

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(A)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22241001
 研究課題名（和文）海洋の気体交換フィードバックシステムと生物生産応答に関する研究

研究課題名（英文）The feedback system of gas exchange in the ocean

研究代表者

渡辺 豊 (WATANABE YUTAKA)

北海道大学・大学院地球環境研究院・准教授

研究者番号：90333640

研究成果の概要（和文）：海洋の窒素・炭素循環変動とそのフラックスの時空間変動を定量化するための新規見積り法の開発に成功した。同時に、簡易で高頻度に海洋表面溶存気体を採水できるシステムの開発と実証試験を実施し、その開発に成功した。このシステムデータ群と既存のデータ群に、窒素・炭素循環のための新規見積り法を適用し、北太平洋ならびに全球規模の窒素・炭素循環の変動の高時空間分解能な分布を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In order to clarify how the nitrogen and carbon cycles in the ocean change spatiotemporally, we carried out the developments of the new estimations about these changes with a new sampling system. Applying the new estimations with the new sampling system to ocean observation, we had significant distributions of spatiotemporal distributions of nitrogen and carbon parameters in the North Pacific and the global ocean, indicating a possibility that we can obtain the detailed spatiotemporal distributions of change in ocean biogeochemical cycles.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	16,000,000	4,800,000	20,800,000
2011年度	14,200,000	4,260,000	18,460,000
2012年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
年度			
年度			
総計	38,600,000	11,580,000	50,180,000

研究分野：基盤研究(A)

科研費の分科・細目：環境動態解析

キーワード：化学海洋学、海洋大気物質循環

1. 研究開始当初の背景

海水中の栄養塩は海洋植物プランクトンの生存にとって欠かせないものであり、その生物活動によって固定された炭素・窒素の循環を制御する役割を担っている。特に、高緯度海域は、生物生産・大気との CO₂ の出入り・窒素循環の物質バランスの観点で、低・中緯度海域に比べて 1 から 2 桁以上の大きさを持っている。さらに大気と接した高密度海

水が海洋内部へ潜り込み、数十年から数百年の時間規模で大気から炭素・窒素を隔離させる点で、生物地球化学的物質循環において大きな役割を担っている。

現在、地球温暖化・気候変動により、これらの領域は著しい物質循環変動を受けていることが報告されている。炭素について見ると、海洋循環の急激な弱まりによって、海洋への人為起源 CO₂ 吸収量が減るとともに、深

海で再無機化され海洋表層から大気へ放出されるはずの天然 CO₂ が大気へ放出されず、海洋内部へ留まってしまっていること、大気中 CO₂ 増加に伴い海洋の酸性化が外洋域では進行し、逆に、大陸縁部・沿岸域ではその大陸-海洋の相互作用により抑制されることが示唆されているが、全海洋的にどのようになるかは未だ不明である。

一方、炭素とともに物質循環制御因子として働くのが窒素である。海洋平均として栄養塩の硝酸塩とリン酸塩の存在比は 16 で、低緯度海域ではこの値より高く、高緯度海域では低い。このことは、高緯度海域では、硝酸塩が不足がちであることを示している。近年の海洋循環の弱化により、海洋表層から深海への酸素供給量が低下し、深海では酸素の代わりに硝酸塩を使って有機物の分解が進む脱窒反応が活発になる可能性がある。海洋循環が弱りつつある今、ますます、深海ではさらに窒素不足が進行し、海洋全体として、窒素循環の収支の不均衡が起こる可能性がある。この不足を補うため、大気から海洋へ窒素固定が促進され、窒素循環が生物活動の主律速因子となりとなることは間違いない。実際、海水中の硝酸塩がオホーツク海や北太平洋高緯度域で急激に減りつつあることが報告され、窒素固定が進み、大気からの CO₂ 吸収を促進していることが報告されている。しかし、その窒素循環変動の影響の定量的評価を炭素循環と同時に取扱いことは必須の研究であるにもかかわらず、未だ行われていない。

