

法医学で同位体学を利用できるかな？

小山 哲 秀

(新潟大学大学院医歯学総合研究科地域疾病制御医学専攻

地域予防医学大講座法医学)

1. 同位体と法医学って？

皆さんは“法医学”と聞いて何を思い浮かべるでしょうか。最近ではTVドラマでも取り上げられることもあり、以前よりは法医学という言葉が耳にする機会が多くなったと思います。法医学とは、「医学的解明助言を必要とする法律上の案件、事項について、科学的で公正な医学的判断を下すことによって、個人の基本的な人権の擁護、社会の安全、福祉の維持に寄与することを目的とする医学である。(1982年日本法医学教育委員会報告より抜粋)」とされており、日々の業務としては、亡くなられた方の死因を究明することを主としており、数多くの知識と経験と技術を駆使して日々奮闘し、事件や事故、病気などの再発防止を含め、広く社会に還元できることを目標に活動しております。

さて、同位体を利用した研究は、法医学に関連する犯罪捜査の分野でも利用されています。例えば、炭素や窒素の同位体比の組み合わせによって、南アメリカ地方で生産されたコカインがどこで作られたか、地理的起源の追跡に利用されたりしています (Ehleringer JR et al. 2000)。また、染田らは、戦没者遺骨に対して、日本人と米国人とを判別する方法として同位体を用いた識別法を開発し、100%の正答率を得ました (Someda et al. 2016)。とりわけ、法医学で重要事項の1つである身元を確認する方法として同位体を利用できる可能性は、とてもエキサイティングなチャレンジだと考えています。まさに、元素の安定同位体比という「指紋」を手がかりにヒトを科学する重要なアプローチになると確信しています。

2. 行方不明者の身元を探るには？

ここで、筆者も同位体を用いた行方不明者の身元推定するツールを確立すべく注目したのが水素と酸素同位体比です。人の体の水分量は約60%程度とされています。その水の供給源は、多くの人の場合、食事や飲水から得られる水にあたる、水道水が占めることとなります。当然ながら、水は酸素と水素により構成されておりますので、体内に存在する水素と酸素元素は概ね水道水由来であることが想定されます (図1)。

2008年に米国における水道水の酸素および水素同位体比には地域差があり、ヒトの毛髪中の水素と酸素同位体比と高い相関性があることが報告されました (Ehleringer JR et al. 2008)。この検討では、広い国土を持つ米国で行われており、水質や環境状況が異なるため、日本での応用が可能かどうかは不明です。そこで、日本においてもヒト由来試料と水道水安定同位体比から居住域を推定するツール作成が出来ないか検討を行っております (図2)。

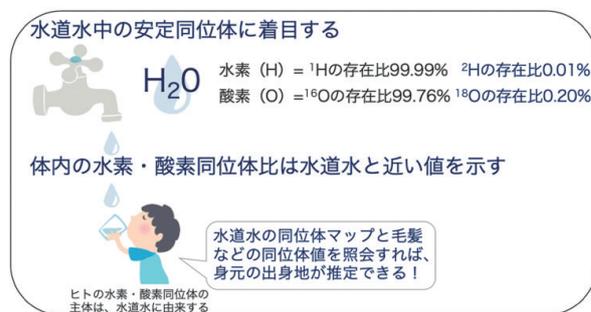


図1. 本研究のコンセプト



図2. 本研究の目的

3. 高い壁 (=課題) を乗り越えられるのか？

本検討を実施するにあたっては解明すべきポイントがいくつかあります。まず、環境水ではなく水道水を利用する点です。水道水に関しては、①水道水中の同位体比は地域によって差を生じうるのか？ ②どの程度の地域差が生じているのか？ ③環境水で認められる同位体比の季節性および経年変化による数値変動はあるのか？ こういった疑問を一つ一つ丁寧に解決し、水道水同位体マップを作成することが目標となります。

現在のところ、新潟県内数百箇所の水道水を採水し、同位体マップの作成を行っております。本稿では、具体的なデータの公表は今後の研究のために控えさせていただきますが、地域差や数値変動においては極めて興味深いデータが得られており、鋭意発表出来るよう準備を進めております。

次に、居住域を推定するにあたっては、①既報と同様に、水道水と居住する者の毛髪中同位体に相関性が認められるのか？ ②様々な背景を持つ法医サンプルにおいても、居住域の推定は可能なのか？ ③毛髪以外のヒトサンプルでも、同じような検証は可能なのか？ このような視点から、解析を進めることによって、最終的に今後利用可能なツールとしての確立を目指していきます。

4. 法医学における同位体の可能性と目指すもの

筆者が経験してきた研究背景は、同位体とは全く無縁の世界です。そんな中、同位体の魅力に惹き込まれ、幸運にも研究をさせて頂くこととなりました。今回、不分相応にも本稿を書かせていただくにあたり、“法医学分野における同位体をどうやって表現すれば最も伝わりやすいのだろうか？”と思案しておりましたところ、地球研のホームページの同位体環境学共同研究事業内に、「元素の安定同位体比という「指紋」が内在しています」という記述に救われた記憶があります。まさに同位体が指紋と同じような身元推定法の1つとなればこれ以上幸せなことはありません。

法医学分野で身元を推定する方法としては、歯

型や指紋・掌紋に代表される身体的特徴によるものや、DNA 型による個人固有の遺伝情報によるものがあります。これらは、個人を特定する能力はありますが、対象者の情報が必要となります。一方、同位体を用いた本研究では、個人を特定することは難しいと思いますが、どの地域に居住していたかを推定することは可能であろうと考えています。将来的な展望としては、身元不明者の個人特定法として、同位体による地域推定と、歯型や DNA 型などを組み合わせた方法が確立出来れば、これまで以上に身元不明者を減らすことが出来るかもしれません。本研究を広く社会の皆様に還元出来るよう、一生懸命頑張ります。

文献

- Ehleringer JR, Casale JF, Lott MJ, Ford VL. Tracing the geographical origin of cocaine. *Nature*. 408(6810):311-2 (2000) DOI: 10.1038/35042680
- Someda H, Gakuhari T, Akai J, Araki Y, Kodera T, Tsumatori G, Kobayashi Y, Matsunaga S, Abe S, Hashimoto M, Saito M, Yoneda M, Ishida H. Trial application of oxygen and carbon isotope analysis in tooth enamel for identification of past-war victims for discriminating between Japanese and US soldiers. *Forensic Sci Int*. Apr; 261:166. e1-5. (2016) DOI: 10.1016/j.forsciint.2016.02.010.
- Ehleringer JR, Bowen GJ, Chesson LA, West AG, Podlesak DW, Cerling TE. Hydrogen and oxygen isotope ratios in human hair are related to geography. *PNAS*. Feb 26;105(8):2788-93. (2008) DOI: 10.1073/pnas.0712228105.

