



産地判別、文明環境史

生物の体に含まれる元素の安定同位体比は、生物が取り込んだ時点の環境の同位体比を反映しますので、「同位体地図」が作成されていれば「産地判別」に使うことができます。また、その値は保存されますので、現在の間や生物だけではなく、遺跡に埋まっている昔の間や生物の体でも測定可能です。発掘された人間や生物に含まれる元素の同位体比は、昔の間や生物の食べものや移動、さらには昔の間の暮らし方についても有益な情報を与えてくれます。さらに、同位体比は地球の歴史に関する情報も与えてくれます。これらについて、具体的な研究を見てみましょう。

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ます。

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

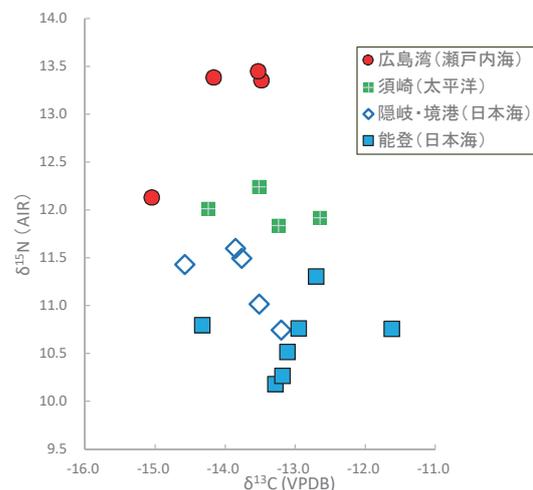


図2. 現生マダイの炭素・窒素同位体比
*石丸ほか (2008) を改変

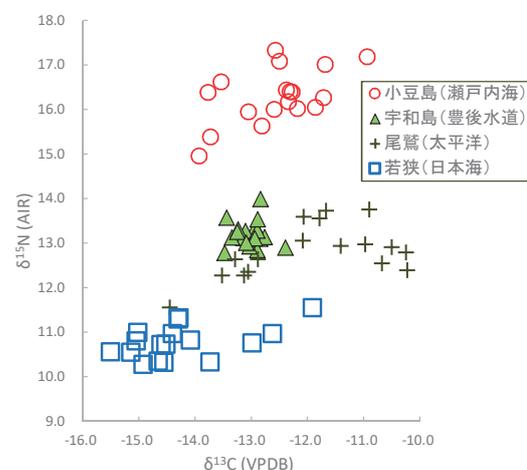


図3. 現生メジナの炭素・窒素同位体比
*石丸ほか (2008) を改変



図 4. 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 (図 4)。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 5)。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 6)。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

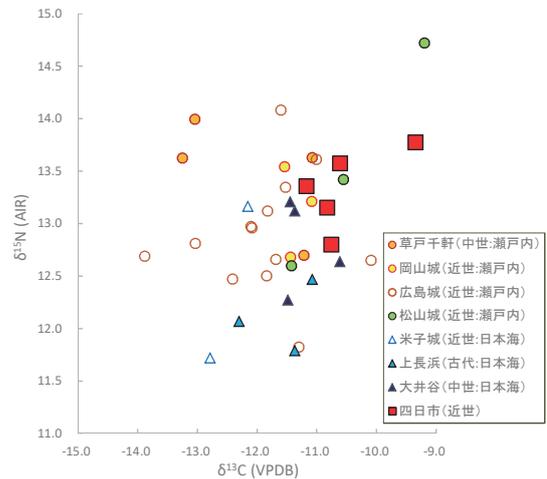


図 5. 四日市遺跡出土マダイの炭素・窒素同位体比
* 石丸ほか (2008) を改変

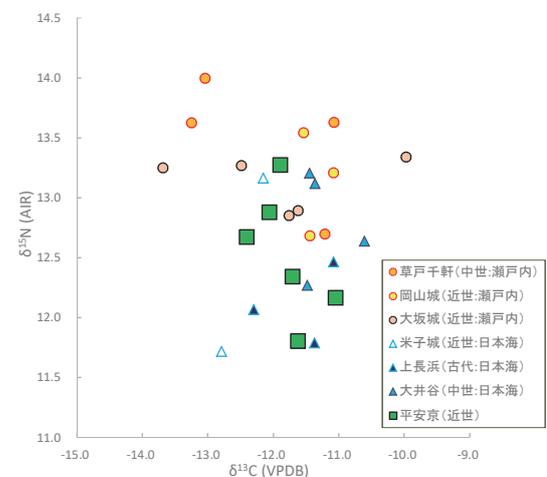


図 6. 平安京左京北辺四坊跡出土のマダイの炭素・窒素同位体比
* Ishimaru et al. 2010 を改変

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。

注釈

- 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)

(2020年4月7日改版)

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

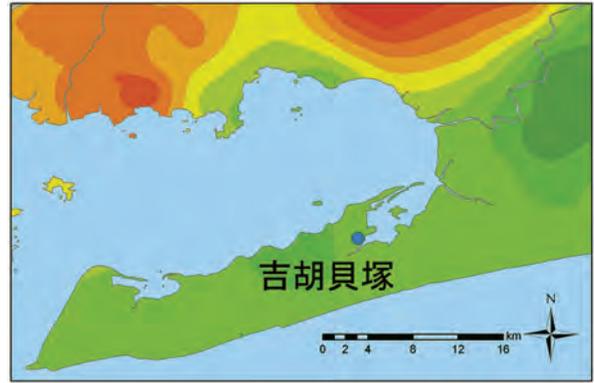


図 2. 吉胡貝塚周辺の Sr 同位体比地図（赤色が同位体比が高く、緑色が低い地域）

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。骨の値をみても、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あります。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

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。

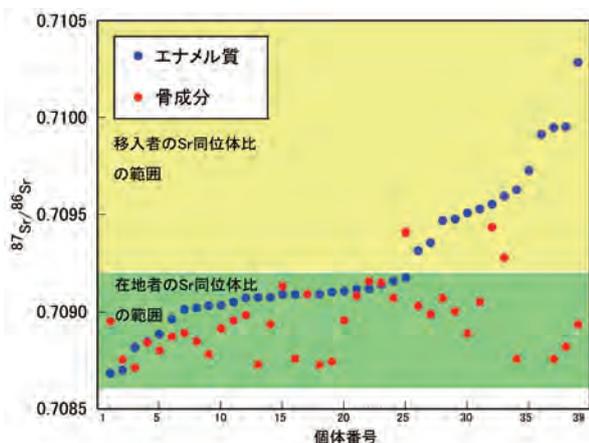


図3. 吉胡貝塚出土人骨の骨成分と歯のエナメル質のSr同位体比

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)

古代犬はどんな餌を食べていたか？

覚張隆史
(金沢大学)

1. 日本列島の古代犬

日本列島に犬¹⁾がいた最古の証拠は、今から約7000年前の縄文時代に遡ると言われています。日本列島には、縄文時代～近代の遺跡から多数の犬骨が見つかっており、日本全国の博物館や大学に収蔵されている犬骨は数万点にのぼります。これら膨大な犬骨コレクションは、日本列島において数千年という長い間、人²⁾と犬がともに生活してきたことを物語る貴重な資料群と言えます。

犬骨資料群の中で、特に人との関わりが強く感じられるものとして、埋葬された痕跡がある犬骨資料が挙げられます。縄文時代の遺跡からは様々な種類の動物骨が検出されますが、生きていたそのままの位置を保った状態で骨がつながって出土するのは、ほぼ人と犬に限定されます。特に、横臥状態（横向きに寝ている状態）で、小指の骨まで残るような全身骨を伴う場合もあり、このような犬骨は縄文時代の人々が犬を葬送の対象としていた一つの証拠と言えます。

また、縄文犬骨には、他の野生動物には殆ど見られない骨折の治癒痕（骨折に伴う骨増殖）が認められており、患部が治癒する期間を通して人々の集落内・集落付近で生存していた可能性が高いといえます。いわゆる食糧資源としての「家畜」「畜産物」といった、食べられる対象物と考えるよりも、人の社会的なコミュニティ内に存在するいわば「伴侶動物」や狩猟犬などの「役畜」として存在していたと推察されてきました。

それでは、仮に縄文犬の多くが縄文人にとって「伴侶動物」や「役畜」と近い存在であった場合、彼らはどの様に生活を共にしていたのでしょうか。現代の伴侶犬と同様に専用の均質的な「ドッグ

