

レニウム-オスミウム法による火山性塊状硫化物鉱床の生成年代決定

野崎 達生

Nozaki Tatsuo

1. はじめに

「鉱床」とは、資源として利用できる元素や石油・天然ガス（エネルギー）等が濃縮している場所で、採掘して経済的に採算が取れるものをさす。そして「鉱床学」とは、鉱床がどのようにして形成されたかというなりたちや規則性（＝成因）を解明し、人類にとって有用な資源を得る方法を検討する学問である。鉱床学のゴールは、一般的には対象とする元素の『起源・運搬・濃集』の3つの要素を解明することであると言われるが、地質学・地球化学・地球物理学・熱力学・微生物学等複数の研究領域にまたがる学際的な学問である。前記の成因を解明するうえで、最も基礎的な情報の1つが鉱床（を構成する鉱物）の生成年代決定である。なぜならば、鉱床の生成年代が明らかになれば、(1) どのような地質学

的現象・イベントと関連して鉱床が生成されたのか、(2) 今後同タイプの鉱床を探索していくうえで、どの・どの年代の地層を探索していけばよいかが明らかになるからである。

鉱床の生成年代決定には、(I) 鉱床母岩やそれらに変質した岩石に含まれるケイ酸塩鉱物（雲母、長石、角閃石等）の K-Ar 年代、Ar-Ar 年代、Rb-Sr 年代等の放射年代、あるいは (II) 鉱床母岩や周辺岩石に含まれる（微）化石年代（放散虫、有孔虫、コノドント、アンモナイト等）が用いられてきた。これらは鉱床の成因を理解するうえで重要な年代情報を提供してくれるが、熱水鉱床のように主要構成鉱物が硫化鉱物（鉱物の分類上で硫黄と結合している鉱物群）の場合には、鉱床の生成年代について“間接的”な情報しか与えてくれないという弱点があった。そこで最近では、Re-Os（レニウム-オスミウム）

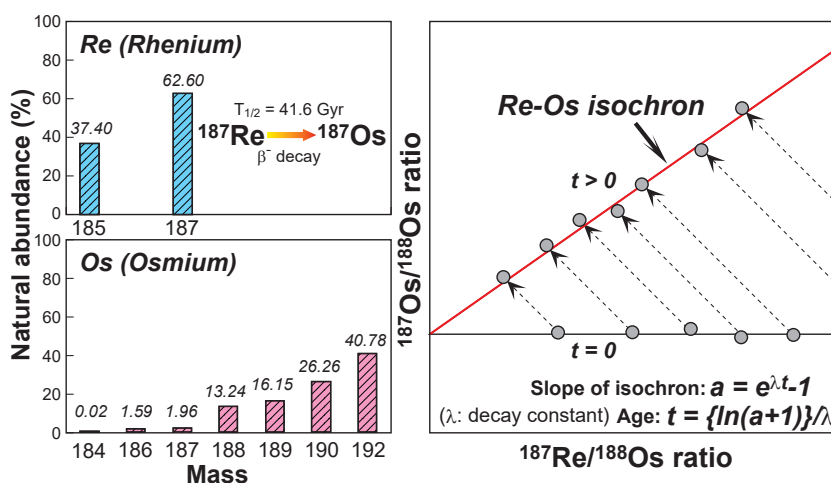


図1 Re-Os 年代決定法の原理^{5,6)}

放射壊変系を用いて、硫化鉱物の数値年代を“直接的”に決定する試みが1990年代から盛んに行われており^{1,2)}、日本においてもいくつかの鉱床に適用されつつある。本稿では、Re-Os年代決定法の原理(図1)及び筆者らのグループがそれを火山性塊状硫化物(VMS)鉱床(=過去の海底熱水鉱床)に適用した最近の事例について紹介する³⁾。

