

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：82706

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2022

課題番号：18K19862

研究課題名（和文）海洋生態系の持続的な食物連鎖の維持と窒素・炭素安定同位体効果の関係

研究課題名（英文）Relationship between nitrogen and carbon stable isotope effects and their sustainable food chains in marine ecosystems

研究代表者

相田 真希（Aita, Maki）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門（地球表層システム研究センター）・グループリーダー

研究者番号：90463091

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）：本研究は、生物の体内で生じている様々な同位体効果における「ゆらぎ」の発生メカニズムを理解することを目的に、炭素と窒素同位体比既知の餌を用いたマイワシとカタクチイワシの飼育実験を行った。その結果、筋肉、肝臓の同位体比に変化が見られなかった一方で、卵黄形成が進むにつれて卵巣の同位体比が上昇する過程を捉えることに成功した。この事実から、自然界のマイワシは、索餌場から産卵場へ移動する間に獲得した栄養を筋肉などに蓄積する一方、卵巣形成に摂取栄養と共に蓄積栄養を効率的、安定的に生殖腺に配分し利用していると推察された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海域規模の海水温の変動と小型浮魚類の数十年規模の変動が密接に関連していることは知られているが、自然界の代謝系の機能的適応戦略、特に加入量の予測に不可欠な産卵親魚群の繁殖能力に関する理論的・実験的な検証は未だ十分ではない。本研究で捉えた代謝系ダイナミクスについて、今後、アミノ酸レベルまで解明し、規格化することができれば、代謝ダイナミクスの解明を通じて、生物生理学研究の発展のみならず、水産海洋学分野においては新たな資源管理方策の提示・導入などにも貢献できると考えられる。

研究成果の概要（英文）：To understand the mechanism of "fluctuation" in various isotope effects occurring in the organisms' bodies, we conducted feeding experiments on Japanese sardines and anchovies using food with known carbon and nitrogen stable isotope ratios. As a result, we succeeded in capturing the process in which the isotope ratio of the ovary increased as yolk formation progressed. In contrast, isotope ratios of the muscle and liver did not change. From this fact, we speculated that wild Japanese sardines accumulate nutrients in their muscles during their migration from the foraging grounds to the spawning grounds, where they efficiently and stably distribute as well as utilize the accumulated nutrition along with the ingested nutrition to the gonads to form the ovaries.

研究分野：海洋物質循環、同位体生態学、生物地球化学

キーワード：同位体効果 アミノ酸組成 窒素・炭素安定同位体比 同位体濃縮 代謝理論モデル マイワシ カタクチイワシ 給餌実験

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

生態学に用いられている化学的な安定同位体精密測定法は、化学反応における同位体効果を基盤とする生物現象の解析法であり、物質の動態について生物種を越えた一般性が期待できる事象を扱う方法である。研究代表者らは、海洋及び陸域生態系における食物連鎖と、生物が持つ炭素・窒素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ ・ $\delta^{15}\text{N}$) の関係について統計的な解析を行った結果、食物連鎖中の摂餌プロセスにおいて統一的な規則性が低次生態系から高次生態系に渡って引き継ぎ維持されている“ $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ 一般性”を見出している(Aita et al., 2011)。これは、生態系間・栄養段階間における動物の代謝プロセスについて窒素・炭素同位体の濃縮が共通していること、また細胞内のアミノ酸代謝過程に関して、C/N 同位体効果が脱炭酸と脱アミノの過程で大きく起こることが背景にあると我々は考えている。近年、サケやアカイカなどの有用魚種の回遊経路や生息地域の検証に、 $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ 一般性が有効であることが示され始めている (e.g. Qin & Kaeriyama, 2016; Kato et al., 2016)。このように、藻類など一次生産者を起点とした食物連鎖の骨格を $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ マップ上に位置付けられることは統計的な経験則として得られた一方で、食物連鎖における $\Delta\delta^{15}\text{N}/\Delta\delta^{13}\text{C}$ について、なぜ回帰直線で近似できるのか、またそこには生態学的、生理学的などのような意味があるのか未だ十分に検証されていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、生態学的因子により起因される誤差(ゆらぎ)に関して、理論的、実験的検証を行うことで、Minagawa & Wada (1984)などで示された

$\delta^{15}\text{N}_{\text{捕食者}} = 3.4[\pm 1.1] \times (\text{TL} - 1) + \delta^{15}\text{N}_{\text{一次生産者}}$ 、
の ± 1.1 ‰ のばらつきを要因を解明することである。そこで、
(1) 成魚を用いた飼育実験による餌 - 捕食者間の N/C 同位体効果の再現性、
(2) 理論モデルによる生起される代謝ステップの検証、
を行い、生体内(動物)の代謝ダイナミクスにおける同位体濃縮機構を深化させる。

