

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「海洋生物多様性および生態系の保全・
再生に資する基盤技術の創出」
研究課題「沿岸生態系の多様性機能評価のための
多元素同位体トレーサー技術の開発」

研究終了報告書

研究期間 2013年10月～2019年3月

研究代表者: 陀安一郎
((共)人間文化研究機構
総合地球環境学研究所
研究基盤国際センター、教授)

§ 1 研究実施の概要

(1) 実施概要

本研究は、生物体に含まれる多元素同位体情報を活用することによって、生物の生息地情報を踏まえた生態系情報を得ることを目的として進めた。東北水研グループが研究を続けてきた東北太平洋岸地域を主たる調査地として選定し、陸域生態系が沿岸海洋生態系に与える同位体情報、および北太平洋における海洋の不均一性に関する情報を、軽元素(地球研陀安グループ)及び重元素(地球研中野グループ)同位体比分析を利用して解析した。東大気海洋研グループは最終年度に東北水研グループと共同で全体の取りまとめに加わった。

特筆すべき研究成果の1つ目は、硬骨魚類の脊椎骨椎体を用いた、個体単位の時系列分析手法を確立したことである。同位体比の時系列情報を得る手法としては耳石分析がよく知られているが、従来の方で分析できるのはストロンチウムや酸素などの元素に限られており、魚類の生態に重要な役割を果たす窒素などの軽元素を高解像度で測定することは現状では難しい。そこで本研究では、魚類の脊椎骨椎体を用いて軽元素安定同位体比の時系列情報を得る新手法を開発した。本手法の有効性を検証するため、河川に遡上したサクラマスを対象に脊椎骨椎体を分割してイオウ安定同位体比分析を行い、魚類の回遊履歴を調べる手法として一般的である、耳石のストロンチウム同位体比分析結果と比較した。その結果、稚魚期に生育していた河川のシグナルが脊椎骨椎体の中心部から、海洋のシグナルが脊椎骨椎体の縁辺部から検出された。従って、脊椎骨椎体には軽元素同位体比の履歴情報がサクラマスの生活史に沿って保存されていることが明らかになった。本手法の妥当性を確認するために、飼育実験下でマイワシとヒラメの餌変え実験を行い、濃縮係数とターンオーバーを確認した。また、仙台湾におけるヒラメの脊椎骨分析結果より、稚魚期の履歴が成魚試料から区別できることを示した。本手法を応用するために、東北沿岸から北太平洋域で採取された動物プランクトンアーカイブ試料(水産研究・教育機構所有オダテコレクション)を利用し、アミノ酸窒素同位体比分析からベースラインの窒素同位体比($\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$)アイソスケープ(同位体地図)を作成した。本アイソスケープを利用し、北太平洋を回遊するサケ(*Oncorhynchus keta*)の移動履歴を推定した。

特筆すべき研究成果の2つ目は、魚類には活用例がほとんどない極微量元素であるネオジウム(Nd)同位体比などの活用法の開発である。東北地方太平洋岸の陸水に関するストロンチウム(Sr)およびネオジウム(Nd)同位体比を高い空間分解能で明らかにした結果、それらが集水域の地質と密接に関連して地域間で大きく変化することが明らかとなった。そのうちNd同位体比に関しては、近傍の陸水の値が沿岸の海水に反映されて大きな地理的変化が生じることがわかった。さらに沿岸域に生息するカキやイガイなどの固着性生物の軟体部と海水のNd同位体比の関係を調べたところ、両者の間に強い正の関係がみられた。また、貝類組織の希土類パターンから、生物体内の希土類元素は基本的に懸濁粒子ではなく、溶存態のNdを起源とすることが明らかとなった。さらに、仙台湾の海水のNdパターンの年間変動を研究したところ、冬季と夏季では海流の混合割合によって変動する一方、沿岸海水は陸域の影響を強く受けていることがわかった。また、東北沿岸で採取された動物プランクトンアーカイブ試料(水産研究・教育機構所有オダテコレクション)を利用したNd同位体比分析により、東北沖のNd同位体比のアイソスケープを作成した。これらの情報を用いて、ヒラメやクロマグロの脊椎骨椎体分析を行ったところ、幼少期のシグナルを検出することに成功した。

