

同位体環境学と同位体地図を用いた研究の展開

陀 安 一 郎*

1. はじめに：同位体環境学とは？

元素の同位体は、水・大気・生物・土壌など生態系を構成する種々の要素に含まれている。さまざまな元素の同位体比を「指紋」として用いることで、ある物質の産地や発生源、それが生まれるプロセスなどが明らかになると期待される。総合地球環境学研究所（以後、地球研）では、多様な環境物質と多くの元素の同位体比を測定する事によって、地球環境問題の解決に資する共同研究を行っている。地球研では、これを「同位体環境学」と呼び、全国の研究者との共同研究（同位体環境学共同研究事業）を2012年度より進めている。

同位体環境学は、「地球化学」「水文学」「生態学」「地質学」「鉱物学」「人類学」「食品科学（産地判別）」「科学捜査」など、専門的学問領域で活用されている「同位体手法」を、学際的な地球環境学の枠組みで捉えるものである。さらに、社会の中で、本手法をどのように活用することができるかということも考えている。地球研における同位体環境学共同研究事業に関しては、ホームページ (<https://www.chikyu.ac.jp>) や紹介記事（丸尾、床波 2019）をご覧ください。

2. 同位体地図 (Isoscape)

元素の同位体比は、元素の由来や物理的・化学的な反応過程を含んだ情報である。例えば、水の水素・酸素同位体比は、蒸発や凝結にともなって同位体分別 (Isotopic fractionation) が起き、基質と生成物の間で同位体比が変化する。降水の水素・酸素同位体比は、このような物理過程に依存して変動するため予測性が高く、空間的な「同位体比の分布地図」を書くことができる。これを同

位体 (Isotope) から見た風景 (landscape) という意味で、Isoscape と呼ぶ (West et al. 2010)。定訳はないが、ここでは簡単に「同位体地図」としておく。同位体地図を利用すると、その場所の同位体比が直感的にわかる。実際にあらゆる地点の同位体比を測定することはできないので、同位体比が変化する理論を用いたり、実測地点間を内挿したりして、同位体地図は GIS (地理情報システム) 上で作成される。例えば、図1では、モデルにより推定された降水量で重み付けされた、年間平均降水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の例を示す。一般に、標高が高いほど (高度効果)、緯度が高いほど (緯度効果)、内陸になるほど (内陸効果)、気温が低いほど (温度効果)、雨量が多いほど (雨量効果)、 $\delta^{18}\text{O}$ 値は低くなるという特徴がある。

図1は降水の $\delta^{18}\text{O}$ 値の例であるが、同じ地図に他の元素の同位体比を重ね合わせることもできる。図2に示すように、ひとつの同位体地図では「同じ同位体比」を示す場所はたくさんあるが、複数の元素に関する同位体地図を重ね合わせることで、より確からしく場所の特定ができる可能性がある。例えば、汚染源の特定や食品の産地判別に関しては、候補となる場所が出来るだけ限定される方が、場所特定に役に立つことになる。我々

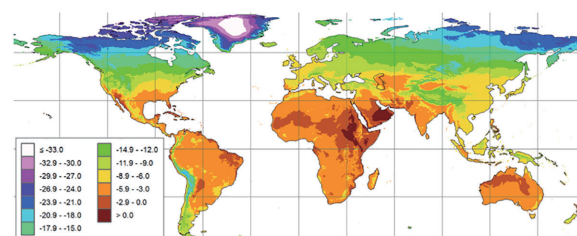


図1. モデルにより推定された降水量で重み付けされた年間平均降水の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$ 値) の例 (Terzer et al. 2013).

*総合地球環境学研究所研究基盤国際センター教授

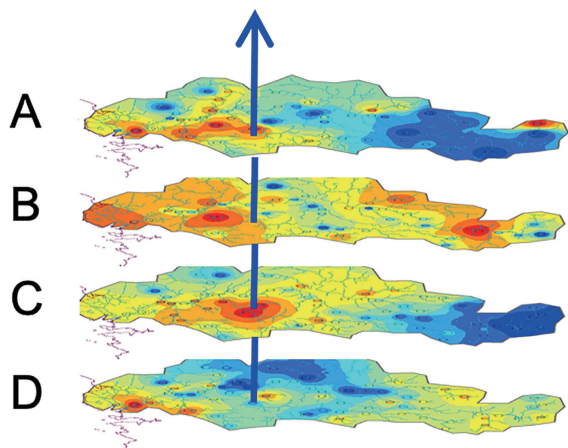


図2. 多元素同位体地図 (Multi-Isoscapes) の概念図. 1つの元素の同位体地図を1枚とした場合, この例ではA~Dの4枚の図を重ね合わせることで, 矢印の地点の特徴が表現される.