著者情報



小山哲秀（新潟大学医学部法医学教室助教）2011年4月から2016年9月まで新潟大学研究機構超域学術院・助教、同年10月から新潟大学脳研究所システム脳病態学分野・特任助教を経て、2017年4月から新潟大学医学部法医学教室・助教、同年7月から新潟大学大学

院医歯学総合研究科死因究明教育センター（兼任）。

（2020年3月31日掲載）

古代人の暮らしを解き明かす同位体分析

— 海産魚はどこから運ばれたのか？ —

石丸 恵利子

（広島大学総合博物館）

1. 遺跡の骨・貝が語るもの

私たち日本人は、古くから陸産資源だけでなく、日本列島近海で採取できる貝類や魚類などの豊富な海産資源を利用してきました。これらは当時の自然環境がどのようなものであったのかを示すものであり、かつ人々にとってそれらは重要な食資源でもありました。その証拠は多くの遺跡に残されています。日本列島は火山灰性土壌であるため酸性を帯び、また細菌やバクテリアなどによって、地中に埋没した軟体部や骨などの有機物は、その多くが分解され消失してしまいます。しかし、貝殻の集積によってややアルカリ性を帯びる貝塚や、低湿地のような嫌気的環境においては有機物が残りやすく、数千年前に利用された貝殻や骨の一部が発掘調査によって現代によみがえります。

発掘された貝殻や骨は動物遺存体と呼ばれ、過去における様々な情報を持つ貴重な資料となります。たとえば沿岸部の貝塚では、ハマグリやサザエ、アサリなどの多様な海産貝類はもちろん、マダイやクロダイ、スズキなどの海産魚類やイノシシやニホンジカなどの哺乳類が確認され、その地で暮らした人々が多様な動物資源を利用していたことを知ることができるのです。日本列島には、縄文時代から、近世・近代に至るまで、動物遺存体が出土するたくさんの遺跡が発見されています。それらの出土資料によって、各時代また各地域での豊富な資源利用の様相を知ることができます。また大きさを調べたり、表面に残る石器や金属器などによる人為的な痕跡を観察し、解体痕や調理の痕跡を調べたりすることで、当時の文化や技術を明らかにすることもできるのです。

2. 運ばれた海産資源が遠隔地とのつながりを示す

遺跡から出土する動物遺存体のなかには、当時の人たちが遠隔地へ移動したこと、あるいは物資を運搬していたことを示すものが発見されることがあります。たとえば縄文時代、中国山地に所在する帝釈狭遺跡群からは海に棲むエイ類の尾棘とハマグリやサルボウなどの海産貝類が出土しています。また奈良盆地の橿原遺跡からはマダイやスズキ、フグなどの海産魚類とクジラの骨が確認されています（丸山ほか 2011）。両遺跡は、現在の海岸線から直線距離にして前者が約 60 km、後者は約 30 km 内陸に位置しています（図 1）。また中世・近世には、平安京左京北辺四坊跡などの京都の多くの遺跡で、ハマグリやサザエ、またマダイやハモ属、ブリ属などの多様な海産物が出土しています（富岡 2004 など）。

それでは、これらの海産資源はどの海域で採れたものが運ばれてきたのでしょうか。その産地を明らかにすることができれば、縄文時代の人の移動や交流範囲、また中世・近世のもの流通圏やそのルートの解明に一石を投じることができそうです。

3. 炭素・窒素同位体分析から魚の産地を読み解く

魚の種や部位は、骨の形態によって同定することができますが、瀬戸内海のマダイと日本海のマダイを形態で区別することはできません。そのため、これまで海産資源の産地や流通ルートについては具体的に論じることができていませんでした。なお、イノシシやニホンジカについても、骨の形態で生息域を知ることはできないため、狩猟



図1. 海産資源が運ばれた内陸部の遺跡と周辺の主な遺跡分布

場所が遺跡の近くであったのか、それとも遠隔地から交易品として持ち込まれたのか、これらを証明するには至っていないのが現状です¹⁾。

そこで私は、炭素・窒素同位体比によって魚の産地を明らかにできないかと考えました。これまで考古学研究では、ヒトの食生態を解明するために人骨の炭素・窒素同位体分析が行われていました。また、同位体比が他と大きく異なる値を持つイノシシ属の存在から、人から餌を与えられた家畜種の可能性なども検討され始めていました。食べ物の違いで地域や時代によってヒトの同位体比が異なるならば、魚においても海域によって餌やそれらの同位体比が異なる可能性があり、炭素・窒素同位体比によって魚の生息海域を区別できるのではないかと考えたのです。

最初にこの挑戦的な研究の試みに理解を示していただいたのが地球研の陀安先生（当時、京大大学生態学研究センター）です。センターに通い、最初に日本近海で捕獲した現生のマダイ、クロダイ、スズキ、メジナを用いて、各魚の炭素・窒素同位体比を測定しました。マダイ、クロダイ、スズキは多くの遺跡から出土する代表的な種であり、現在でも多く食べられています。メジナも日本列島近海に広く分布しています。前3種は骨資料において同位体比を測定し、メジナについては筋肉部を用いました。

分析の結果、いずれの種においても瀬戸内海産

のもの窒素同位体比が高く、日本海産では低い傾向が認められました（図2、3）。太平洋産はほ

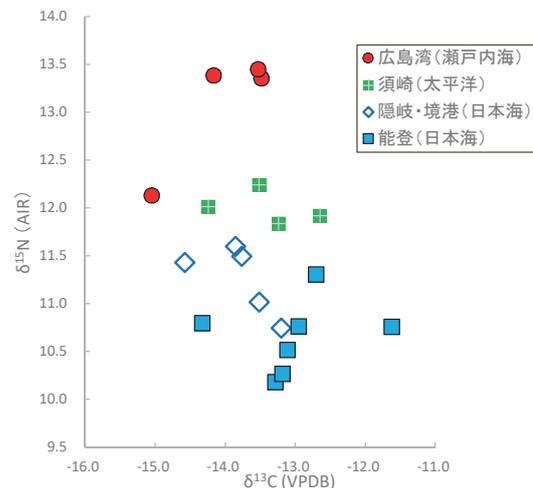


図2. 現生マダイの炭素・窒素同位体比
*石丸ほか (2008) を改変

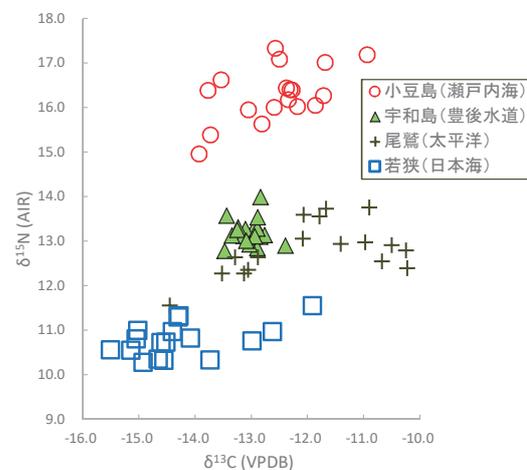


図3. 現生メジナの炭素・窒素同位体比
*石丸ほか (2008) を改変



写真 1. 遺跡出土魚骨から抽出した骨コラーゲン

はその中間の値を示しました (石丸ほか 2008)。

4. 遺跡から出土する魚の産地はどこなのか

現生資料の分析によって、同一魚種においても海域で同位体比が異なることが明らかとなったため、次に遺跡資料での分析を行いました。出土資料より骨コラーゲンを抽出し、同位体比を測定しました (写真 1)。ここでは幕末から近代にかけて宿駅「四日市宿」として栄えた四日市遺跡 (広島県) と、中世から近世の公家屋敷地跡である平安京左京北辺四坊跡 (京都府) から出土したマダイの産地について検討した結果を紹介します。