フード」を与えられていたのでしょうか。それとも、人が食べた残飯を食べていたのでしょうか。実は、その実態についてはまだほとんど研究されていないのが現状でした。

2. 北陸地方の縄文犬

日本列島の中でも特に北陸地方の縄文時代の前半期に、多数の犬骨の出土事例が報告されています。代表的な遺跡名として、鳥浜貝塚・三引遺跡・堀松貝塚・上山田貝塚・上久津呂中屋遺跡・米泉遺跡・真脇遺跡・赤浦貝塚・大境洞穴・朝日貝塚・小竹貝塚・南太閤山 I 遺跡などがあり、20 個体以上の多数個体が検出されている事例は石川県七尾市にある三引遺跡（個体数；37 個体）（石川県埋蔵文化財センター 2005）と、富山県富山市にある小竹貝塚（個体数；69 個体）（富山県文化振興財団 2014）です（図 1）。

中でも小竹貝塚出土犬骨では、埋葬された可能性が高い犬 16 個体が検出されています。また、埋葬が疑われるものの、明確に埋葬と言えない事例もあり、それらを含めると 20 個以上となります。よって、日本列島の縄文時代の前半期にお

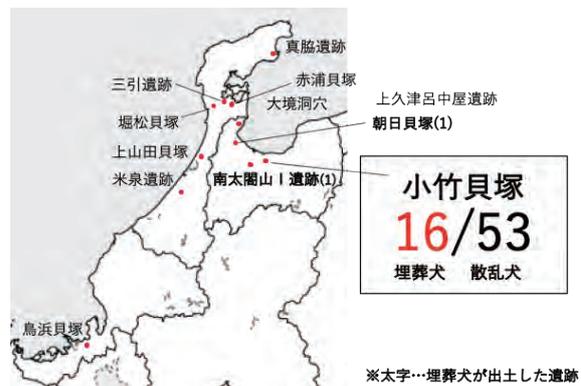


図 1. 北陸地方における縄文時代犬骨の主な出土事例

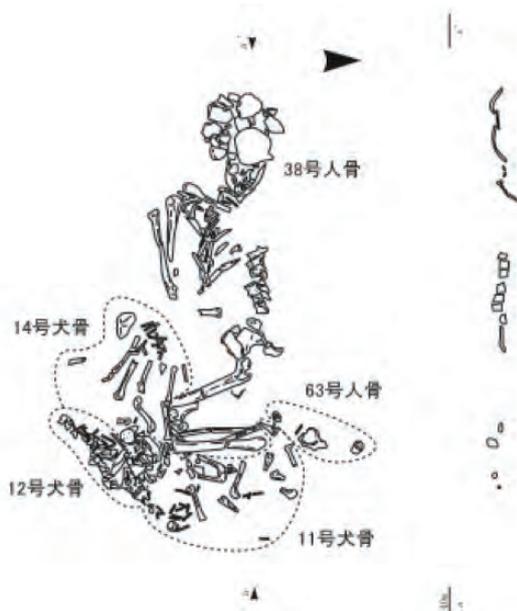


図2. 小竹貝塚出土埋葬犬と埋葬人骨(埋葬人骨38号・63号に近接した地点で出土する埋葬犬11号・12号・14号)

る埋葬犬の出土事例としては日本最大規模と言えます。小竹貝塚は埋葬犬だけでなく、同一墓域から91個体にのぼる多数の人骨埋葬群が検出されており、なかには埋葬犬骨と埋葬人骨が隣接して出土していることから、何らかの関連性が疑われます(図2)。この様に、縄文時代の前半期における人と犬の関係について議論する上で、小竹貝塚出土犬骨は重要な位置を占めます。

3. 埋葬犬骨の食性解析

骨コラーゲンの炭素・窒素安定同位体比は、その個体が摂取した食物の炭素・窒素安定同位体比を反映します。このしくみを遺跡出土犬骨に応用することで、遺跡から出土する古代犬それぞれの摂取食物の特徴を復元することが可能です。小竹貝塚出土の埋葬犬16個体の骨から骨コラーゲンを抽出・精製し、保存状態の良いコラーゲンを得ることに成功しました。この精製コラーゲンを用いて炭素・窒素安定同位体比を測定し、摂取した可能性がある食物群の炭素・窒素安定同位体比と比較しました。その結果、海生魚類を多量に摂取した場合にとりうる炭素・窒素安定同位体比の範囲を示す古代犬が数多くいたことがわかりました

(図3)。一方で、海生魚類ばかりを食べたとはいえない様な個体も混在していたことから、個体ごとに多様な食物を摂取していたと考えられます。

次に、同じ小竹貝塚から出土した人骨の炭素・窒素安定同位体比を比較し、摂取食物の違いを見てみました。その結果、埋葬犬は人よりも炭素・窒素安定同位体比が共に高い傾向を示しており、海産物をより多く摂取していたことがわかってきました(図4)。「お魚啜えたどら猫」ならぬ、「お魚啜えた犬」といったところでしょうか。

さらに犬と人の関わりについて検討するために、個々の埋葬犬と近い場所に埋葬されていた人骨の炭素・窒素安定同位体比を比較してみました。

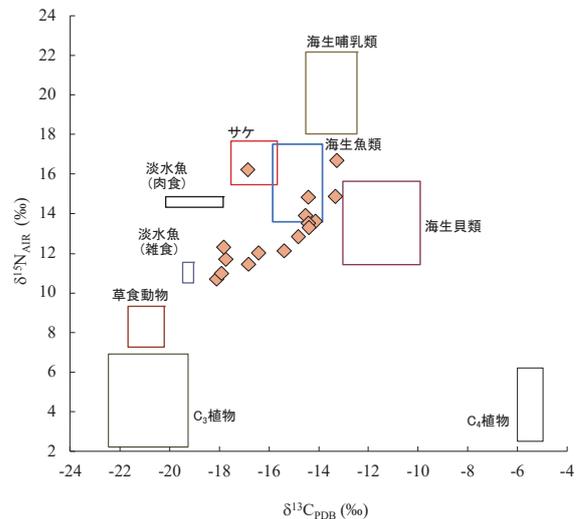


図3. 埋葬犬骨の安定同位体比(四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。)

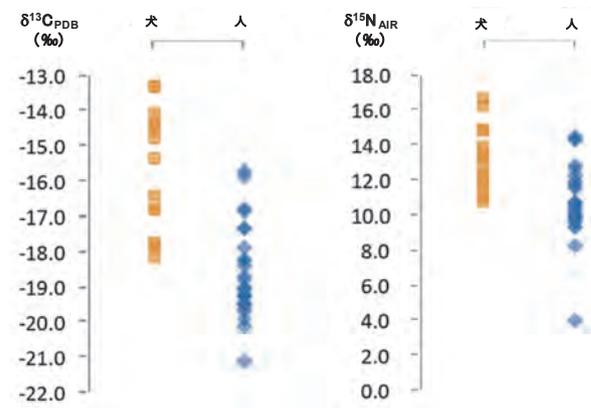


図4. 埋葬犬骨と埋葬人骨の安定同位体比の比較

小竹貝塚5号犬と小竹貝塚64号人骨の同位体比を比較すると、両安定同位体比共に大きく異なり、埋葬犬がどちらも高い値を示していました。他の地点でも同様の傾向が見られることから、埋葬地点が近くても埋葬人骨と埋葬犬の間では摂取食物の質は類似するわけではなく、埋葬犬は人よりも海産物を摂取している傾向にありました。埋葬犬と埋葬人骨の出土地点に近い場合、必ずしも生存時における世帯の近さを意味しているわけではありませんが、しかし、仮にもしその様な場合であっても、小竹貝塚出土埋葬犬と埋葬人骨の間には、やはり全体的に利用する食物資源の質がそもそも大きく異なることには変わりありません。よって、なぜ小竹貝塚出土犬がより多くの海産物を摂取できていたのか、その部分を中心に当時の人と犬の関係性を考察していく必要があります。

4. 遺跡間における出土犬の食性比較

小竹貝塚出土埋葬犬が全体的に海産物の摂取率が高い傾向にあることがわかってきましたが、では他地域ではどのような食物資源を摂取していたのでしょうか。石川県・能登半島にある七尾市の縄文早期（約7000年前）の遺跡である三引遺跡出土犬（散乱犬骨³⁾）の安定同位体比を比較すると、三引遺跡出土犬の方が両安定同位体比の多様性が低く、かつ小竹貝塚よりも海産物摂取の傾向が強いことがわかりました（図5）。三引遺跡の周囲の環境は七尾湾という海に近く、遺跡からは多くの魚骨と海獣類が検出されています（石川県埋蔵文化財センター2005）。また、小竹貝塚から出土する動物叢を見ると、三引遺跡と同様に魚骨と海獣類の検出されており、陸生動物と海生動物の比率に大きな差異は見られない。唯一異なる点として、小竹貝塚からは汽水域の魚種がより多く検出されており、三引遺跡とはやや異なる要素もありました。小竹貝塚の埋葬犬が多様な食性を示したのは、周囲の環境の違いを反映していることかもしれません。