特に、全球・北太平洋の気候・海洋循環・物質循環に大きな影響を与える領域は、縁辺海を含めた北太平洋高緯度海域である。同海域は、人為的影響を受けやすい大川・アムール川と、温暖化・炭素窒素循環変動に敏感な広大な海洋大陸棚を有している。このため、全球の炭素・窒素循環研究をするうえでは、同海域での研究が不可欠である。特に、温暖化による海洋の弱化が進む現在、大気・海洋間を通じた物質循環の挙動をとらえ、それに伴う生物応答の定量化が必須である。これらが、現在進みつつある物質循環変動に対して、負のフィードバック効果（例えば、深海からの再無機化炭素の大気放出の抑制、窒素固定、生物種変動による生物の窒素取り込み量の変化など）として働き、これらの変動に対する復元力となっている可能性がある。これらの大気と海洋の相互作用を捕らえるためには、従来の海洋表層混合層間の炭素・窒素変動の 1 桁下の数年規模の時間スケールと、生物群集繁茂範囲の 1 桁下の経緯度 1 度以下の空間スケールで、高分解能な表層混合層の炭素・窒素循環変動とそのフラックスの定量化、さらに、これらに対する生物生産の応答の評価が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、大気海洋環境・炭素窒素循環・植物プランクトン種・生物生産量の異なる高緯度全域 (40°N-60°N)、低中緯度全域 (10°N-40°N)、北太平洋気候変動に多大な影響を与えるオホーツク海西部海域をモデル海域として、混合層内の炭素 (溶存無機炭素 (DIC), アルカリ度 (Alk), $\delta^{13}\text{C}$, pCO_2) と窒素 (N_2)、化学トレーサー (SF_6 , CFCs) について、溶存気体高頻度採水システム (曳航体) を用いて世界初の時空間的に高頻度な観測を試みた。得られたこれらの高分解能時空間情報を用いて、海洋の炭素・窒素溶存気体の気体交換システム (人為 CO₂ ならびに気候変動由来 CO₂ や人為的窒素の付加) の見積り法を世界初で開発・提案するとともに、これらの見積りを実施した。同時に観測した物理・化学・生物パラメータ (気象海象、栄養塩、Fe など) とともに解析し、同モデル海域の炭素・窒素循環の動態と、それが地球温暖化フィードバック効果として物質循環モデルに組み込み可能な形の定式化を行うことを最終目的とした。

3. 研究の方法

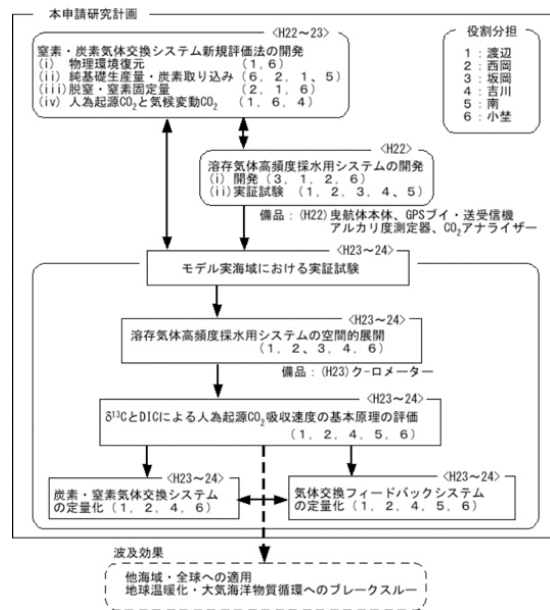


図 1: 研究体制

以下の 3 つを柱に研究を実施した(図 1 参照)

(1) 炭素・窒素気体交換システムと生物生産応答の定量化のための新規見積り法の開発

N_2 , Ar, SF_6 と CFCs の成分を用いて、高精度な気泡貫入量の見積りを目指した。ここで得た気泡貫入量を、現場での気象海象情報 (風速、波浪等) と比較することで、①大気・海洋気体交換過程に重要な海洋表層の物理環境情報の復元の新規見積り法を開発し、観測データと比較し、その妥当性を評価した。

また、これを発展させて、②海洋表層混合層の純基礎生物生産量の新規見積り法を開発し、観測データと比較し、その妥当性を評価した。さらに、③海洋表層混合層の脱窒量と窒素固定量の新規見積り法、人為的な窒素の負荷量の新規見積り法の開発を行った。加えて、④ DIC と $\delta^{13}\text{C}$ の物質収支を連立で解くことで、海洋の人為起源 CO_2 吸収速度を求め、さらに気候変動由来 CO_2 変動速度をも得られる新規見積り法を開発し、観測データと比較することでその妥当性を評価した。