はこのやり方を「多元素同位体地図 (Multi-Isoscapes)」と呼び, この研究方法を進めようとしている.

現実的に, 多数の同位体地図を同じ時空間的な解像度で作成することは困難であり, あくまでアイデアの段階であるが, いろいろな元素の同位体比のデータは蓄積しつつあり, 今後多元素同位体地図を用いた同位体環境学アプローチが展開することを期待している. 以下に, 同位体地図を用いた研究例を挙げる.

3. 陸域の同位体地図

植物体の有機物 (セルロース) の $\delta^{18}\text{O}$ 値は, 吸収した水の酸素同位体比と, 光合成が行われるときの植物の蒸散の程度によって決まる (Barbour et al. 2004). 年輪セルロースの $\delta^{18}\text{O}$ 値の年変動は, 蒸散に影響する要素である気温や降水量の年変化を反映するため, 古気候の復元によく用いられる.

一方, 光合成産物で作られる種子の $\delta^{18}\text{O}$ 値は, 同じ蒸散条件下であれば, 吸収した水の「高度効果」によって, 標高が高いほど低い $\delta^{18}\text{O}$ 値を持つ可能性がある. Naoe et al. (2016a) は, この仮説を実際の種子で検証した (図3).

この関係を用いると, 高度方向における動物の「種子散布」の効果を調べることができる. 現在,

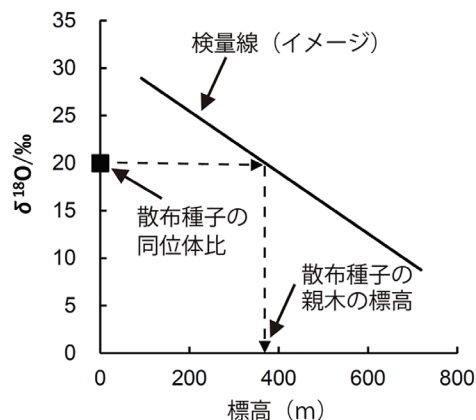


図3. 種子の酸素同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$ 値) と標高の関係 (Naoe et al. 2016a).

地球温暖化が進行しているため, 生物が温暖化による環境の変化に適応するためには, 気温が低い高緯度もしくは高標高へ移動する必要がある. しかし, 植物は自分で移動できないために, 果実を食べ種子を含んだフンをする動物に, どれだけ好条件の場所へ種子を運んでもらうかが重要になる. そこで, カスミザクラとサルナシを対象に, 動物のフンから採取した種子の $\delta^{18}\text{O}$ 値を測定し, 親木との標高差を調べた.

その結果, 春から夏に結実するカスミザクラでは, ツキノワグマによって平均で 307 m 高標高へと散布されていた (Naoe et al. 2016b). これは, この季節に植物の開花・結実が山麓から山頂へと進むため, それに応じてツキノワグマが移動しているからであると考えられた. すなわち, ツキノワグマの種子散布によって, カスミザクラは地球温暖化を回避できる方向へと移動できる可能性があることを示している.

一方, 秋に結実するサルナシを用いて同様の研究をしたところ, ツキノワグマによって平均で 393 m 低標高へと散布されていた (Naoe et al. 2019). これは, 秋には季節が逆に山頂から山麓へと進むため, ツキノワグマもそれに応じて移動するためだと考えられた. すなわち, サルナシにとってツキノワグマによる種子散布は地球温暖化に対して適応的でない可能性があることが示された.

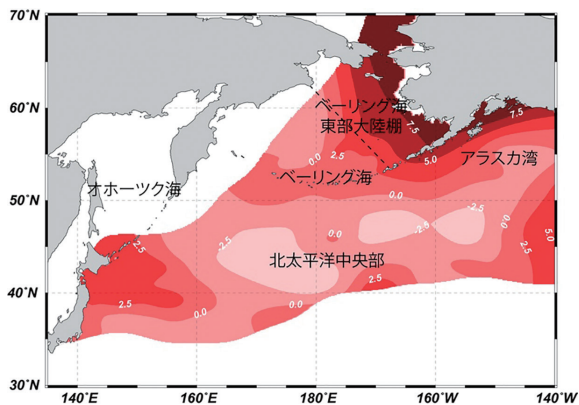


図 4. 北太平洋における窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$ / ‰ 値) の同位体地図. ベーリング海東部の大陸棚では、特に高い同位体比を示す.