3. 研究の方法

栄養段階に伴う $\delta^{15}\text{N}$ 及び $\delta^{13}\text{C}$ の濃縮の変動は、一次生産者の生育に沿った N/C 同位体比の変動、捕食者の生理状態、餌と捕食者の筋肉のアミノ酸組成の差、の3つの要因によって変化すると考えられる。そこで、本課題では後者の2要因に関して、(1) 成魚を用いた飼育実験を通して生起する代謝ステップについて、(2) 代謝理論モデルによる検証を行う。

(1) 飼育実験

先行研究で実施したクロマグロ稚魚の飼育実験や、ラットに同一の餌を4カ月間与え続けた再現性を見る飼育実験(和田・相田, 2017)から、捕食者のタンパクの生合成に律速がかからないようなアミノ酸組成を持つ餌 = 捕食者の蛋白質のアミノ酸組成と同じアミノ酸組成を持つ餌を与える実験が必要であると考えている。そこで本研究では、成熟ステージに左右されない成魚(飼育魚)を選定し、 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ および窒素・炭素全量が既知の餌料を数ヶ月間与え続け、餌に対する体組織内の同位体比分布が安定したものを実験開始前までに準備する。ここでは、摂取栄養依存度が大きく異なるマイワシ、カタクチイワシを用いることで、未熟期~成熟期にまつわる一連のタンパク質代謝の動態の変化に着目し、体組織の炭素・窒素同位体効果の再現性をトレースする。

(2) 代謝理論モデル

代謝系のダイナミクスと炭素・窒素同位体効果について、タンパク質合成・分解過程の理論モデル(Ishii et al. *in prep.*)を用いて、同位体濃縮・効果の生理的理論値の推定、餌の C/N 比などの生育条件に対する感度推定し、飼育結果の説明要因の妥当性について検証する。

4. 研究成果

(1) 同位体に対するターンオーバータイムが異なると考えられる2つの魚種: カタクチイワシ(ターンオーバータイムが1~2か月程度と比較的早い)、マイワシ(カタクチイワシに比べ、ターンオーバータイムが数か月程度と長い)の成魚に、同位体比既知の餌を3か月に渡って与え続ける飼育実験を行った。実験期間中に、筋肉、生殖腺、脂肪、心臓、脳などの約700検体を採取し、各組織の $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ の分析を行った。このうち特に摂取栄養がどのように体組織に蓄積され、卵巣へどれだけ配分されるかに焦点を当て、マイワシのメスの生殖腺指数に対する筋肉、肝臓、卵巣の $\delta^{15}\text{N}$ を詳細に解析したところ、筋肉、肝臓の同位体比に変化が見られなかった一方で、卵黄形成が進むにつれて卵巣の同位体比が上昇する過程を捉えることに成功した(図1)。得られた同位体比の考察から、 $\delta^{15}\text{N}$ の大きいリサイクルされたアミノ酸の寄与によって卵巣

のタンパク質の $\delta^{15}\text{N}$ が増加する、肝臓での脱アミノ反応に伴い同位体比の高くなったアミノ酸が卵黄タンパクに多く用いられるため、さらに $\delta^{15}\text{N}$ が増大した、という2つのプロセスでの濃縮効果のはたらきによるものと推察した。すなわち、自然界のマイワシは、索餌場から産卵場へ移動する間に獲得した栄養を筋肉などに蓄積しておき、卵巣の成長には、摂取栄養と共に蓄積栄養を効率的、安定的に生殖腺に配分し利用していることが考えられた。一方、カタクチイワシについて、得られた同位体結果から解析を行い、実験開始後に給餌した餌の同位体比よりも低かったことから、餌に対する体組織内の同位体比分布を安定させるためにはマイワシよりも更に長い実験期間が必要であると結論した。

