

漢式鏡の化学的研究（6）

－ミシシッピバレー型鉛床の産地－

馬淵 久夫

●キーワード：青銅鏡（bronze mirror）、漢式鏡（Han-style mirror）、鉛同位体比（lead isotope ratio）、ミシシッピバレー型鉛床（Mississippi Valley-type deposits, MVT deposits）

1. はじめに

産地推定の研究における鉛同位体比法の特徴は、地殻化学あるいは鉛床学の進展を取り入れることによって推定の確実性が高まることにある。筆者は、1977年から漢式鏡の鉛同位体比の測定を始め¹⁾、1990年代半ばまでに約500面の鏡のデータを蓄積した。それらを当時の思考能力の範囲内で解釈し、学術論文および資料を所蔵する機関の報告書の形で発表した。しかし、鏡の原材料の産地については、鉛同位体比に潜む情報のポテンシャルの高さからみて、なされた解釈はいま一つ不十分の感がぬぐえなかった。

21世紀に入って人類の資源とエネルギーが大きな社会問題になり、世界的に地球科学の研究が進展した。特に、資源大国である中国の地質学・鉛床学の進歩は著しく、中国国内の専門誌のみならず欧文誌にも多数の論文が発表されるようになった。鉛同位体比の解釈に必要な情報が増えてきたといっていよい。

考古学においても漢鏡の研究に進展がみられた。特に、岡村秀典による前漢鏡（岡村：1984）および後漢鏡（岡村：1993）の編年は、客観的な分類の指標として考古学で広く受け入れられるようになった。鏡の文様研究を専門としない筆者にとって、漢鏡1期～7期の編年は鉛同位体比の変化を整理するうえで強力な道標となった。

このような状況のなかで、筆者は10年前に銅鏡以外

の青銅器について「鉛同位体比による研究30年」を総括し（馬淵：2007）、残された問題として、漢式鏡の原材料を新たな視点をもって見直すことを始めた。

まず、漢式鏡の化学組成を検討し（馬淵：2010）、岡村編年と鉛同位体比との相関を探り（馬淵：2011）、さらに産地推定を深化させるために必要な鉛同位体比の統合理論（モデル年代）を作成した（馬淵：2012）。

これらの新しい方法論と結果を前提にして、1980年代に確立した鉛同位体比の基準図を見直した結果、「前漢鏡タイプ」（領域W）には領域WLとWHの2種類があること（馬淵：2016）、また「後漢鏡タイプ」（領域E）は武昌系（領域Es）と呉会系から構成されることを推定した（馬淵：2014）。

以上は最近の研究の要約であるが、全体を概観すると、測定された前漢鏡39面、後漢三国晋鏡（三角縁神獣鏡を除く）162面のほとんどは、領域Wあるいは領域Eのいずれかに入り、具体的に原材料の産地を論じることができた。しかし「例外のない規則はない」の通り、201面のなかの2面はW、Eいずれの領域にも収まらない「異常な」鉛同位体比を示した。愛媛県樹之本古墳出土の細線式獣帯鏡（馬淵：2011, p.50）と京都府椿井大塚山古墳出土の画文帯対置式神獣鏡（馬淵：2014, p.14）である。これらの2面については、各論文の同じ鏡式を論じた場所で、「○○の鉛同位体比は図の範囲内にプロットできない数値である。漢式鏡にまれに存在す

る特殊なミシシッピバレー型なので別稿で考察する」と記した。

小論の目的はこの「別稿で考察する」の約束を果たすことにある。論述の順序は、まずミシシッピバレー型鉱床とはなにかを地球化学と放射化学の視点から概説し、第二に鉱床学による東アジアでの存在の情報を紹介し、第三にそのような鉱床の鉛の同位体比がなぜ異常な値をとるかについての筆者の考えを述べ、第四に上記2面の鏡の鉛がどこに由来するかを推定する。