(2) 溶存気体高頻度採水用システム (溶存気体採水用曳航体) の開発と実証試験

時空間的に高分解能な表層混合層の炭素・窒素循環変動と、そのフラックスの定量化を図るため、溶存気体高頻度採水用システム (溶存気体採水用曳航体) の開発を図り、従来の観測船停船観測との比較を行い、その信頼性・妥当性を評価した。

(3) モデル海域における高確度な炭素・窒素気体交換システムとそのマッピングと定量化

研究観測船に溶存気体高頻度採水用システムを搭載し、北太平洋全域 (10°N - 60°N) の経緯度 0.5 度程度の高頻度な海洋表層混合層多層採水 (水深 10m 、 20m) を実施した。ここで得た結果と、(1) の炭素・窒素気体交換の新規見積り法を用いて、時空間的に高分解能な同海域の表層混合層の炭素・窒素物質循環変動とそのフラックスの定量化を行った。併せて、これらのパラメタリーゼーション化を行い、同モデル海域における大気・海洋間を通じた窒素・炭素物質循環の挙動を捕らえ、それに伴う生物生産応答の定量化を目指した。

4. 研究成果

本研究における主な成果としては、

(1) 海洋の気体交換システムと生物生産応答の定量化のための方法として、 N_2 と Ar 等を用いた脱窒・窒素固定ならびに新生産量の新規見積り法の開発に成功したこと

(2) 海洋表面を通して海洋に付加される人間活動起源の CO_2 ならびに窒素の新規見積り法の開発に成功したこと

(3) 時空間的に高分解能な表層混合層の炭素・窒素循環変動の定量化を図るための溶存気体高頻度採水用システム (溶存気体採水用曳航体) の開発に成功したこと

(4) 上記で開発した見積り法ならびにシステムを用いて、北太平洋高緯度域ならびに全球的な炭素・窒素物質循環の挙動を捉えたことが、その成果である。

(1) 脱窒・窒素固定ならびに新生産量の新規見積り法の開発

海洋中の硝酸塩類 (以後、簡易的に硝酸と呼ぶ) は全球規模で海洋の生物活動を制御する必須の栄養物質である。しかし、海洋表層のほとんどの海域では、その濃度は枯渇気味のため、海洋生物活動の律速段階となっている。この海洋の窒素収支を支配しているのは脱窒と窒素固定である。脱窒過程は海水の硝酸を窒素ガス (N_2) として海洋から除去し、一方、窒素固定は大気から N_2 を取り込み、リン酸に対して過剰量の硝酸を増やすことで、海洋の窒素収支を制御している。しかし、この2つの過程で駆動されている海洋の窒素収支が平衡状態にあるのかどうか、未だ議論が続いている海洋物質循環システム解明の上での最大の謎である (Deutsch and Weber, 2012)。脱窒と窒素固定の見積りはこれまで独立に行われ、異なる時空間規模でのデータを用いてその窒素収支の議論がなされてきた。脱窒見積り法と窒素固定見積り法の代表例としては、硝酸/リン酸の全海洋平均値 16 と観測値のずれによる窒素枯渇量から脱窒を求める方法 ($[\text{N}]_{\text{def}}$ 法) (例えば、Gruber and Sarmiento, 1997) と、培養による方法 (例えば、Devol et al., 2006) がある。

ここでは脱窒過程により海水中の N_2 濃度が飽和値に対して過剰になることに着目し、海水中の N_2 の過剰値から脱窒量を見積もる方法を開発した。その概略は以下のとおりである。

脱窒の最終生成物 N_2 は海洋では他の供給源も除去源も持たないため、海水のアルゴンガス (Ar) に対する N_2 の過剰量 ($[\text{N}]_{\text{ex}}$) とし以下のように表現できる。

$$[\text{N}]_{\text{ex}} = [(\text{N}_2/\text{Ar})_{\text{obs}} - (\text{N}_2/\text{Ar})_{\text{bkg}}] \cdot [\text{N}_2]_{(t, s)}, \quad \text{式(1)}$$

ここで、 $(\text{N}_2/\text{Ar})_{\text{obs}}$ は脱窒海域観測された N_2/Ar 比、 $(\text{N}_2/\text{Ar})_{\text{bkg}}$ は脱窒海域系外の海水の N_2/Ar 比、 $[\text{N}]_{(t, s)}$ は水温と塩分データから見積もられる N_2 の大気飽和量である。

