

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21838

研究課題名(和文)北太平洋の生物生産を支える北太平洋中層水の化学的特性の形成過程の解明

研究課題名(英文)Chemical properties of North Pacific intermediate water and its impact to biological production

研究代表者

西岡 純(Nishioka, Jun)

北海道大学・低温科学研究所・教授

研究者番号：90371533

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文)：本挑戦的萌芽研究で得られた成果によって、南極中層水は表層の珪藻の増殖を支えるには鉄とケイ素が不足する海域となり、その一方で、北太平洋中層水ではケイ素が豊富な水塊となっており、その西側(NPIE-W)では鉄の供給も比較的多く、表層の珪藻の生産を支えていることがより明確に示された。今後、「なぜ北太平洋中層水はSiが豊富になるのか？」について、縁辺海を含めた物質循環システムの全貌を定量的評価する必要があることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本が面する西部北太平洋は、全海洋の面積の6%を占めるに過ぎないが、全海洋の水産資源の27%を生み出す。これらの水産資源を支えているのは海洋の基礎生産者である植物プランクトンである。また海洋の基礎生産者である植物プランクトンは、光合成を行うことでCO₂を有機炭素に変え、有機物粒子の沈降を介し海洋の中深層に送り込む。これは海洋生物ポンプと呼ばれ、特に大型の珪藻類が生物ポンプに果たす役割は大きい。本研究の成果は、西部北太平洋亜寒帯域がなぜ珪藻種の優先する生物生産の高い海になるのかを明らかにすることにつながり、日本近海の水産資源を生み出すシステムや二酸化炭素吸収メカニズムの解明に結びつく。

研究成果の概要(英文)：The results obtained from this study clearly show that the Sub-Antarctic intermediate water becomes an area where Fe and Silicic acid are insufficient to support the growth of diatoms in the surface layer, while the North Pacific intermediate water is a Si-rich water mass and the supply of Fe is relatively high in its western part (NPIE-W), which also supports the production of diatoms in the surface layer. The results of the study indicated the need for a quantitative evaluation of the entire material circulation system, including the marginal seas in the North Pacific.

研究分野：化学海洋学

キーワード：南極中層水 北太平洋中層水 栄養塩化学的的特性 栄養塩濃度データセット 生物生産

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

北太平洋中層水 (North Pacific Intermediate Water: NPIW) に含まれる栄養物質の化学的特性は、鉄 (Fe) 不足が原因でケイ酸塩 (Si) が不足する南極中層水 (Sub-Antarctic Mode Water: SAMW) のそれとは大きく異なる。海洋コンベアベルトの出口に位置する北太平洋は、他の世界中の海と比べて特異的な特徴を持つ。一部では「北太平洋がケイ素の海」呼ばれ (Tsunogai et al., 1979; Sarmineto et al., 2004)、主要な栄養塩 Si の濃度が他の海盆にくらべて異常に高く、この Si は、(硝酸塩 (N) やリン酸塩 (P) とともに、海洋表層に供給されて珪藻類の増殖を促進し、この海域の高い水産資源を支えている。しかし、NPIW の形成域である北太平洋亜寒帯域も、SAMW 同様に、珪藻の増殖は Fe 制限を受けている海域として知られている。「何故、SAMW は鉄 (Fe) 制限のため Si の除去が進んだ水塊になり、NPIW は Si の除去が起こらず Si 豊富な水塊になるのか？」この違いこそが、NPIW が支配する北半球の海洋が「珪藻の海」となり高い生物生産を生み出す鍵となっているはずである。しかし、この問いに答えるための科学的な知見は不足している。

2. 研究の目的

本研究課題では「北太平洋の生物生産を支える NPIW の化学的特性を決める要因」を解明するために、NPIW と SAMW の化学的特性を詳細に比較し、得られた両水塊の化学的特性の形成メカニズムを検討することで、北太平洋特有の栄養物質循環と中層水形成を介した生物生産をコントロールする要因の解明を目指した。

3. 研究の方法

3.1. NPIW と SAMW の化学的特性形成過程の比較

NPIW 形成域と SAMW 形成域の化学的特性 (N、P、Si と Fe 濃度比) とその形成過程を検討するために、本研究で新たに取得したデータを既存のデータとともに解析した。南極海から南半球の SAMW 解析に使用する新たなサンプルは、2019 年 10 月~12 月に実施される白鳳丸 KH-19-6 次航海に参加し、南太平洋赤道域から南極海にかけて西経 90 度の南北断面データを取得した。また、2014 年に GEOTRACES 航海で取得した西経 170 度の南北断面データも合わせて解析に使用した。一方、NPIW については、これまで申請者が集めてきた北太平洋および縁辺海 (ベーリング海、オホーツク海) のデータセットを解析に使用した (図 1)。

