

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：17301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23651017

研究課題名（和文） 海洋亜表層における窒素循環の制御要因としての鉄の新たな機能

研究課題名（英文） Role of iron as a regulator of nitrogen cycle in the subsurface ocean

研究代表者

武田 重信 (TAKEDA SHIGENOBU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授

研究者番号：20334328

研究成果の概要（和文）：海洋亜表層における鉄と栄養塩の鉛直分布を詳細に測定し、鉄欠乏が植物プランクトンからの亜硝酸塩の細胞外放出を促し、亜硝酸塩極大層を形成する要因になっているとの仮説の検証を試みた。東シナ海陸棚上では植物プランクトンは鉄欠乏状態になかったが、西部北太平洋では亜硝酸塩極大層における溶存鉄濃度が極めて低く、仮説の妥当性が支持された。但し、アンモニウム塩濃度が高い場合には、微生物の硝化作用も寄与している可能性がある。

研究成果の概要（英文）：As a mechanism for the formation of the subsurface nitrite maximum (SNM), a hypothesis that iron limitation stimulates nitrite release from phytoplankton cells to the surrounding water, was examined in the oceanic waters, by measuring detailed distributions of iron and nutrients near the subsurface chlorophyll maximum layer. Although phytoplankton assemblage in the East China Sea was not under iron-limitation, extremely low concentration of dissolved iron observed near the SNM seems to support the hypothesis in the western North Pacific. In the subarctic waters of the North Pacific, however, archaeal ammonia oxidation may also contribute to the formation of the SNM, because of the high ambient ammonium concentrations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析

キーワード：海洋科学、海洋生態、化学海洋、窒素循環、鉄

1. 研究開始当初の背景

海洋における炭素など生元素の物質循環を把握するには、有光層外から供給される硝酸塩などを用いた一次生産、すなわち新生産を正しく評価することが必須となる。近年、有光層内で微生物硝化による硝酸塩の生成が起きていることが示され、硝酸塩取り込みを指標として従来見積もられてきた新生産の見直しが求められている。この微生物硝化の寄与を評価する上で、海洋の亜表層でみられる亜硝酸塩の極大層の形成要因の解明が、

重要な鍵になり得る。

亜硝酸塩の極大層が生じる要因としては、微生物によるアンモニアの硝化作用と、植物プランクトンからの亜硝酸塩放出の二つの機構が考えられる。硝化については、古細菌の関与が指摘されているものの、植物プランクトンからの亜硝酸塩放出メカニズムについては不明な点が多い。従来、弱光下での亜硝酸還元の影響が関係していると考えられてきたが、光環境だけでは説明できない事例もみられる。一方、室内実験において亜硝酸

還元と硝酸還元のバランスが鉄欠乏によって乱されると余剰の亜硝酸塩が細胞外に放出されることが報告されており、外洋の溶存鉄濃度は亜表層クロロフィル極大層付近で極小を示すことから、亜硝酸塩極大層の形成に植物プランクトンの鉄欠乏が関与している可能性は高いと考えられる。しかし、フィールドの現場において両者の関係を直接調べた研究はこれまでなかった。

2. 研究の目的

海洋の亜表層における鉄および栄養塩の鉛直分布を高分解能で測定し、植物プランクトンによる亜硝酸塩と硝酸塩の取り込み活性を調べることにより、微量栄養素である鉄の欠乏が、植物プランクトンからの亜硝酸塩の細胞外放出を促し、亜硝酸塩の極大層を形成する要因になっているとの新規仮説を検証する。

また、亜硝酸塩極大層の出現深度が比較的浅い東シナ海と、深いフィリピン海での観測結果を対比させることにより、光強度など植物プランクトンからの亜硝酸塩放出に関与する鉄以外の環境要因の影響も合わせて評価する。

これらにより、外洋域における窒素循環を御す因る要としての鉄の新たな役割を明らかにし、海洋新生産の再評価に資することを目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

(1) 東シナ海

長崎大学水産学部附属練習船長崎丸 333 次航海において、2011 年 7 月 18、21 日に、済州島南方の 31.8° N、125.8° E 付近の 2 測点で観測を実施した。

CTD・ニスキン採水については、表層から海底付近までの各層採水に加えて、亜表層クロロフィル極大層付近での約 1~2m 間隔の高分解能採水を行った。また亜表層クロロフィル極大層付近では、テフロン製のチューブおよびペローズポンプで構成される微量金属用ポンプ採水システムによる採水も実施した。

