全体像を捉えることに成功した(Nishioka et al., 2013;図8)。

 ることも判明した(Nishioka et al., 2013)。

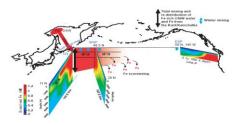


図8 「環オホーツク海域の鉄供給システム」が北 太平洋の広域に与える影響の概念図。濃度コンタは 太平洋で得られた溶存鉄濃度断面図のデータ。

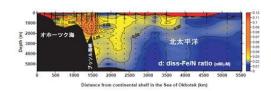


図9 西部オホーツク海および北太平洋の東経 155 度ラインにおける溶存鉄濃度:窒素比の鉛直分布。



図10 オホーツク海から北太平洋へ移送される鉄 供給過程の定量評価

オホーツク海―北太平洋物質循環システム の時間変動に関しても、新たな知見を得てい る。DSW に吸収されたオホーツク海中層の人 為的二酸化炭素の長期変動を解析したところ、 1993 年から 2006 年にかけて等密度面 27.0ce より浅い深度では人為的二酸化炭素が 16%増 加したが、一方で 27.0m より深い深度では 28%減少し、水柱全体では14%減少しているこ とを発見した (Watanabe et al., 2013)。これは、 DSW が低塩化・低密度化し浅い深度に侵入す ることに対応しており、熱塩循環の弱化と合 致する物質循環変動である。鉄も DSW に取 り込まれオホーツク海北部から中層を輸送さ れている。この人為的二酸化炭素の振る舞い は、熱塩循環による鉄輸送能力の弱化を示す ものである。

(3) 熱塩循環/物質循環のモデリングおよび予測可能性の評価

栄養物質(鉄)循環および気候変動に対する熱塩/物質循環システムの応答を解明し、予測するため、オホーツク海特有の物理過程を組み込んだ物質循環モデルを開発した。このモデルは、熱塩循環再現性の指標であるフロン(CFC11、CFC12)について、オホーツク海内の分布を良い精度で再現することに世界で初めて成功し(Uchimoto, Nakamura et al., 2011)、鉄も主な観測的特徴を再現した

(Uchimoto, Wakatsuchi et al., 2014;図11)。 感度実験と収支解析によると、中層の鉄濃度 には海底堆積物からの供給(巻上げ・溶出) が支配的影響を及ぼすこと、海面混合層への 鉄供給に対しては、オホーツク海と西部亜寒 帯の外洋域では従来推測されていた大気由来 粒子や混合層下からの取込より、オホーツク 海陸棚からの水平輸送の寄与の方が大きいこと、が示された。こうした鉄の輸送経路は、 高分解能の鉄循環モデルを用いてさらに詳細 に再現されている。

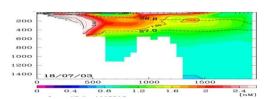


図11 数値モデルによって再現された中層鉄循環

このように鉄循環は物理場の影響を大きく 受けるため、その経年変動の再現・予測も物 理場の再現性に依存することが示唆される。 まず熱塩循環単独で経年変動シミュレーショ ンを行ったところ、DSW の塩濃度変動おいて、 河川や降水による淡水供給、風成循環による 塩供給、海氷生成に伴う塩供給が「せめぎ合 い」に同程度に寄与しており、データ解析か ら得た結果と整合的な結果を示した(Nakanowatari, Wakatsuchi et al., 2015)。 次に、このモ デルで物質循環シミュレーションを行うと、 図 12 に示すように、親潮域において栄養塩 (リン酸)の濃度の経年変動をよく再現した。 鉄は栄養塩に比べてデータ量が少なくモデル との直接の比較はできないものの、栄養塩と 正の相関を持って変動しており、基礎生産も それに連動する。この良好な再現性は、DSW と潮汐混合を介して強く結合した熱塩/物質 循環システムの予測可能性を示している。

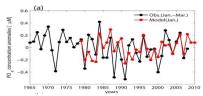


図12 冬季親潮域の栄養塩(リン酸)の時系列。 黒線は観測、赤線はモデル。

(4) まとめ:オホーツク海-北太平洋をつなぐ熱塩/物質循環システム

熱塩循環の強さを決めるのは、DSW の塩濃度である。その変動は、亜寒帯循環を跨長を まーツク海北部に到達する表層塩偏差の長距離伝搬、海氷生産量の変動、オホーツク北部 の降水量変動と密接に関わっていることが明らかとなった。オホーツク北西陸棚上にのより なかとなった。オホーツク北西陸棚上にの するアムール川由来の鉄や有機物は、こ広範 する DSW に取り込まれ、北大公に に供給される。DSW と潮汐混合を介し強く に大熱塩循環と物質循環が植物プランク との増殖などの生物地球化学的現象を北太平 洋スケールで規定しているという、この絶妙なシステムが、本研究によって明らかとなったのである(図13)。ロシアとの共同研究では突然の計画変更もあったが、臨機応変に対応することで、結果的には本研究の目的を達する為の良好なデータが取得され、ブレークスルーがもたらされたと言える。

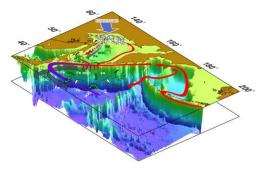


図13 本研究で得られたオホーツク海-北太平洋をつなぐ熱塩/物質循環システムの模式図。赤の矢印は表層の流れ、灰色は中層の流れ、紫は潮汐混合によって変質した表層の流れを表す。