一方、これまでに一般に用いられてきた脱窒見積り法 ($[\text{N}]_{\text{def}}$) は以下のような式で表現できる。

$$[\text{N}]_{\text{def}} = (R_{\text{N/P}} \cdot [\text{P}]_{\text{obs}} - [\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+]_{\text{obs}}), \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $R_{\text{N/P}}$ は全海洋平均の硝酸/リン酸の比、 $[\text{P}]_{\text{obs}}$ と $[\text{NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+]_{\text{obs}}$ はそれぞれ海水試料中のリン酸濃度と硝酸濃度である。予備的実験で、上記の式(1)と(2)を用いた脱窒量見積りの比較を行ったところ、常に、 $[\text{N}]_{\text{ex}} \geq [\text{N}]_{\text{def}}$ となった。この理由として、 $[\text{N}]_{\text{ex}}$ が脱窒によって生成した N_2 のみを見積もっているのに対して、 $[\text{N}]_{\text{def}}$ が窒素固定量 ($[\text{N}]_{\text{fix}}$) もその見積りに含んでいることが示唆された。すなわち、海水中の N_2 、Ar、硝酸、リン酸を同時に採取・測定し、式(1)と(2)に適用すること ($[\text{N}]_{\text{ex}} - [\text{N}]_{\text{def}}$ 法) で、同じ時空間規模での海水中の脱窒と窒素固定の同時見積り

が可能となることを意味する。

そこで、この方法を北太平洋高緯度海域、特に脱窒が活発に起こっていると考えられるオホーツク海に適用した。その結果、同海域では、窒素固定が 25 Tg-N/year、脱窒が 32 Tg-N/year と初めての定量化に成功し、同海域が全球窒素循環に重要な役割をはたしていることを明らかとした(表 1) (Ito, Watanabe *et al.*, 投稿中)。

Process	全球[DeVries <i>et al.</i> , 2012]	オホーツク海[本研究]
窒素固定	210 Tg-N/year	25 Tg-N/year
脱窒	164 Tg-N/year	32 Tg-N/year

表 1 : 全球とオホーツク海の窒素収支の見積り

また、新生産量の見積り法については以下のような考え方に基づいて開発を行った。

$$[O_2]_{bio} = [O_2]_{obs} - [O_2]_{sat} \cdot ([Ar]_{obs} / [Ar]_{sat}), \quad \text{式(3)}$$

ここで、下付 bio, obs, sat はそれぞれ、生物由来、観測値、飽和を意味している。生物生産が行われる海洋表層混合層においては、試料中の O_2 は大気からの物理的な溶解と生物生産によって構成されている。Ar は物理的な溶解過程しかないもので、これを利用すると右辺第 2 項は O_2 の物理的な溶解項となり、この項を観測値から差し引くことで生物由来の O_2 を見積もることができる。これに酸素と炭素の化学量論比を掛けて、海洋表層混合層内で積分すると新生産速度(NOP)が求められる。北太平洋高緯度域で生物生産が最も高い親潮域にこの見積り法を適用したところ、既存の方法と一致した結果が得られ(図 2)、溶存気体を図ることで、NOP が高分解能で見積もれることを明らかにした(Tanaka, Watanabe, *et al.*, 2013)。