3.2. 中層水の化学的特性を決定する生物過程 (船上培養実験)

南極海の表層海水で生成された粒子の沈降によって除去される N : P : Si : Fe 比を明らかにし、NPIW と SAMW の栄養物質の化学的特性の違いが生まれる生物プロセスを明らかにすることを目的に、上記の白鳳丸 KH-19-6 次航海において船上実験を行った。

4. 研究成果

4.1. Fe 供給過程と Fe:N の化学的特性の比較

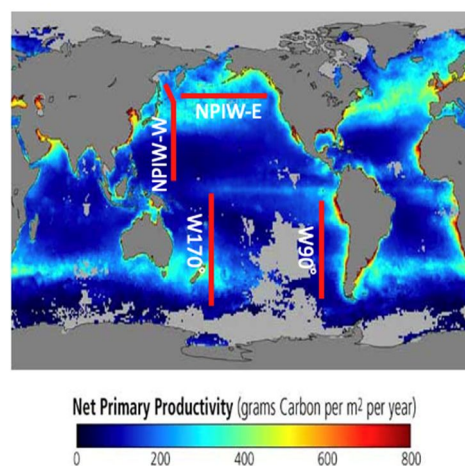


図 1 本研究で取り扱ったデータセットの取得された観測ライン、白鳳丸 KH-19-6 次航海は W90 度ライン、KH-14-6 次航海は W170 度ライン、NPIW データセットは北太平洋の NPIW-W と NPIW-E ラインから得た。背景色は正味の基礎

東部南太平洋から南大洋にかけて溶存 Fe (dFe) 濃度の鉛直断面図を作成し(図 2 上) 酸素濃度や熱水プルームのトレーサーとなるヘリウム安定同位体比 (^3He) とともに解析を行った。その結果、東部南太平洋では、再無機化による Fe の内部循環と熱水プルームによる外部 Fe 供給が分布を決める重要な要因であることが分かった。また同航海で実施した培養実験の結果、中層上部に分布する再無機化した Fe が、亜熱帯域亜表層の植物プランクトン増殖に寄与していることが示唆された。さらに、西経 170 度に沿った SAMW には、ニュージーランド棚など局所的な供給源から Fe を受け取っていることが示唆された。

SAMW 海域のデータを、Nishioka et al. (2020) で詳しく報告されている NPIW 西側の子午面循環域(以下 NPIW-W) および同じ密度域で東に広がる北太平洋亜寒帯中層水(以下 NPIW-E) と比較し、これらの水塊にどの程度 Fe が含まれているのかを検討した(図 2)。北太平洋亜寒帯域から赤道にかけての東経 155 度のデータと赤道から南極海にかけての西経 170 度のデータを合わせたラインの dFe 濃度(図 2 下)と栄養塩濃度の鉛直断面プロファイルを図 3 に示す。SAMW と NPIW の分布しているエリア(図 3a)で、栄養塩濃度が大きく異なることがわかる(図 3)。図 4a は、3 つの海域における dFe と見かけの酸素使用量(AOU)をプロットしたものである。

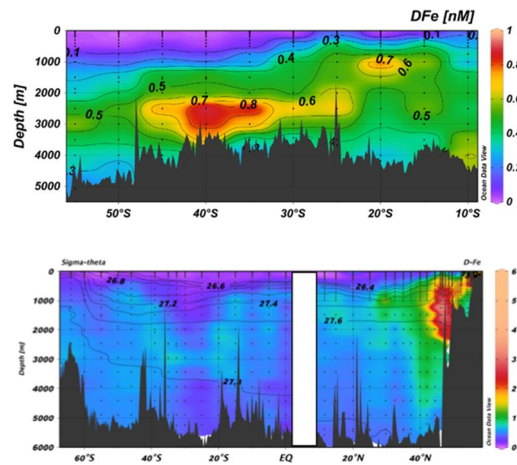


図 2 W90 度ライン東部南太平洋の溶存 Fe 濃度断面図(上) W170 度ラインおよび E155 度ラインの北太平洋から南太平洋にかけての溶存 Fe 濃度断面図(下)