四日市遺跡は瀬戸内海から約 20 km 内陸に位置し、アカニシやアワビ、ハマグリなどの海産貝類に加え、マダイ、スズキ、ヒラメ、サメなどが出土しています (石丸 2007)。距離的にも瀬戸内海産のものである可能性が高いのですが、同位体分析の結果、窒素同位体比が高く、瀬戸内海沿岸域に位置する遺跡の同位体比と同様な値を示しました (図 4)。スズキやクロダイについても同様な特徴が認められたことから、四日市遺跡には瀬戸内海から多くの海産物が運ばれたと結論付けました (石丸ほか 2008、Ishimaru et al. 2011)。

一方、平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの同位体比は多様な値を示しました (図 5)。京都は平安京遷都以来、政治や産業、文化などが栄えた日本の中心的な都市のひとつです。各地から様々な物資が運ばれたであろうことは言うに及びませ

ん。京都の公家および武家屋敷跡や町屋跡からは、瀬戸内海では取れなかった可能性が高いカツオやマグロ属、日本海から運ばれたと考えられるマダラやサバ属なども報告されています。このような魚類の出土組成からみても平安京出土マダイの同位体比が多様であるのは、各海域で捕れたマダイが運ばれたからではないかと推測されます。窒素同位体比が低く、上長浜貝塚や米子城跡のマダイと同様な値をもつ資料は、日本海産のマダイかもしれません。

また、中世以降に貿易都市として栄えた博多遺跡群 (福岡県) においても、出土するマダイの同位体比は多様な値が得られ、遺跡の前面に広がる

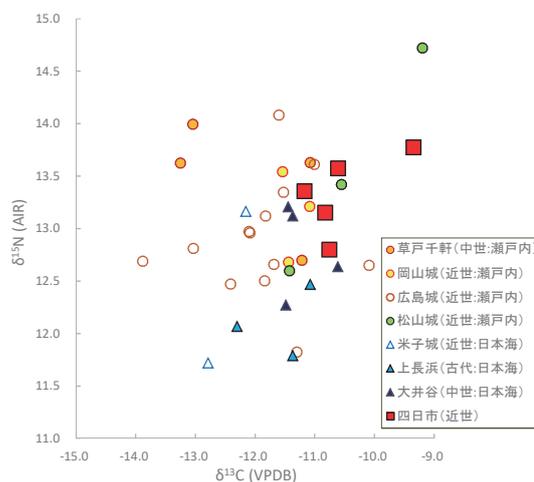


図 4. 四日市遺跡出土マダイの炭素・窒素同位体比
* 石丸ほか (2008) を改変

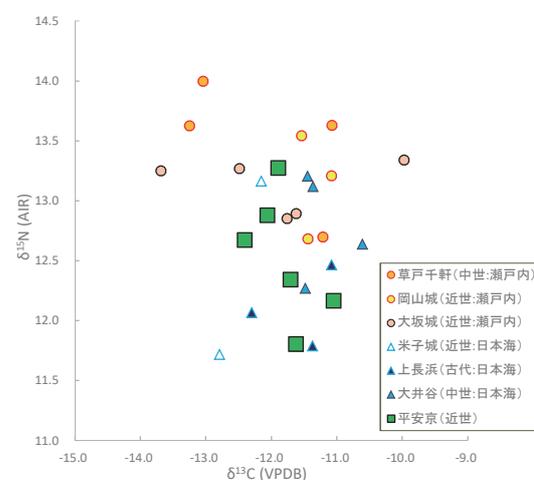


図 5. 平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの炭素・窒素同位体比

* Ishimaru et al. 2010 を改変

玄界灘（日本海）だけでなく瀬戸内海産のマダイも流通していた可能性が高いことがうかがえました（米田ほか2010、石丸2014）。

5. 古代人の暮らしを解き明かす、同位体分析の可能性

これまで記したように、炭素・窒素同位体分析は考古学研究において、ヒトの食生態の解析や魚類の産地推定など、歴史を明らかにする重要な指標となっています。ここでは、流通網が発達し、海産物が遠隔地へと運ばれるようになる中世・近世の遺跡における魚類の産地推定についての研究成果を紹介しましたが、縄文時代の遺跡でも漁撈域や過去の水域環境を推定する上で有益な結果が得られていますので、これらの成果についても少し紹介します。

例えば、青森県にある三内丸山遺跡や東道ノ上(3)遺跡から出土したマダイとスズキの炭素・窒素同位体比を比較すると、両遺跡ではやや違いが認められました（石丸2011）。三内丸山遺跡は陸奥湾の奥部に位置し、東道ノ上(3)遺跡は太平洋側で現在は汽水湖になっている小川原湖南西の内陸部に位置しています。共に縄文時代前期を中心とした遺跡です。同位体分析の結果、マダイの炭素・窒素同位体比は、三内丸山遺跡よりも太平洋側に位置する東道ノ上(3)遺跡の方が共に高く、スズキについても同様の傾向が示されました。これは、両遺跡の漁撈域が異なっていたことを示しています。

また、房総半島周辺地域の縄文遺跡でも興味深い結果が得られました。現在の東京湾側に位置する遺跡と、現在の銚子方面から利根川低地に当時広がっていた古鬼怒湾側に位置する遺跡では、同位体比に違いが認められました²⁾。これまでの分析で、測定数が少ない魚種では比較が困難ですが、スズキについては顕著な違いが認められました。東京湾側の遺跡では炭素・窒素同位体比が共に高い一方で、古鬼怒湾側の遺跡では両値が低いという興味深い結果が得られました。これらの結果か

らも、両遺跡ではスズキの漁撈域が異なっていたことが示唆されます。

以上のように、海産魚類の炭素・窒素同位体分析によって、遺跡から出土する魚類の産地や漁撈域を明らかにする研究が進められ、様々な情報が得られています。これは海域によって海産魚類の同位体比が異なることを利用したのですが、出土資料の同位体比は当時の古環境や魚類の古生態を知るための有益な情報でもあります。動物資源利用の様相や当時の食文化、ヒトの移動やものの流通の歴史をより具体的に明らかにするためにも、各地域・各時代の遺跡から出土する貴重な文化財である海産魚類の炭素・窒素同位体分析を適切に進め、分析データを蓄積することが課題だと思います。

註

- 1) イノシシやニホンジカの産地（狩猟域）を明らかにするため、現在、歯エナメルストロニウム同位体分析を進めており、これらの研究成果については別の機会に紹介したいと思います。
- 2) 縄文時代前期から後期頃、房総半島一体は現在の海岸線が深く入り込み（縄文海進）、東京湾側を「奥東京湾」、霞ヶ浦側を「古鬼怒湾」と呼びます。