最後に中国製漢式鏡の締めくくりとして、日本出土の鏡をもとに確立した鉛同位体比基準図が中国出土遺物と整合性をもつこと、すなわち誤っていないことを検証する。

2. ミシシッピバレー型鉱床とは

ミシシッピバレー型 (Mississippi Valley-Type, 略号 MVT) 鉱床とは、熱水性鉱床の一種で、炭酸塩岩質の地層の中に、後述するようなメカニズムによって鉛・亜鉛が堆積した鉱床である。今から78年前、北米のミシシッピ渓谷の流域で初めて認識されたので、この地の名称を冠することになった (Bastin: 1939)。その後、数多くの研究が行われて世界の各地で同種の鉱床が見つかり、20世紀後半には、その成因の推定のために酸素、硫黄、ストロンチウム、鉛などの安定同位体比の測定も行われるようになった。

このタイプの鉱床鉛が異常な同位体比をとることは、1960年代から知られていて (Heyl et al.: 1966)、筆者は、1970年代に鉱床鉛の研究を始めていた同僚の佐藤和郎 (故人) がミズーリ・タイプ (当時の呼称) としばしば口にするのを聞いていた。わが国の研究者としては、中井俊一が在米中に北米4か所の MVT 鉱床産・閃亜鉛鉱 (ZnS) について Rb-Sr 年代の研究を実施している (Nakai et al.: 1990, 1993)。

MVT 鉱床に関する膨大な研究成果を紹介することは容易ではないが、石原舜三によるアメリカの現地訪問記 (石原: 1985) や世界の鉛・亜鉛鉱床の総説 (地質解析委員会報告書: 1985) があり、最近では USGS (アメリカ地質調査所) の研究者が、世界で判明した MVT 鉛・亜鉛鉱床の資料集を公表し (Tailor et al.: 2009)、諸

説ある生成モデルをまとめて発表したので (Leach et al.: 2010)、まずそれらのなかから小論に必要な基礎知識を紹介し、次章で異常な鉛同位体比について筆者の考えも交えて論考したい。

2.1 MVT 鉱床の特徴と成因

MVT 鉱床は、おもに古生代 (541~252 Ma) の堆積盆の周辺にある炭酸塩岩プラットホーム・シーケンス中に胚胎する。鉱石鉱物は主として閃亜鉛鉱 (ZnS)・方鉛鉱 (PbS) と、ホスト岩石中の脈石鉱物である白雲石 ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)・方解石 (CaCO_3) であり、それに黄鉄鉱 (FeS_2)・白鉄鉱 (FeS_2)・重晶石 (BaSO_4)・螢石 (CaF_2) などが付随する。

成因については過去にいろいろな議論があったが、最近20年の結論では、層間水として地層中にトラップされた蒸発濃縮した海水 (油田塩水との関連も指摘されている) が、圧密によって移動しながら周辺の地殻物質の亜鉛・鉛などを溶解し、炭酸塩岩の空隙に入って地下水と混合し、そこに含まれていた H_2S と結合して鉱床を形成したとされている。硫黄の源は、堆積層内の無機硫化物や含硫黄有機化合物からくる H_2S だが、それらの硫黄化合物は、もともとは古海水中の硫酸塩に由来したと考えられている。このような成因が分かったことにより、鉱床の種類は熱水鉱床の一種ということになった。鉱床形成の際の海水の温度は比較的低温で 75°C ~ 200°C 、塩分濃度は 10~30% TDS²⁾ と推定されている。

2.2 MVT 鉱床の形成時期

Rb-Sr 法などの年代測定によって、多くの MVT 鉛・亜鉛鉱床の鉱化年代が明らかになってきた。USGS の研究者は世界の MVT 鉱床のデータを次のようにまとめている (Leach et al.: 2010)。

まず、ホスト岩石層の年代は、94%が顕生累代 (541~0 Ma) で、それより古い先カンブリア時代のは6%に過ぎない。

次に、鉱床の形成は、大きく分けて二つの期間に集中する。第一は、デボン紀から石炭紀を經過してペルム紀に至る期間 (419~252 Ma)、第二は、白亜紀から古第三紀に至る期間 (145~23 Ma) である。多くの研究者