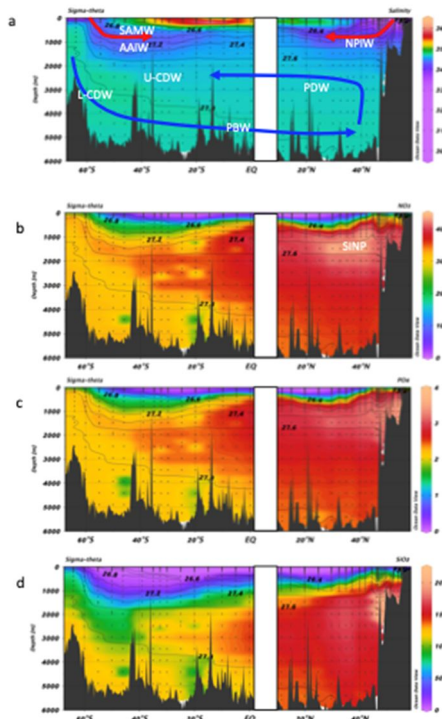


図 3 W170 度ラインおよび E155 度ラインにかけた(上から)塩分、硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩の鉛直断面図

AOU は、表層から沈み込んだ後のこれらの中層水の時間スケールを示す良い指標である(Tagliabue et al., 2019)。dFe と AOU の線形関係は、粒子状 Fe からの dFe 再生と中層水の物理的輸送中の dFe の著しい除去のバランスを反映していることを示している(Tagliabue et al., 2019)。本研究においても、決定係数は低いものの、基本的に 3 水塊とも dFe と AOU の間に正の関係があった(図 4a)。西経 170 度に沿った SAMW の傾き ($3.3 \text{ dFe } \mu\text{mol/AOU mol}$) は、西経 150 度に沿った SAMW の報告数 ($2.7 \text{ dFe } \mu\text{mol/AOU mol}$) (Tagliabue et al., 2019) や NPIW ($1.9 \sim 2.4 \text{ dFe } \mu\text{mol/AOU mol}$) より大きくなっていった。したがって、本研究で観測した SAMW では、沈み込み後の時間スケールが短い(観測 AOU 値が低い)にもかかわらず、西経 170 度沿いの SAMW の dFe 蓄積率は西経 150 度沿いの SAMW や NPIW のそれよ

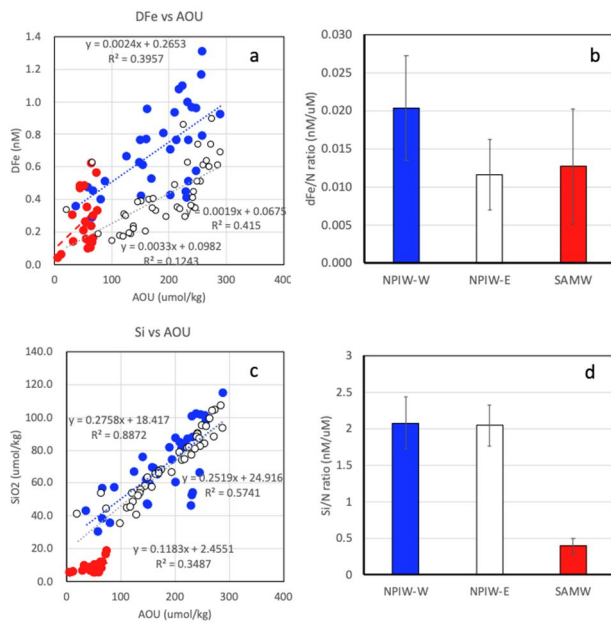


図4 NPIW-W (青) NPIW-E (白) SAMW (赤) の各水塊における dFe vs AOU プロット (a) dFe/N 比 (b) Si vs AOU プロット (c) Si:N 比 (d)

りも大きくなっている。このことから、本研究で観測された SAMW の散布図 (図 4a) は、SAMW が形成されてから比較的短い時間で、おそらくニュージーランド高原からの Fe を局所的に受け取っていたことを示す。一方 NPIW の dFe 濃度には、北方縁辺海域の影響が卓越している (Nishioka et al., 2020)。観測された SAMW の dFe 濃度 (最大~0.6nM) は、NPIW-W (最大~1.2nM) より低いが、NPIW-E (最大~0.8nM) と同等であった (図 4a)。