海岸部以外の遺跡に注目してみると、また大き

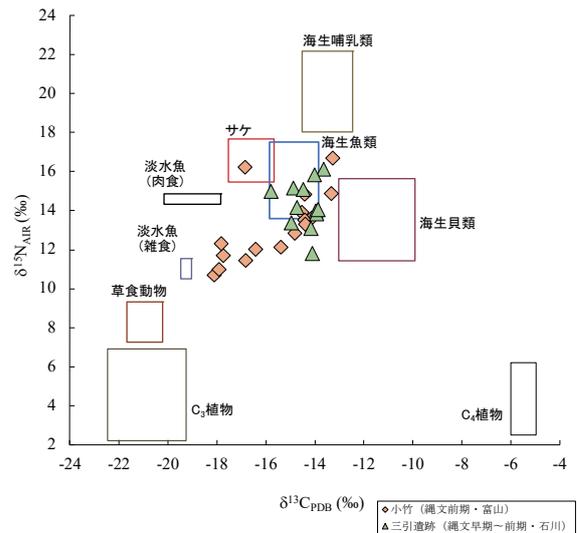


図5. 小竹貝塚出土埋葬犬と三引遺跡出土散乱犬との比較（四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。）

く異なる様相を呈していることがわかります。愛媛県久万高原町の縄文早期の遺跡である上黒岩岩陰遺跡は、日本最古の放射性炭素年代値を示す埋葬犬骨が見つかっており、散乱犬骨も多数見つかっています。同遺跡からは人骨も検出されているため、両者の安定同位体比の比較を実施したところ、埋葬犬は人と近似した値を示すことがわかりました。一方、埋葬されていない犬は人よりも海産物をより多く摂取していました（図6）。上黒岩岩陰遺跡がある久万高原町は名前の通り標高が高い内陸地域であり、愛媛県伊予市方面の海岸部まで約40 km、高知県須崎市方面の海岸部へは約60 kmあります。海産物摂取率が高い個体が海岸部で成犬まで成長したと仮定した場合、数十キロの距離を単独もしくは人と共に移動してきた可能性も考えられます。この様に、縄文時代の遺跡出土犬の摂取食物の多様性は、犬の移動性においても何かしらの関連があるかもしれません。

いずれの事例においても、縄文時代の犬は人と必ずしも同じ食物資源を常に利用しておらず、日和見的な挙動を示すことだけは確かです。場合によっては、特定の餌を一時期に与えていた可能性は否定できないものの、各地域で統一的な犬の飼

育法や餌の制限はない、粗放的飼育状態であったと推察されます。

一方、縄文時代後の弥生時代以降になると、大型環壕集落跡から出土する犬骨の安定同位体比は多様性が低下する傾向にあります。稲作に生業がシフトすることで、水田に生息する淡水魚へのアクセスも容易になり、海産物摂取割合も低下していきます(図7)。また、中近世の城下町から出

土した犬骨では、海産物摂取の影響が強く見られますが、多様性が低下するという点では同様の傾向でした。これらのことから、犬の生息環境・食環境の多様化・均質化の要因は犬の食性と関連している可能性が高いといえます。縄文犬の摂取していた食物資源の高い多様性も人の社会のあり方と連動しての現象と思われる。小竹貝塚出土埋葬犬の安定同位体比の多様性もこの現象に起因するものと思われる、より粗放的な環境で自由に人の集落間を行き来していたのかもしれませんが。そのおこぼれの餌として人が獲った魚を食べていたり、違う集落では陸上の食物資源にありつけていると思われます。

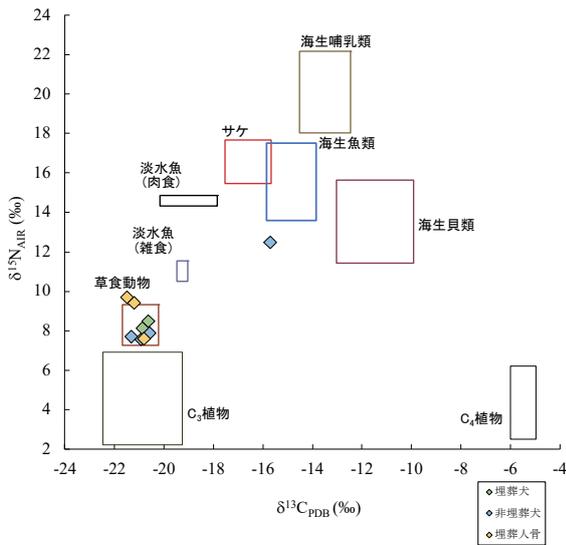


図6. 上黒岩陰遺跡出土埋葬犬・散乱犬骨の炭素・窒素安定同位体比(四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。)

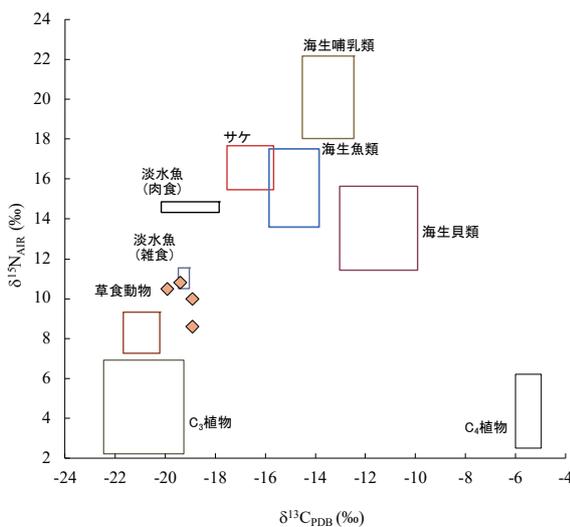


図7. 弥生犬の安定同位体比の比較(四角の範囲は、各食物の炭素・窒素安定同位体比に対して、犬が各食物候補を摂取した際に生じる栄養濃縮係数を加算した場合にとりうる範囲を示している。)

5. おわりに

古代犬の炭素・窒素安定同位体分析を通して、犬の摂取食物に関する情報を抽出してきましたが、ストロンチウム同位体比や酸素同位体比など他の同位体情報を応用することで犬の移動に関する情報も抽出が可能です。多元素同位体分析により、高精度な古代犬の生態復元を実施することで、過去の人と犬の関係性がより具体的に復元できます。私たち現代人は、過去の人と犬との関わりをついつい現代社会のアナロジーで捉えがちです。同位体情報という客観的な指標を用いることで先入観を打破し、私たちがこれまで予想もしなかった人と犬の関係性が見えてくると期待されます。

注釈

- 1)2) 学術的な表現として、「犬」と「イヌ」、「人」と「ヒト」で区別して利用する機会が多いが、本原稿は学術的表記よりわかりやすさを重視するためにそれぞれ「犬」と「人」に統一した。
- 3) 埋葬された形跡が残っていない犬骨。

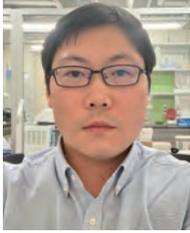
文献

富山県文化振興財団 (2014)「富山県小竹貝塚発掘調査報告書」富山県教育委員会埋蔵文化財

センター

石川県埋蔵文化財センター（2005）「七尾市三引
遺跡 4」財団法人石川県埋蔵文化財センター

著者情報



覚張隆史（金沢大学人間社会学域
助教）2011年東京大学新領域創
成科学研究科博士課程単位取得
体学。2012年日本学術振興会特
別研究員（PD）（北里大学）を
経て、2015年11月より現職。

（2021年3月31日掲載）

（2022年3月31日改版）

古代アンデスの人々はリヤマやアルパカを飼育していたのか？ — スترونチウム同位体比分析で動物の出身地を探る —

瀧上 舞
(国立科学博物館)

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。リヤマは遅くとも紀元前 2000 年頃に、アルパカは紀元前 4000 年頃から前 3500 年頃の間にか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。ラクダ科動物の骨の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（図 1）。標高 2,500 m 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、注目すべき



図 1. パコパンパ遺跡遠景

遺跡の一つです。なぜならば、パコパンパ遺跡はかつて野生の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、パコパンパI期（紀元前1200年～前700年、以下PC-I期と表記）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（紀元前700年～前400年、以下PC-II期と表記）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、ラクダ科動物という生態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

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2)。

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3) (Takigami et al., 2020)。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の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

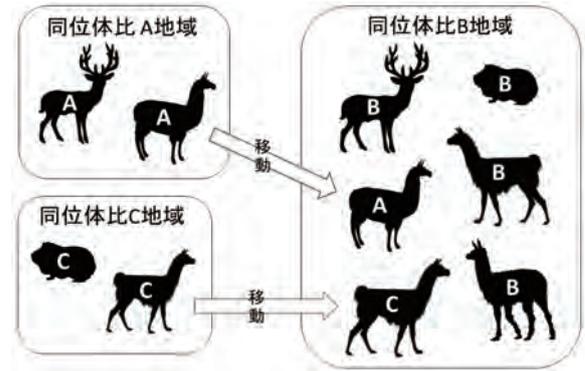


図2. ストロンチウム同位体比分析による出身地推定の概念図

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示唆されます。

なお、PC-I期のラクダ科動物のストロンチウム同位体比と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、残念ながら調査は叶いませんでした。