2. Re-Os 放射壊変系による年代決定の原理

Re, Osは、原子番号75番、76番の元素であり、OsはPtやPd等と共に6つある白金族元素のうちの1つである。Reは主に¹⁸⁵Reと¹⁸⁷Reの2つの同位体から構成され、Osは主に¹⁸⁴Os, ¹⁸⁶Os, ¹⁸⁷Os, ¹⁸⁸Os, ¹⁸⁹Os, ¹⁹⁰Os, ¹⁹²Osの7つの同位体から構成される(図1)。Re同位体の中で、¹⁸⁷Reは放射性同位体であり、半減期416億年で β^- 壊変して¹⁸⁷Osを生じる(なお、1つ以上の安定同位体を持つ元素の中で、天然放射性同位体が安定同位体より多く存在している元素は、In, Te, Reのみである)。この放射壊変系について、安定同位体である¹⁸⁸Osとの比を取ると、以下の式が成り立つ。

$$\left(\frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{188}\text{Os}}\right) = \left(\frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{188}\text{Os}}\right)_i + \left(\frac{{}^{187}\text{Re}}{{}^{188}\text{Os}}\right)(e^{\lambda t} - 1) \cdots (1)$$

ここで*i*は初期値を、 λ は¹⁸⁷Reの壊変定数(1.666×10⁻¹¹)⁴⁾を示す。ある鉱物が形成したときのOs同

位体比初期値($(\frac{{}^{187}\text{Os}}{{}^{188}\text{Os}})_i$)が一定で、なおかつ現在まで試料の同位体系の閉鎖系が保たれていれば、化学分析をして得られる¹⁸⁷Re/¹⁸⁸Os比を横軸に、¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os比を縦軸に取ってプロットすると、一直線上に並ぶ(図1)。この直線はアイソクロン(等時線)とよばれ、アイソクロンの傾きから鉱物の生成した年代値*t*を求めることができる。

従来の放射年代決定法との大きな違いは、Re, Osが共に親鉄・親銅元素であるために、硫化鉱物に濃集しやすい性質があることである。更に、有機物にも濃集しやすい性質があるため、硫化鉱物、隕石、石油鉱床、黒色頁岩等、従来の放射年代法では直接的に年代軸を入れづらかった試料に対して、数値年代(以前は絶対年代という用語が使用されていた)を得られるのが大きな特長である。なお、Re-Os年代決定法に関する日本語の文献はあまり多くないが、筆者らのグループによるレビュー論文が日本語で書かれており⁵⁾、本誌においてもRe-Os年代決定法について以前に紹介されているので⁶⁾、より詳細についてはそれらを参照されたい(https://www.jrias.or.jp/books/pdf/201505_TRACER_NOZAKI.pdf)。