4. 海域の同位体地図

陸域と異なり、海域では海水が絶えず移動するため、同位体地図を作成すること自体が難しい。そこで、Matsubayashi et al. (2020) は北太平洋の広域で採取された、ある程度長期に生存する動物プランクトンのアーカイブ試料（水産研究・教育機構のオダテコレクションなど）を利用し、北太平洋域における窒素同位体比の同位体地図を作成した。

北太平洋の広範囲を含む地点を対象に、各地点で採取された動物プランクトン試料の中から北太平洋で優占するカイアシ類 6 種のいずれかを抽出し、試料全体の窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$ 値) の測定を行った。さらに、それらの試料の一部から、アミノ酸の窒素同位体比を測定した。窒素源の値を反映するフェニルアラニンの窒素同位体比から、栄養段階 (TL) による増加分 (0.4‰ / TL) を差し引いて、ベースラインの窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ 値) を算出した。これらのデータを Ocean Data View を用いて地図化したものを図 4 に示す (Matsubayashi et al. 2020)。

5. 魚類の移動履歴の研究

海洋における同位体地図が書けたところで、その同位体比を用いて魚類の移動履歴を推定するためには、どの部分を分析すれば良いであろうか？ 魚類でよく用いられる履歴保持部位は「耳石」である。耳石は付加成長をするため、成長方向に分

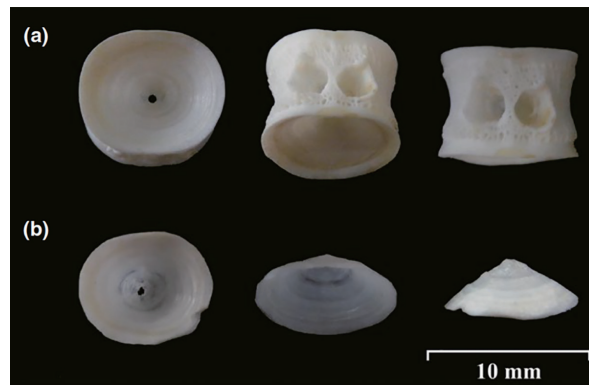


図 5. サクラマスから取り出した脊椎骨 (a) とスポンジ状の骨を除去した椎体 (b) (Matsubayashi et al. 2017)。

析を行うことで生活史に沿った環境・生態履歴を復元可能である。特に、両側回遊魚の耳石に含まれる Sr/Ca 比を用いて、河川・海洋の生息地判別を行う例が多い (Campana 1999)。耳石は炭酸カルシウムを主成分とする結晶であるため、無機態の炭素 ($\delta^{13}\text{C}$)、酸素 ($\delta^{18}\text{O}$) 同位体比は比較的簡単に測定可能である。一方、有機態の炭素 ($\delta^{13}\text{C}$)、窒素 ($\delta^{15}\text{N}$)、イオウ ($\delta^{34}\text{S}$) 同位体比などの測定は難しい。そこで、Matsubayashi et al. (2017) は、脊椎骨の椎体 (図 5) を成長方向に「輪切り」することによって時系列に沿った同位体比の履歴を見られるか検討したところ、 $\delta^{34}\text{S}$ 値の履歴が時系列に沿って残されていることを確認した。

この手法を用いて、北太平洋域を回遊するサケ (通称シロザケ, *Oncorhynchus keta*) の移動履歴を推定した研究を紹介する (Matsubayashi et al. 2020)。まず、北日本の複数河川で採取したサケの脊椎骨を成長方向に 10 分割して、窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}_{\text{Bulk}}$ 値) を測定し、そのうち 2 個体ではアミノ酸の窒素同位体比を測定した。これらから栄養段階の効果を相殺した $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ 値を計算し、図 4 の同位体地図と比較し、サケの回遊経路を個体ごとに推定する統計モデルを構築した (図 6)。

その結果、 $\delta^{15}\text{N}_{\text{Base}}$ 値は、成長の終盤にあたる外側の脊椎骨切片で最も高い値を示し、ベーリング海東部大陸棚 (図 4 参照) がサケの回遊のゴールになっていると推定された。

図 6 に見られる、日本近海から成長に伴って

ベーリング海に移動する部分は既知の経路を確認したものであったが、サケが成長の最後の時期にベーリング海東部の大陸棚へ回遊するという部分は、新たな発見であった。サケは栄養塩に富み生物生産が非常に盛んなベーリング海大陸棚で、甲殻類などの餌を食べて性成熟することで、海での回遊を終えて母川へ回帰することが示唆された。

これらの研究例のように、同位体地図と同位体を保持する物質や生物を用いた研究は発展しつつある研究手法である。今後、幅広い応用を見据えて「同位体環境学」の共同研究を進めていきたいと考えている。