4. 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から、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。

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。炭素・窒素同位体比分析からは、植生の異なる地域から連れて来られていた可能性が示唆されています (Takigami et al., 2021)。おそら

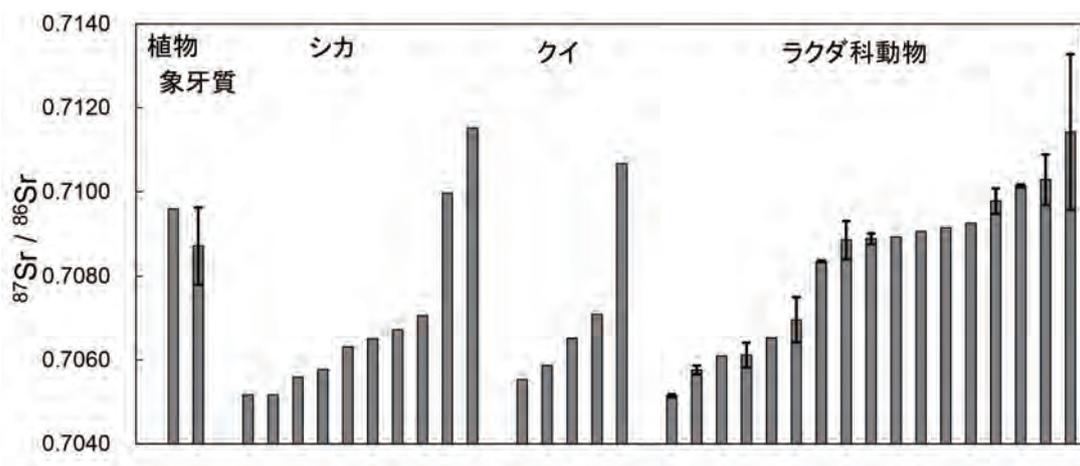


図3. パコパンパ遺跡出土動物骨のストロンチウム同位体比 (Takigami et al., 2020 の図3改訂)

く儀礼や祭祀の特別な生贄として稀に入手されたか、あるいは別の地域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期に針や紡錘車出土量が増加し、紡績関連活動の比重が高まったことが推測されています。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社会の発展に大きな影響を与えたのかもしれない。

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、ちょうど紀元前800年～前700年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比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, D. Morales-Chocano, Yoneda M (2020) Isotopic evidence for camelid husbandry during the formative period at the Pacopampa site, Peru. *Environmental Archaeology*. 25(3): 262-278. <https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1586091>
- Takigami M, Seki Y, Nagaoka T, Uzawa K, D Morales-Chocano, Mukai H, Yoneda M (2021) Isotopic study of maize exploitation during the formative period at Pacopampa, Peru. *Anthropological Science* 129(2): 121-132. <https://doi.org/10.1537/ase.210531>

著者情報



瀧上 舞 (国立科学博物館人類研究部研究員) 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、2018年国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員を経て、2021年より現職。

(2020年3月31日掲載)

(2022年3月31日改題・改版)

古代アンデスの人々は何を食べていたのか？ — 炭素・窒素同位体比分析でトウモロコシ利用を探る —

瀧上 舞
(国立科学博物館)

1. はじめに

アンデス文明といえば、黄金色のトウモロコシがあふれる豊かな社会というイメージをもつ方も多いのではないのでしょうか？ 実際にアンデス文明ではいろいろな種類のトウモロコシを栽培し、たくさん食べ、お酒にして飲み、神様に捧げていました(図1)。まるで日本における米のように、トウモロコシは大切に親しみのある食物でした。日本では弥生時代に稲作が到達し、徐々に日本各地へ広がっていききましたが、アンデス地域でも中米で栽培化されたトウモロコシが伝わった後、徐々に広がっていく歴史があります。その伝播の過程(いつ・どこで・どのくらい使われるようになったのか)は未だわからないことも多く、様々な研究者が謎の解明に取り組んでいます。私もそんな研究者の一人であり、アンデス文明初期の社会でのトウモロコシ利用の伝播を調査しています。



図1. 屋台で売っている茹でトウモロコシ。添えてるのは塩味のきいたチーズ。

2. アンデス文明におけるトウモロコシ

アンデス文明とは、南米のアンデス山脈周辺に栄えた文明です。一つの連続した社会ではなく、ナスカやモチェ、インカなど様々な地域で大小の社会が興亡しました。最盛期にはインカ帝国が広域を支配し、北はコロンビアから南はチリ・アルゼンチンにまたがる地域へ影響を及ぼしましたが、1532年にスペイン人により征服されました。

そのアンデス文明で食糧として利用されていたトウモロコシは、中米地域で9000年前頃から利用が始まり、およそ6500年前までに半栽培化の状態以南米に伝わり、独自に栽培化が進んだと考えられています。遺跡や土壌堆積物から出土するトウモロコシの殻粒や穂軸、葉、花粉などから、アンデスの太平洋岸では6500年前、高地で遅くとも4000年前、アマゾン地域でも6000年前には栽培が始まっていたと推測されています。

では実際にヒトの食料の中で、トウモロコシはどのくらいの割合を占めていたのでしょうか？ 遺跡から出土する食物残渣やでんぷん粒、土壌コア中の花粉分析では、そこにその食物が存在していたことや相対的な増減は推定できますが、個人の食物中の割合までは推定できません。そこでヒトの骨の中に記録された食べ物の情報が重要になってきます。

3. 炭素・窒素同位体比分析による食性推定

ヒトが食物を摂取すると、胃や腸を通して小さく分解されます。アミノ酸まで分解された後、血液中を通して体の各組織に運ばれ、新しい組織を形成します。その時、そのアミノ酸の元となった

食物が何だったのかという情報を記録したまま、ヒトの体は形成されていきます。その情報が同位体比です。

ヒトの食物となる動植物は、光合成回路の違いや、栄養段階の違いから、異なる炭素同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) と窒素同位体比 ($\delta^{15}\text{N}$) を有しています。ヒトの体組織には摂取した食物の同位体比を混合した値が反映されており、より多く食べた食物の値に近づきます。例えば、トウモロコシを多く食べた個体は高い炭素同位体比を示し、魚を多く食べた個体は高い窒素同位体比を示します。この手法を用いて遺跡から出土する古人骨の同位体比を分析することで、昔の人がどのくらいトウモロコシを摂取していたのかという「食性」を推定することができます。

4. パコパンパ遺跡のトウモロコシ利用

分析対象としたのはペルー北部高地の標高 2,500 m の山地に位置するパコパンパ遺跡です。アンデス文明初期の社会で栄えた巨大な神殿建築の遺跡です。パコパンパ I 期 (紀元前 1200 年～前 700 年、以下 PC-I 期と表記) とパコパンパ II 期 (紀元前 700 年～前 400 年、以下 PC-II 期と表記) の 2 時期に区分され、PC-I 期の終わりから PC-II 期にかけて神殿の巨大化や複雑化、リーダーの出現、銅製品生産、遠隔地からの奢侈品輸送、地域間交流の活性化など、大きな社会的変化が生じています。私たちは同位体比分析による食性推定から、社会の変化に伴ってヒトの食性にどのような影響があったのかを調査しました (Takigami et al., 2021)。

パコパンパ遺跡のヒトの同位体比を調べると、PC-I 期は低い炭素同位体比を示しましたが、PC-II 期からは炭素同位体比が上昇していました (図 2)。これは PC-I 期の C_3 資源 (キャッサバなどの C_3 植物と、野生のシカなどの C_3 植物を摂取した動物) への高い依存から、PC-II 期に C_4 資源利用の導入という食性の変化が生じたことを示しています。 C_4 資源利用とは直接的/間接的

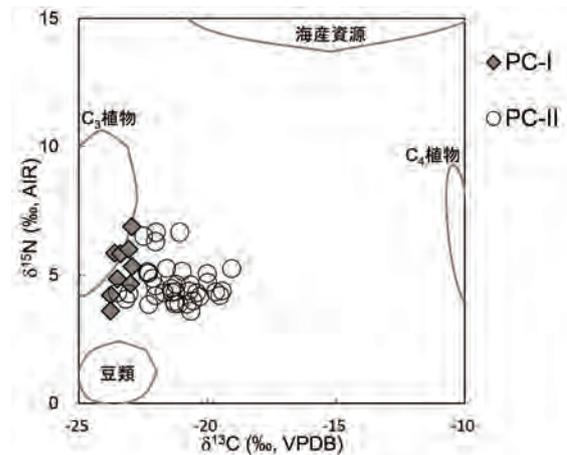


図 2. パコパンパ遺跡出土人骨の炭素・窒素同位体比 (Takigami et al., 2021 を改変)