3. 火山性塊状硫化物(VMS)鉱床への適用

3.1. 対象試料及びRe-Os組成・年代

我々が暮らしている日本列島の基盤岩は、飛騨帯・

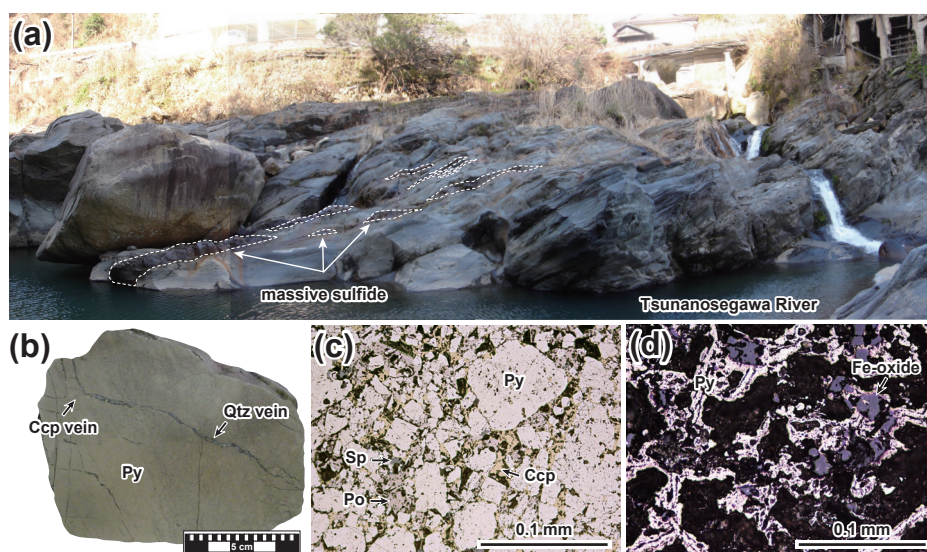


図2 宮崎県槇峰鉱床の (a)露頭写真, (b)黄鉄鉱に富む鉱石試料の断面写真, (c)自形黄鉄鉱に富む鉱石試料の顕微鏡写真, (d)コロフォーム黄鉄鉱と磁鉄鉱に富む鉱石試料の顕微鏡写真³⁾

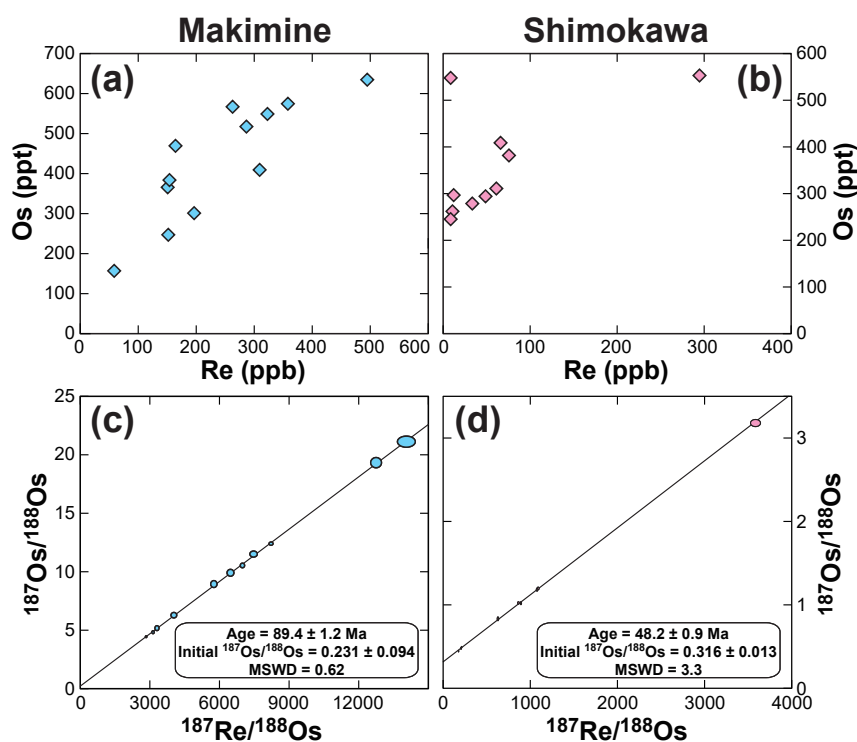


図3 宮崎県榎峰鉱床及び下川鉱床の (a, b) Re・Os 濃度, (c, d) $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比・ $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比及びアイソクロン年代³⁾

南部北上帯等の中国古大陸の断片を除くと、残りの大部分は過去5億年以降に形成された付加体から構成されている⁷⁾。付加体には、過去の海洋地殻やその上に累重した堆積物（チャート、泥岩、砂岩、石灰岩等）が取り込まれるため、しばしば過去の海洋底で生成した鉱床も取り込まれており、それが現在陸上で観察される。具体的には、海底熱水鉱床に由来するVMS鉱床、中央海嶺近傍の熱水性堆積物に由来するアンバー鉱床（Fe-Mn鉱床）、海洋玄武岩の熱水活動に由来するMn鉱床、層状Mn鉱床等である^{8,9)}。VMS鉱床のうち、中央海嶺の海底熱水鉱床に由来するものは別子型鉱床（Besshi-type deposit）とよばれ、島弧・背弧の海底熱水鉱床に由来するものは黒鉱鉱床（Kuroko deposit）とよばれており、どちらも本邦発の学術用語である。別子型鉱床は様々な地質帯・付加体に分布しているが、黒鉱鉱床は日本海拡大に伴って形成されたグリーンタフベルト（緑色凝灰岩帯）に胚胎している。本研究では、四万十帯北帯（白亜紀付加体）及びその北方延長である日高帯（古第三紀付加体）に胚胎している宮崎県榎峰鉱床（図2）及び北海道下川鉱床の鉱石試料に対して、Re-Os年代決定法を適用した。ど

