

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04247

研究課題名(和文)窒素安定同位体比を用いて海洋生物の回遊経路を解明する

研究課題名(英文)Understanding of fish migration by nitrogen isotope ratio

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化などの気候変動が海洋生物へ与える影響を明らかにするうえで、海洋生物の回遊経路の解明は不可欠である。しかし、海洋生物の中でも特に魚類は、行動範囲が広いと移動行動の観察は難しく、さまざまな解析手法が試みられているものの、定常的な回遊経路でさえ不明な点が多い。そこで本研究では、魚類の脊椎骨と水晶体のアミノ酸窒素同位体比測定から、対象とする魚が回遊中に食べた餌の窒素同位体比履歴を復元した。また、海洋窒素同位体モデルを用いて窒素同位体比の空間分布を作成した。魚類の窒素同位体比履歴と窒素同位体比の空間分布から回遊経路を推定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、魚類の脊椎骨や水晶体の窒素同位体比履歴と窒素同位体比の空間分布から、回遊経路を推定する手法を確立した。本手法は、魚類以外のさまざまな海洋生物についても応用可能であることから、気候変動が海洋生物に与える影響の理解や、水産資源の将来予測の精度向上へつなげられる。また、本研究でモデルを用いて作成した植物プランクトンの窒素同位体比の空間分布は、観測ベースよりもシームレスかつ高解像度であるため、窒素同位体比を用いて生息環境を復元する研究の精度向上にもつなげられる。

研究成果の概要(英文)：Identifying the migration routes of marine animals is crucial for sustainable fisheries management and biodiversity conservation. Although tracking technologies have advanced tremendously, the migration routes over their entire life including the spawning sites or the larva and juvenile habitats are often unknown due to body-size limitations. Here we developed a new method capable of reconstructing the geographic and trophic histories of migratory fish by compound-specific isotope analysis of amino acids in vertebra and eye lens with modeled nitrogen isoscape of phytoplankton.

研究分野：生物地球化学

キーワード：窒素同位体比 回遊経路 海洋生態系モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化などの気候変動に対する海洋生物の応答を明らかにすることは、海洋生物の今後の資源保護や資源管理を行ううえで、喫緊の課題である。近年この課題を解決すべく、「魚類成長-回遊モデル」を用いた研究が数多く行われている (Ito et al., 2004, Megrey et al., 2007, Kishi et al., 2011 など)。しかしこれらのモデルには、実測不足のため、回遊経路の再現性の検証が十分に行えていないという難点がある。実際、魚類の回遊は、標識放流、鱗相分析、DNA 分析、アーカイバブルタグなどさまざまな手法で復元が試みられているが、生存の鍵となる仔稚魚期を含む一生分の回遊経路は不明な点が極めて多い。

魚類の一生を通じた経験履歴 (水温、塩分など) を復元する手法として、耳石の同位体比分析が有名である。しかし耳石では、回遊履歴の推定に重要な役割を果たす、窒素や放射性炭素、硫黄などの同位体比を測定することができない。そこで近年、一生を通じた回遊履歴を復元するため、耳石と同じく蓄積性組織である、脊椎骨のアミノ酸窒素同位体比分析法が開発された (Matsubayashi et al., 2017)。

従来から広く測定されている、海洋生物の全窒素同位体比 (図1の黒丸) には、「食物連鎖における一次生産者の窒素同位体比」と「どのような餌を食べたか (栄養段階が2の動物プランクトンと3の小魚は 3.3‰ 同位体比が異なる。)」の2つの情報が混在しているため、しばしばその解釈は混迷を極める。そこで近年、これらの情報を区別して解釈する目的で、アミノ酸レベルの窒素同位体比測定が行われるようになった (図1の白丸)。Chikaraishi et al. (2009, 2010) は、海洋生物のフェニルアラニンの窒素同位体比が、その生物が属する「食物連鎖における一次生産者の窒素同位体比 ($^{15}\text{N}_{\text{Base}}$)」を示し、グルタミン酸とフェニルアラニンの窒素同位体比の差から、その生物の「栄養段階 (図1の横軸)」が推定できることを明らかにした。つまり、脊椎骨のアミノ酸窒素同位体比からは、回遊中に滞在した海域の植物プランクトンの窒素同位体比履歴と、回遊中に食べた餌の履歴が復元できる。