な C_4 植物の摂取を意味します。直接的な C_4 植物摂取の候補として、アンデス地域で栽培されたトウモロコシとアマランサスがあります。パコパンパ遺跡の土器や歯石中のデンプン粒分析からはトウモロコシしか検出されておらず、また現在のパコパンパ周辺の年間気温からはアマランサスの栽培には適さないことが推測されるため、パコパンパ遺跡で当時栽培されていた C_4 植物はトウモロコシだと考えられます。間接的な C_4 植物利用には、 C_4 植物で飼育された動物の肉が想定されます。動物骨の同位体比分析からは、PC-I 期にテンジクネズミ (食用モルモット、クイとも呼ぶ) が、PC-II 期にテンジクネズミとリヤマが C_4 植物を食べていたことが示されました (図 3)。アンデスでは、標高の低い地域において野生の C_4 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。パコパンパ遺跡の標高では野生の C_4 植物はほとんど存在しないため、テンジクネズミやリヤマはヒトが栽培した C_4 植物、すなわちトウモロコシを摂取していたと推測されます。また、PC-I 期の時点ですでに、テンジクネズミにトウモロコシを与えていたことは注目すべき結果です。当時、テンジクネズミは台所で残飯などを餌に飼育されていました (図 4)。この小型家畜がトウモロコシを摂取していたということは、おそらく人も PC-I 期にトウモロコシを食べていたことでしょう。しかし、

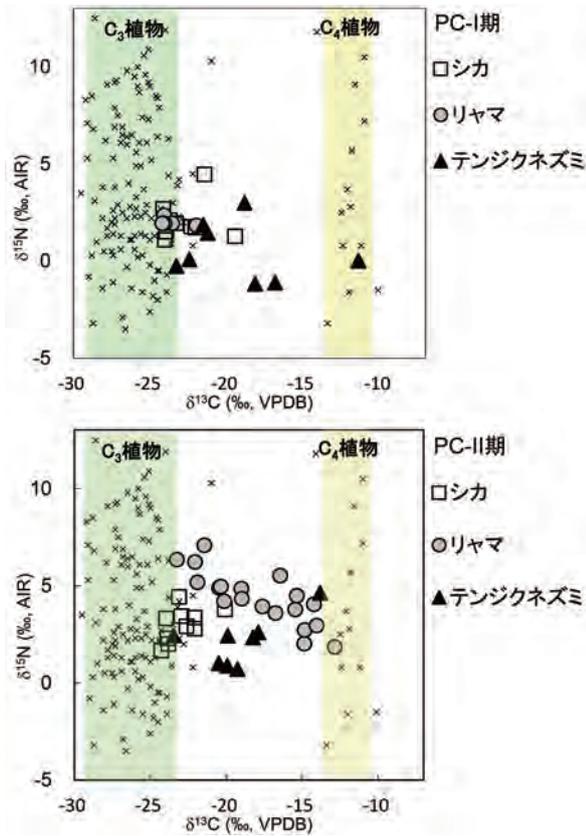


図3. パコパンパ遺跡出土動物骨の炭素・窒素同位体比 (Takigami et al., 2021 を改変)



図4. 屋内で飼育されているテンジクネズミ

他の C₃ 植物や C₃ 植物を食べた動物がヒトの食料の大部分を占めていたため、PC-I 期の人骨の同位体比には表れてこなかったと考えられます。それが PC-II 期になると、トウモロコシで飼育されたリヤマの肉や、増産されたトウモロコシを多く食べたことで、古人骨の同位体比にも C₄ 資源利用がしっかり記録されたのだと推察されます。PC-II 期にラクダ科動物の飼育が始まった可能性は、ストロンチウムの同位体比の分析結果からも

示唆されており (Takigami et al., 2020)、ラクダ科動物飼育の導入がヒトの食物資源利用に大きな影響を与えていたことが読み取れます。

なお、両時期を通じて窒素同位体比は低く、海から離れた立地のパコパンパ遺跡では海産資源の利用は極めて少なかったと考えられます。

5. アンデス形成期の食性比較

さらに、この食性変化はペルー広範囲で同時期に生じたと考えられます。パコパンパ遺跡の結果と先行研究で報告された同位体比を図にまとめると (図5)、PC-I 期に相当する形成期中期 (~紀元前 800 年頃) までの食性では、C₃ 資源と海産資源を結ぶ長線上に各地の遺跡が分布しています。これは海産資源と C₃ 資源が中心的な食物で、海産資源の割合は海岸からの距離によって異なっていたことを表していると考えられます。しかし PC-II 期に相当する形成期後期 (紀元前 800 年頃 ~ 前 250 年頃) とその後の末期 (紀元前 250 年頃 ~ 前 50 年頃) になると、クントウル・ワシ遺跡や、アヤクーチョ盆地のピキマチャイ洞窟などでも、C₄ 資源の利用が始まっていることが報告されており、C₄ 資源利用の増加が広範囲で生じていたことが示唆されます。残念ながらこの2遺跡では同一遺跡内での食性の時代差が検証できていないため、形成期中期にどのような食性だったのかは分かっていません。現在のところ、同位体比分析

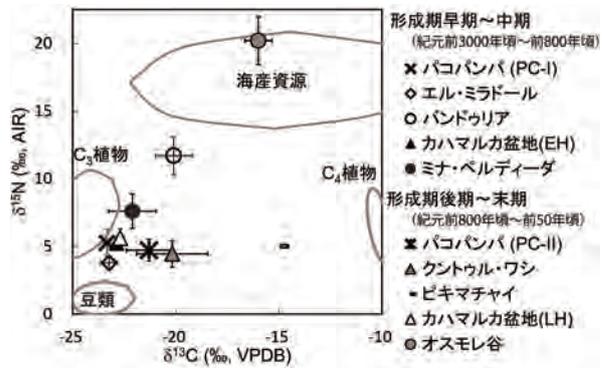


図5. アンデス形成期の広域的な食性比較。形成期早期~中期 (紀元前 3000 年頃 ~ 前 800 年頃) と形成期後期~末期 (紀元前 800 年頃 ~ 50 年頃) で食性の傾向が異なる。(Takigami et al., 2021 を改変)

で検出された形成期の食性の時代変遷はパコパンパ遺跡が唯一の事例となっていますが、さらに検証するため、現在も調査を続けています。トウモロコシはいつ、どうしてアンデス地域の主要な食料になったのか、同位体比分析というライトで古代アンデスの人々の生活を照らしだしていきます。

文献

Takigami M, Uzawa K, Seki Y, D. Morales Chocano, Yoneda M (2020) Isotopic evidence for camelid husbandry during the formative period at the Pacopampa site, Peru. *Environmental Archaeology* 25(3): 262-278. <https://doi.org/10.1080/14614103.2019.1586091>
Takigami M, Seki Y, Nagaoka T, Uzawa K, D

Morales-Chocano, Mukai H, Yoneda M (2021) Isotopic study of maize exploitation during the Formative Period at Pacopampa, Peru. *Anthropological Science* 129(2): 121-132. <https://doi.org/10.1537/ase.210531>

著者情報



瀧上 舞 (国立科学博物館人類研究部研究員) 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、2018年国立歴史民俗博物館プロジェクト研究員を経て、2021年より現職。

(2022年3月31日掲載)

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 (Sameda 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)。

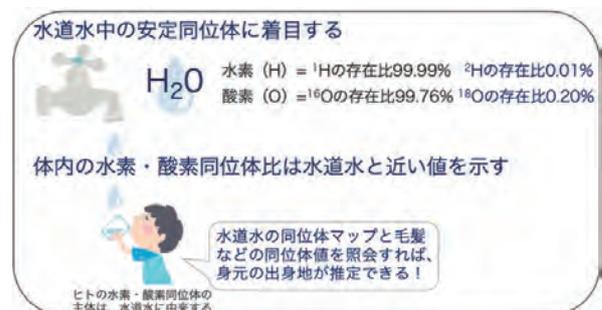


図1. 本研究のコンセプト

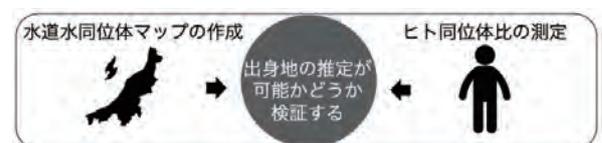


図2. 本研究の目的

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、分不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へ還元出来るよう、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）

（2020年4月7日改版）

氷河の氷の安定同位体比から復元する昔の気温

— シルクロードの気候変動を探る —

竹内 望
(千葉大学)