文献

石丸恵利子（2007）西条盆地の動物遺存体と骨利用「広島大学東広島キャンパス埋蔵文化財発掘調査報告書」Ⅳ、広島大学埋蔵文化財調査室、pp. 539-548

石丸恵利子・海野徹也・米田穰・柴田康行・湯本貴和・陀安一郎（2008）海産魚類の産地同定からみた水産資源の流通の展開 — 中四国地方を中心とした魚類遺存体の炭素・窒素同位体分析の視角から —、「考古学と自然科学」57、pp. 1-20

石丸恵利子（2011）三内丸山遺跡および東道ノ上

(3) 遺跡出土魚類と哺乳類の炭素・窒素同位体分析「特別史跡三内丸山遺跡年報」14、青森県教育委員会、pp. 21-26

石丸恵利子 (2014) 同位体分析からみた水産資源の流通、「季刊考古学」128、pp. 47-49

富岡直人 (2004) 動物遺存体の分析「平安京左京北辺四坊跡」本文編、財団法人京都市埋蔵文化財研究所、pp. 342-356

丸山真史・橋本裕子・松井章 (2011) 橿原遺跡出土の動物遺存体「重要文化財橿原遺跡出土品の研究」奈良県立橿原考古学研究所、pp. 281-294

米田穰・覚張隆史・石丸恵利子・富岡直人 (2010) 骨の同位体分析から中世博多の人々の生活に迫る「市史研究ふくおか」5、福岡市博物館市史編さん室、pp. 33-49

Ishimaru E, Tayasu I, Umino T, Yumoto T (2011) Reconstruction of Ancient Trade Routes in

the Japanese Archipelago Using Carbon and Nitrogen Stable Isotope Analysis: Identification of the Stock Origins of Marine Fish Found at the Inland Yokkaichi Site, Hiroshima Prefecture, Japan. The Journal of Island & Coastal Archaeology 6-1:160-163.

著者情報



石丸恵利子 (広島大学総合博物館研究員) 2008年京都大学大学院人間・環境学研究科博士後期課程研究指導認定退学。1991年ニッカウキスキー株式会社、2008年総合地球環境学研究所プロジェクト研究員、2013年徳島大学埋蔵文化財調査室特任助教などを経て2014年4月より現職。

(2020年3月31日掲載)

縄文人の集団間の移動を ストロンチウム同位体比から調べる

日 下 宗一郎

（東海大学・海洋学部・海洋文明学科）

1. 縄文時代の古人骨と抜歯風習

縄文時代人は、約16500年～2300年前の日本列島に居住していた人々です。稲作農耕を始める前の時代で、狩猟・採集・漁労をなりわいとしていました。彼らは堅穴建物に住む定住的な暮らしをしていました。森林からはクリやドングリといった堅果類を採集して貯蔵していました。また、弓矢や槍を用いてニホンジカやイノシシなどの陸上哺乳類を狩猟していました。沿岸部では、魚や貝をとって食べていました。それらが捨てられて堆積した貝塚遺跡からは、多様な魚貝類の種類が見つかります。また、縄文時代人には貝塚に亡くなった人を埋葬する風習があり、土壌が貝殻のアルカリ性になることで、保存状態の良い古人骨が貝塚から多く見つかります。

貝塚遺跡から発掘される縄文時代の古人骨は、当時の生活を知る上で貴重な資料です。人の骨を見ると性別や死亡した年齢が分かります。歯が残っていると、虫歯や歯周病などの跡を観察することができます。また、副葬品や埋葬姿勢などを検討すると、当時の埋葬に関する風習を検討することが可能となります。

古人骨に見られる社会的な風習として、生前に人の歯をわざと抜く抜歯風習があります。抜歯風習は、縄文時代の後・晩期（約3100～2300年前）には多くの個体が行っていたため、成人儀礼であろうと推定されています。

抜歯風習の中でも、前歯のうち、下顎の切歯を抜く人と、下顎の犬歯を抜く人がいました。人によって歯を抜く部位が異なることは、縄文時代の社会の中における何らかの個人の役割を表してい

た可能性があります。考古学的には、切歯を抜く人が副葬品とともに埋葬されることが多かったため、集団の在地の人で、犬歯を抜く人が移動してきた人で、この在地者と移入者が結婚したことを抜歯が表していると考えられてきました。このような過去のことに関する仮説は、様々な観点から検証を加えることが必要です。そこで、同位体分析の手法を用いて、仮説を検証できないかと考えました。

2. 移動を調べるストロンチウム同位体分析

この問題に対して、検討を加えることができるのは、ストロンチウム同位体分析という手法です。ストロンチウム（Sr）はアルカリ土類金属で、2価の陽イオンとなります。生物の必須元素ではないのですが、生体のうち骨や歯に多く含まれています。地球化学の分野では、環境の中で地質によってストロンチウムの同位体比に変動があることが知られていました。これは場所によって、同位体比に違いがあるということです。また、生態系の中でこの元素も循環をしています。岩石が風化してSrが環境中に供給されます。水に溶けるので、植物や動物が吸収します。人も水や植物や動物を摂取するので、Srを体内に取り込みます。炭素や窒素の同位体と違って、Srの場合は食物が取り込まれる過程で同位体比の上昇が生じません。そこで、ある地域に生息する生物は、その地域の地質に由来するSr同位体比を示すこととなります。このことを利用すると、地質が異なり、Sr同位体比が異なる場所の間を生物が移動すると、その生物の体組織の同位体比を測定すれば、移動



図 1. 吉胡貝塚から出土した人骨（復元模型）

した個体を検出することが可能であることを示唆しています。地球研には、Sr 同位体比を測定することのできる大型の装置があり、これを利用して古人骨のストロンチウム同位体分析を行うことにしました。

研究の対象にしたのは、愛知県の南部に位置し、三河湾の沿岸にある貝塚遺跡です。縄文時代の後・晩期の吉胡貝塚からは多数の古人骨が出土しています（図 1）。この遺跡から出土した古人骨には、抜歯風習を観察することができます。そこでこれらの遺跡を研究対象としました。

人の移動を検出する前に、まず環境中の Sr 同位体比の分布を調べることにしました。これには、現代の樹木の葉を集めて、Sr 同位体比を調べました。その地域の生物が利用している Sr の値を知る必要があったので、動物と違って動くことのない植物を用いました。遺跡周辺から 5 km メッシュを基準に多くの地点から植物の葉を採取しました。分析には植物の葉を燃やして灰にして、塩酸で溶かして、いくつかの手順で分析することで Sr 元素を抽出します。そしてその同位体比を質量分析装置を用いて測定しました。すると、植物の Sr 同位体比には地域差があることが分かりました（図 2）。とくに三河湾の北の地域で値が高く、南の地域で値が低いことが分かりました。同位体比の分布の違いを示す地図のことを、同位体比地図と呼びます。この地域差の解釈のために、この地域の地質図を検討すると、北の地域が火山性の地質から成っていて、南の地域は堆積岩や石灰岩