さらに、南極海と北太平洋において、高緯度から低緯度への Fe と栄養塩の輸送を評価するために、SAMW 水塊と NPIW 水塊の Fe と主要栄養塩の化学的特徴を比較した。中層水の dFe と N の比率は、中層水が表層に供給されたときに、生物にどれだけ栄養が消費されるかを理解するために重要な化学的特徴な要素の一つである。そこで、dFe と N の比を各水域間で比較した結果を図 4b に示す。SAMW の値 (0.013 ± 0.008 nmol Fe/ μ mol N) は NPIW-W (0.020 ± 0.007 nmol Fe/ μ mol N) より有意に低い値を示したが、NPIW-E (0.012 ± 0.005 nmol Fe/ μ mol N) とは有意差はなかった。この結果は、SAMW の dFe:N 比が NPIW-E と同程度であることを示しており、表層植物プランクトンに水を供給する場合、厳しい Fe 制限を受けることを意味している。一方で NPIW-W の広がる西部北太平洋では、NPIW-E や SAMW のエリアにくらべて Fe 制限が緩和されることが示唆された。

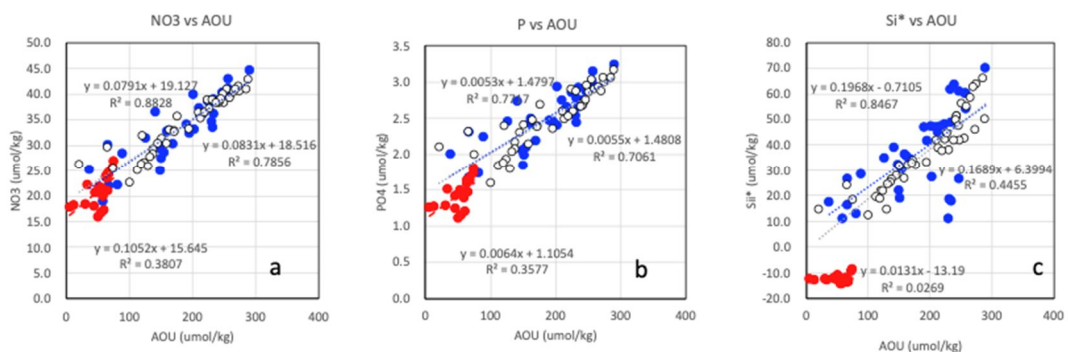


図5 NPIW-W (青) NPIW-E (白) SAMW (赤) の各水塊における N vs AOU プロット (a) P vs AOU プロット (b) Si* vs AOU プロット (c)

4.2. Si:N の化学量論の比較

N (P) 対 AOU のプロットは 3 つの水塊で線形の関係を示し、N と P の再生速度がすべての中層水塊で一致していることが示された (図 5a, b)。一方で、Si 対 AOU プロットでは SAMW のみ線形の関係から外れる。南大洋の極域前線帯の太平洋側を西経 170 度で調査した多くの先

行研究により、SAMW の最も顕著な特徴は水中の Si 含有量であることが明らかになっている (Sarmiento, 2004; Brzezinski et al., 2005)。本研究で得られた Si と AOU のプロットは、SAMW と NPIW の間に明確な違いを示した (図 4c)。また、水中の Si 濃度と N 濃度の差をインデックスとした Si^* (N に対する Si がどれだけ過剰に存在するかを示す) を用いた場合、 Si^* と AOU の傾きは NPIW-W と -E で一致しており (図 5c) 全ての値が正の値となっている。一方、SAMW のそれは負の値のみを示し、SAMW では N に対して Si が不足していることを意味する。これらの結果は、Sarmiento et al.(2004)の結果を踏襲していた。Si と N の比率は、中層水が表層に供給された場合の生物種の特性を制御する重要な化学量論的な要素の一つである。そこで Si:N 比を各中層水塊で比較したところ (図 3d) SAMW は NPIW-W (2.1 ± 0.4 mol Si/ mol N) および NPIW-E (2.0 ± 0.3 mol Si/ mol N) に比べて 5 倍低い値 (0.4 ± 0.1 mol Si/ mol N) であることがわかった。この結果は、 170° W に沿った SAMW は NPIW に対して Si:N 比が 5 倍低いことを示している。