極地や高山に分布する氷河は、過去数百から数万年にわたって毎年雪が積もり重なって形成されたものです。氷河の中に保存された雪の年輪を掘削して得た円柱状の氷の試料を、アイスコアといいます。アイスコアの氷の構成する水の安定同位体比を分析すると、その雪が降った当時の気温を推定することができます。大気から地上に降る雪や雨の水の安定同位体は、気温が高い時ほど重い同位体をもつ水分子がわずかに多く含まれるためです。近年、南極や北極だけでなく、アジアの山岳地帯からもアイスコアが掘削されるようになりました。そのような低緯度山岳氷河のアイスコアは、数千年の我々人類の歴史とも密接と関わる環境変動を明らかにしてくれます。

1. 氷河とアイスコア

氷河とは、重力によってゆっくりと流れる雪と氷の塊で、地球の寒冷域に分布します(図1)。氷河は、南極やグリーンランドなどの極地のほか、ヒマラヤや天山、ロッキー、アンデス山脈などの高山域にも分布します。夏でも気温の低いこのよ

うな寒冷地では、一度降った雪が融けてなくなることがないため、積雪は毎年層となって積もり重なっていきます。数百から数千年という長い間、雪が降り積もると、深さ数百から数千mの巨大な雪と氷の塊となり、さらにその塊は重力によってゆっくり動き出します。このように形成されたものが、氷河です。

氷河の内部には、数百から数万年にもわたって降り積もった雪や氷が、層となって年輪のように保存されています。この氷河の年輪を氷河の上から特殊なドリルを使って掘り出した円柱状の試料を、アイスコアといいます(図2)。アイスコアは、現在から過去にかけて地球上に降った雪を連続的に保存した試料ということになります。大気上空から降ってくる雪は、大気成分や大気中に浮遊する様々な物質と一緒に巻き込んで氷河上に堆積します。このような雪に含まれる成分や物質は、その時の地球環境を示す重要な情報を持っています。アイスコアに含まれているさまざまな成分を分析することによって、過去の地球環境を連続的な時系列で復元することができるのです。アイス



図1. 中央アジア天山山脈の山岳氷河



図2. 氷河から掘削したアイスコア試料

コアの研究は、地球の過去にさかのぼるタイムマシンといってもいいでしょう。

過去の地球環境を復元する手段には、他にも樹木の年輪や湖底堆積物などがあります。その中でもアイスコアは、昔の降水や大気、大気に浮遊する物質をそのまま冷凍保存するという、他の方法にはない特徴をもった貴重な試料といえます。

2. 氷の安定同位体比と気温

雪や氷からなるアイスコアには、環境指標となる様々な微量物質が含まれており、それらの濃度や構成の分析から過去環境が復元されています。さらに氷を構成する水そのものにも、重要な環境情報が含まれています。その一つが、雪が降った当時の気温です。氷を構成する水に含まれる安定同位体の構成が、雪が降った時の気温と関係があるため、アイスコアの安定同位体分析から気温を復元することができます。

水分子を構成する酸素原子と水素原子には、それぞれ複数の安定同位体が存在します。酸素原子は質量数 16、17、18、水素原子は質量数 1、2 の同位体です。ただし、地球上に存在するほとんどの酸素原子は質量数 16、水素原子は質量数 1 の同位体です。質量数の重い同位体は、数千から数百万個の一つと、ごくわずかに含まれるだけです。ただし、水の中に含まれるこの重い同位体の量は、水が蒸発や凝結する過程で変化します。氷河の上に降る雪に含まれる重い同位体の量は、雪になる前の水蒸気が、どこからどのように蒸発して輸送されてきたかによって変化し、さらにその過程の気温の影響も大きく受けます。その過程は実際には複雑ですが、多くの場合では、気温が高いほど降水や降雪に含まれる重い同位体の量がわずかに多くなります。つまり、気温と水の重い同位体の量（水の安定同位体比）には、正の相関関係があり、その関係式を知ることができれば、降水の安定同位体比から降った時の気温を推定することができます。このように気温を推定するために利用

する水の安定同位体比を、安定同位体温度計とも言います。

厚さ 3,000 m を超える巨大な氷河である南極氷床には、過去数十万年というとても長い期間の降雪が保存されています。南極氷床から掘削されたアイスコアからは、水の安定同位体比を利用して過去数十万年間の気温変動が復元され、地球が氷期と間氷期という気候変動を十万年周期で繰り返してきたことが明らかとなりました。

3. シルクロードの気候変動

近年では南極やグリーンランドなどの極域の氷河だけではなく、ヒマラヤや天山山脈など、山岳地の氷河からもアイスコアが掘削されるようになりました。このような低緯度帯の山岳氷河のアイスコアは、極域ほど長期間の記録を持っているわけではありませんが、地理的に我々人類の生活圏と近く、過去数千年の人類の文明や移動とも関わる気候変動を明らかにしてくれます。

天山山脈は、ユーラシア大陸中央部に広がる砂漠地帯を東西 3,000 km に横切る巨大な山脈です。山脈の標高は 4,000 から 7,000 m に達し、4,000 m を超える山肌には、山岳氷河が発達しています。天山山脈の南北の山麓には、古くから西洋と東洋を結んだ交易路として知られるシルクロードが通っています。天山山脈の氷河の融解水が、山麓の砂漠地帯にオアシスを形成し、人々の往来を可能にしたためです。数千年に渡って様々な民族や文化が往来したシルクロードは、過去どのような気候変動があったのでしょうか。またその気候変動は、地域の文化や人々の往来に影響はしなかったのでしょうか。

2007 年に中央アジア、キルギス共和国の天山山脈の氷河（グリゴリア氷帽、図 3、図 4）でアイスコアの掘削が行われました。標高 4,700 m の氷河の頂上から氷河底の岩盤まで、深さ 87 m の連続的な氷が採取されました。氷河の底から得られた有機物の放射性炭素年代測定から、最底部の氷は、約 13000 年前のものであることがわかりま

した。このアイスコアは、シルクロードの 13000 年間の歴史に対応する気候変動を保存していることとなります。



図 3. 天山山脈グリゴレア氷帽頂上のアイスコア掘削キャンプ



図 4. アイスコアを掘削するアイスドリル

このアイスコアの水の安定同位体比の分析の結果、13000 年間の気温変動を復元することができました (図 5)。アイスコアの浅い部分は、氷河の表面に近くなるほど、安定同位体比は高くなっていることがわかりました。これは、20 世紀以降、降雪の中の重い同位体の量が増えている、つまり気温が上昇していることを示しています。その気温上昇量は 100 年あたり、約 1.2℃と推定できました。また、この近年の気温は、過去 13000 年間で最も温暖であることがわかりました。19 世紀以前は、小さな変動があるものの比較的安定な気温が長く続いていたこともわかりました。最も大きく気温が変化したのは、今から約 8000 年前であることがわかりました。この氷の層の安定同位体比は、大きく低下しています。過去 10000 年間は完新世と呼ばれる最終氷期の後の温暖な時代ですが、このアイスコアは完新世の初期に中央アジアでは大きな寒冷化があったことを示しています。さらにアイスコアの最深部の年代が 13000 年であったことは、13000 年前にはこの氷河は存在しなかったほど、今よりも温暖であったことを示しています。最終氷期末期に、現在よりも温暖な時代があったことは、このアイスコアの大きな発見の一つです。最終氷期から完新世にかけて、人類はユーラシア大陸を移動し分布を広げたと考えられています。このような中央アジアの気候変動は、人類の移動やシルクロードの成立にも大き

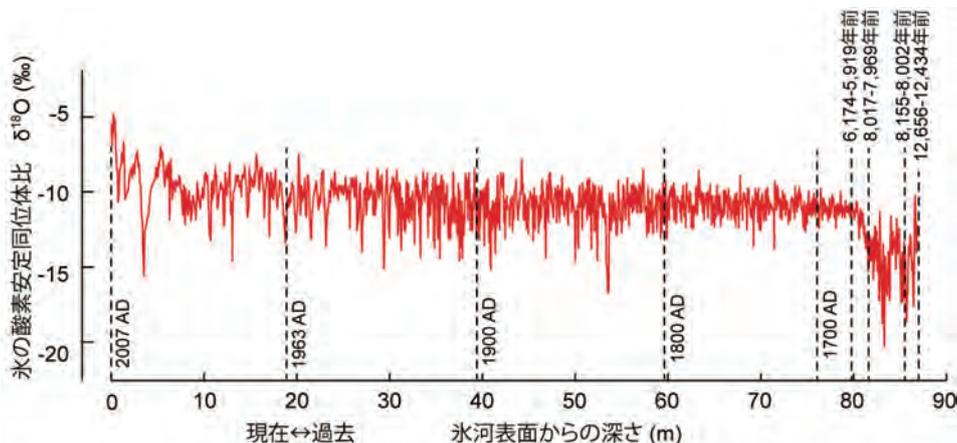


図 5. 天山山脈グリゴレア氷帽のアイスコアの酸素安定同位体比。重い同位体の量が多い ($\delta^{18}\text{O}$ が高い) ほど、気温が高いことを示しています。

く影響を与えた可能性があります。高山の氷河に保存された氷の安定同位体比を分析することで、我々は地球環境と人間文化の密接な関係を知ることが可能となり、それは将来の気候変動を予測する上でも重要な意味を持っています。

文献

- Takeuchi N, Fujita K, Aizen V B, Narama C, Yokoyama Y, Okamoto S, Naoki K, Kubota J (2014) The disappearance of glaciers in the Tien Shan Mountains in Central Asia at the end of Pleistocene. *Quaternary Science Reviews*, 103: 26e33.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.09.006>
- Takeuchi N, Sera S, Fujita K, Aizen V B, Kubota J (2019) Annual layer counting using pollen grains of the Grigoriev ice core from the Tien Shan Mountains, central Asia. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 51(1):

299-312.

