

重元素同位体

申 基 澈
(総合地球環境学研究所)

重元素というものが何を指すのかということには決まった定義はありません。これは便宜上使う言葉であり、分野によってはその意味も変わります。地球科学分野では主に金属元素のことを言いますが、軽元素（水素、炭素、窒素、酸素等）より重い元素という意味で使う人もいます。

まず、重元素同位体について話す前に、用語について話しておきます。同位体は、原子核が安定しているかどうかによって放射性同位体（Radioactive Isotope；RI）と安定同位体（Stable Isotope；SI）とに分けられますが、この安定同位体には、もともと安定な同位体と放射起源同位体（Radiogenic Isotope）が含まれます。ここでは重元素（金属元素）の放射起源同位体と安定同位体の両方について話します。一般的に重元素同位体というと放射起源同位体のことを指すことが多いのですが、2000 年頃から分析技術の発展に伴い、それまでは出来なかった金属元素の安定同位体の測定が可能になったため、両方を区別しておく必要があります。

1. 放射起源同位体（Radiogenic Isotope）

一般的に安定同位体というのは、太陽系が出来て以来その存在量に変化がなくて一定に安定して存在しているものですが、放射起源同位体は親元素である放射性元素の放射壊変によって生成する安定した同位体です。この放射起源同位体は、時間が経つことによってその存在量はどんどん増えていきます。その一方で親元素の放射性元素はその存在量が少なくなっていて、最終的にはなくなることになります。この関係を「親元素（放射性）— 娘元素（安定）」と表記します。このような同位体は、条件が合えばそれらを含んだものの

年代測定に用いることができます。昔から地球と隕石の年代や各種岩石の形成年代測定に用いられ、U-Pb（ウラン—鉛）年代測定法や Rb-Sr（ルビジウム—ストロンチウム）年代測定法などがこれに当たります。このような放射性同位体—放射起源同位体は他にも K-Ar、Sm-Nd、U-Pb、Th-Pb、Lu-Hf、Re-Os などがあり、アルゴン（Ar）、ネオジミウム（Nd）、鉛（Pb）、ハフニウム（Hf）は放射起源同位体となります。ここでは Sr（ストロンチウム）を中心にお話しします。

Sr は 4 つの安定同位体を持っており、 ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{87}Sr 、 ^{88}Sr です。 ^{87}Sr が放射起源同位体ですが、厳密にいうと太陽系が形成された時にすでにあった安定同位体とその後 ^{87}Rb の放射壊変で生成された放射起源同位体の両方からなっています（図 1）。

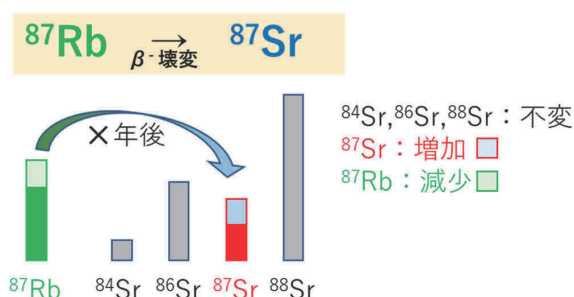


図 1. Rb の放射壊変と Sr 安定同位体の変化

安定同位体である ^{84}Sr 、 ^{86}Sr 、 ^{88}Sr の比は地球上のどの物質でも一定の値を持っているため変わりません。変わるのは量が増える ^{87}Sr のみです。

同位体研究では、実際計測が難しい各同位体の絶対値を求めるより、それらの存在比の方が比較的容易に測定できます。Sr では $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比で放射起源同位体を、 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比で安定同位体を求めています。特に $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は時間の経過でし

か変化しないため、ある物質に含まれている Sr 放射起源同位体比は、温度や圧力変化などの環境変化によってはその値が変わりません。

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ の放射起源同位体は 1960 年代以降から岩石研究に広く利用され、様々な岩石について同位体比の測定が行われてきました。その結果、岩石の種類とそれらの形成年代によって $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比が異なることが分かってきました。富士山玄武岩なら $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比は 0.704 くらい (倉沢 1986) で、屋久島花崗岩なら 0.708-0.709 (Anma et al. 1998)、海水は 0.70918 (Faure and Mensing 2005) です。

つまり、ある地域の岩石は特定の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比を持っていて、同じ岩石であっても他の地域の違う年代のものや、同じ年代であっても違う種類の岩石であれば、その同位体比が違うことになります。これを用いると、岩石の Sr 放射起源同位体から何処から出てきた岩石かを推定することが可能になります。Sr と共に Nd や Pb などの同位体

く似ており、Sr が Ca を置換して存在することができます。Ca は岩石に多く含まれている元素ですが、岩石の風化過程で水に溶けて移動します。水に溶けている Ca は動物や植物が容易に取り入れることができるので、骨格を構成するなど生物にとって主要な元素の一つとして使われています。そのため Ca と置換している Sr は微量ながらも様々な生物に広く存在していて、それらの放射起源同位体を測ることで、その生き物がずっとそこに居たものなのか、それともどこから来たものなのか、どこからきたのかなどを明らかにすることができます。例えば、遺跡から出土した縄文時代の人骨と動物骨について Sr 同位体比を測定し、その地域で生存したものか他地域からの転入した個体かを明らかにした研究報告が報告されています (日下 2018)。