試水中の硝酸塩+亜硝酸塩、亜硝酸塩、リン酸塩濃度の測定には、オートアナライザー (AACS-IV) を用いるとともに、常法で検出限界以下となった場合には、検出部に光路長 50~100 cm のキャピラリーフローセルを用いる高感度比色法を適用した。クロロフィル *a* 濃度は、GF/F フィルターにてろ過後、DMF 抽出し、酸添加蛍光法にてターナー蛍光光度計で測定した。

ポンプ採水試料については、栄養塩濃度を

測定するとともに、孔径 0.22 μm のフィルターでろ過した後、塩酸を添加して pH 1.7 以下の状態で数カ月間保存し、キレート樹脂濃縮・化学発光法により溶存鉄濃度を測定した。

亜表層クロロフィル極大層付近の 3~4 層の試水については、DAPI 染色法により全菌数を測定した。また、亜表層クロロフィル極大層では、2 L の試水に ^{15}N でラベルした硝酸塩あるいは亜硝酸塩を 10、100、2000 nM の濃度で添加し、現場光量条件下にて日中 4 時間の船上培養を行い、硝酸塩および亜硝酸塩の取り込み速度を求めた。

(2) 西部北太平洋

2011 年 12 月の学術研究船白鳳丸 KH-11-10 次航海および 2012 年 7 月の白鳳丸 KH-12-3 次航海に乗船し、それぞれ西部北太平洋の 23° N、180° および 40° N、160° E で観測を実施した。

採水は、チタン製アーマードケーブルで吊下した CTD-CMS システムに、酸洗浄した 12-L テフロンコーティング・ニスキン X 型採水器 24 本を装着し、微量金属による汚染防止に配慮して実施した。亜表層クロロフィル極大層付近の 24 層で数 m 間隔の高分解能採水を行い、栄養塩、クロロフィル *a*、溶存鉄濃度を測定した。鉄濃度の分析には、海水自動濃縮装置を備えた高分解能 ICP 質量分析計を用いた。また、亜表層クロロフィル極大層付近の 10 層の細菌群集について、全菌数に加えて、アンモニア酸化古細菌 (AOA) とアンモニア酸化細菌 (AOB) の存在量についても解析を行った。

4. 研究成果

(1) 東シナ海

観測を行った東シナ海中央部の 2 測点では、深度 8 m あるいは 14 m 付近と、30 m 付近の 2 カ所に水温・塩分躍層が認められ、亜表層クロロフィル極大はいずれも 30 m 付近の躍層に対応した深度で見られた (図 1)。これらの測点の 1% 光量層深度は、33 m (7 月 18 日) と 28 m (7 月 21 日) であった。

7 月 18 日のクロロフィル *a* 濃度の最大値は深度 30.4 m の 2.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ で、深度 26.8~31.3 m の厚さ約 4.5 m の範囲で 1 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以上のクロロフィル *a* 濃度が検出された。一方、7 月 21 日の最大クロロフィル *a* 濃度は、深度 29.6 m の 1.4 $\mu\text{g L}^{-1}$ であり、その上下 1 m の深度におけるクロロフィル *a* 濃度は 0.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 以下に減少していたことから、亜表層クロロフィル極大層の厚みは非常に薄かったと考えられる。

7 月 18 日に観測された栄養塩濃度は、表層か

ら深度30 mの水温・塩分躍層付近まではほぼ枯渇状態にあった(図1)。硝酸塩濃度は、深度30.5 mの $<3 \text{ nM}$ から32.4 mの $8.5 \text{ } \mu\text{M}$ へと、約3 mの層内で急激に増加し、そこでの硝酸塩の濃度勾配は $2630 \text{ } \mu\text{mol m}^{-4}$ となった。それ以後では $8.5\sim 9.2 \text{ } \mu\text{M}$ の濃度で鉛直的な変化は乏しかった。硝酸塩と同様に、亜硝酸塩およびリン酸塩についても、検出限界以下からそれぞれ $0.14 \text{ } \mu\text{M}$ および $0.38 \text{ } \mu\text{M}$ へと急増しており、亜表層クロロフィル極大の直下に非常にシャープな栄養塩躍層が形成されていた。7月21日の観測では、 $8.8 \text{ } \mu\text{M}$ の急激な硝酸塩濃度の増加が深度幅約1 mの狭い範囲内で見られ、そこでの硝酸塩の濃度勾配は $3220 \text{ } \mu\text{mol m}^{-4}$ となったが、その深度は亜表層クロロフィル極大層とほぼ一致していた。