は、これらの鉱床形成に地球規模の地殻変動が関与したという見解をもっている。すなわち、第一の「デボン紀～ペルム紀」には、パンゲア大陸の分裂（大陸移動説）、第二の「白亜紀～第三期」にはマイクロプレートの同化作用、がそれぞれ引き金になったと考えられる。鉱化作用の継続時間は20万年程度と推定されている。

2.3 資源としての MVT 鉱床

USGS が収録している世界の MVT 鉛・亜鉛鉱床は、必ずしもすべてを網羅しているものではないが（よく研究された北米大陸が圧倒的に多い）、考古学の参考になる部分もあるので、鉱山としての統計を簡潔に紹介する。

まず、鉛・亜鉛の資源として見たとき、MVT 鉱床は、現在、数の上ですべての型の鉱床の24%を占める。鉛・亜鉛の生産量では、38%が MVT 鉱床からのものである。一つの鉱山の鉱区は一般的に広く、数千平方キロメートルに及ぶものが多い。名称のもとになった Upper Mississippi Valley（ミシシッピ川の上流、すなわちイリノイ・ケンタッキー・ミズーリなどの北部諸州地域）では7,800 km²の広さをもっている。成因から想像できるように、鉱床は山岳地帯ではなく、平原の地下に層状に存在するので、採鉱は古代でも比較的容易だったと思われる。鉱石についても、硫化物鉱石（方鉛鉱と閃亜鉛鉱）と脈石（方解石とドロマイト）の鉱物組み合わせが

単純で、かつ物性が明らかに異なるため選鉱が容易であり、低品位で稼行できる利点がある（石原：1985）。この点も古代に採掘され易かった理由になる。

2.4 東アジアの MVT 鉱床

USGS の資料集（Tailor et al.：2009）には、世界の113か所の MVT 鉱床が記載されている。東アジアについては表1に示した中国の8か所だけで、朝鮮半島と日本列島についての記載はない。この資料集に登録された鉱床は、2009年以前の論文で MVT であることが証明されたものであるため、研究が進めば今後まだまだ増えると思われる。日本列島については、鉛同位体比の異常は認められず、鉱床の調査でも MVT の報告のないことは確かであるが、朝鮮半島は慶尚北道の鉱山に異常な鉛同位体比の鉱石が検出されていて、存在の可能性がある。これについては後述する。

表1の8か所は細かく見ると、中国の東北地域（No.1）、南部地域（No.2, 3, 4）、西部地域（No.5, 6, 7, 8）の3か所の地質構造帯にあることが分かる。これらのなかではNo.7, 8の雲南省会沢鉱床が昔から有名で、筆者らも「東アジア鉛鉱石の鉛同位体比」の論文で異常値を報告している（馬淵・平尾：1987）。ほかの鉱床は、以前から鉛・亜鉛鉱床として知られていたが、MVT であることは最近20年以内に分かったものが多い。

表1 USGS に登録されている東アジアの MVT 鉛・亜鉛鉱床 (Tailor et al.: 2009)
Table 1 Far Eastern MVT lead-zinc deposits registered at the USGS database

No.	国	鉱 床 名		所 在	文 献	備 考
1	中国	関門山	Guanmenshan	遼寧省本溪市	Tang et al.: 2013	柴河鉱床とも呼ばれる
2	中国	花垣	Huayuan	湖南省湘西土家族・苗族自治区	Schneider et al.: 2002	
3	中国	后江橋	Houjiangqiao (註2)	湖南省永州市道県	Li : 2002	
4	中国	凡口	Fankou	広東省韶関市北方 40 km	Lu : 1983	
5	中国	天宝山	Tianbaoshan	四川省涼山彝族自治州会理県	張 : 2005	
6	中国	大梁子	Daliangzi	四川省涼山彝族自治州会東県	林 : 1994	
7	中国	会沢・礦山廠	Huize-Kuangshanchang	雲南省曲靖市会沢県	Li et al.: 2007	
8	中国	会沢・麒麟廠	Huize-Qilinchang	雲南省曲靖市麒麟区	Yin et al.: 2009	