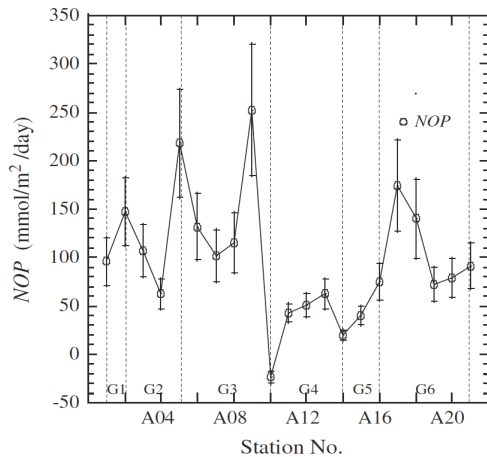


図 2 : 親潮域における NOP の見積り

(2) 人間活動起源の CO_2 ならびに窒素の海洋への付加量の新規見積り法の開発

従来広く行われてきた海水中の溶存無機炭素(DIC)の直接比較法(例えば、Sabine *et al.*, 2004)では、前提となる仮定が多いた

め誤差が大きく、10年程度の時間規模での人為起源 CO_2 吸収速度の変動しか見積もれない。このため、近年予測される急激な人為起源 CO_2 吸収速度の変動を定量的に捉えることは困難であった。この結果、地球温暖化に伴う CO_2 の海洋のフィードバック効果予測をますます不確かなものとしていた。そこで、従来法では見積もることの困難な海洋の人間活動起源 CO_2 吸収量と気候変動成分を高精度に区別し評価のための新たな見積り方法を開発した。これは、人間活動起源 CO_2 が陸上植物由来の化石燃料燃焼によって生成されているため、その炭素安定同位体比($\delta^{13}C$)が低いこと、またその感度が CO_2 自身よりも良いことに基づいた方法である。海洋中の炭酸系物質収支を人為起源の $\delta^{13}C_{as}$ について整理すると式(4)のようになる。

$$\delta^{13}C_{as} = \frac{\delta^{13}C_{obs} - R_{\delta^{13}C/DIC} R_{DIC/AOU} AOU}{f(AOU)} \quad (4)$$

ここで、R はそれぞれの成分比、AOU は酸素消費量である。f(AOU)はAOUの関数。ここで、海洋表層混合層の $\delta^{13}C$ と DIC の時間変化量比 $D(= \Delta \delta^{13}C / \Delta DIC)$ で除すると、任意の時間(t)での人間活動起源 CO_2 量(C_{ant})を求めることができ、さらに、同一点で任意の時間差をとれば、高精度な海洋の人間活動起源 CO_2 吸収速度(ΔC_{ant})の見積りが可能となる。北太平洋高緯度海域にこの見積り法を適用したところ、従来法と同様な傾向を示し、かつ高精度高精度に C_{ant} と ΔC_{ant} を描き出すことがわかった(図 3) (Watanabe *et al.*, 2011)。

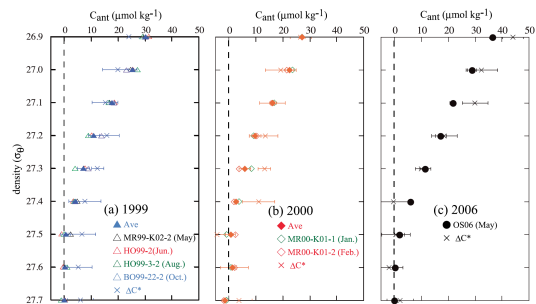


図 3 : 1999 年~2006 年における C_{ant} の鉛直分布(44°N, 155°E)

人間活動起源 $N(N_{ant})$ は現在海洋ベースで見積もる方法がなく、その開発が望まれていた。

海洋中の窒素の観測値(N_{obs})は深層起源(N_{pre})、脱窒・窒素固定由来(N^*)、有機物生成・分解(ΔN_{org})、そして N_{ant} によって構成されている。ここに化学量論比を代入し、 N_{ant} と N_{pre} について整理すると以下のようなようになる。

$$N_{ant} + N_{pre} = R_N / P \cdot P_{obs} - R_N / AOU \cdot AOU \quad (5)$$

人間活動の影響を受けていない深層の N_{pre} は水塊認識トレーサー(Si0 と P0)で重回帰できると仮定すると、以下のようなになる。

$N_{ant} = R_N / P \cdot P_{Obs} - R_N / AOU \cdot AOU - f(SiO, PO)$ (6)
 式(5)と(6)による $N_{pre} + N_{ant}$ と N_{ant} の分布の差から、海洋浅海の N_{pre} を見積もることが可能となり、北太平洋の高緯度域、中緯度域、低緯度域の代表観測点にこの見積り法を適用したところ、初めて N_{ant} を $\pm 1 \mu\text{mol/kg}$ で定量化することに成功した(図 4) (Watanabe et al., 投稿準備中)。