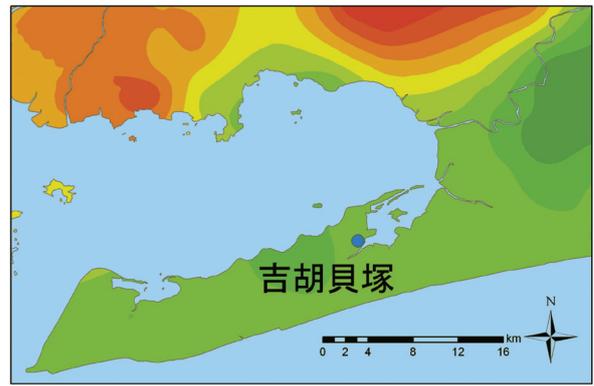


図 2. 吉胡貝塚周辺の Sr 同位体比地図（赤色が同位体比が高く、緑色が低い地域）

などから成っています。同位体比地図と地質図を比べてみると、地質の違いに応じて、環境中の Sr 同位体比が異なっていることが推定されます。地域によって値が異なることは、Sr 同位体分析によって、この地域で生物の移動が解析可能なことを示唆しています。

3. 移動していた縄文時代人

そして、古人骨の Sr 同位体比を測定しました。古人骨の場合は、肋骨と歯のエナメル質を分析に用いました。歯の表面に見える白い部分はエナメル質と呼ばれるとても硬い組織です。歯は子どもの頃に形成されます。歯が虫歯になって削っても再生されないように、歯のエナメル質は成人後に作られることはありません。歯のエナメル質は子どもの頃に摂取された食物から合成されていて、その Sr 同位体比は子どもの頃に住んでいた地質に由来します。いっぽうで、骨は、骨折しても治るように、破壊と再生を繰り返していますので、成人後に住んでいる場所の値を反映しています。また、歯のエナメル質は有機物が含まれずとても密な組織であるために、埋葬中に地下水の Sr が混入してしまうことがありません。しかし、骨は多孔質なため、地下水から Sr が混入してしまう特徴があります。

骨や歯の分析のためには、デンタルドリルを用いて約 3 mg の粉末試料を削ります。そして植物の場合と同じように、Sr を抽出して同位体比を

測定しました。その結果を図3に示しています。吉胡貝塚から出土した人骨のSr同位体比は、大きな変動を示しました。とくに歯のエナメル質の同位体比のばらつきが大きいことが分かります。このことは、子どもの頃に、他の場所に住んでいた移入者を含んでいる可能性を示しています。骨の値をみてみると、変動が小さいことが見てとれます。骨は遺跡の地下水の影響などで、その値が生前の値から変化している可能性もあります。

ここで、縄文時代人の食資源を考えると、大きく分けて、陸上資源（植物と陸上哺乳類）と海産資源（魚貝類）があります。陸上資源のSr同位体比は、現生の植物の値を参考に推定しました。吉胡貝塚の周辺の植物の値は低い値を示します。いっぽうで、海水のSr同位体比は0.7092という一定の値を示し、海水からSrを吸収する海産資源も一定の値を示します。縄文時代人の食物のSr同位体比はこれらの値の範囲だと考えられるので、その範囲を在地の値の範囲と推定しました。すると、骨の値はほとんどその範囲に入り、成人の頃に住んでいた場所の値であり、また地下水の影響などもあるため、その範囲に入ると考えられます。しかし、歯のエナメル質の同位体比をみると、その範囲に入る個体と、範囲から外れる個体がいます。これは何を意味しているのでしょうか。

歯のエナメル質の値が、在地の値の範囲に入る個体は、子どもの頃も吉胡貝塚に住んでいた個体

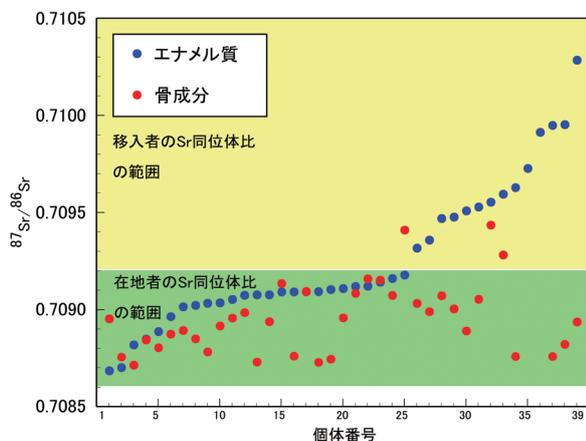


図3. 吉胡貝塚出土人骨の骨成分と歯のエナメル質のSr同位体比

であることが推定されます。このような個体は集団内における在地者と呼ばれます。ほかに在地の値の範囲から外れる個体が見られます。このような個体は、子どもの頃に吉胡貝塚以外の場所で生活をしてきた個体であり、集団内の移入者であろうと推定することができます。とくに、植物の値から作成したSr同位体比地図を見てみると、吉胡貝塚のある渥美半島や浜名湖周辺で同位体比が低く、北の地域で値が高いことが分かります。吉胡貝塚の移入者は、北の地域で生まれ育った可能性があることが示唆されます。

そして、性別ごとに見てみると、男性にも女性にも移入者が含まれていることが分かりました。縄文時代には男女ともに集団間を移動していたようです。また、抜歯のグループごとに見てみると、切歯を抜く個体と犬歯を抜く個体のどちらのグループにも移入者が含まれているという結果になりました。考古学的には切歯を抜く個体が在地者で、犬歯を抜く個体が移入者であろうと推定されてきましたが、Sr同位体比からはどちらにも在地者と移入者が含まれている結果となりました。歯を抜くパターンは、人の移動とは対応をしていなかったようです。

4. おわりに

このように、古人骨のSr同位体比を測定することで、過去の人の移動について調べることが可能となります。亡くなった人の骨は、個人の来歴について話すことはできませんが、その同位体分析によって過去の人の移動について雄弁に語ることができます。このほかにも、古人骨の炭素や窒素の同位体比を測定すれば、過去の食性を調べることが可能ですし、動物骨の炭素同位体比を分析すれば過去の古環境を調べることが可能となります。これからも、さまざまな元素の同位体を用いることで、過去の人の歴史について詳しく明らかにしていきたいと考えています。

文献

Kusaka S, Ando A, Nakano T, Yumoto T, Ishimaru E, Yoneda M, Hyodo F, Katayama K, (2009) A strontium isotope analysis on the relationship between ritual tooth ablation and migration among the Jomon people in Japan. *Journal of Archaeological Science* 36: 2289-2297.

<https://doi.org/10.1016/j.jas.2009.06.013>

日下宗一郎 (2012) 「縄文時代人の食性と集団間移動－安定同位体分析による試論－」 *考古学研究* 59 : 92-102.