註1：USGS の論文には地図の中に拼音による鉱床名が書かれている。鉱床の漢字名・所在・文献は筆者が調べて補った。
註2：后江橋は、USGS の表・地図には誤って Houhongqiao と記されている。
註3：朝鮮半島にも MVT 鉱床が存在すると思われるが、USGS には登録されていない。
註4：日本での MVT 鉱床の報告はない。

3. MVT 鉱床の鉛同位体比

MVT 鉱床の鉛同位体比が異常であること、すなわち放射性起源鉛 (radiogenic, 特に Pb-206) の割合が異常に多いことは 1960 年代半ばにアメリカの研究者によって報告された (Heyl et al.: 1966)。このような異常をもつ鉛は、鉛鉱石が最初に発見されたミズーリ州のジョプリン市 (Joplin) にちなんで J 型鉛 (J-type lead) と呼ばれるようになった。筆者がミシシッピバレー型の鉛と呼んできたのは、J 型と同類の鉛が中国などにもあると考えたからである。この名 (J 型鉛) は今では歴史的名称になっている。

ここでは、約 30 年前の測定時に筆者が体験した事柄と、おもにアメリカの研究者による最近の理論とを紹介し、考古資料の産地推定にどのような役割をもつかを考察する。

3.1 二種類の異常値の体験

1980 年代のはじめ、筆者は鉛同位体比測定において二種類の異常値を体験した。いずれも測定を始めて日が浅く、経験不足の筆者にとって困惑する出来事であった。

まず、銅鐸のなかで鳥取県泊出土のものが他の多くと違う異常な数値になったときである。これが朝鮮系遺物 (多鈕細文鏡・細形銅利器) と同じ原材料であることの発見につながったことはすでに多くの機会に紹介した (馬淵・平尾: 1982, 馬淵: 2007)。朝鮮系遺物のような異常な鉛は、その後、鉱山の鉱石を測ったとき、中国では雲南省会沢鉱山、朝鮮半島では慶尚北道の蓮花鉱山などで見いだされたので、radiogenic の (放射性起源鉛を多く含む) 鉱床が存在することを納得した (馬淵・平尾: 1987)。

第 2 の「異常」は、1980 年代半ばころ、鉱石と遺物の両方で体験した。一つの個体のなかで同位体比が変動する現象である。

まず、鉱石については、地質調査所 (現 独立行政法人産業技術総合研究所地質調査総合センター) の佐々木昭から提供された上記の朝鮮半島・蓮花鉱山の 10 個の方鉛鉱のデータであった。筆者らがまず測定し、のちに佐々木が地質調査所の新しい質量分析計で測定したが、

どの鉱石についても東京国立文化財研究所のデータと地質調査所のデータは一致しなかった。不審に思った佐々木は、各鉱石の異なる部位から試料を採取して測定した。その結果は、一個の方鉛鉱のなかでも、部位によって鉛同位体比が違うことを発見した。同じ鉱山からの 10 試料 (第一蓮花 5, 第二蓮花 5) が、すべて違った数値をとることは筆者らの測定で分かっていたが、方鉛鉱の同一個体のなかでも数値が変動することが確認された。

遺物については、山崎一雄名古屋大学名誉教授から測定を依頼された福岡県の立岩遺跡出土のガラス試料であった。山崎教授は、室蘭工業大学の室住正世研究室で数回繰り返し測定された当ガラス試料のデータが、大きくばらつくのを見て、機器の精度のためと考えられたようである。試料は風化したガラスの粉だったので、微小部分をいくつかに分けて測ってみた。結果は、いずれも非常に radiogenic であり、しかも試料相互の同位体比は誤差の範囲を大きく超えて違っていた。そこで、山崎教授には、この現象はデータのばらつきではなく、資料内部の同位体の不均一によるものであることを報告した。

