

1. 研究課題名:

海棲哺乳類アーカイブの重元素安定同位体比測定と生態学的応用性の検討

2. 共同研究者

長谷川菜々子 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

板井啓明 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻)

国末達也 (愛媛大学沿岸環境科学研究センター)

3. 研究目的

本研究は、生物組織における重金属の安定同位体比を測定することで、餌-生体間および生体内で重金属の分配・挙動の理解を目的とする。生物組織に含まれる元素安定同位体は、大別して(1)環境中の同位体比を反映、(2)餌の吸収時に生じる同位体分別、(3)主要臓器への元素分配で生じる同位体分別により変動する(Jaouen et al., 2017)。このことは炭素・窒素に代表される軽元素の安定同位体比分析ではよく研究がなされている。しかし、重元素安定同位体比の分析法は、MC-ICP-MSの発展に伴い比較的最近確立されたものであるため、生態系内での重元素安定同位体の挙動には不明な点が多い。本研究は重元素の1つとして生態必須性が高い鉄に着目し、生物試料における鉄安定同位体比の分析手法の確立と、それを使用した海洋生態系での鉄の同位体比の変動幅について生物種ごとに比較を行った。

4. 研究内容

本研究では、日本近海に生息する4種の魚類、1種の頭足類、3種の鯨類、および動物プランクトン(主にカイアシ類)の組織中 $\delta^{56}\text{Fe}$ を測定した。鉄安定同位体比は、マルチコレクタ型誘導結合プラズマ質量分析計(MC-ICP-MS, ThermoFisher Scientific, Germany)を用いて分析した。分析の前処理として妨害元素の除去法を、既報のカラム分離法(Maréchal et al. 1999)

を改良することで確立した。本測定法を用いた分析法の精度と確度を生物試料 4 種の微量元素認証物質 (CRM) で評価したところ、先行データの存在する 2 試料では誤差は 0.06%以内であった。また、値不明の二種類の CRM については $-0.09 \pm 0.05\%$ 、 $-2.32 \pm 0.03\%$ の値が得られた。