<https://doi.org/10.1080/15230430.2019.1638202>

竹内望 (2012) 「天山山脈アイスコアからみる中央ユーラシアの気候変動」 In: 中央ユーラシア環境史 1 環境変動と人間 (奈良間千之編)、臨川書店、pp. 16-85

著者情報



竹内 望 (千葉大学大学院理学研究院教授) 1999年東京工業大学大学院生命理工学研究科修了、博士(理学)。アラスカ大学研究員、総合地球環境学研究所助教、千葉大学大学院自然科学研究科准教授を経て、2012年より現職。専門は雪氷学、雪氷生物学。環境変動と雪氷環境に生息する微生物の関係を明らかにするため、ヒマラヤ、天山、北極など世界各地の氷河の調査を行っている。

(2022年3月31日掲載)

ネオジム同位体比から明らかになった日本海の形成史

堀川 恵 司

(富山大学 学術研究部理化学系)

1. 日本海の形成過程

これまでに分かっている日本海の形成過程や日本列島の形成史によれば、かつて日本列島はユーラシア大陸の一部で、約 2500 ~ 2000 万年前に日本列島とユーラシア大陸の間に溝が形成され、それが徐々に拡大し、今の日本海の原型が形成されたようです。日本海の拡大が終息した 1000 万年前には、日本列島の分布は現在の弧状に近い配置になっていましたが、西日本は朝鮮半島と陸続きで、東日本の大部分は海面下にあったようです。当時の日本海は、日本列島によって閉ざされた現在のような半閉鎖的な縁海ではなく、東側に大きく開いた湾のような形状をし、日本海と太平洋との間で表層水や深層水を交換していたとされています。しかし、1000 万年前以降、東日本～北海道地域が徐々に隆起し、太平洋と日本海の間にあった海峡が徐々に縮小・浅海化して、現在のような半閉鎖的な日本海が作られました (図 1)。

日本海が太平洋と分離し、閉鎖的になっていく過程は、東北日本の隆起活動や日本列島の形成と密接に関係していますが、いつ頃、そしてどの程度の時間スケールで起こったか、については実はよく分かっていませんでした。そこで、著者らは「海水の由来」を判別できるネオジム (ネオジウムとも表記する) 同位体比に着目して、日本海の閉鎖時期を解析することにしました。これは、東北日本の隆起活動によって日本海が閉鎖的になれば、太平洋からの海水の流入が制限されるため、日本海深層水の化学組成が太平洋と異なるようになる、この変化をネオジム同位体比から明らかにできるのではないかと考えたからです。

2. 海水の由来が分かるネオジム同位体比

海水中には、大気から供給されるダスト粒子の溶脱や、岩石の風化、海底熱水からの供給など、様々な経路から様々な元素が供給され、蓄積して

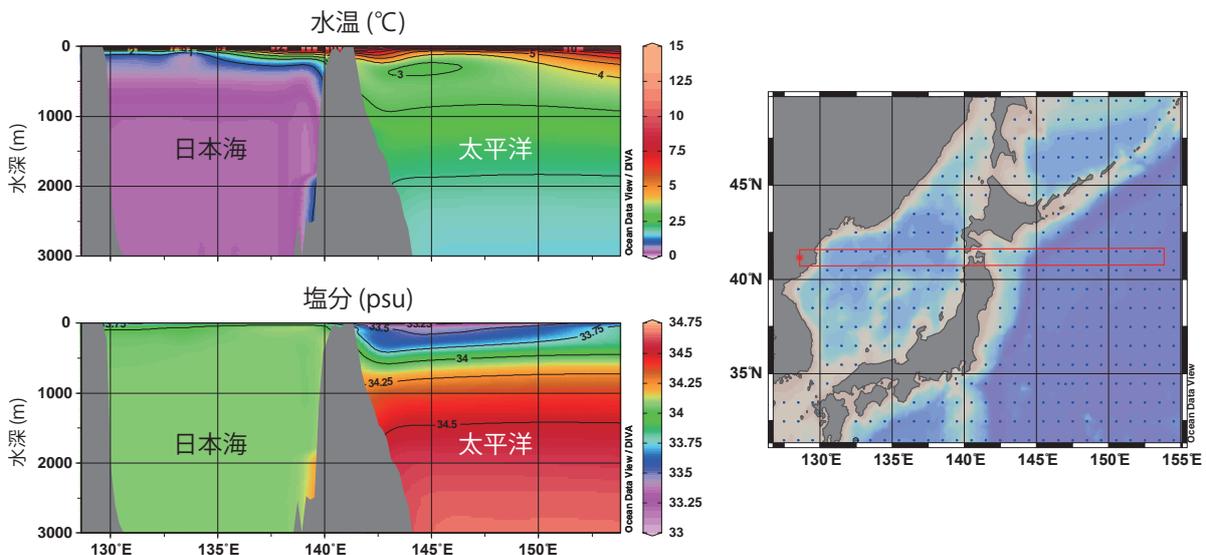


図 1. 日本海—太平洋の水温と塩分の断面図。外洋との深層水の交換がない半閉鎖的な日本海の水温・塩分は太平洋域の水温・塩分と異なった鉛直構造を示す。

います。本稿で取り上げるネオジウム (Nd) も海水に溶けている元素の一つで、主に大陸の岩石が水との反応で溶け (化学風化)、河川を通じて海洋に供給されている元素になります。海水中のネオジウム濃度は数十ピコモル (pmol)/kg 程度で、これは海水中の主要イオンの一つであるマグネシウム (Mg、約 50mmol/kg) と比べると、10 億分の 1 の濃度になります。このような海水中に微量にしか存在しない元素を、微量元素あるいは極微量元素と呼んでおり、ネオジウムもそのような微量元素の一つになります。

このような微量元素の同位体組成を分析するのは、非常に難しく、大量の海水試料の濃縮が必要であるにもかかわらず、1979 年には既に海水中のネオジウム同位体比の分布が報告されています。この結果は、ネオジウム同位体比の水塊化学トレーサーとしての有用性を明示した点で非常に重要な黎明期の研究結果の一つです。

なぜ、1970 年代から海水のネオジウム同位体比が注目され、分析され始めたかという点、当時既に深海底のマングノジュール¹⁾ のネオジウム同位体比 (海水組成を反映する) が分析されており、その結果から太平洋や大西洋で同位体比が異なること、ネオジウムの海洋での滞留時間が短いことなどから、ネオジウム同位体比が海水の混合や循環を解析できるトレーサーになるのではないかと、考えられ始めたためです。

ネオジウムは、質量数の異なる 7 つの同位体 (142, 143, 144, 145, 146, 148, 150) を持ち、多くの研究で議論に用いられるネオジウム同位体比は、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ の存在比になります。 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比の変動を議論する理由は、質量数 144 のネオジウム (^{144}Nd) は安定同位体であるのに対して、質量数 143 のネオジウム (^{143}Nd) は、質量数 147 のサマリウム (^{147}Sm) の放射壊変 (半減期 1.06×10^{11} 年) によって、生成される核種だからです。例えば、ある岩石中にサマリウムとネオジウムが含まれていた場合、時間が経過するにつれ、 ^{147}Sm の一部が ^{143}Nd へ放射壊変し、岩石中の ^{143}Nd 量が少し増

えます。そのため、マグマが固化してできた岩石の形成年代が古いほど、あるいは、岩石中にサマリウムが多量に含まれるほど、岩石は高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を持つことになります。つまり、岩石の形成年代・種類 (Sm/Nd 比) に応じて、岩石のネオジウム同位体比が多様に変化します。また、岩石を形成するマグマ源自体の同位体比の変化 (時間と共に $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比が増加) も合わせ、一般に年代の古い大陸地殻が広く分布する北米・グリーンランド域では、低い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を示す岩石が見られ、より形成年代の若い火山岩が広く分布する太平洋域では、より高い $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比を持つ岩石が分布しています。