本研究では、履歴情報を持つことがわかっている耳石についても、新しい活用法について検討を行った。耳石の $\delta^{18}\text{O}$ は塩分の影響が小さい外洋域において水温の指標として主に用いられてきたが、陸域の影響を受けやすい汽水域を利用するスズキやイシガレイの稚魚の耳石に着目した研究も行ったところ、沿岸域ではむしろ、水温より塩分の影響の方が大きいことを示した。その他、チーム間連携によって得られたメチオニン窒素同位体比や炭素14などを用いた多元素同位体比活用法提示を行なった。多元素同位体比分析技術は、まだまだ個別の領域で用いられているが、これらを統合して用いることによって、それぞれの同位体比アイソスケープの不均一性を活用した生息場所推定方法を、多元素同位体トレーサー技術として活用できる。

(2) 顕著な成果

<優れた基礎研究としての成果>

1. 脊椎骨の同位体比を用いて生物の移動履歴を研究する手法の開発

概要: 魚類においては、生息地履歴を調べる手法として耳石が用いられてきたが、炭素、酸素、ストロンチウム以外の元素は微量であり分析が困難であった。本研究では、新たに脊椎骨の成長層(脊椎骨椎体)を時系列に沿って測定することにより、窒素、イオウといった軽元素の同位体比、またアミノ酸窒素同位体比の変化を追跡する手法の開発を行った。本手法は、個体別の生息地履歴を研究する手法として画期的な手法である。

2. 極微量重元素同位体比を用いて海域の地球化学的特徴を明らかにする手法の開発

概要: 海洋生態系の中で生産性が高くかつ人為影響の強い沿岸生態系では、陸域由来の栄養塩や微量元素の流入が生態系の基礎生産を支え、場所の特異性を示す。本研究では、ストロンチウム(Sr)に加え、陸域由来の微量元素、特にネオジミウム(Nd)や鉛(Pb)といった今まで利用されてこなかった元素の同位体比を測定することにより、沿岸海洋生態系の異質性を明らかにした。これは、今まで見えなかった微量な差異を検出する画期的な手法である。

3. アーカイブ試料分析による海域のアイソスケープ(同位体地図)作成

概要: 魚類の耳石や脊椎骨椎体には、時系列同位体情報が蓄積されている。この情報をもとに生息地履歴を復元するためには、元素別のアイソスケープの作成が必要である。本研究では、東北沿岸から北太平洋域で採取された動物プランクトンアーカイブ試料(水産研究・教育機構所有オダテコレクションなど)を活用し、当海域の $\delta^{15}\text{N}$ および一部の海域の Sr・Nd 同位体マップを作成した。これらのマップは、魚類をはじめとする様々な海洋生物の移動履歴研究のための基礎資料として汎用的に用いることができる。

<科学技術イノベーションに大きく寄与する成果>

1. 多元素同位体マッピングを行う上での個別要素に関する技術開発

概要: 生物体や陸水・海水に含まれる Nd は微量であり、Nd 同位体比の生態系への広範な適用には限界があったが、本研究において数ナノグラムの Nd 量でも同位体分析が可能な方法や堆積物吸着体から環境水の Nd 同位体比を求める手法を開発した。また、永田チームと共同で、汽水域など陸域と水域資源が混合する領域で有効な、メチオニン窒素同位体比分析手法の開発を行った。

2. アイソスケープと履歴情報から個体単位の周遊履歴を推定する手法の開発

概要: 魚類の脊椎骨椎体や耳石などの部位から得られる同位体比の時系列情報と、アイソスケープから得られる面的情報から、魚類の個体単位で周遊履歴を推定する統計モデルを開発した。現時点では限られた魚種でしか活用できていないが、今後アイソスケープのデータベースが充実していくにつれて、より確からしい履歴推定が行えると考えられる。

3. 多元素同位体比測定による海産物の産地判別

概要: 食の安全への意識の高まりから、水産物の産地判別には消費者の意識が高まっているとともに、国としては漁業資源管理や資源付加価値の観点も重要になってきている。水産物の同位体による産地判別手法は、遺伝子情報による判別と相補的な手法となりうる。本 CREST 研究によって、多元素同位体比のレベルで海洋の不均一性が明らかになりつつあり、この観点からの応用可能性が広がる。