ちらの鉱床も、現地性玄武岩（砂岩・泥岩に貫入しているが、全岩化学組成は島弧玄武岩ではなく、中央海嶺玄武岩（N-MORB）に類似している岩石）を伴い^{10,11)}、遠洋性堆積物に由来するチャートを伴わないのが大きな特徴である。

記載（肉眼・顕微鏡観察、構成鉱物の同定、組織観察）・分析には、榎峰鉱床が分布する宮崎県延岡市の綱の瀬川沿いから採取された鉱石試料及び北海道下川鉱床における探査・ボーリング調査によって得られたコア試料を用いた。これらの鉱石試料は黄鉄鉱（ FeS_2 ）が卓越し、他の主要構成鉱物は閃亜鉛鉱（ ZnS ）、磁硫鉄鉱（ Fe_{1-x}S ）、黄銅鉱（ CuFeS_2 ）、磁鉄鉱（ Fe_3O_4 ）である（図2）。分析には硫化物鉱石試料を粗割し、重液（ジヨードメタン CH_2I_2 ： $\rho = 3.33 \text{ g/cm}^3$ ）分離によってケイ酸塩鉱物を除去したものをを用いた。すなわち、Re-Os分析に用いた鉱石試料は、単鉱物を分離したものではなく、複数種類の硫化物鉱物の混在物（黄鉄鉱に富む）である。

宮崎県榎峰鉱床のRe-Os組成は、Re濃度が59.0～495 ppb、Os濃度が157～635 ppt、 $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比が2600～14000、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が4.4～21.1の範囲を示す（図3）。北海道下川鉱床のRe-Os組成は、Re

濃度が 8.8~295 ppb, Os 濃度が 246~554 ppt, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比が 81.4~3590, $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が 0.45~3.2 の範囲を示す (図 3a, b)。Re, Os は共に親鉄・親銅元素であるが, このように ppt~ppb レベルの濃度が通常である (Re を結晶構造に取り込みやすい輝水鉛鉱は ppm レベルの Re を含む^{1,2)}, コンドライト隕石は数十~数百 ppm レベルの Re, Os を含む)。両鉱床の $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比及び $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比は良好な直線性を示し, その近似直線 (アイソクロン) の傾きから, 槇峰鉱床の硫化物鉱石の Re-Os 年代は 89.4 ± 1.2 Ma (1 Ma = 100 万年前), Os 同位体比初期値 ($(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$) は 0.231 ± 0.094 , 北海道下川鉱床の硫化物鉱石の Re-Os 年代は 48.2 ± 0.9 Ma, Os 同位体比初期値は 0.316 ± 0.013 と求められた (図 3c, d)。

3.2. Re-Os 年代の意義

宮崎県槇峰鉱床が胚胎する四万十帯北帯蒲江亜層群槇峰層の砂岩・泥岩からは, サントニアン~カンパニアン中期 (86.3~77.9 Ma) を示す放散虫化石が報告されている¹²⁾。北海道下川鉱床が胚胎する日高帯下川緑色岩体からは化石年代は報告されていないが, 近接する岩尾内フリッシュ (砂泥互層) に含まれるジルコンの U-Pb 年代は, 若いもので 47.0 ± 11.0 Ma を示す¹³⁾。したがって, 硫化物鉱石の Re-Os 年代と周辺に分布する砂岩・泥岩の堆積年代はほぼ同じタイミングであり, 露頭において観察さ

