

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K22917

研究課題名（和文）窒素同位体モデルを用いた新たな古海洋窒素サイクル解析手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a New Palaeoceanographic Nitrogen Cycle Analysis Method Using a Nitrogen Isotope Model

研究代表者

吉川 知里（Yoshikawa, Chisato）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・海洋機能利用部門（生物地球化学センター）・副主任研究員

研究者番号：40435839

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：海洋表層水中の硝酸濃度は、海洋の一次生産を決める主要な要因である。この要因を復元するため、海底堆積物に含まれる全窒素の窒素同位体比がこれまでプロキシとして用いられてきた。しかし、窒素同位体比記録の解釈には複数の可能性が生じるため、その海域の特性に応じて解釈を吟味する必要がある。本研究では、全球窒素同位体比モデルを用いて産業革命前と最終氷期最寒期の沈降粒子の窒素同位体比分布を復元した。この沈降粒子の窒素同位体比の季節変化についてクラスター解析を行い、全球海洋を季節変動特性で11に区分けした。各区分けについて、沈降粒子の窒素同位体比変動を決める要因を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、全球窒素同位体比モデルを用いて産業革命前と最終氷期最寒期の沈降粒子の窒素同位体比分布を復元した。復元結果を基にクラスター解析を行い、全球海洋を季節変動特性で区分けして各区分けにおける沈降粒子の窒素同位体比変動を決める要因を明らかにした。本研究で開発した全球窒素同位体モデルは、退氷期における沈降粒子の窒素同位体比分布の時系列復元が可能であることから、退氷期を含む海底堆積物の窒素同位体比変動を定量的に考察できるようになると考えられる。また、本研究で行ったクラスター解析を退氷期の気候変動特性の区分けへ応用可することで、古海洋窒素サイクル解析の新たな手法へつながることが考えられる。

研究成果の概要（英文）：Nitrate concentrations in marine surface water are a major determinant of marine primary production. Nitrogen isotope ratios of total nitrogen in marine sediments have been used as a proxy to reconstruct this factor. However, multiple possibilities for the interpretation of the nitrogen isotope ratio record arise, and it was necessary to examine the interpretation according to the characteristics of the region. This study used a global nitrogen isotope model to reconstruct the nitrogen isotope ratio distribution of sinking particles in the pre-industrial and Last Glacial Maximum periods. A cluster analysis of the seasonal changes in the nitrogen isotope ratios of sinking particles was performed, and the ocean was divided into 11 compartments based on seasonal variation characteristics. The factors determining the variation of nitrogen isotope ratios of sinking particles for each division were discussed.

研究分野：同位体生物地球化学

キーワード：窒素同位体比 古海洋 窒素同位体モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海洋表層水中の硝酸濃度は、海洋の一次生産を決める主要な要因である。それゆえ、海洋全体の生物生産量を決める要因であるとともに、海洋の炭素サイクルを駆動するエンジンである。したがって過去の海洋変動を理解する古海洋学にとって、海洋表層の窒素循環は長らく研究の本丸と見なされてきた(Sarmiento and Gruber, 2006)。この重要な地球環境要素を復元するため、海底堆積物に含まれる全窒素の窒素同位体比がこれまでプロキシ(代替指標)として用いられてきた。

しかし、窒素同位体比の解釈は単純ではなく、海洋表層の一次生産者の窒素同位体比は、大きく分けると図1に示した3つの要因によって決まる。つまり、窒素同位体比記録の解釈には複数の可能性が生じるため、その海域の特性に応じた解析が必要となる。

そこで本研究では、窒素同位体モデルを用いて、各海域における窒素同位体比変動を決める要因が図1に示した3つのうちのどれに当てはまるかをあらかじめ明らかにすることで、全球海洋において海域特性に応じた窒素同位体比記録の解析手法を提示する。この結果を用いることで、窒素同位体比記録の解釈を単純化でき、より定量的な考察が可能となると考えている。