CREST 目標についての位置付け

本研究で得られた成果は、魚類個体からその生息場所を推定したり、生息地履歴を推定する技術であり、CREST 目標における「海洋環境変化による生物多様性の変動を把握・予測するためのモデルやモニタリング手法の構築により、水産資源量予測の高精度化や環境影響評価の高

度化」の実現に資すると考えられる。

< 代表的な論文 >

Jun Matsubayashi, Yu Saitoh, Yutaka Osada, Yoshitoshi Uehara, Junko Habu, Tsuyoshi Sasaki, Ichiro Tayasu, “Incremental analysis of vertebral centra can reconstruct the stable isotope chronology of teleost fishes” *Methods in Ecology and Evolution* **8**(12): 1755–1763, 2017

Yu Saitoh, Takanori Nakano, Ki-Cheol Shin, Jun Matsubayashi, Yoshikazu Kato, Hiroshi Amakawa, Yutaka Osada, Chikage Yoshimizu, Noboru Okuda, Yosuke Amano, Hiroyuki Togashi, Yutaka Kurita, and Ichiro Tayasu, “Utility of Nd isotope ratio as a tracer of marine animals: regional variation in coastal seas and causal factors” *Ecosphere* **9**(8): e02365, 2018

Naoto F. Ishikawa, Yoshito Chikaraishi, Yoshinori Takano, Yoko Sasaki, Yuko Takizawa, Masashi Tsuchiya, Ichiro Tayasu, Toshi Nagata, Naohiko Ohkouchi, “A new analytical method for determination of the nitrogen isotopic composition of methionine: its application in aquatic ecosystems with mixed resources” *Limnology and Oceanography: Methods* **16**(9): 607–620, 2018
(永田チームとのチーム間連携)

§ 2. 研究実施体制

(1) 研究チームの体制について

① 地球研グループ(陀安班)

研究代表者: 陀安 一郎(総合地球環境学研究所・研究基盤国際センター・教授)

研究項目

- ・総合的軽元素同位体解析による食物網解析技術の開発
- ・脊椎骨椎体を用いた同位体履歴分析手法の開発
- ・アイソスケープ(同位体地図)手法を用いた魚類生息地履歴推定法の開発

② 地球研グループ(中野班)

主たる共同研究者: 中野 孝教(総合地球環境学研究所・名誉教授)

研究項目

- ・沿岸生態系における陸域由来元素指標の確立
- ・極微量ネオジウムアイソスケープ作成による魚類生息地履歴推定法の開発
- ・東北日本太平洋岸域における多元素マップおよびアイソスケープ作成

③ 東北水研グループ

主たる共同研究者: 栗田 豊(水産研究・教育機構・東北区水産研究所・部長)

研究項目

- ・脊椎骨椎体の齢および成長の指標としての有効性の検討
- ・スズキおよびヒラメの多元素同位体を用いた生息環境推定手法の確立と応用
- ・ヒラメ食性の成長および生息場所に依存した変化の解明
- ・バイオロギング・放射性同位体を用いたヒラメの移動推定

④ 東大・大気海洋研グループ

主たる共同研究者: 白井 厚太郎(東京大学・大気海洋研究所・助教)

研究項目

- ・多元素同位体を用いた魚類の移動推定手法の確立と応用

(2) 国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

CREST永田チームとは、期間の途中から ^{14}C 分析を用いたサケ(*Oncorhynchus keta*)の研究やメチオニン窒素同位体比分析に関するチーム間連携課題を行なったほか、大槌地域フィールドキャンペーンに加わり、共同研究を行った。

重元素同位体手法および河川水のNd同位体比を堆積物から求め方法については岡山大学理学部の山下勝行准教授と、また海洋環境におけるNd同位体分析手法に関してはJAMSTECの天川裕史博士と共同研究を行った。

国外においては、University of UtahのGabriel Bowen教授とアイソスケープ手法を用いた産地判別手法に関する意見交換を継続的に行っており、2019年度のJpGUにおいて共同コンペーナーのセッションを設ける。