日下宗一郎 (2018) 「古人骨を測る 同位体人類学序説」 京都大学学術出版会

著者情報



日下宗一郎 (東海大学海洋学部海洋文明学科 講師) 2011 年京都大学大学院理学研究科修了、博士 (理学)。2014 年総合地球環境学研究所プロジェクト研究員、2015 年ふじのくに地球環境史ミュージアム主任研究員・准教授などを経て、2019 年より現職。

(2020 年 3 月 31 日掲載)

リヤマとアルパカ

— アンデス文明動物飼育物語 —

瀧 上 舞

（山形大学／国立歴史民俗博物館）

1. はじめに

軽くて柔らかくて暖かいアルパカセーターは、世界中で大人気の防寒具です。近年は日本でも入手しやすくなったアルパカウール製品ですが、もともとはアンデス文明で開発された資源だったということはあまり知られていません。南米アンデス山脈の周辺で発展したアンデス文明には牛や馬、羊が存在せず、その代わり大型の家畜動物としてリヤマとアルパカが飼育されていました。毛は衣類に、肉は食物に、骨は道具に加工され、さらに荷物の運搬力としても利用されており、リヤマ・アルパカは多用途な家畜として経済的な寄与の大きい動物でした。

リヤマとアルパカは、野生のグアナコとビクーニャから家畜化されました（以下、リヤマ・アルパカ・グアナコ・ビクーニャをまとめて表現する際はラクダ科動物と呼びます）。ラクダ科動物は過酷な環境への耐性が強く、特にアルパカは高地に適応しています。ラクダ科動物の家畜化は高地高原で生じ、その後、標高の低い山間部や低地にも飼育が伝播したと考えられています。家畜化が生じた時期については、単一起源説と他地域起源説の両方が存在しています。近年ではアルゼンチンやチリの高地を含む他地域起源説を支持する研究者が増えています。リヤマは4200-2000 BCの間に、アルパカは5000-4000 BCの間に家畜化されたと推測されています。

家畜化されたラクダ科動物は各地に伝播しましたが、その時期や段階的な伝播の変遷については、未だ全容が明らかになってはいません。多用途な家畜であることから社会の発展に果たした役割は

大きく、アンデス文明の研究者はラクダ科動物飼育の伝播過程や、管理の実態、利用規模などに注目してきました。

ラクダ科動物飼育の推定方法には、動物考古学的調査の長い歴史があります。ラクダ科動物骨の体サイズや歯の形態変化、出土骨中のラクダ科動物の割合やシカ骨との割合の変化、ラクダ科動物の年齢分布の変化など、飼育の開始は動物骨から得られる様々な指標で検証されてきました。近年では、これらの動物考古学的調査に加えて同位体比分析を行うことで、より確かな飼育推定を行った報告が増えてきています。私たちの研究チームもパコパンパ遺跡のラクダ科動物について調査を行いました。

2. パコパンパ遺跡

パコパンパ遺跡はペルー北部高地に位置する巨大な神殿建築です（写真1）。標高2,500mのアンデス山脈東斜面上部に位置します。この遺跡はラクダ科動物飼育の伝播過程において、注目すべ



写真1. パコパンパ遺跡遠景

き遺跡の一つです。なぜならば、パコパンパ遺跡は過去の野生ラクダ科動物の分布域外だったと考えられているからです。それにも関わらず、1200-700 BC のパコパンパ I 期（PC-I 期）からラクダ科動物の骨が出土し始めます。続くパコパンパ II 期（700-400 BC、PC-II 期）には、ラクダ科動物の骨の出土量が急増します。したがって、PC-I 期に極僅かなラクダ科動物がヒトの手を介して遺跡に存在し、PC-II 期にはラクダ科動物の管理・利用形態が大きく変化したという可能性が考えられます。パコパンパ遺跡に、いつ・どんな形でラクダ科動物とその飼育方法が伝わったのかを明らかにすることは、ラクダ科動物資源の利用変遷の研究に一つのマイルストーンを置くことが期待できます。私たちの調査チームはパコパンパ遺跡におけるラクダ科動物の飼育を明らかにするため、同位体比分析を行いました。

3. ストロンチウム同位体比による出身地推定

まず行ったのはストロンチウム同位体比分析です。ストロンチウム(Sr)の同位体比は地域によって異なっており、水を通してその地域に生息する植物から動物へと反映されます。特に動物の歯には、歯が形成される幼少期に過ごした地域のストロンチウム同位体比が記録されています。遺跡から出土する動物の歯のストロンチウム同位体比を分析し、遺跡周辺の同位体比や他の個体の同位体

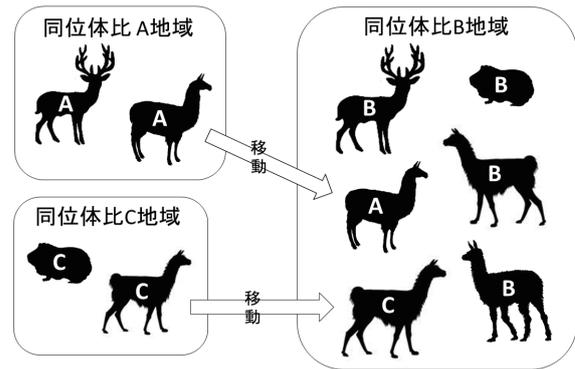


図1. ストロンチウム同位体比分析による出身地推定の概念図

比と比較することで、「同一地域で成長したのか、それとも別の地域から来たのか」という出身地域を推定することができます（図1）。

分析の結果、パコパンパ遺跡から出土したPC-II期のラクダ科動物の歯のストロンチウム同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) は幅広い値を示しました（図2）（Takigami et al., 2019）。このラクダ科動物の幅広い同位体比が遺跡周辺地域の値を反映しているかどうかを確認するため、遺跡から出土したシカとクイ（テンジクネズミ）の同位体比も分析しました。アンデス文明では、シカは飼育に適さないため、その都度狩猟により入手されていましたし、クイは食用として居住地近くで飼育されていました。言い換えると、遺跡を利用していた人々の生活圏内にある同位体比がこれらの動物から推測できます。さらに遺跡が存在している地質の値

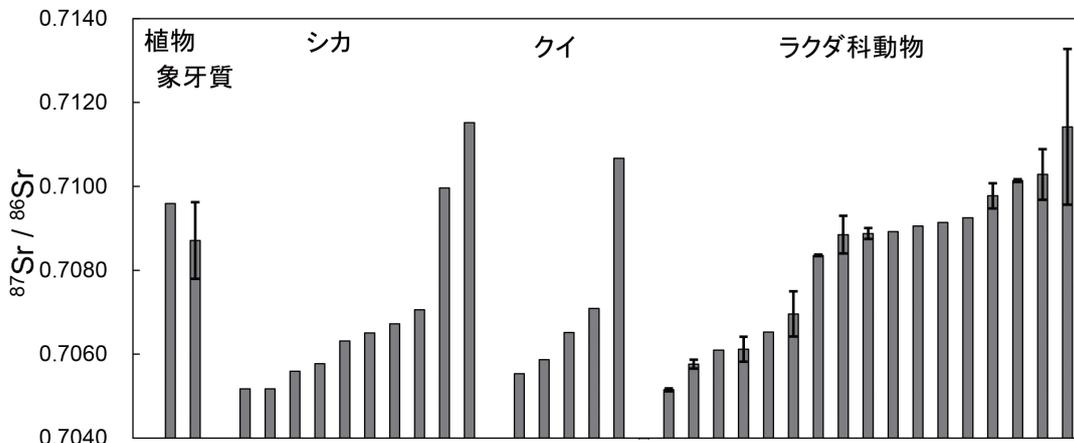


図2. パコパンパ遺跡出土動物骨のストロンチウム同位体比（Takigami et al., 2019 の図3改訂）

を反映した試料（歯の象牙質や植物）も含めて在地の値を調べた結果、ラクダ科動物の同位体比はほとんどが在地の値と一致しました。したがって、遺跡周辺のヒトの活動範囲内でラクダ科動物が飼育されていた可能性が唆されます。