以上の成果は、海洋において理解が不足していた「縁辺海を介した陸と海の繋がり」を理解する上で、基礎的な知見となる。これらの成果の一部を、国際誌 Progress in Oceanography の特集号(掲載論文 21 編)として出版した。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計106件) (全て査読有)

- ①Nakanowatari, T., <u>T. Nakamura</u>, K. Uchimoto, H. Uehara, <u>H. Mitsudera</u>, <u>K.I. Ohshima</u>, H. Hasumi, and <u>M. Wakatsuchi</u> Causes of the multidecadal-scale warming of the intermediate water in the Okhotsk Sea and western subarctic North Pacific, Journal of Climate, 28, 2015, 714-735. doi: 10.1175/JCLI-D-14-00172.1.
- ②Uehara, H., A. A. Kruts, <u>H. Mitsudera, T. Nakamura</u>, Y. N. Volkov, and <u>M. Wakatsuchi</u>: Remotely propagating salinity anomaly varies the source of North Pacific ventilation, Progress in Oceanography, 126, 2014, 80–97. doi:10.1016/j.pocean.2014.04.016
- ③Uchimoto, K., <u>T. Nakamura</u>, <u>J. Nishioka</u>, H. <u>Mitsudera</u>, K. Misumi, <u>D. Tsumune</u>, and <u>M. Wakatsuchi</u>, Simulation of high concentration of iron in dense shelf water in the Okhotsk Sea. Progress in Oceanography, 126, 2014, 194-210.

doi:10.1016/j.pocean.2014.04.018

- ④ Nishioka, J. (1番目)(他5人), Quantitative evaluation of iron transport processes in the Sea of Okhotsk, Progress in Oceanography 126, 2014, 180-193. doi:10.1016/j.pocean.2014.04.011
- ⑤Suzuki, K (1番目)., J. Nishioka (4番目) (他6 人), , Spatial variability in iron nutritional status of large diatoms in the Sea of Okhotsk with special reference to the Amur River discharge. Biogeosciences, 11, 2014, 2503-2514, doi: 10.5194/bg-11-2503-2014.
- ⑥ Ohshima, K. I. (1 番目), Wakatsuchi(最後)(他3名), Freshening and dense shelf water reduction in the Okhotsk Sea linked with sea ice decline. Progress in Oceanography, 126, 2014, 71-79, doi:10.1016/j.pocean.2014.04.020.
- ⑦Nishioka, J.(1 番目), Y. W. Watanabe (3 番目), N. Ebuchi (7 番目), Wakatsuchi (最後) (他 7 人), Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles, Global Biogeochemical Cycles, 27, 2013, 1–10, doi:10.1002/gbc.20088.
- ⑧Isada, T., J. Nishioka (5 番目), K. Suzuki (最後) (他4人), Amur River discharge on Amur River discharge on phytoplankton photophysiology in the Sea of Okhotsk during late summer", Journal of Geophysical Research: Oceans, 118, 2013, 1995-2013, doi: 10.1002/jgrc.20159.
- ⑨Shigemitsu, M., <u>J. Nishioka (2 番目)</u>, <u>Y.W. Watanabe (3 番目) (他 3 名)</u>, Fe/Al ratios of suspended particulate matter from intermediate water in the Okhotsk Sea: Implications for long-distance lateral transport of particulate Fe, Marine Chemistry, 157, 2013, 41-48. doi:10.1016/j.marchem.2013.07.003
- (II) Watanabe, Y. W., J. Nishioka, and T. Nakatsuka, Decadal time evolution of oceanic uptake of anthropogenic carbon in the Okhotsk Sea, Geophysical Research Letters 40, 2013, 1–5, doi:10.1002/grl.50113
- ①<u>若土正曉</u>:海洋大循環を支える南極からの 冷たい水の大量流出,パリテイ,26巻,7 号,2011,65-67.

[学会発表] (計 145件)

①Nakanowatari, T., K. Uchimoto, <u>T. Nakamura</u>, <u>J. Nishioka</u>, <u>H. Mitsudera</u>, <u>M. Wakatsuchi</u>. Seasonal variability of dissolved iron in the western subarctic North Pacific: Importance of lateral advection processes, AOGS, July 31, 2014, Royton Sapporo Hotel, Sapporo.

〔図書〕(計25件)

①<u>西岡純</u>,三寺史夫 編集:生物地球化学過程 に果たす環オホーツク圏の海洋循環・物質 循環の役割-I, II, III, IV, 月刊海洋(合 本版),598pp,2012.

[その他]

http://wwwoc.lowtem.hokudai.ac.jp/

- 6. 研究組織
- (1)研究代表者

若土 正曉 (WAKATSUCHI, Masaaki)

北海道大学·名誉教授

研究者番号:60002101

(2)研究分担者

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

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

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: 6040008

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:10203656

渡邉 豊 (WATANABE, Yutaka)

北海道大学·地球環境科学研究院·准教授

研究者番号:90333640

鈴木 光次 (SUZUKI, Koji)

北海道大学・地球環境科学研究院・准教授

研究者番号: 40283452

黒田 寛 (KURODA, Hiroshi) 独立行政法人水産総合研究センター・ 北海道区水産研究所・主任研究員 研究者番号: 3 0 5 3 1 1 0 7

(3)連携研究者

大島 慶一郎 (OHSHIMA, Keiichiro) 北海道大学・低温科学研究所・教授 研究者番号:30185251

津旨 大輔 (TSUMUNE, Daisuke) 電力中央研究所・上席研究員 研究者番号:10371494

的場 澄人 (MATOBA, Sumito) 北海道大学・低温科学研究所・助教 研究者番号: 30391163