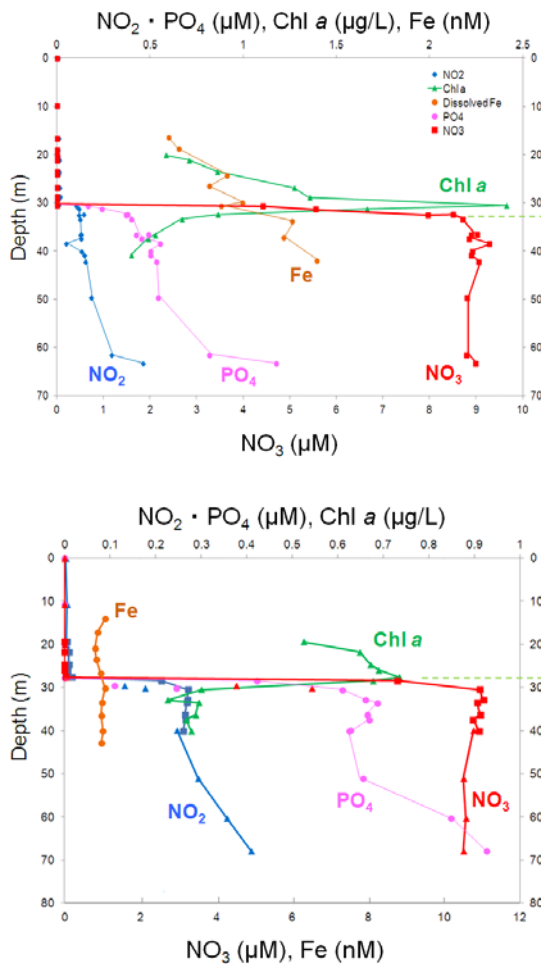


図1 東部東シナ海の陸棚上における栄養塩、溶存鉄、クロロフィルa濃度の鉛直分布(上:7月18日、下:7月21日)黄緑の破線は1%光量層を示す

亜表層クロロフィル極大層付近の溶存鉄濃度は $0.8\sim 1.3 \text{ nM}$ で、下層でやや高くなる傾向が見られたものの、明瞭な濃度躍層は認めら

れなかった(図1)。また、亜表層クロロフィル極大層とその上層の全菌数は約 $1.3 \times 10^6 \text{ cells/ml}$ で、その下層の約 $0.9 \times 10^6 \text{ cells/ml}$ と比べて若干多い程度であった。

亜表層クロロフィル極大層のプランクトン群集による硝酸塩取り込みの半飽和定数と最大取り込み速度は、 300 nM と $22 \text{ nmol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ (7月18日)および 25 nM と $7 \text{ nmol L}^{-1} \text{ hr}^{-1}$ (7月21日)となり、亜硝酸塩についても、同様な値が得られた。従って、水温・塩分躍層を通して下層から供給される栄養塩は、亜表層クロロフィル極大層のプランクトン群集によって活発に取り込まれていると予想される。

これらの結果から、東シナ海の陸棚上のクロロフィル極大層付近に分布する植物プランクトンは鉄が不足しておらず、躍層下から鉛直拡散により供給される無機窒素・リンを急速に取り込んでいたと推察される。

東シナ海の陸棚縁域で行った観測では、クロロフィル極大層の5~10m下層かつ硝酸塩躍層の上部に相当する深度に明瞭な亜硝酸塩極大が形成されており、植物プランクトンによって取り込まれた硝酸塩の一部が亜硝酸塩として放出されている可能性が示唆された。

(2) 西部北太平洋

2011年12月および2012年7月に西部北太平洋の2測点において深度間隔数mの高分解能の採水を実施して、亜硝酸塩と溶存鉄濃度の鉛直分布の関係について検討した。

北緯23度の測点では、深度110m付近に見られた亜表層のクロロフィル極大層の約25m下層に亜硝酸塩極大が認められ、そのピーク位置は表層で枯渇していた硝酸塩が増え始める深度と一致していた(図2)。但し、亜硝酸塩が増え始める深度は、硝酸塩が増え始める深度よりも15mほど浅かった。160m以浅の溶存鉄濃度は概ね 0.04 nM と低く、植物プランクトンの鉄欠乏が細胞外への亜硝酸塩の放出要因となった可能性は高いと考えられる。

北緯40度の測点では、クロロフィル濃度の極大層が30mと浅く、90m付近まで徐々に濃度が減少するブロードな鉛直分布パターンを示した(図3)。硝酸塩と亜硝酸塩は、ともに25m付近から増加し始め、亜硝酸塩は硝酸塩躍層下部の62mで極大を示した。亜硝酸極大層は、浅層側でブロードになる鉛直分布パターンとなり、亜硝酸塩の分布とほぼ対応する形でアンモニウム塩濃度の極大も見られた。亜硝酸塩が増加していた80m以浅における溶存鉄濃度は、約 0.10 nM で、80~120m層の平均濃度 0.24 nM の半分以下の値であり、亜硝酸塩の生成に関して溶存鉄不足の関与が示唆された。