なお、PC-I期のラクダ科動物のストロンチウム同位体比も比較できれば良かったのですが、PC-I期のラクダ科動物の骨片は極少数であり、なおかつストロンチウム同位体比分析に適した歯の試料が存在していなかったため、調査が叶いませんでした。そこで、次に行ったのは、炭素・窒素同位体比分析による食性推定です。ラクダ科動物の食べた植物の種類から、飼育地域を推定しました。

4. 炭素・窒素同位体比を用いた飼育地域の推定

食性とは「何をどのくらい食べたのか」という情報のことです。食性は炭素と窒素の同位体比分析で推定できます。

食物は光合成回路の違いや食物連鎖による栄養段階の違いから、炭素・窒素同位体比の異なるいくつかのグループに分けられます。ラクダ科動物は草食動物のため、植物の同位体比に注目します。植物は光合成回路の違いから大きく3つに分けられます。すなわち、C₃植物とC₄植物、CAM植物です。C₃植物の炭素同位体比は低く、C₄植物は高く、CAM植物はその間の同位体比を有しています。CAM植物は主にサボテン科などの多肉植物に多く、ラクダ科動物が摂取しない植物であるため、以下では考察から省きます。植物の同位体比は、その植物を摂取するラクダ科動物にも反映されます。より多く餌として食べた植物の同位体比に近い値が体組織に記録されます。そのためラクダ科動物の体組織を分析することで、「どのような植物を餌としていたのか」という食性推定ができます。なお、この分析は骨コラーゲンを用いて行えるため、僅かな骨片しか出土していないPC-I期のラクダ科動物についても実施できました。

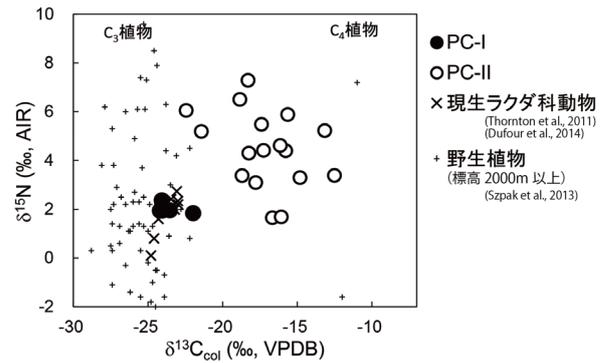


図3. パコパンパ遺跡出土ラクダ科動物の食性推定 (Takigami et al., 2019の図8改訂)

パコパンパ遺跡のラクダ科動物の食性は、PC-I期からPC-II期の間で大きく変化していました（図3）（Takigami et al., 2019）。PC-I期の個体はC₃植物を中心とした食性で、これは標高4,000 m以上の高地高原で飼育されている現生のラクダ科動物と良く似た食性でした。一方、PC-II期のラクダ科動物は、C₃植物とC₄植物を混合した食性を示し、個体によってそれぞれの植物の寄与の割合が異なっていました。アンデスでは、標高の低い地域において野生のC₄植物が数多く存在していますが、標高2,000 m以上の高地ではその種類が激減します。そのためパコパンパ遺跡のラクダ科動物のうち、特にC₄植物の寄与が高い個体において、選択的に野生のC₄植物だけを摂取したという状況は想像し難いです。そこで考えられるのは、ヒトが栽培していた植物です。ヒトが食べる実の部分収穫した後に、残された葉や茎をラクダ科動物に与えた可能性が想定されます。当時のヒトの食用植物のうち、C₄植物はトウモロコシとアマランサス（キウィチャと呼ばれる雑穀の一種）です。これらの植物をヒトがラクダ科動物に与えていた、すなわち飼育していた可能性が考えられます。やはりPC-II期には遺跡の周辺でラクダ科動物飼育が開始されていたと言えるのではないのでしょうか。

5. まとめ

私たちの研究では、動物考古学的調査を背景に、

パコパンパ遺跡のラクダ科動物の同位体比分析を実施し、PC-II 期に遺跡周辺でラクダ科動物飼育が行われていたことを明らかにしました。特に、様々な同位体比分析を組み合わせたことで、分析試料の制限という不利な条件を克服し、多角的な視点での飼育開始の確かな証拠を示すことができました。

野生のラクダ科動物の分布域外と推定されているパコパンパ遺跡周辺には、おそらく元々はラクダ科動物が存在していなかったと想像されます。そのため PC-I 期にはラクダ科動物は稀少な存在でした。儀礼や祭祀の特別な生贄として稀に入手されたか、あるいは高地高原からキャラバンで荷物を載せてやってくる珍しい動物として認識されていたのでしょうか。しかし、PC-II 期になると身近な動物に変貌します。自分たちで飼育・管理を行い、食料や毛織物の原料、荷駄獣として様々な活用していたと推測されます。遺跡からは PC-II 期に針や紡錘車の出土量が増加し、紡績関連活動の比重が高まったことが示唆されています。また、遺跡の神殿建築も大きく複雑になり、金銀銅製品が出土するなど、社会の発展がうかがえます。ラクダ科動物の飼育導入が影響を与えたのかもしれませんが。

アンデス中央高地や南部高地の高原地域で始まった飼育活動は、南北様々な地域の標高の低い山間部に伝播していきました。北部高地の他の神殿遺跡でも、パコパンパ遺跡と同時期にラクダ科

動物の出土量が増加するという報告があり、ちょうど 700 BC 頃からアンデス北部の山間地域にラクダ科動物の飼育が伝播したと推測されます。このパコパンパ遺跡の同位体データはその瞬間を捉えたと言っても過言ではないかもしれません。現在、私たちのチームは他の遺跡でも同位体比分析を進めており、今後さらにこの説を補強するデータが得られると期待しています。

文献

Takigami M, Uzawa K, Seki Y, Morales Chocano, D, Yoneda M (2019) Isotopic Evidence for Camelid Husbandry During the Formative Period at the Pacopampa Site, Peru. *Environmental Archaeology*. DOI: 10.1080/14614103.2019.1586091