以上、二つの体験を総合して考えると、次のように現象の理解ができるとともに、データの扱いにおいて重要な教訓が得られる。

まず、筆者らが過去に発表した蓮花鉱山の鉛同位体比データを見てみよう (図 1)。第一蓮花 5 試料、第二蓮花 5 試料、の計 10 試料の数値が並んでいるが、すべてが不一致である。同位体比は鉱床内で不均一なので、一鉱石内での不均一も、当然と言えば当然であった。これは産地推定のための鉛同位体比法にとって非常に重要なことを示唆している。つまり、この種の鉱床では、鉛同位体比の範囲を示すことはできても、代表値は存在しないということである。蓮花鉱山の 10 試料のデータも、たまたま測定した小部分の数値であって、試料 (鉱石) の代表値でないことが分かる。

立岩遺跡出土のガラスの材料は、戦国時代から漢代にかけて長江流域から南方にかけての地域 (楚国内) で作られた鉛バリウムガラスである。PbO 40.8%, BaO 16% という分析値が報告されている (山崎: 1987, p. 278)。では、鉛バリウムガラス内部の鉛同位体比の不均一性はどこから来るのだろうか。根本的な原因は、次節 (3.2)

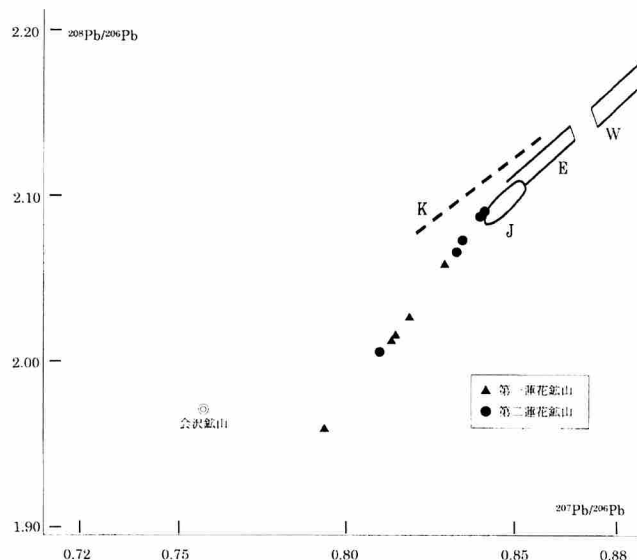


図1 異常な鉛同位体比をもつ鉛鉱石
(馬淵・平尾：1987；馬淵：2012)

Figure 1 Lead ores with anomalous lead isotope ratios

で見られるような鉛鉱石の不均一性がガラスになっても残っているためであることは間違いない。具体的には、原材料として、炭酸塩鉱物（白鉛鉱 PbCO_3 と毒重土石 BaCO_3 ）が使われたような場合（Brill et al. : 1991）、加熱によって二酸化炭素が抜けるだけでガラス状になり、ガラス質の粘性が高いために、攪拌が不十分だったことが考えられる。立岩ガラスは塞杆（閉塞梘子）様と記されている。倭国での二次製品だとしても、形状変更だけで、材料の攪拌が十分に行われなかったのではないだろうか。

3.2 鉱石内部の不均一（実例）

MVT 鉱床の発見は 1939 年、その鉱床から J 型鉛が発見されたのが 1966 年、となるが、一鉱石内部の不均一性は 1980 年代に入って報告が出始めた（たとえば Sverjensky : 1981）。ここでは分かりやすい一つの事例を紹介しよう。

Sicree et al. (1998) は Upper Mississippi Valley (UMV) 地区の中心近くに位置する South Hayden 鉱体から得られた方鉛鉱の一結晶を使って、中心部から表面までの 6 mm 弱の間を約 0.3 mm 刻みに鉛同位体比を測定した。その結果は図 2 のようになった。

図 2 の縦軸は $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ で、図 1 のような産地推定に使われる図の横軸に相当する。Radiogenic の成分が多いほど、分母が大きくなるので、縦軸の数値は小さく