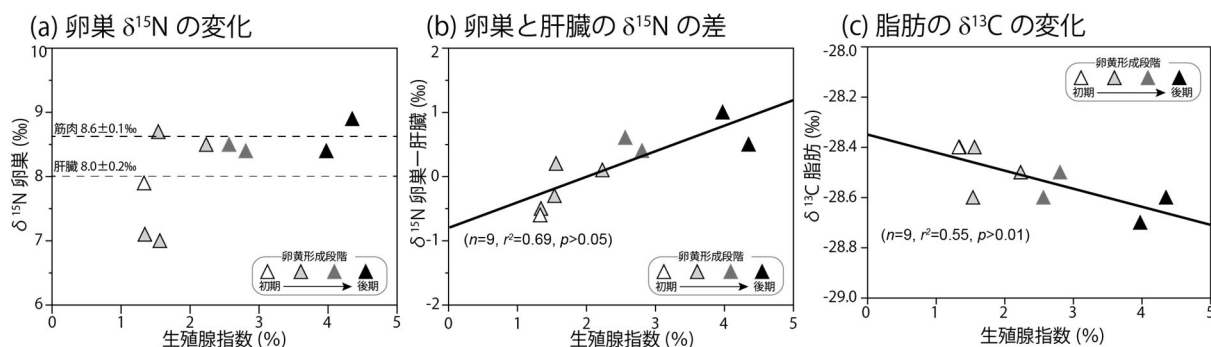


図1 (a)飼育実験によるマイワシの生殖腺指数(卵巣重量×100/体重)と卵巣の $\delta^{15}\text{N}$ の関係。筋肉、肝臓の $\delta^{15}\text{N}$ は変化が見られなかった。(b)肝臓と卵巣の $\delta^{15}\text{N}$ の差。卵黄形性が進むにつれて、卵巣の $\delta^{15}\text{N}$ が高まってゆく。(c)脂肪の $\delta^{13}\text{C}$ は、卵黄形性が進むにつれて低くなってゆく。

(2) マイワシで観察された $\delta^{15}\text{N}$ 濃縮の実験結果を理論的に説明するために、採餌と体成長、生殖成長のプロセスに伴う、餌、筋肉、生殖腺、肝臓、アミノ酸プールの中の窒素循環と同位体効果に関する数理モデルを作成した。このモデルの分析から、餌から供給される炭素窒素比、体成長/生殖成長/運動時の要求の炭素窒素比の変化が、肝臓における脱アミノ反応強度の変化を介して卵巣の $\delta^{15}\text{N}$ の値に反映されること、その際に筋肉の $\delta^{15}\text{N}$ 値は大きく変動しないことが定性的に示された。

< 引用文献 >

Aita Noguchi M., Tadokoro, K., Ogawa, N. O., Hyodo, F., Ishii, R., Smith, S. L., Saino, T., Kishi, M. J., Saitoh, S.-I. and Wada, E. (2011) Linear relationship between carbon and nitrogen isotope ratios along simple food chains in marine environments, *Journal of Plankton Research*, 33(11), 1629-1642, doi:10.1093/plankt/fbr070.

Qin Y., Kaeriyama M. (2016). Feeding habits and trophic levels of Pacific salmon (*Oncorhynchus spp.*) in the North Pacific Ocean. *North Pacific Anadromous Fish Commission*, 6, 469-481.

Kato Y., Sakai M., Nishikawa H., Igarashi H., Ishikawa Y., Vijai D., Sakurai Y., Wakabayashi T., Awaji T. (2016) Stable isotope analysis of the gladius to investigate migration and trophic patterns of the neon flying squid (*Ommastrephes bartramii*), *Fisheries Research*, 173(2), 169-174, doi: 10.1016/j.fishres.2015.09.016.

Minagawa M., Wada E. (1984) Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(5), 1135-1140, doi: 10.1016/0016-7037(84)90204-7.

和田英太郎, 野口真希 (2017) N/C 安定同位体を用いた新食物連鎖解析法 - その現状と今後, *RADIOISOTOPE*, 66, 331-342. doi: 10.3769/radioisotopes.66.331.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 野口 真希	4. 巻 69
2. 論文標題 安定同位体比で食物連鎖を紐解く	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本プランクトン学会報	6. 最初と最後の頁 49 ~ 50
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.24763/bpsj.69.1_49	査読の有無 無
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野口真希
2. 発表標題 安定同位体比で食物連鎖を紐解く
3. 学会等名 プランクトン学会シンポジウム、次世代プランクトン研究を開拓する新技術・方法論
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井励一郎、野口（相田）真希
2. 発表標題 魚類の成長に伴う臓器の窒素同位体変動に関する代謝モデル
3. 学会等名 日本生態学会第69回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野口（相田）真希、田所和明
2. 発表標題 炭素・窒素同位体比からみた海食物連鎖
3. 学会等名 白鳳丸30周年記念世界一周航海（HEAW30）へ向けた 研究戦略会議
4. 発表年 2019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	石井 励一郎 (Ishii Reiichiro) (40390710)	総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・准教授 (64303)	

	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 協力者	米田 道夫 (Yoneda Michio)		
研究 協力者	杉崎 宏哉 (Sugisaki Hiroya)		

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