著者情報



瀧上舞（山形大学人文社会科学部プロジェクト教員／国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員）2015年東京大学新領域創成科学研究科先端生命科学専攻修了、博士（生命科学）。2009年日本学術振興会特別研究員（DC1）、2012年同（PD）、2015年山形大学学術研究員を経て、2018年より現職。

（2020年3月31日掲載）

資源開発における環境負荷低減のための同位体研究

大竹 翼
(北海道大学工学研究院)

1. 資源開発と環境汚染

我々の便利な生活を維持していくために石油や石炭のエネルギー資源や鉄・銅・亜鉛などの金属資源の開発は必要不可欠です。これら地球資源の多くは、数万年～数千万年といった長い時間を経て地下深くで形成されたものであり、人間が採掘することで地表に露出し、地表の気や水と反応します。それらが有害な金属や元素で環境中に漏出した場合には、生態系や我々の健康に重大な問題を引き起こすことがあります。例えば、銅・鉛・亜鉛といった卑金属元素は硫化物として採掘されますが、同時に産する黄鉄鉱と呼ばれる硫化鉄鉱物 (FeS_2) が地表で雨水と反応し、酸化されると硫酸酸性の酸性鉱山廃水 (Acid Mine Drainage: AMD) を生じます。AMD には硫化物にもともと含まれていたヒ素や鉛、カドミウムなど有害な元素も溶けていることがあるため、適切に処理しないと環境中に放出することができません。処理には中和や沈殿といった方法が用いられますが、天然に見られる化学反応や生物を利用しコストを



図1. カナダの鉱山でみられる酸性鉱山廃水。大量の鉄鉱物の沈殿によって赤褐色になっている。

抑えたパッシブトリートメントという方法が注目され、様々なサイトで研究が行われています。パッシブトリートメントを効率的に行うためには、鉱山廃水中の元素の濃度や存在状態、その起源などを正確に把握することが必要になります。そのために同位体を用いた手法が活躍します。

2. レアアース資源開発における環境影響評価

レアアース（希土類）元素という言葉を知ることがあるでしょうか？ レア金属 31 鉱種の 1 つで、スカンジウム、イットリウムの 2 元素にランタノイド族 15 元素を加えた 17 元素をまとめた元素のグループです。風力発電やハイブリッドカーに使われる高性能磁石や触媒など環境技術を含む日本の先端産業に欠かせない“産業のビタミン”です。しかしながら、レアアース元素の地球化学的挙動は、ウラン、トリウムといった放射性元素とよく似ているため、レアアース鉱石の多くに放射性元素が含まれています。したがって、その採掘・精錬は環境負荷が大きいという難点があり、採掘や精錬で発生する残渣は適切に処理されなければなりません。我々の研究グループはレアアース資源の開発に伴う環境影響評価を適切に行うためのケーススタディとして、かつてレアアースが精錬され、現在は同様の鉱石からチタンが精錬されているマレシア・イポー市周辺地域の河川において調査を行い、精錬所や廃棄物処分場が河川の水質に与える影響また汚染物質の起源やその除去プロセスを同位体を用いて明らかにしました (Ito et al., 2017)。

調査の結果、レアアースの精錬所跡地近くには現在チタン精錬所が建設され、その残渣の堆積場



図2. マレーシアにあるチタン精錬所の残渣堆積場からの漏洩水が混入した河川。鉄水酸化物のナノ粒子が沈殿している。

も設置されていました。またその堆積場からは堆積物と雨水が反応した酸性水が漏洩しており、周辺河川へ流入していました。酸性水は多くのウランや鉛など金属元素を高濃度で含んでおり、河川水と混合することでpHが上昇し、濃度は低下しますが、環境基準を大きく超えるものでした（図2）。

汚染河川において本当に金属元素が精錬所由来であるかを明らかにするには鉛の同位体比の測定が有効です。鉱石中の鉛同位体比は周辺の岩石や土壌中の鉛や排ガスなど他の人為由来の鉛が持つ同位体比とは異なるためです。分析の結果、河川中の鉛同位体比は鉱石中の鉛同位体比と類似しており、精錬所の残渣由来であることが明らかになりました。また、鉄安定同位体比の測定からは、鉄も精錬所の残渣由来であることだけでなく、pHの上昇とともに鉄水酸化物として酸化沈殿し一部はナノ粒子として河川水とともに輸送されていることも明らかになりました。汚染河川は下流に行くにしたがい鉄鉱物が沈殿するとともに、金属元素の濃度もさらに低下していき、大きな河川に流入する際には問題ないレベルまで濃度が下しており、自然浄化が達成されていました。このようなメカニズムを解明することは、今後、低コスト・低環境負荷な残渣・汚染水処理法の開発につながると期待されます。



図3. インドネシア、スラウェシ島にあるニッケルラテライト鉱山。岩石が風化により赤くなっている。高濃度のニッケルやクロムを含む。

3. ニッケルラテライト鉱床開発における環境影響評価

ニッケルは、従来のステンレスなど合金としての用途に加え、電気自動車などに必要なリチウムイオン電池の正極材として用いられるため、重要なレアメタルの1つであり、今後の重要増加が期待されています。ニッケルは、以前はカナダやロシアなど限られた地域に存在していた硫化物鉱床から資源を採掘していましたが、近年、新たな製錬方法の開発により、ニッケルラテライト鉱床と呼ばれる岩石の化学風化によって形成する鉱床（図3）の開発が可能になりました。

ニッケルラテライト鉱床は、気温が高く降水量の多い熱帯～亜熱帯地域に発達するため、東南アジアではインドネシアやフィリピンなどで開発が進んでいます。風化で脆くなった岩石のため容易に採掘できますが、地下30m程度までの表層付近にニッケルが濃集しているため、表土を広く剥ぎ取る必要があります。また、この鉱石はニッケルだけでなくクロムも多く含んでいるため、雨水などと反応することでクロムが溶け出し、周辺の河川を汚染することも懸念されており、フィリピンなどでは近年のニッケルラテライト鉱床開発が抑制される傾向にあります。しかしながら、周辺の岩石もニッケルやクロムに富んでいることが多く河川には自然由来の重金属元素も含まれています。鉱山由来のクロムの影響を適切に評価するた

めにはクロムの安定同位体比の測定が有用だと考え、我々の研究グループは地球研と共同研究で国内ではほとんど行われていないクロム同位体比分析手法の確立を目指しています。

文献

Ito A, Otake T, Shin K, Ariffin KS, Yeah FY, Sato T (2017) Geochemical signatures and processes in a stream contaminated by heavy mineral processing near Ipoh city, Malaysia. *Applied Geochemistry* vol. 82, 89-101.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.05.007>

著者情報



大竹 翼（北海道大学工学研究院環境循環システム部門 環境地質学研究室 准教授）2008年ペンシルバニア州立大学大学院地球科学科修了、Ph.D. in Geosciences and Astrobiology. 2009年東北大学理学研究科地学専攻特任助教、2011年独立行政法人産業技術総合研究所地圏資源環境研究部門特別研究員を経て、2012年より現職。

(2020年3月31日掲載)