2. 重元素安定同位体 (Stable Isotope)

重元素の安定同位体は 2000 年頃からの分析技術の進歩によって可能になった研究分野です。特に MC-ICP-MS (高分解能マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置) という装置の開発は高分解能測定ができるため、金属元素の安定同位体比測定に大きな進展をもたらしました。重元素は軽元素に比べると同位体間の相対的な質量差が小さく、また化学反応の際に同位体間に起きる結合力の差が小さいため同位体比の変化 (同位体分別) が起きにくいという特徴があります。そのため、わずかな変化を検知するためには高分解能高精度の同位体分析装置が必要となります。

2004 年に「Geochemistry of Non-traditional Stable Isotopes」という本が出版されて以来、この分野の研究が拡大されることになり、マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca)、鉄 (Fe)、銅 (Cu)、亜鉛 (Zn) などの天然環境で生物活動と密接な関係を持っている元素を中心に研究が進んでいます。

これにより、金属の酸化還元反応や微生物による反応、生物間での捕食被食関係、体内組織での

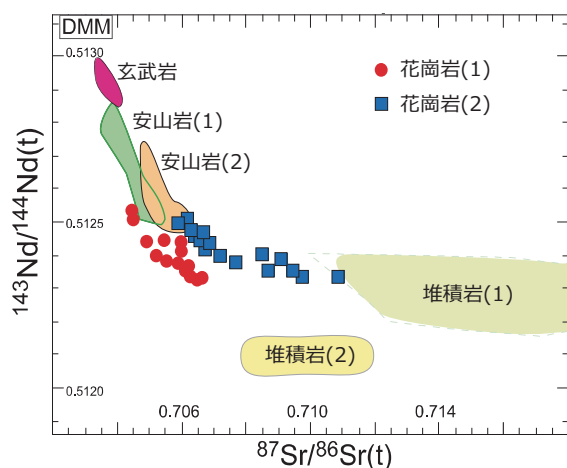


図 2. 岩石研究で用いられる Sr-Nd 放射起源同位体図の例。花崗岩 (1) は安山岩 (1) と、花崗岩 (2) は安山岩 (2) 及び堆積岩 (1) と密接な関係を持っていることが分かります。

を一緒に解釈することでより正確な関係が分かります (図 2)。

Sr 放射起源同位体を用いることで物質や元素の移動を追跡することができるため、Sr はトレーサービリティ研究によく用いられています。これは Sr の化学的な挙動がカルシウム (Ca) とよ

生化学反応など様々な要因により、重元素でも同位体分別が起きていることが明らかになってきました。

上で話したように、放射起源同位体はその比を測定してその数値をそのまま使いますが、安定同位体は、軽元素と同様に基準となる標準物質の値に対する未知試料の値のずれとして表します。そのため安定同位体比測定では標準物質(Reference materials; RMs)の役割は非常に重要です。しかし、現実問題としてこの標準物質が十分に安定して供給されていないという問題があります。標準物質(又は認定標準物質; Certified RMs)は分析において必要不可欠なものであり、測定値の補正や、測定法及びその正確度の評価に使われます。また、他研究室との比較などでも利用されているため、測定値の信頼度を担保する重要な物質です。

このような標準物質は安定同位体比を測定するためには十分に均質であり、かつ時間の経過でその値が変化しないということが重要です。放射起源同位体で使っていた標準物質を安定同位体で用いたり、新たな標準物質を作成したりしていましたが、同位体的に不均質だったり、作成したものを使い切ってしまったなど、残念ながらその供給は安定していません。

重元素の安定同位体比は分析装置で測定しますが、試料を調整する段階で大きな同位体分別が起きやすいので、試料の前処理では細心の注意が必要です。

MC-ICP-MS を用いた重元素の安定同位体研究は、軽元素の安定同位体研究や放射起源同位体

研究に比べるとまだその歴史が浅く、直面している問題点も多いですが、その分開拓の余地も大いにある分野でもあります。

文献

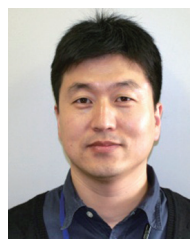
Faure G, Mensing T. (2005) 「ISOTOPES principles and applications 3rd ed.」 John Wiley & Sons, INC.

倉沢一 (1986) ストロンチウム同位体比からみた日本列島弧の火山岩類の成因. 地学雑誌 95-4, p. 254-276.

Anma R. et al. (1998) Compositional zoning and its implication in a toroidal circulation inside the Yakushima pluton, SW Japan. Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue, 53, 157-176. <http://id.nii.ac.jp/1291/00002343/>

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



申 基澈 (総合地球環境学研究所 研究基盤国際センター)、2008 筑波大学大学院生命環境科学研究科 博士課程終了、博士(理学)、2009 筑波大学 研究基盤総合センター研究員、総合地球環境学研究所技術補佐員、2011 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)

(2020 年 4 月 7 日改版)