海洋において窒素同位体比は、栄養塩濃度の違いや、窒素固定、脱窒などによって空間的に大きく変化する。このため、脊椎骨のアミノ酸窒素同位体比と、植物プランクトンの窒素同位体比の空間分布を比較することで、魚類の回遊経路が把握できる。これまでの研究では、懸濁粒子や動物プランクトンなど、植物プランクトン以外の窒素同位体比の空間分布を用いて、数多くの仮定を基に、回遊履歴が推定されてきた。高精度な回遊履歴の推定には、植物プランクトンの窒素同位体比分布が不可欠であるが、植物プランクトンの窒素同位体比測定は容易ではない。近年、海洋窒素同位体モデルは、硝酸、植物プランクトン、沈降粒子、堆積物などの窒素同位体比測定結果の再現に成功している (Yoshikawa et al., 2005, 2006, 2016 など)。この海洋窒素同位体モデルを、実際の気候変動を再現できている物理場で駆動すれば、植物プランクトンの窒素同位体比の空間分布の作成が可能になると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、海洋生物の回遊経路の解明に窒素同位体比を用いる手法の確立である。「海洋窒素同位体モデル」と「魚類の蓄積性組織のアミノ酸窒素同位体比測定」の2つの手法を組み合わせ、海洋生物の回遊経路を解明する。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) 蓄積性組織のアミノ酸窒素同位体比測定から魚類の窒素同位体比履歴を復元する。
- (2) 植物プランクトンの窒素同位体比の実測値を集積する。
- (3) 海洋窒素同位体モデルを用いて、植物プランクトンの窒素同位体比分布を作成する。

3. 研究の方法

本研究では、海洋生物の回遊経路の解明に窒素同位体比を用いる手法を確立するためのケーススタディーとして、マサバを研究対象とした。

(1) 蓄積性組織のアミノ酸の窒素同位体比

2020年8月18日に大槌湾の定地網で漁獲したマサバから脊椎骨を採取し、中心部から辺縁部にかけて段階的に切り分け、それぞれの切片からコラーゲンを抽出して、EA-IRMSで全窒素同位体比を、GC-IRMSでアミノ酸の窒素同位体比を測定した。また同個体から水晶体を採取し、辺縁部から中心部にかけて段階的に剥き、それぞれについてEA-IRMSで全窒素同位体比を、GC-IRMSでアミノ酸の窒素同位体比を測定した。アミノ酸の窒素同位体比をもとに栄養段階による上昇

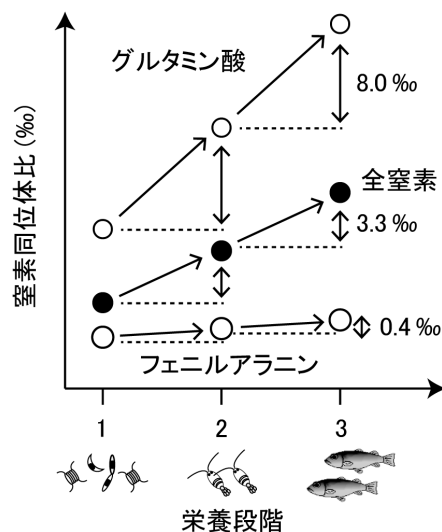


図1：全窒素同位体比、アミノ酸窒素同位体比と栄養段階の関係 (Chikaraishi et al., 2009 を改変)

(図1)を補正し、マサバが孵化してから捕獲されるまでに食べた餌の餌(植物プランクトン)の窒素同位体比履歴を算出した。

(2) 植物プランクトンの窒素同位体比

白鳳丸のKH-15-J01航海において、西部北太平洋亜寒帯海域のSt.K2のクロロフィル極大から、植物プランクトンの窒素同位体比測定用の海水を採取した。海水は、船上にて限外ろ過し、濃縮液を液体窒素で凍結して持ち帰った。ラボにて、セルソーターを用いて懸濁粒子から植物プランクトンを分取し、EA-IRMSで全窒素同位体比を測定した。