れる地質学的特徴も考慮すると (図 2), 一部は過去の海底 (及び海底下) で未固結堆積物を置換しながら生成していると考えられる。その他の地質学的・地球化学的特徴として, 両鉱床は母岩として現地性玄武岩を伴うこと^{10,11)} (= 鉱床は中央海嶺で生成している), 遠洋性堆積物に由来するチャートを随伴しないこと (= 鉱床の堆積場は, 大陸から遠く離れた遠洋域ではなく, 砂泥互層が堆積するような比較的大陸に近い場所である), 放射壊変起源の ^{207}Pb 及び ^{208}Pb に富む radiogenic な Pb 同位体比組成を示すこと¹⁴⁾ (= 鉱床を構成する硫化鉱物中の金属元素は, 玄武岩だけでなく周囲の堆積岩からも供給されている), 硫化鉱物の硫黄同位体比組成 ($\delta^{34}\text{S}$) が +4~+12‰ とやや重い値を示すこと⁸⁾ (= 堆積物中に重たい $\delta^{34}\text{S}$ を持つ海水がトラップされ, 海水由来の SO_4^{2-} が還元されて含まれている), 変成鉱物組合せから推定される地温勾配が周辺地域よりも高いことから¹⁵⁾, 両鉱床は白亜紀~古第三紀にかけて, 日本列島に中央海嶺が沈み込む直前の堆積物が被覆した環境で生成したと考えられる (図 4)³⁾。

海嶺沈み込み現象は, 日本列島においては約 1 億年に 1 回のペースで起こっていると考えられ, 低温高压型及び高温低压型の「対の変成帯」の形成 (例えば, 三波川帯と領家帯), バソリス (巨大花崗岩体) の形成及びそれに引き続く構造浸食を引き起こし, 沈み込み帯の上に位置する活動的大陸縁辺域の構造史を紐解くうえでキーとなる地質学的現象の 1 つで

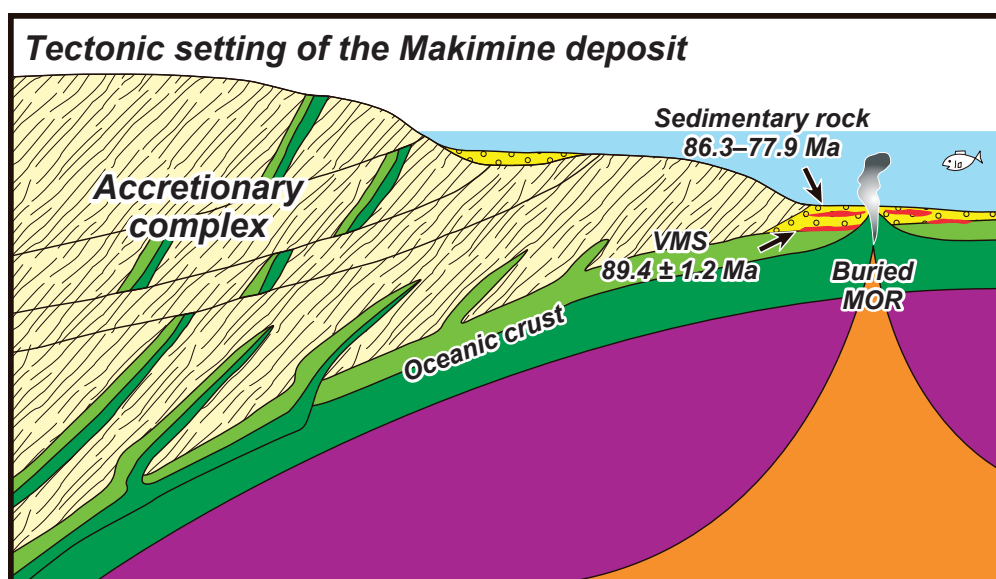


図 4 宮崎県槇峰鉱床の堆積場³⁾

ある⁷⁾。今後、付加体中に胚胎し、現地性玄武岩を伴う別子型鉍床の Re-Os 年代決定を更に進めていくことで、世界における海嶺沈み込みのタイミングが確度・精度よく求まり、それぞれの地質帯の構造史の解明につながることを期待される。