本挑戦的萌芽研究で得られた成果によって、SAMW は表層の珪藻の増殖を支えるには Fe が不足する海域となり、その一方で、NPIW が Si が豊富な水塊となっており、その西側 (NPIE-W) では Fe の供給も比較的多く、表層の珪藻の生産を支えていることがより明確に示された。しかし、「なぜ北太平洋中層水は Si が豊富になるのか？」については、そのシステムの全貌が定量的評価も含めて明らかになっていない。また、これまで Fe はオホーツク海陸棚の堆積物から供給され海水生成が駆動する北太平洋中層循環によって長距離移送されている事が把握されたが、「なぜ除去されやすい Fe が北太平洋中層水に留まって長距離移送されるのか？」は未だ不明である。北太平洋中層水が Si や Fe が豊富な水塊になり、西部北太平洋やオホーツク海で珪藻が大増殖する仕組みを明らかにするための研究プロジェクトを立ち上げた。

引用文献

- Brzezinski, M. A., M-Lynn. Dickson, D. M. Nelson, R. Sambrotto, Ratio of Si, C and N uptake by microphytoplankton in the Southern Ocean, *Deep Sea Res. II* 50, 619-633, 2003.
- Nishioka J, Obata H, Ogawa H, Ono K, Yamashita Y, Lee KJ, Takeda S, Yasuda I, Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific through the intermediate water at the termination of the global ocean circulation, *Proc Natl Acad Sci USA* 117(23):12665–12673, doi.10.1073/pnas.2000658117, 2020.
- Sarmiento, J. L., N Gruber, M. A. Brzezinski, J. P. Dunne, High-latitude controls of thermocline nutrients and low latitude biological productivity, *Nature* 427, 56-60, 2004.
- Takeda, S., Influence of iron availability on nutrient consumption ratio of diatoms in oceanic waters, *Nature* 393, 774-777, 1998.
- Tagliabue, A., A. R. Bowie, T. DeVries, M. J. Ellwood, W. M. Landing, A. Milne, D. C. Ohnemus, B. S. Twining, P. W. Boyd, The interplay between regeneration and scavenging fluxes drives ocean iron cycling, *Nature comm.*, doi.org/10.1038/s41467-019-12775-5, 2019.
- Tsunogai, S., M. Kusakabe, H. Iizumi, I. Koike, A. Hattori, Hydrographic features of the deep water of the Bering Sea-The Sea of Silica, *Deep Sea Research* 26, 641-659, 1979.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nishioka J, Obata H, Hirawake T, Kondo Y, Yamashita Y, Misumi K, Yasuda I	4. 巻 77
2. 論文標題 A review: iron and nutrient supply in the subarctic Pacific and its impact on phytoplankton production	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Oceanography	6. 最初と最後の頁 561-587
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10872-021-00606-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Nishioka J, Hirawake T, Nomura D, Yamashita Y, Ono K, Murayama A, Shcherbinin A, Volkov Y N, Mitsudera H, Ebuch N, Wakatsuchi M, Yasuda I	4. 巻 198
2. 論文標題 Iron and nutrient dynamics along the East Kamchatka current, western Bering sea basin and Gulf of Anadyr	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Progress in Oceanography	6. 最初と最後の頁 102662-102662
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.pocean.2021.102662	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kondo, Y., R. Bamba, H. Obata, J. Nishioka, S. Takeda	4. 巻 11
2. 論文標題 Distinct profiles of size-fractionated iron-binding ligands between the eastern and western subarctic Pacific	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sci. Rep.	6. 最初と最後の頁 2053-2053
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-021-81536-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Misumi, K., J. Nishioka, H. Obata, D. Tsumune, T. Tsubono, M. C. Long, K. Lindsay, J. K. Moore	4. 巻 35
2. 論文標題 Slowly Sinking Particles Underlie Dissolved Iron Transport Across the Pacific Ocean	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Glob. Biogeochem. Cycles	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2020GB006823	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Nishioka J
2. 発表標題 Sub-polar marginal seas fuel the North Pacific Ocean through the intermediate water
3. 学会等名 International Symposium Kanazawa University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三浦 大輝・西岡 純・小畑 元・近藤 能子・深澤 徹・小川 浩史・津田 敦
2. 発表標題 東部南太平洋および南大洋における溶存鉄濃度分布
3. 学会等名 2020年度日本海洋学会秋季大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
ロシア連邦	ロシア極東海洋気象学研究所		