対象とする時間範囲は、2.1万年前の最終氷期最寒期である。これまで、海底堆積物の窒素同位体比記録の解釈には複数の可能性が生じるため、複数の仮説についてそれぞれ考察する必要がある。またその解釈も「窒素固定量が増えた」や「硝酸利用効率が下がった」など定性的な考察に終始せざるを得なかった。

Etourneau et al. (in prep.)は、南極縁辺海において採取した、過去2000年間の海底堆積物の窒素同位体比を測定した。南極海は脱窒や窒素固定の寄与は無視できるものの、これまでの研究と同様に、南極縁辺海の窒素同位体比記録からは、中世温暖期に窒素同位体比が上昇している。「硝酸利用効率が上がった」という、定性的な考察しか導けなかった。

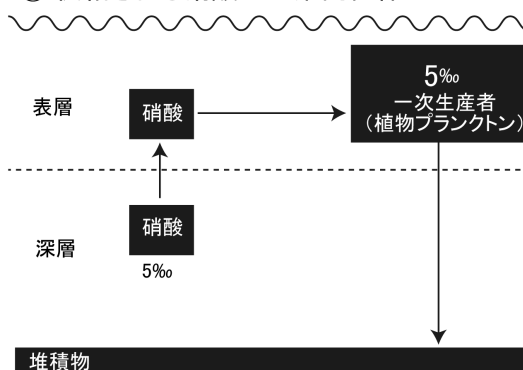
そこで吉川らは、過去2000年再現実験の気候場を用いて、図2に示した海洋窒素同位体モデルを駆動し、南極縁辺海の表層水中の硝酸濃度を復元した。海洋窒素同位体モデルを用いた解析も行うことで、南極縁辺海の表層水中の硝酸濃度は、混合層深度の変化に伴う一次生産量の変化に起因して、過去2000年間に1~23 μMの間で変動していたという、定量的な考察を導けた。この研究を踏まえて、窒素同位体モデルを用いた古気候実験を行い、あらかじめ海域ごとに窒素同位体比変動を決める要因を明らかにできれば、海底堆積物の窒素同位体比記録の解釈を格段に単純化できるはずだと考えた。

2. 研究の目的

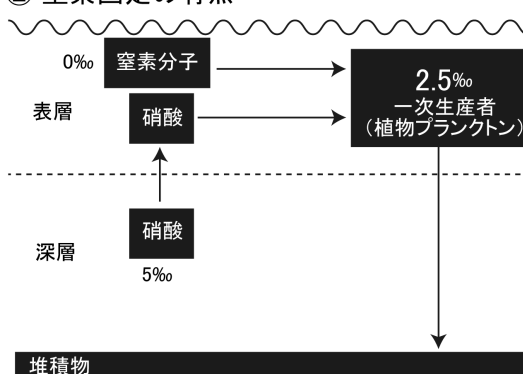
本研究では、海洋窒素同位体モデルを用いて、海域ごとに窒素同位体比変動を決める要因を明らかにすることで、海域特性に応じた解析手法を提示し、海底堆積物の窒素同位体比記録の解釈を高次化する。本研究の具体的な研究目標は以下の3つである。これらの目標を達成して、本研究の目的を実現する。

(1) 窒素同位体モデルを用いて産業革命前の全球窒素同位体比分布を作成する。

① 供給される硝酸の窒素同位体比



② 窒素固定の有無



③ 硝酸の利用効率 (同化量 / 供給量)