4. まとめと今後の展望

本稿では、Re-Os 放射壊変系を用いた年代決定の原理及び VMS 鉍床への最近の適用例について紹介した。本年代決定法が開発されてから 30 年以上が経過しているが、従来の年代決定法と異なる大きな利点は硫化鉍物、隕石、石油鉍床、黒色頁岩等の数値年代を直接的に得られる点である。Re, Os の濃度が通常は ppt~ppb レベルであること、Re 及び Os の分離及び濃縮するための前処理プロセスがやや煩雑であること、同位体測定には検出器を複数備えた大型の質量分析装置（マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置（MC-ICP-MS）や負イオン表面電離型質量分析装置（N-TIMS）等）が必須であることが短所であるが、今後も地球史を解読するうえで重要な年代決定法の 1 つとして活用されていくと考えられる。

Re-Os 同位体のもう 1 つの重要な地球化学的用途として、 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比を使った研究が挙げられる¹⁶⁾。Re の方が Os に比べて液相に濃集しやすい不適合 (incompatible) 元素であるため、各岩相 (リザーバー) 間で Re/Os 比が異なり、時間の経過と共に $^{187}\text{Re} \Rightarrow ^{187}\text{Os}$ の放射壊変により $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 比が大き

なバリエーションを示す¹⁷⁾。具体的には、大陸地殻 (河川水) が ~1.4 という高い値を、マントル (熱水) と隕石 (宇宙塵) が 0.12~0.13 という低い値を持つことを利用して、古環境変動解読、大規模火成活動や隕石衝突イベントの追跡、火成岩のマグマソースを解明する研究等に応用されている。Re-Os 同位体は年代決定だけでなく、今後も様々な研究に応用され続けていくことが期待される。

参考文献

- 1) Stein, H. J., *et al.*, *Terra Nova.*, **13**, 479-486 (2001)
- 2) Stein, H., *et al.*, *Encyclopedia of Scientific Dating Methods* (2014)
- 3) Nozaki, T., *et al.*, *Sci. Rep.*, **14**, 30094 (2024)
- 4) Smoliar, M. I., *et al.*, *Science.*, **271**, 1099-1102 (1996)
- 5) 野崎達生, 他, 地球化学, **48**, 279-305 (2014)
- 6) 野崎達生, *Isotope News*, **733**, 13-17 (2015)
- 7) Isozaki, Y., *et al.*, *Gondwana Res.*, **18**, 82-105 (2010)
- 8) Sato, K., *et al.*, *Island Arc.*, **5**, 216-228 (1996)
- 9) 野崎達生, 他, 地質学雑誌, **124**, 995-1020 (2018)
- 10) 君波和雄, 他, 地質学雑誌, **98**, 391-400 (1992)
- 11) 宮下純夫, 他, 地質学論集, **47**, 307-323 (1997)
- 12) 寺岡易司, 他, 5 万分の 1 地質図幅 佐伯, 78p (1990)
- 13) Nanayama, F., *et al.*, *Island Arc.*, **30**, e12403 (2021)
- 14) 初谷和則, 筑波大学大学院修士論文, 135p (2005)
- 15) 長江晋, 他, 地質学論集, **52**, 255-272 (1999)
- 16) 野崎達生, *Isotope News*, **774**, 22-26 (2021)
- 17) Peucker-Ehrenbrink, B., *et al.*, *Terra Nova.*, **12**, 205-219 (2000)

(早稲田大学 理工学術院 創造理工学部 環境資源工学科)