(3) 窒素同位体比分布

海洋窒素同位体モデルを、産業革命前の気候場を用いて駆動して、植物プランクトンの窒素同位体比分布を作成した。本研究で測定した植物プランクトンの窒素同位体比や、北部北太平洋の硝酸塩の窒素同位体比(Yoshikawa et al., 2018)、北部北太平洋の動物プランクトンのアミノ酸の窒素同位体比から算出した $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ (Matsubayashi et al., 2022)などの実測値と同位体モデルの出力を比較して、再現性を検証した。

4. 研究成果

(1) 蓄積性組織のアミノ酸の窒素同位体比

脊椎骨のフェニルアラニンとグルタミン酸の窒素同位体比は、それぞれ+3.2~+6.3‰と+20.9~+25.1‰だった。水晶体のフェニルアラニンとグルタミン酸の窒素同位体比は、それぞれ-2.7~+4.6‰と+10.4~+21.4‰だった。両者とも成長に伴い同位体比が上昇した。水晶体は、脊椎骨よりも大きく変動し、より仔稚魚期の同位体比を復元可能であることが示唆された。水晶体のフェニルアラニンとグルタミン酸の窒素同位体比から推定した栄養段階は1.9~3.0で、成長に伴い上昇した。水晶体のフェニルアラニンの窒素同位体比を栄養段階で補正して求めた $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ は-3.3~+3.9‰で、成長に伴い上昇した(図2)。

(2) 植物プランクトンの窒素同位体比

St.K2の植物プランクトンの全窒素同位体比は、5~20 μm の分画が-3‰、0.2~5 μm の分画が-6‰だった(図3)。本研究で測定した植物プランクトンの窒素同位体比は、図4に示した窒素同位体モデルのSt.K2付近の結果(約2‰)よりもかなり低い。この理由の1つとして、本サンプルを、植物プランクトンが年平均よりも低い窒素同位体比を示す、7月に採取したことがあげられる。また、本サンプルを、鉛直的に最も低い窒素同位体比を示すクロロフィル極大で採取したこともあげられる。さらに、今回測定した分画が20 μm 以下に限定されていたことも、その一因と考えられる。

St.K2の同じ水塊の硝酸の窒素同位体比は、+8.5‰だった。同じ水塊のアモニアの窒素同位体比は検出限界以下だったため、測定することはできなかったが、5m下層のアモニアの窒素同位体比は、硝酸よりも低い値を示した(図3)。このことから、St.K2の植物プランクトンは、硝酸だけでなく、より同位体比の低いアモニアも取り込んでいる可能性が示唆された。

(3) 窒素同位体比分布の作成

Yoshikawa et al. (2022)へ窒素固定と脱窒を導入した窒素同位体モデルを、大気海洋結合モデル(MIROC3.2)の産業革命前の海洋物理場で駆動し、植物プランクトンの窒素同位体比を予報した。北部北太平洋海域の植物プランクトンの年・有光層平均窒素同位体比は、-2~+7‰の範囲だった(図4)。窒素固定が起こっている亜熱帯海域や、鉄律速のため栄養塩利用効率の低い

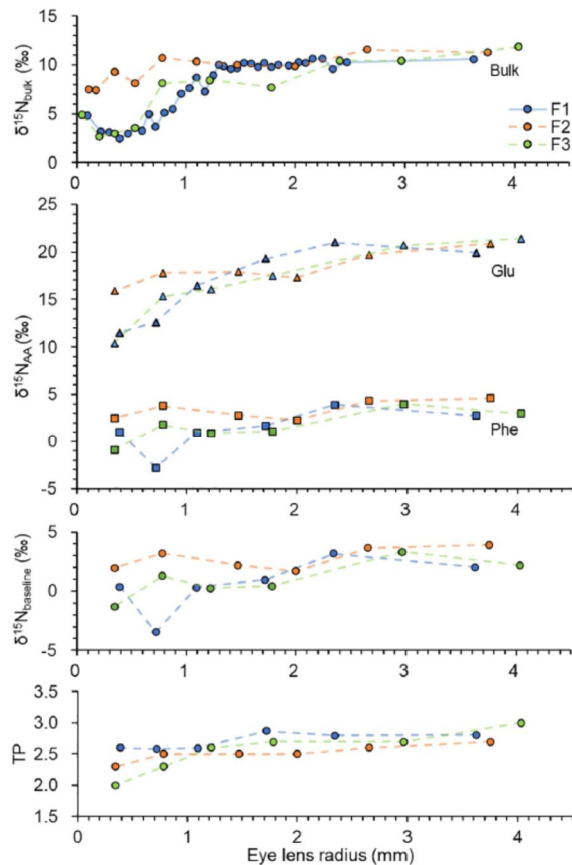


図2: 水晶体の全窒素同位体比とアミノ酸窒素同位体比の測定結果とそれらを基に算出した $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ と栄養段階の変遷(Harada et al., 2022)。