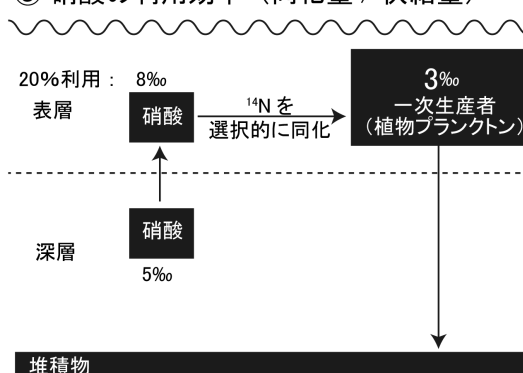


図1：海洋表層の一次生産者の窒素同位体比を決める3つの要因。 は硝酸の利用効率が100%の場合。深層の同位体比は脱窒などの寄与で平均(5‰)からずれる場合がある。 は窒素固定による窒素分子の取り込みが硝酸取り込みと同量の場合。 は利用効率が20%で同位体分別が5‰の場合。

(2) 窒素同位体モデルを用いて最終氷期最寒期の全球窒素同位体比分布を作成する。
 (3) クラスタ解析を行い、全球海洋を窒素同位体比の季節変動特性から区別する。

3. 研究の方法

本研究では、海底堆積物の窒素同位体比記録の解釈に、海域特性に応じた窒素同位体比記録の解析手法を提示することを目的として、以下に示した手順で研究を行った。

(1) 産業革命前の窒素同位体比分布

大気海洋結合モデル(MIROC3.2)によって計算された産業革命前の海洋物理場と、分担者の重光と協力者の山本が提供した硝酸や鉄などの栄養塩の濃度分布を用いて、海洋窒素同位体モデル(図2)を駆動し、氷期の全球窒素同位体比分布を作成した。

(2) 最終氷期最寒期の窒素同位体比分布

Kobayashi et al. (2015)の2.1万年前の気候場と、分担者の重光と協力者の山本が提供する硝酸や鉄などの栄養塩の濃度分布を用いて、海洋窒素同位体モデル(図2)を駆動し、氷期の全球窒素同位体比分布を作成した。

(3) 全球海洋の季節変動特性の区別

産業革命前と最終氷期最寒期の窒素同位体比分布を用いて、季節変動パターンの類似性に基づくクラスタ解析を行い、窒素同位体比の季節変動特性の区別を行った。

4. 研究成果

(1) 産業革命前の窒素同位体比分布

産業革命前の沈降粒子の窒素同位体比は、東部北太平洋、東部南太平洋、インド洋などで水柱の脱窒の影響を受けて高い窒素同位体比を示し、サルガッソ海や黒潮続流域、インド洋東部などで窒素固定の影響を受けて低い窒素同位体比を示すなど、Tesdal et al. (2013)の表層堆積物に含まれる全窒素の窒素同位体比測定値の全球分布とよく一致した(図3上)。

(2) 最終氷期最寒期の窒素同位体比分布

最終氷期最寒期の沈降粒子の窒素同位体比は、産業革命前と同じく、東部北太平洋、東部南太平洋、インド洋などで水柱の脱窒の影響を受けて高い窒素同位体比を示し、サルガッソ海や黒潮続流域、インド洋東部などで窒素固定の影響を受けて低い窒素同位体比を示した。産業革命前と比較して最終氷期最寒期は、窒素固定速度も脱窒速度も遅かった。このため、最終氷期最寒期の沈降粒子の窒素同位体比は、窒素固定起こっている海域では産業革命前と比較して高く、脱窒が起こっている海域では産業革命前と比較して低い値を示した(図3下)。

(3) 全球海洋の季節変動特性の区別

沈降粒子の窒素同位体比の季節変化は-5%から+20‰の範囲で、さまざまなパターンの季節変化を示した。その振幅は、高緯度海域で大きく、低緯度海域で小さいなど、海域によって異なる季節変化を示した。このような沈降粒子の窒素同位体比の季節変動特性から、全球海洋を11に区別した(図4)。区分1~4は、HNLC 海域を含む亜寒帯海域に広く分布した。これらの海域の沈降粒子の窒素同位体比を規