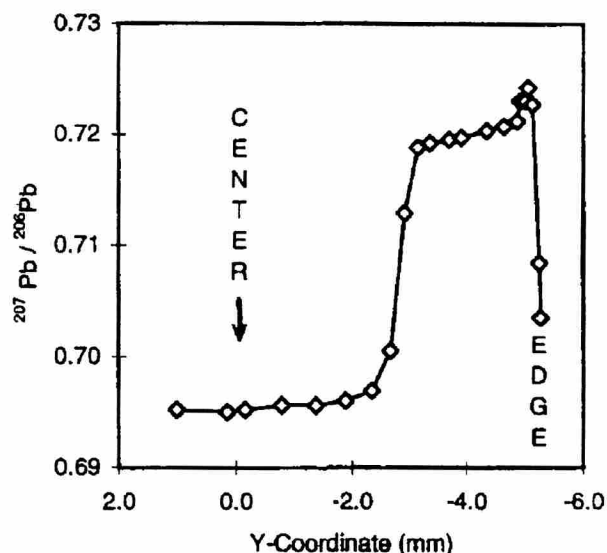


図2 方鉛鉱結晶内の鉛同位体比変動

—成長の中心から縁まで— (Sicree et al. : 1998)

Figure 2 Lead isotope data for a traverse across the growth center to edge of a galena crystal

なる。図 1 で分かるように、普通の鉛（ordinary lead あるいは common lead と呼ばれる）は $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} = 0.84 \sim 0.90$ なので、図 2 の数値 0.69~0.73 は著しく radiogenic であり、図 1 の中国雲南省会沢鉱山よりももっと radiogenic である。そして顕著なのは、中心（center）から縁（edge、結晶の表面）へ向かって約 2 mm のプラトーののち、崖のような急勾配で上昇し、しばらくプラトーがあって、表面で急落する状況である。上下のプラトーの数値差は 3.6% もある。現在の質量分析計では $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ の計測誤差（1 σ ）は 0.01~0.02% 程度であるから（筆者らの 30 年前の機器でも 0.02~0.03% に達していた）、このプラトー差は計測誤差の 300 倍もの大きさである。一鉱石内でとんでもない不均一になっていることが分かる。

3.3 MVT 鉱床における鉛同位体比異常の原因

MVT 鉱床の異常鉛の原因は鉱床学の問題であることは確かだが、考古科学においても無視できない。鉛同位体比法が異常鉛の産地推定に使えるかどうかを判断するのに必要だからである。普通の鉱床鉛（多くは火山性マグマに由来する）については、「鉱山ごとに鉛同位体比が一定」であり、「その同位体比は、地球生成以来の地殻内での鉛の履歴で決まる」という原則が方法論としての売り物だった。それが MVT 鉱床の場合、そうではな

い。ここでは、鉱床学に深入りせずに、筆者が専門とする放射化学・同位体化学の観点から考えてみる。

MVT 鉱床に関する論文は多数存在する（筆者が把握したものだけでも 300 を超える）。それらの多くが鉛同位体比異常に触れているが、明確な理論的モデルを提案したものはない。その理由は、MVT 鉱床の鉱石がすべて異常というわけではないからである。異常鉛（radiogenic）が見つからなかったり、鉱床内での同位体比変動が小さかったりする場合が少なからず存在する模様である。たとえば、最近出版された「炭酸塩岩層に胚胎するベースメタル鉱床」³⁾の総説では次のような表現で説明している（Kamona: 2011）。

「Forey et al. (1981) によると、1 鉱床内でも方鉛鉱の生成の時期によって鉛同位体比が明瞭に違っている。鉱床の堆積が進むにつれて、より radiogenic になる傾向がある。さらに、鉱体が小さい方が同位体比変動が激しい。これは地殻の radiogenic の鉛の汚染を受けやすいためである。」

この観察は 30 年以上前のもので、すべてがこのルールに従うわけでないことが分かってきているが、すべての研究者に共通している認識は、最後のフレーズ「地殻の radiogenic の鉛の汚染」である。筆者がこれらの文献を読む前に想像していたことは、韓国慶尚北道蓮花鉱山の鉱石が、図 1 に示すように、ほとんど 1 直線上に載ることから、ordinary と radiogenic の二つの鉛源の混合が主なる原因ということであった。その頃は、「濃縮した海水が地殻の特定の層を通過しながら鉛・亜鉛を溶解させる」というメカニズムを知らなかったので、具体的に成因を考えることはできなかった。しかし、いま、多くの事例が示すように、汚染の鉛源は二つ以上（微視的に見れば無限の数）ありうるということが分かったので、2.1 と 2.2 で記した MVT 鉱床の成因を取り入れて、鉛同位体比が不均一になる一例を、筆者の考えに従って図 3 に模式的に表してみた。