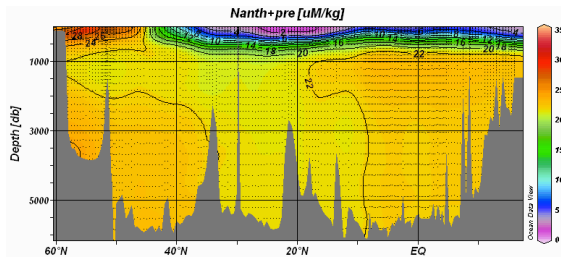


図 4: 北太平洋 180 度の $N_{ant} + N_{pre}$ 南北断面 [$\mu\text{mol/kg}$]

(3) 溶存気体高頻度採水用システムの開発
 溶存気体高頻度採水用システム (溶存気体採水用曳航体) の開発には、図 5 と図 6 を基盤にその開発を初年度 H22 年に行った。北大・おしよろ丸を用いての実証試験では、溶存気体(O_2 , SF_6)を連続測定し、定点観測測定値と $\pm 3\%$ 以内の差で一致しており、溶存気体の高頻度観測が可能であるシステムの確認ができた (Watanabe et al., 投稿準備中)。

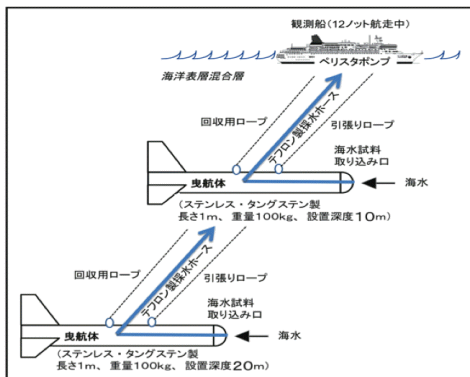


図 5: 高頻度採水用システム概念図

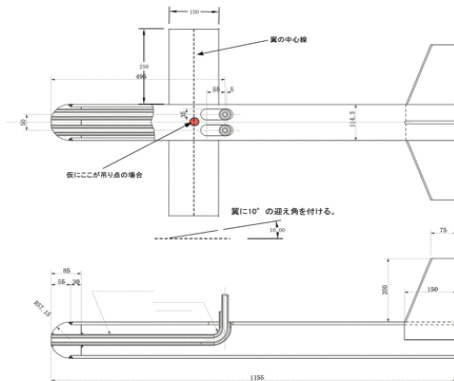


図 6: 曳航体の設計図

(4) 高解像度炭素・窒素循環マッピング

研究観測船に溶存気体高頻度採水用システムを搭載し、北太平洋全域で実施した高頻度観測ならびに、それ以前に高精度で観測された広域観測データ群を、本研究で開発した新規見積り法に適用し、時空間的に高分解な同海域の表層混合層の炭素・窒素物質循環変動とそのフラックスの定量化を行った (Watanabe et al., 投稿準備中)。炭素循環については、北太平洋高緯度海域のマッピングを行い、現在、気体交換過程を通して、 ΔC_{ant} が $0.9 \pm 0.1 \mu\text{mol/kg/year}$ で海洋に蓄積されていることが明らかとなった。

また、窒素循環については、全海洋のマッピングを行い、 N_{ant} と N_{pre} の高分解の時空間分布の見積りを行った(図 7)。その結果、 N_{ant} は現在、北大西洋北部と南半球中緯度で $1-3 \mu\text{mol/kg}$ 程度蓄積されていることを初めて明らかとした。1990 年代との差も有意に見られ、現在、その全海洋の時間積分による差によって N_{ant} の蓄積速度の解析を行っている。

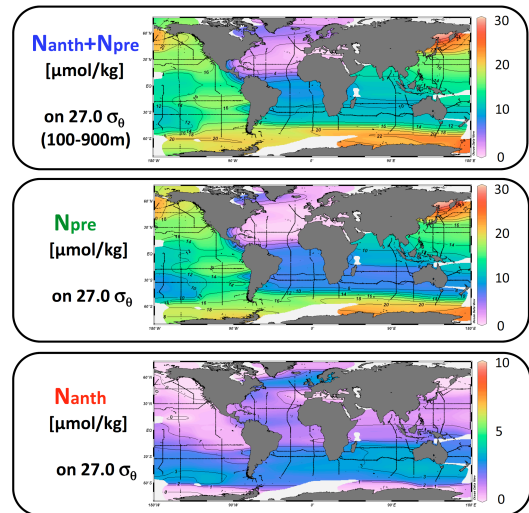


図 7: 2000 年代の N_{pre} と N_{ant} の分布 [$\mu\text{mol/kg}$]