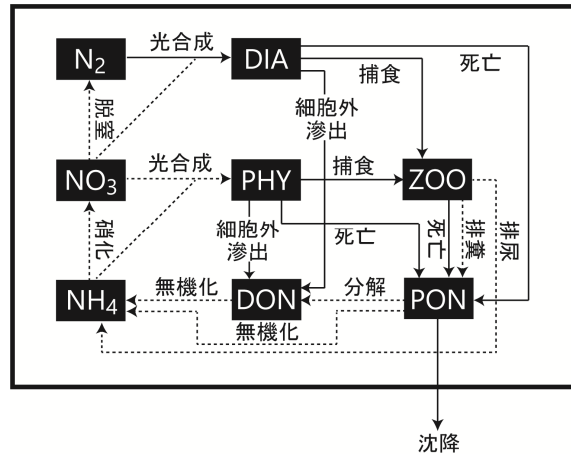


図2: 海洋窒素同位体モデル。モデルは以下8つの構成要素からなる(N₂: 窒素分子、NO₃: 硝酸塩、NH₄: アンモニウム塩、PHY: 植物プランクトン、DIA: ジアゾ栄養生物、ZOO: 動物プランクトン、PON: 粒状有機窒素、DON: 溶存有機窒素)。実線矢印は、同位体分別を伴わない過程、点線矢印は、同位体分別を伴う過程を示している。

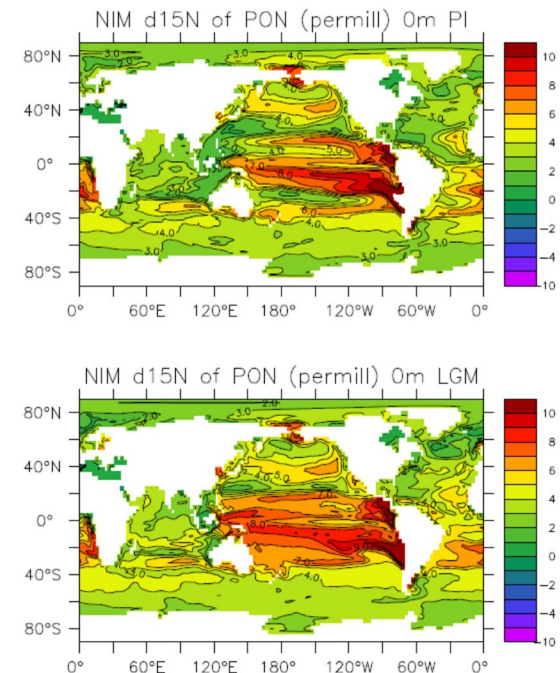


図3: 産業革命前(上)と最終氷期最寒期(下)の窒素同位体モデルによる表層粒子状有機物の年平均窒素同位体比分布。

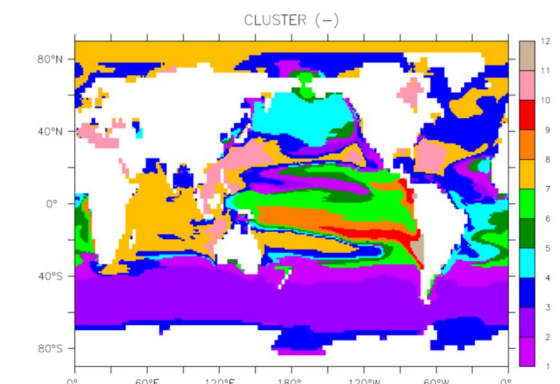


図4: 産業革命前の沈降粒子の窒素同位体比の季節変動特性による区別。

定する要因は、硝酸塩の利用効率（図1）だった。区分8~11は、水柱で脱窒が起こっている海域に分布した。これらの海域の沈降粒子の窒素同位体比を規定する要因は、脱窒（図1）と硝酸塩の利用効率（図1）だった。区分5~6は、堆積物中で不完全な脱窒が起こっている海域や水柱で脱窒が起こっている海域から少し離れた海域に分布した。これらの海域の沈降粒子の窒素同位体比を規定する要因も、脱窒（図1）と硝酸塩の利用効率（図1）だった。区分7は、窒素固定が起こっている海域だった。これらの海域の沈降粒子の窒素同位体比を規定する要因は、窒素固定（図1）だった。区分10は、窒素固定が起こっている海域の周辺や北極海だった。これらの海域の沈降粒子の窒素同位体比を規定する要因は、窒素固定（図1）や硝酸塩の利用効率（図1）だった。