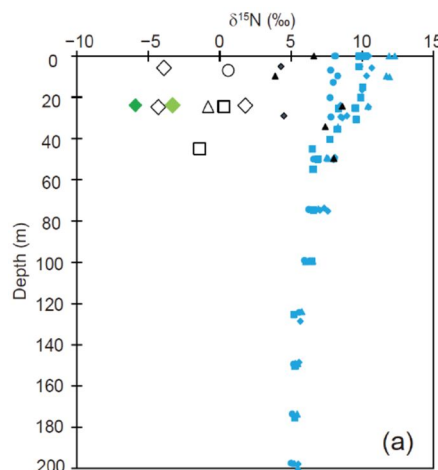


図3: St.K2における植物プランクトンの(緑)、懸濁粒子(白)、硝酸(青)、アンモニア(黒)の窒素同位体比の鉛直分布(Yoshikawa et al. Submitted)。

亜寒帯海域では、低い窒素同位体比を示した。一方、栄養塩の利用効率が高い混合水域や、堆積物中の脱窒と不完全な硝化が起こっているベーリング海峡周辺海域では高い窒素同位体比を示した。モデルによる窒素同位体比分布は、Matsubayashi et al. (2022)による $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ の水平勾配と矛盾のない分布を示した。

F1とF3の $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ は、眼球半径が1mm以下の時期には1‰以下の値を示し、その後成長に伴い3‰を超えて上昇した(図2)。図4の窒素同位体比分布から、これらの個体は、孵化直後から仔稚魚期は亜熱帯海域に生息し、その後混合水域まで北上したと考えられる。F2にも同様の傾向は見られるが、眼球半径が0.7mmの時期にすでに3‰を超えていることから、F1とF3よりも北側で孵化した可能性が考えられる。

本研究では、マサバの脊椎骨と水晶体のアミノ酸の窒素同位体比分析と窒素同位体モデルによる窒素同位体比地図を組み合わせ、マサバの回遊経路を復元する手法を開発した。今後は、より詳細な移動履歴の復元を目指して、状態空間モデルの利用や窒素同位体モデルの高解像度化を予定している。