陸域に露出する岩石のネオジウム同位体組成は、河川を通じて沿岸海水のネオジウム同位体比にも影響を及ぼします (図 2)。このような関係は海盆スケールでも見られ、北大西洋の海水は $-12\epsilon_{\text{Nd}}$ 程度 (エプシロンネオジウム値²⁾) で、北太平洋の海水は $-4\epsilon_{\text{Nd}}$ 程度の値を示し、周辺陸域の岩石のネオジウム同位体比に概ね一致し、各海域・水塊ごとにネオジウム同位体比組成が大きく異なることがわかってきています。また、ネオジウム同位体比は、生物活動によって同位体比が変化することがないため、半保存性成分として振る舞うことも分かってきており、このような性質から「海水の由来」を解析できる化学トレーサーとされています。

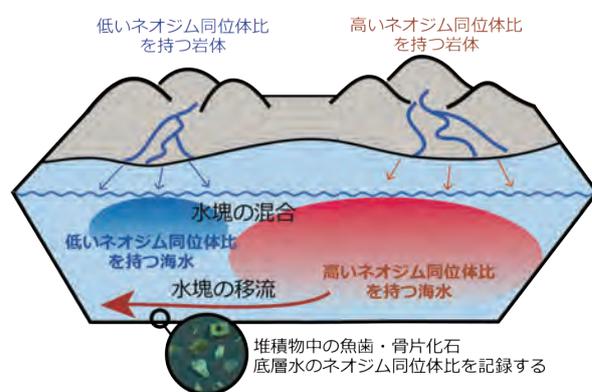


図 2. 海水のネオジウム同位体比の分布を決める要因の概念図



図3. 堆積物中に含まれる魚歯・骨片化石の写真。スケールはおよそ1 mm。

3. 魚の歯や骨の化石に記録される海水のネオジウム同位体比

陸から遠く離れた海洋底では、1000年間でおよそ1 cm程度の早さで堆積物が降り積もっていきます。このような堆積物について単2電池一個分程度の量を取って顕微鏡で覗くと、0.1～2 mm程度の魚の歯や骨片を十数個、場合によっては百個程度見つけることができます(図3)。0.1～2 mmの骨片数十個というのは、非常に少ない量ですが、魚の歯・骨はアパタイトで形成されており、海水中のネオジウムを濃縮しています。このような濃集する性質を持つことで、微量であっても歯や骨片化石のネオジウムの同位体比の分析ができます³⁾。最も重要な点は、このように分析される魚歯骨片化石のネオジウム同位体比が、当時の海底面付近の海水のネオジウム同位体比を記録している点です。このような特性を持つ魚歯骨片化石を各時代の海底堆積物から拾い集め、ネオジウム同位体比を分析することで、ネオジウム同位体比の変化から、当時海底面を流れていた「海水の由来」を知ることができます。

4. ネオジウム同位体比から明らかになった日本海の形成史

著者らは、2013年に統合国際深海掘削計画(Integrated Ocean Drilling Program (IODP) 346次航海)において、日本海中央部の大和堆で掘削された堆積物試料(過去1000万年間で堆積した全長約400 m)を対象として、魚歯・骨片化石のネオジウム同位体比を分析しました。ネオジウム

同位体比の分析から、試料を採取した日本海中央部の深層水が、いつ頃から北太平洋(ネオジウム同位体比高い)や南太平洋に由来(ネオジウム同位体比やや低い)する外洋の海水の影響を受けなくなったのかを調べようと思いました。

ネオジウム同位体比の結果から、日本海の深層水は、1000-850万年前の間は、北太平洋に由来する海水(ネオジウム同位体比高い)の影響を受けており、850万年-450万年前については、南太平洋に由来する海水(ネオジウム同位体比やや低い)の影響を受けていたことが分かりました(図4)。さらに興味深いことに、450万年前、約14万年間の短期間に、日本海のネオジウム同位体比が大きく減少していたことも分かりました。これは、高いネオジウム同位体比をもつ太平洋の海水が、日本海に流入しにくくなったことを示しています。

450万年前前後は、ちょうど太平洋プレートの運動が活発で、プレート縁辺にあたるニュージーランドやパプアニューギニアなどで造山運動が盛んだった時期に対応しており、東北日本でも造山運動が活発だった時期と重なります。そのため、今回得られたネオジウム同位体比データと併せて考えると、450万年前頃に東北日本の隆起により、太平洋と日本海を繋いでいた海峡が14万年程度の短期間に浅海化・縮小し、日本海と太平洋の海

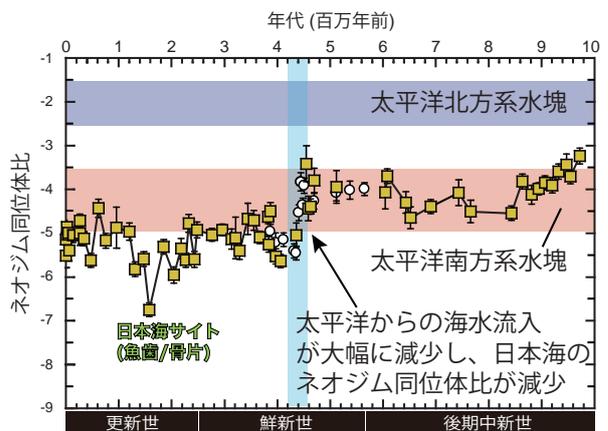


図4. 日本海堆積物中の魚歯・骨片化石のネオジウム同位体比の過去1000万年間の変動。同時期の太平洋北方系水塊と南方系水塊のネオジウム同位体比も合わせて示した。450万年前に日本海のネオジウム同位体比の急激な減少が見られる。

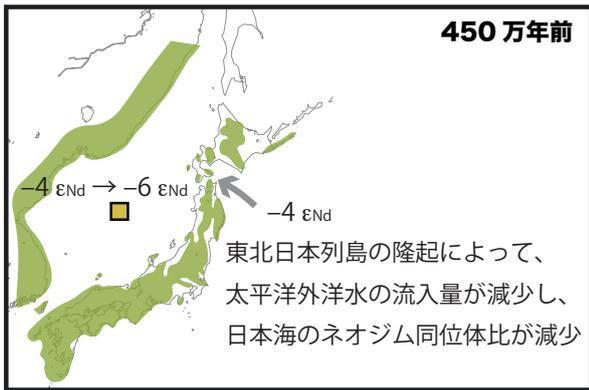


図5. 450 万年前の日本海の推定される古地理図。東北日本の隆起に伴って、太平洋から日本海に流入する海水が大幅に減少したことが、日本海のネオジウム同位体比から示唆される。

水交換が大幅に減少したことが推測されます(図5)。つまり、東北日本の隆起が障壁になって、日本海と太平洋間での深層水交換を減少させたことから、日本海と太平洋との分離はこの時期に起こったと言うことができます。

5. おわりに

日本海の形成史や日本列島の形成史は、多くの研究者が日本海海底にある大陸地殻の厚さと形、地磁気縞、断層の走向と分布、陸上岩石の古地磁気や日本海海底堆積物に残された微化石記録を丹念に調べることで復元されてきました。本研究は、これまで日本海では適用されていなかった「海水の由来」を探れるネオジウム同位体比を用いることで、日本海の閉鎖史をこれまでよりも高い時間解像度でかつ鮮明に描きました。

注釈

- 1) 堆積物中に形成されたマンガンやコバルト、鉄、ニッケルに富んだ球形の塊。

(2021年3月31日掲載)

(2022年3月31日改版)

- 2) エプシロンネオジウム値

$$\epsilon_{\text{Nd}} = \left(\frac{{}^{143}\text{Nd}}{{}^{144}\text{Nd}}_{\text{sample}} / 0.512638 - 1 \right) \times 10^4$$

- 3) アパタイトに濃集しているネオジウムは、およそ 100 $\mu\text{g/g}$ 以上の濃度になる。したがって、骨片化石がおよそ 1 mg あれば、ネオジウム同位体比の分析ができます。海水のネオジウム同位体比の分析には、10 ~ 20 kg の海水が必要なことを考えると、アパタイト化石へのネオジウムの濃集の程度がよくわかると思います。

文献

Kozaka Y, Horikawa K, Asahara Y, Amakawa H, Okazaki Y (2018) Late Miocene–mid-Pliocene tectonically induced formation of the semi-closed Japan Sea, inferred from seawater Nd isotopes, *Geology*, 46(10), 903–906, <https://doi:10.1130/g45033.1>.

著者情報



堀川恵司(富山大学学術研究部理学系准教授)2006年、北海道大学大学院地球環境科学研究科博士後期課程修了。博士(地球環境科学)。日本学術振興会特別研究員(DC1)、高知大海洋コア総合研究センター、名古屋大学・フロリダ大学(日本学術振興会特別研究員PD)、富山大学大学院理工学研究部(理学)助教などを経て、2013年より現職。専門は、古海洋学、地球化学。