本研究では、海域ごとに窒素同位体比の季節変化を決める要因が図1に示した3つのうちのどれに当てはまるかを明らかにした。これにより、季節変動特性に応じて海底堆積物の窒素同位体比記録を解析することが可能となった。今後は、同モデルを用いた退氷期実験を行って気候変動特性による区分けを行いたいと考えている。

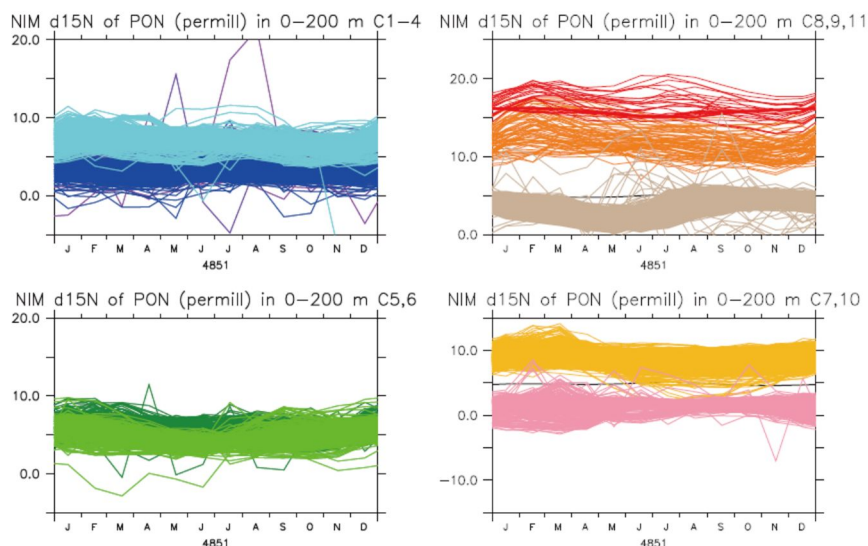


図5：産業革命前の沈降粒子の季節変化。図の線の色は、図4に示した区画1~11の色と対応している。黒色の太線は全球平均値を示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yoshikawa Chisato, Shigemitsu Masahito, Yamamoto Akitomo, Oka Akira, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 11
2. 論文標題 A nitrogen isoscape of phytoplankton in the western North Pacific created with a marine nitrogen isotope model	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Frontiers in Marine Science	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmars.2024.1294608	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 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 吉川知里・重光雅仁・山本彬友・岡頭・大河内直彦
2. 発表標題 西部北太平洋における一次生産者の窒素同位体比地図
3. 学会等名 日本地球化学会 第70回年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chisato Yoshikawa, Masahito Shigemitsu, Akitomo Yamamoto, Akira Oka and Naohiko Ohkouchi
2. 発表標題 Nitrogen isoscape of phytoplankton in the western North Pacific created nitrogen isotope model a marine
3. 学会等名 Ocean Science Meeting 2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Chisato Yoshikawa, Masahito Shigemitsu, Akitomo Yamamoto, Akira Oka, Naohiko Ohkouchi
2. 発表標題 Building a nitrogen isoscape of phytoplankton in the western North Pacific using a marine nitrogen isotope model
3. 学会等名 JPGU2022（国際学会）
4. 発表年 2022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
研究 分担者	重光 雅仁 (Shigemitsu Masahito) (20511695)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(海洋観測 研究センター)・技術研究員 (82706)	
研究 分担者	山本 彬友 (Yamamoto Akitomo) (30794680)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動 予測研究センター)・特任研究員 (82706)	

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
---------	---------