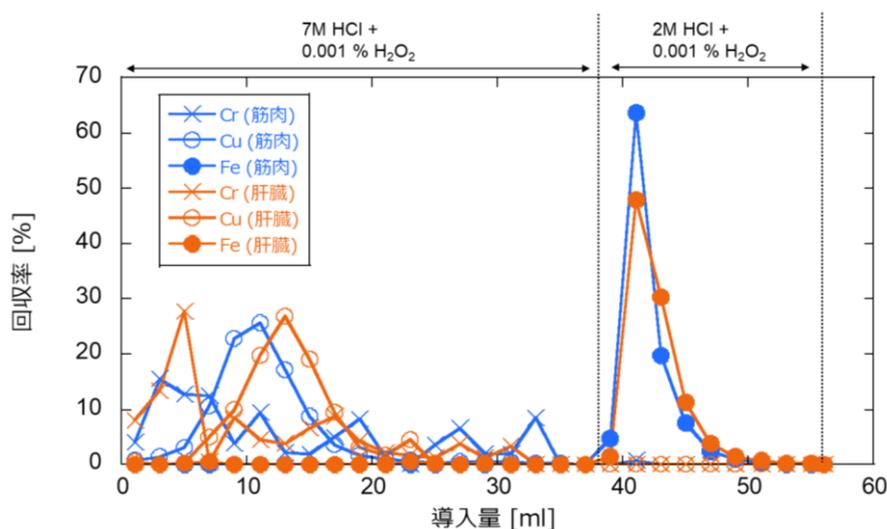


図 1. 陰イオンカラムによる鉄と妨害元素の分離

5. 研究成果

測定した計 9 種類の生物の鉄安定同位体比の値はそれぞれ、動物プランクトン： $-0.03 \pm 0.08\%$ (n=1)、魚類筋肉： -2.64% から -0.71% (n = 19, 平均： -1.65%)、鯨類筋肉： -2.37% から -1.74% (n = 9, 平均： -2.15%)であった (図 2)。ほとんどの生物試料中 $\delta^{56}\text{Fe}$ は、北太平洋表層海水の値 ($-0.5 \sim +0.5\%$) に対して低値であった。分析した生物の栄養段階を、生態情報をもとに大まかに分類したところ、鯨類 < 中型魚類 < 動物プランクトンの順に $\delta^{56}\text{Fe}$ が上昇し、栄養段階の上昇に伴い軽い同位体が濃縮する傾向が示唆された。栄養段階の増加に伴う安定同位体比の増加 (N など)、減少傾向 (Ca など) は他の同位体でも認められている。しかし、中型魚類の重要な餌生物であるマイワシ (*Sardinops melanostictus*) は他の魚類に対して顕著に低い値を示し、食物連鎖による軽い安定同位体の段階的濃縮以外の要因が示唆された。

地域差の影響を評価するため、同一種複数海域のデータが得られたマイワシ（高知沖、宮城沖）とカツオ（*Katsuwonus pelamis*、カムチャツカ沖外洋、三陸沖、グアム沖外洋、東シナ海）の $\delta^{56}\text{Fe}$ を地域別に比較した。その結果、検体数が限られたことも要因であるが、有意な地域差は認められなかった。また、全カツオ中 $\delta^{56}\text{Fe}$ の変動幅（ -1.46% から -0.71% ）はマイワシ（ -2.64% から -1.73% ）と重複しておらず、明らかに高値であった。このことから、種差の影響は地域差よりも大きいと考えられた。

代謝過程における体内での潜在的な分別過程は、吸収、代謝（形態変化）、排泄に分類される。鉄は体内で複数の酸化状態を取ることが知られており、ヘム鉄 [Fe(II)]と、非ヘム鉄 [Fe(III)] の相互変換は同位体分別の原因となると推察される。高次生物では、前者は血中ヘモグロビンを主体とする各種タンパク質、後者は輸送体としては血漿中のトランスフェリン、貯蔵体としては肝臓中のフェリチンが主要である。そこで、非ヘム鉄、ヘム鉄の主要リザーバー間の比較を目的に、鯨類の肝臓-筋肉間の $\delta^{56}\text{Fe}$ を比較した。その結果、各個体において、筋肉よりも肝臓で高値であった。これは、先行研究による陸棲哺乳類の傾向と同様であった (Balter et al., 2013)。すなわち、非ヘム鉄には重い同位体が、ヘム鉄には軽い同位体が分配され、これらの量比が両者の同位体比を規定している可能性がある。

鯨類の筋肉中 $\delta^{56}\text{Fe}$ が多くの低次栄養段階生物に対して低値を示す理由として、非ヘム鉄-ヘム鉄リザーバー間の同位体比の分離は、分別の方向としては整合的である。しかし、肝臓中の $\delta^{56}\text{Fe}$ は環境中の値と比較すると低値である。したがって、生物種間での同位体比シフトには吸収と排泄における分別を評価する必要がある。脊椎動物体内の鉄は、腸管吸収率は低く (<3%, Finch et al., 1978)、体内での再利用が主体であり、比較的長い滞留時間を有することが知られている。そこで、(1) 主要な同位体分別機構は吸収過程での速度論的効果であり、(2) 吸収率が低いほど吸収後の $\delta^{56}\text{Fe}$ が低値を示す、と仮定し、接餌量などの魚類生態学的知見に基づく試算を