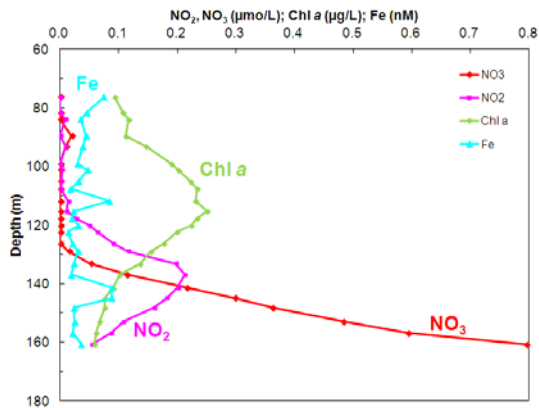


図2 西部北太平洋の北緯23度における栄養塩、溶存鉄、クロロフィルa濃度の鉛直分布

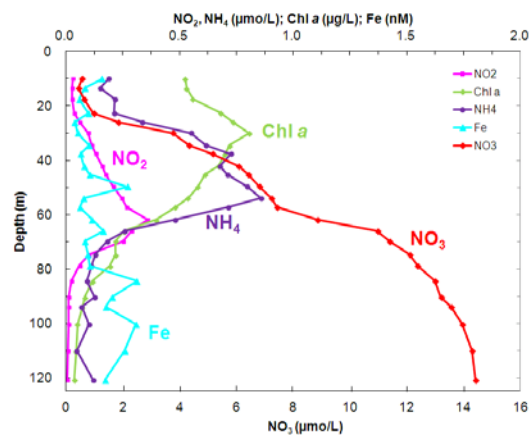


図3 西部北太平洋の北緯40度における栄養塩、溶存鉄、クロロフィルa濃度の鉛直分布

一方、北緯40度の測点の深度40~60 mにかけてアンモニア酸化古細菌の存在量が増加しており、亜硝酸塩の鉛直分布とも対応が見られた。従って、現場のアンモニウム塩濃度が高い場合、亜硝酸塩極大の形成には、植物プランクトンからの亜硝酸塩放出と微生物による硝化作用の両方が関わっていると思われる。

本研究で明らかになった、亜硝酸塩極大層の形成と鉄の関わりを考慮することで、今後、有光層内の硝化作用を正確に把握できるようになり、外洋における新生産の再評価が進むと期待される。また、それらのプロセスを海洋生態系モデルに新たに組み込むことにより、地球環境変動に対する海洋生態系応答の予測精度向上にも寄与すると思われる。

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1件)

- (1) T. Shiozaki, K. Furuya, H. Kurotori, T. Kodama, S. Takeda, T. Endoh, Y.

Yoshikawa, J. Ishizaka, and T. Matsuno, Imbalance between vertical nitrate flux and nitrate assimilation on the continental shelf: Implications on significance of nitrification, Journal of Geophysical Research, vol. 116, C10031, 1-10, 2011, 査読有
DOI: 10.1029/2010JC006934

[学会発表] (計5件)

- ① 武田重信、江藤祐輔、梅澤有、和田実、夏季の東シナ海済州島南方海域における亜表層クロロフィル極大層付近の栄養塩動態、2013年度日本海洋学会春季大会、2013年3月24日、東京海洋大学
- ② 武田重信、江藤祐輔、梅澤有、和田実、東シナ海の陸棚上における亜表層クロロフィル極大層と栄養塩躍層の関係、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海の循環と混合に関する研究」、2013年2月5日、九州大学
- ③ 武田重信、江藤祐輔、梅澤有、和田実、東シナ海周辺海域における亜表層の栄養塩分布の特徴、名古屋大学地球水循環研究センター共同利用研究集会「東シナ海陸棚域の鉛直過程と物質循環」、2012年6月8日、名古屋大学
- ④ 武田重信、江藤祐輔、迎雄一、夏季の東シナ海表層における長江起源水の拡がりや栄養塩の動態、九州大学応用力学研究所共同利用研究集会「東シナ海の循環と混合に関する研究」、2012年2月6日、九州大学
- ⑤ 山田弥知、武田重信、田村圭、塩田友樹、吉村浩、東部東シナ海における大気から海洋への栄養塩沈着、東京大学大気海洋研究所共同利用研究集会「大気・海洋間の生物地球化学的循環過程のリンケージ」、2011年9月13日、北海道大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 重信 (TAKEDA SHIGENOBU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・教授
研究者番号：20334328

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

和田 実 (WADA MINORU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・准教授
研究者番号：70292860

梅澤 有 (UMEZAWA YU)

長崎大学・水産・環境科学総合研究科・准教授
研究者番号：50442538