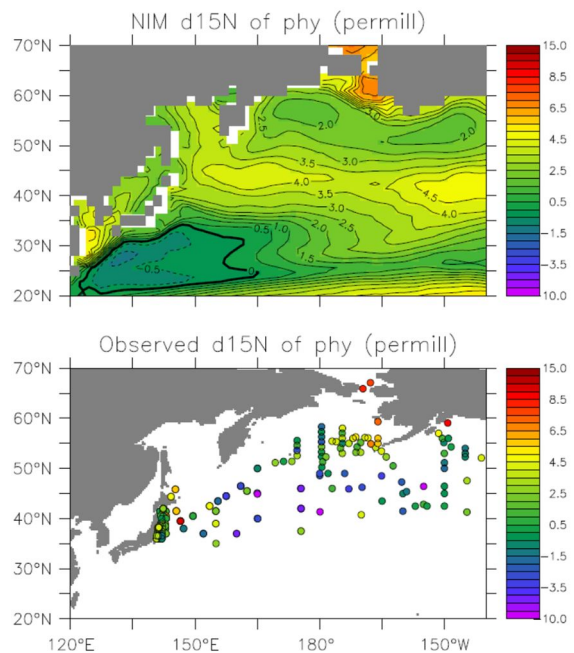


図4：窒素同位体モデルによる植物プランクトンの年・有光層平均窒素同位体比分布とMatsubayashi et al. (2022)の $^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ の分布(Yoshikawa et al., in prep.)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Mino Y., Sukigara C., Honda M. C., Kawakami H., Wakita M., Sasaoka K., Yoshikawa C., Abe O., Kaiser J., Kimoto K., Kitamura M., Fujiki T., Matsumoto K., Saino T.	4. 巻 125
2. 論文標題 Seasonal and Interannual Variations in Nitrogen Availability and Particle Export in the Northwestern North Pacific Subtropical Gyre	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Oceans	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） 10.1029/2019JC015600	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 Matsubayashi, J., Osada, Y., Tadokoro, K., Abe, Y., Yamaguchi, A., Shirai, K., Honda, K., Yoshikawa, C., Ogawa, N.O., Ohkouchi, N., Ishikawa, N.F., Nagata, T., Miyamoto, H., Nishino, S., and Tayasu, I.	4. 巻 23(5)
2. 論文標題 Tracking long distance migration of marine fishes using compound specific stable isotope analysis of amino acids.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Ecology Letters	6. 最初と最後の頁 881 -890
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1111/ele.13496	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 -
1. 著者名 Harada Yota, Ito Shin-ichi, Ogawa Nanako O., Yoshikawa Chisato, Ishikawa Naoto F., Yoneda Michio, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Compound-Specific Nitrogen Isotope Analysis of Amino Acids in Eye Lenses as a New Tool to Reconstruct the Geographic and Trophic Histories of Fish	5. 発行年 2022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.2021.796532	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 Isaji Yuta, Yoshikawa C., Ogawa N. O., Matsumoto K., Makabe A., Toyoda S., Ishikawa N. F., Ogawa H., Saito H., Honda M. C., Ohkouchi N.	4. 巻 23
2. 論文標題 Nitrogen Sources for Phytoplankton in the Eastern Indian Ocean Determined From ¹⁵ N of Chlorophyll <i>a</i> and Divinylchlorophyll <i>i</i>	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geochemistry, Geophysics, Geosystems	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） 10.1029/2021GC010057	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 Yoshikawa Chisato, Ogawa Nanako O., Chikaraishi Yoshito, Makabe Akiko, Matsui Yohei, Sasai Yoshikazu, Wakita Masahide, Honda Makio C., Mino Yoshihisa, Aita Maki N., Fujiki Tetsuichi, Nunoura Takuro, Harada Naomi, Ohkouchi Naohiko	4. 巻 49
2. 論文標題 Nitrogen Isotopes of Sinking Particles Reveal the Seasonal Transition of the Nitrogen Source for Phytoplankton	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2022GL098670	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5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yoshikawa, C., A. Makabe, Y. Matsui, S. Toyoda, M.C. Honda, and N. Ohkouchi
2. 発表標題 Nitrate isotopes in the Bay of Bengal.
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 : Virtual (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉川知里、眞壁明子、松井洋平、豊田栄、本多牧生、布浦拓郎、大河内直彦
2. 発表標題 東部インド洋における硝酸の窒素酸素同位体比
3. 学会等名 2020年度地球化学会第67回オンライン年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 C. Yoshikawa, N.O. Ogawa, Y. Chikaraishi, A. Makabe, Y. Matsui, Y. Sasai, M. Wakita, M.C. Honda, Y. Mino, M.N. Aita, T. Fujiki, T. Nunoura, N. Harada and N. Ohkouchi
2. 発表標題 Seasonal transition of the dominant nitrogen source for phytoplankton reconstructed by determining the nitrogen isotope composition for nitrate, ammonium, and individual amino acids of sinking particles in the Northwestern Pacific
3. 学会等名 OSM2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshikawa, C., M. Shigemitsu, A. Yamamoto, A. Oka, N. Ohkouchi
2. 発表標題 Nitrogen isotope mapping in the North Pacific using a marine nitrogen isotope model.
3. 学会等名 JPGU Meeting 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021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 JPGU Meeting 2022 (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	伊藤 進一 (Ito Shinichi) (00371790)	東京大学・大気海洋研究所・教授 (12601)	
研究分担者	山口 晴代 (Yamaguchi Haruyo) (20722672)	国立研究開発法人国立環境研究所・生物多様性領域・主任研究員 (82101)	
研究分担者	松林 順 (Matsubayashi Jun) (30756052)	国立研究開発法人水産研究・教育機構・水産資源研究所(横浜)・研究員 (82708)	

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			
米国	Princeton University			