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 29 件)

- ① Nishioka, J., Watanabe, Y. W., et al. (accepted): Intensive mixing along an island chain controls oceanic biogeochemical cycles. *Global Biogeochemical Cycles*. 査読有。
- ② Watanabe, Y. W., Nishioka, J., Nakatsuka, T. (2013): Decadal time evolution of oceanic uptake of anthropogenic carbon in the Sea of Okhotsk. *Geophysical Research Letters*, 40, 1-5, doi:10.1002/grl.50113. 査読有。
- ③ Tanaka, S. S., Watanabe, Y. W., et al. (2013): Spatial high-resolution estimation of net oxygen production

during spring bloom in the western North Pacific using dissolved oxygen, nitrogen and argon. *Marine Chemistry*, 149, 85-95, doi: 10.1016/j.marchem.2013.01.001. 査読有.

- ④ Watanabe, Y. W., et al. (2011): Recent change in the oceanic uptake rate of anthropogenic carbon in the North Pacific subpolar region determined by using a C-13 time series. *Journal of Geophysical Research*, 116, C0206, doi:10.1029/2010JC006199. 査読有.
- ⑤ Shigemitsu, M., Watanabe, Y. W., Yamanaka, Y., Honda, M. C., Kawakami, H. (2011): Relationship between sinking organic matter and minerals in the shallow zone of the western subarctic Pacific. *Journal of Oceanography*, 66, 697-708, doi:10.1007/s10872-010-0057-1. 査読有.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 田中美菜子、西岡 純：オホーツク海南部・日本海 北部の表層水中における鉄及び栄養塩の地理的分布。2013 年度日本海洋学会春季大会、東京海洋大学、東京、2013 年 3 月 24 日。
- ② 渡辺豊、氏家崇、南秀樹：北太平洋高緯度域における生物起源沈降粒子フラックスの長期変動。2012 年度日本海洋学会春季大会、筑波大学、つくば、2012 年 3 月 26 日。
- ③ Itoh, M., Watanabe, Y. W., et al.: Estimate of denitrification in the Okhotsk Sea by using oceanic excess nitrogen. European Geophysical Union 2011 meeting. Vienna, Austria, 1st April 2011.
- ④ 渡辺豊：北太平洋の炭素循環に対するオホーツク海の影響。2010 年度日本海洋学会秋季大会シンポジウム「オホーツク海を起源とする熱塩・物質循環システムとその変動」、東京農業大学オホーツクキャンパス、網走、2010 年 9 月 30 日。

[図書] (計 5 件)

- ① Watanabe, Y. W., et al. (2013). Long-term changes of greenhouse gases in the ocean and their feedback effects on the climate. In: *Linkages in Biogeochemical Cycles Between Surface Ocean and Lower Atmosphere*. Eds. M. Uematsu, et al., in press.
- ② Yoshikawa-Inoue, H., et al. (2013). Temporal and Spatial Variations in Carbonate System and Air-Sea CO₂ Flux in the Kuroshio and Kuroshio

Extension. In: *Linkages in Biogeochemical Cycles Between Surface Ocean and Lower Atmosphere*. Eds. M. Uematsu, et al., in press.

- ③ 渡辺豊 (分担執筆)：地球と宇宙の化学事典：「海の物質循環」朝倉書店 (2012)
- ④ 渡辺豊 (分担執筆)：藻類ハンドブック：「DMS と DMSP」、NTS (2012)
- ⑤ 西岡純 (分担執筆)：環オホーツク海域の豊かな生態系を生み出す鉄供給システム、北海道大学出版 (2012)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 豊 (WATANABE YUTAKA)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授
研究者番号：90333640

(2) 研究分担者

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

坂岡 桂一郎 (SAKAOKA KEIICHIRO)
北海道大学・水産学部・准教授
研究者番号：40241377

吉川 久幸 (YOSHIKAWA HISAYUKI)
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・教授
研究者番号：60344496

南 秀樹 (MINAMI HIDEKI)
東海大学・生物学部・教授
研究者番号：60254710

小埜 恒夫 (ONO TSUNEO)
水産総合研究センター・中央水産研究所・主任研究員
研究者番号：40371786

(3) 研究連携者

なし