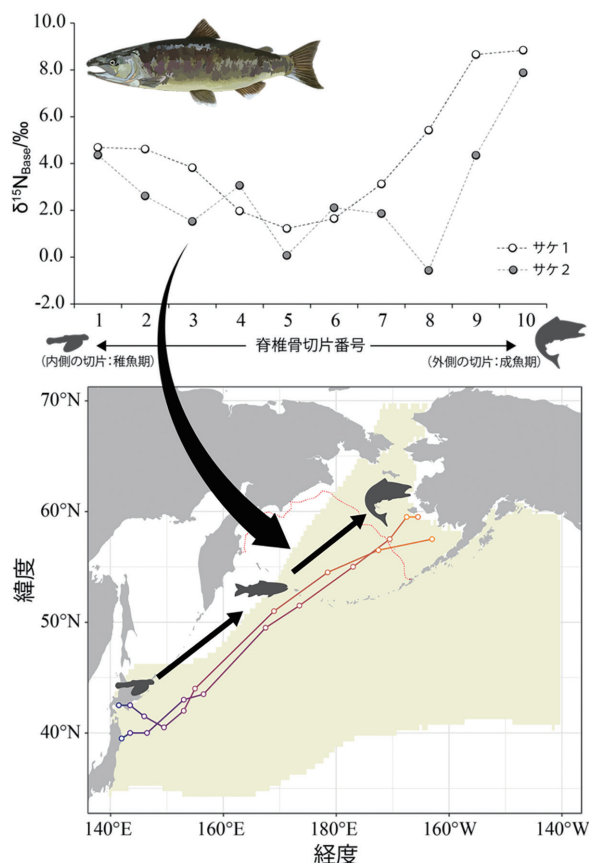


図6. アミノ酸の窒素同位体比分析を実施したサケ2個体の $\delta^{15}\text{N}_{\text{Based}}$ 値の履歴(上図)と、そこから推定された回遊経路(下図). 赤い点線より右が $\delta^{15}\text{N}_{\text{Based}}$ 値の高いベーリング海東部の大陸棚(図4参照)

参考文献

- Barbour MM, Roden JS, Farquhar GD, Ehleringer JR (2004) Expressing leaf water and cellulose oxygen isotope ratios as enrichment above source water reveals evidence of a Péclet effect. *Oecologia* 138: 426–435.
- Campana SE (1999) Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series* 188: 263–297.
- 丸尾雅啓, 床波志保 (2019) こんにちは「大学共同利用機関法人人間文化研究機構総合地球環境学研究所を訪ねて」。*ぶんせき* 2019: 555–557.
- Matsubayashi J, Osada Y, Tadokoro K, Abe Y, Yamaguchi A, Shirai K, Honda K, Yoshikawa C, Ogawa NO, Ohkouchi N, Ishikawa NF, Nagata T, Miyamoto H, Nishio S, Tayasu I (2020) Tracking long-distance migration of marine fishes using compound-specific stable isotope analysis of amino acids. *Ecology Letters*, 23: 881–890.
- Matsubayashi J, Saitoh Y, Uehara Y, Osada Y, Habu J, Sasaki T, Tayasu I (2017) Incremental analysis of vertebral centra can reconstruct the stable isotope chronology of teleost fishes. *Methods in Ecology and Evolution* 8: 1755–1763.
- Matsubayashi J, Umezawa Y, Matsuyama M, Kawabe R, Mei W, Wan X, Shimomae A, Tayasu I (2019) Using segmental isotope analysis of teleost fish vertebrae to estimate trophic discrimination factors of bone collagen. *Limnology and Oceanography: Methods* 17: 87–96.
- Naoe S, Tayasu I, Masaki T, Koike S (2016a) Negative correlation between altitudes and oxygen isotope ratios of seeds: exploring its

applicability to assess vertical seed dispersal. *Ecology and Evolution* 6: 6817–6823.

Naoe S, Tayasu I, Sakai Y, Masaki T, Kobayashi K, Nakajima A, Sato Y, Yamazaki K, Kiyokawa H, Koike S (2016b) Mountain-climbing bears protect cherry species from global warming through vertical seed dispersal. *Current Biology* 26: R315–R316.

Naoe S, Tayasu I, Sakai Y, Masaki T, Kobayashi K, Nakajima A, Sato Y, Yamazaki K, Kiyokawa H, Koike S (2019) Downhill seed dispersal by temperate mammals: a

potential threat to plant escape from global warming. *Scientific Reports* 9: 14932.

Terzer S, Wassenaar LI, Araguás-Araguás LJ, Aggarwal PK (2013) Global isoscapes for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences* 17: 4713–4728.

West JB, Bowen GJ, Dawson TE, Tu KP (2010) *Isoscapes: Understanding movement, pattern, and process on Earth through isotope mapping*. Springer