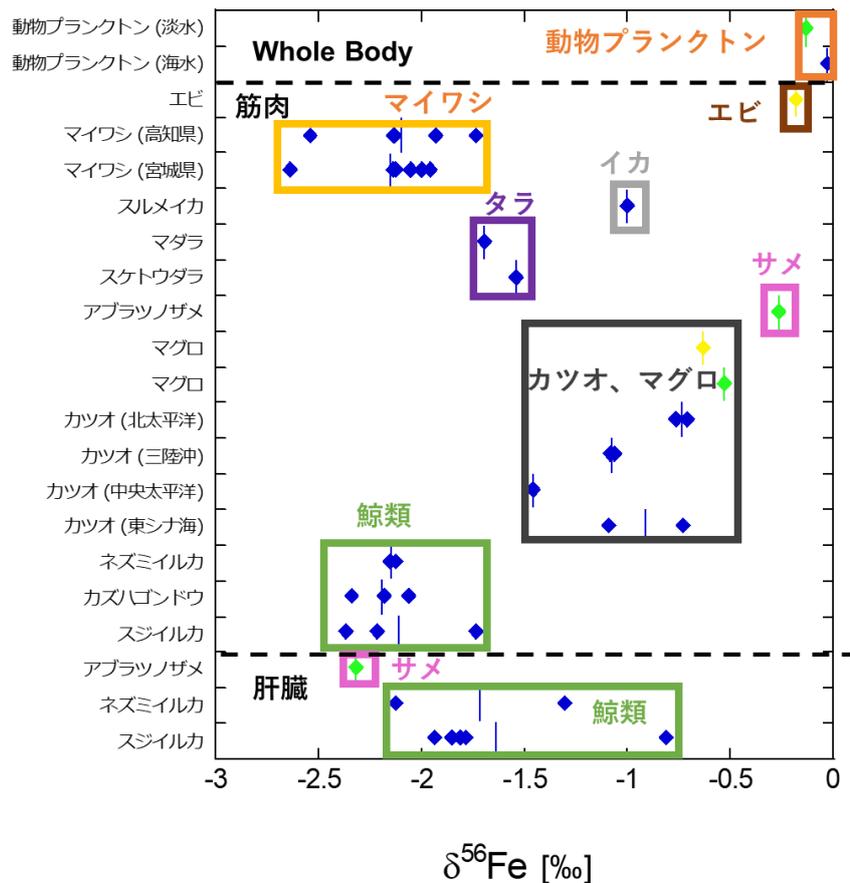


図 2. 海洋生物の組織中鉄安定同位体比
 (青：日本近海の生物試料，緑：認証物質，黄：
 文献値 (Walczyk and von Blanckenburg,
 2002))

実施した。その結果、マイワシの吸収効率 (0.4%) はカツオ (2.6%) に比べて低いと推定された。この仮説を実証するには、餌生物の同位体比や、エラ吸収と腸管吸収の寄与比を実験的に調べる必要となるが、マイワシの顕著に低い $\delta^{56}\text{Fe}$ 値は、吸収率が低いことに由来するという暫定的結論を得た。

本研究を通し、海洋生物中 $\delta^{56}\text{Fe}$ の支配要因として、種特異的な吸収・代謝プロセスがもっとも強く寄与することが示された。生物試料の戦略的アーカイビングは、世界的にも推進されているが、これらの試料を用いた研究の発展性を検討する上で、本研究で得られた知見は有効だと考えられる。

6. 研究発表

- ▶ 長谷川菜々子，板井啓明，高橋嘉夫，名取幸花，栗栖美菜子，国末達也，田辺信介，微量元素濃度と鉄安定同位体 *isoscape* を用いた沿岸性・外洋性海棲哺乳類の生態解析，日本地球化学会年会(オンライン, 2020.11)
- ▶ 長谷川菜々子，板井啓明，高橋嘉夫，名取幸花，栗栖美菜子，国末達也，田辺信介，海洋高次生物の組織中鉄安定同位体変動の特徴～鉄代謝プロセスの種依存性に関する示唆～，同位体比部会(オンライン, 2020.11)

7. 今後の問題点

鉄安定同位体比の地域依存性について、マイワシと鯨類における二つの海域間比較では関連が見受けられなかったが、カツオは海域による地域差が大きい可能性があるため、同位体比の差が大きい海域から更に追加試料を測定する必要がある。また、プランクトン-海水間の同位体分別の小ささから、様々な海域におけるプランクトンの同位体分析を行うことで、海洋環境中の鉄安定同位体比の変動幅を見積もることができると考え、今後更なる分析を進める。

本研究では鉄安定同位体比の主要な変動要因として各生物の鉄吸収率を挙げたが、推測に準拠するところが大きく、今後飼育実験に基づく検証が必要であると考えられる。