模式図は単純化して、次のような設定で MVT 鉱床ができるとする。

①基盤の形成

MVT 鉱床を胚胎する炭酸塩岩層を含む地層の基盤が、なんらかの地殻変動（火成作用）によって古生代カン

ブリア紀初頭（541 Ma）に形成されたとする（図 3 の最上段）。

②炭酸塩岩層の近辺には、岩石組成の異なる A 層、B 層、C 層が存在する（図 3 の上段）。

A 層：花崗岩質で、ウラン・トリウムを含み、鉛を含まない。トリウムのウランに対する含量比（Th/U）が C 層に比べて小さい。

B 層：541 Ma の地殻変動時に鉛を含む熱水が主になって固化した層。いわば普通の鉛鉱床と考えてもよい。

C 層：A 層と同様に花崗岩質で、ウラン・トリウムを含み、鉛を含まない。トリウムのウランに対する含量比（Th/U）が A 層に比べて大きい。

③中生代白亜紀初頭（145 Ma）に地殻変動（マイクロプレートの微調整）があって、濃縮海水（brine）が岩石間（A 層、B 層、C 層）を通して移動し、鉛の溶出が起こる（図 3 の中段）。

④ A 層、B 層、C 層を通してそれぞれ溶出した鉛を含む海水 Brine A、Brine B、Brine C は炭酸塩岩層に侵入して、互いに混ざり合いながら H₂S と遭遇し、方鉛鉱 PbS を沈積させる。模式図では、Brine B を主役にして、Brine A と Brine C にそれぞれ汚染されて生まれた方鉛鉱（PbS-AB と PbS-BC）を示した（図 3 の下段）。

⑤模式図中の鉛同位体比は次のように設定した。

a) A 層と C 層

541 Ma の火成作用でそれまでに進化してきた鉛は除去され、新たに両層に含まれるウランとトリウムから鉛が生まれて蓄積されていく。145 Ma までの 396 m.y. の間に蓄積された鉛の同位体比は、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb については現在のウランの同位体比 ²³⁵U/²³⁸U=1/137.88 から遡って計算すると簡単に得られ、²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb=0.0616 となる。Brine A と Brine C はこの非常に radiogenic な鉛を含んでいる。

一方、A 層と C 層で 396 m.y. の間に蓄積される ²⁰⁸Pb の量は、両層に含まれるトリウム（²³²Th）量によって規定される。鉛同位体比図にプロットしたときにトリウム含有量の違いがどのように図に現れるかが分かるように、A 層は Th/U 比が小さく、C 層は

Th/U 比が大きいと設定した。Th/U 比はさまざまな地層があるので、どのように決めても構わないが、生成した異常鉛が現実の測定値の範囲に入るように筆者が計算し、Brine A が $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.1671$ 、Brine C が $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=1.4698$ と設定した。つまり、C 層の方が A 層よりも 8.8 倍だけトリウム濃度（ウランとの相対濃度）が高いという設定である。

b) B 層

541 Ma に鉛・ウラン・トリウムを含むマグマから

分離した鉍床鉛に相当し、鉛同位体比は 145 Ma になっても不変。B 層を通過した Brine B が含む鉛については、普通の鉛（ordinary lead）の範囲ならば、同位体比はどんな数値でもいいが、ここでは筆者らが測定した中国広東省凡口鉍山の方鉛鉍の同位体比（ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.8530$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.1171$ ）を設定した。凡口鉍床は MVT 鉍床とされており（Lu：1983）、しかもこの鉍石は異常鉛ではなく、モデル年代が 540 Ma と計算されているので（馬淵：2012、p.16 表 8）、

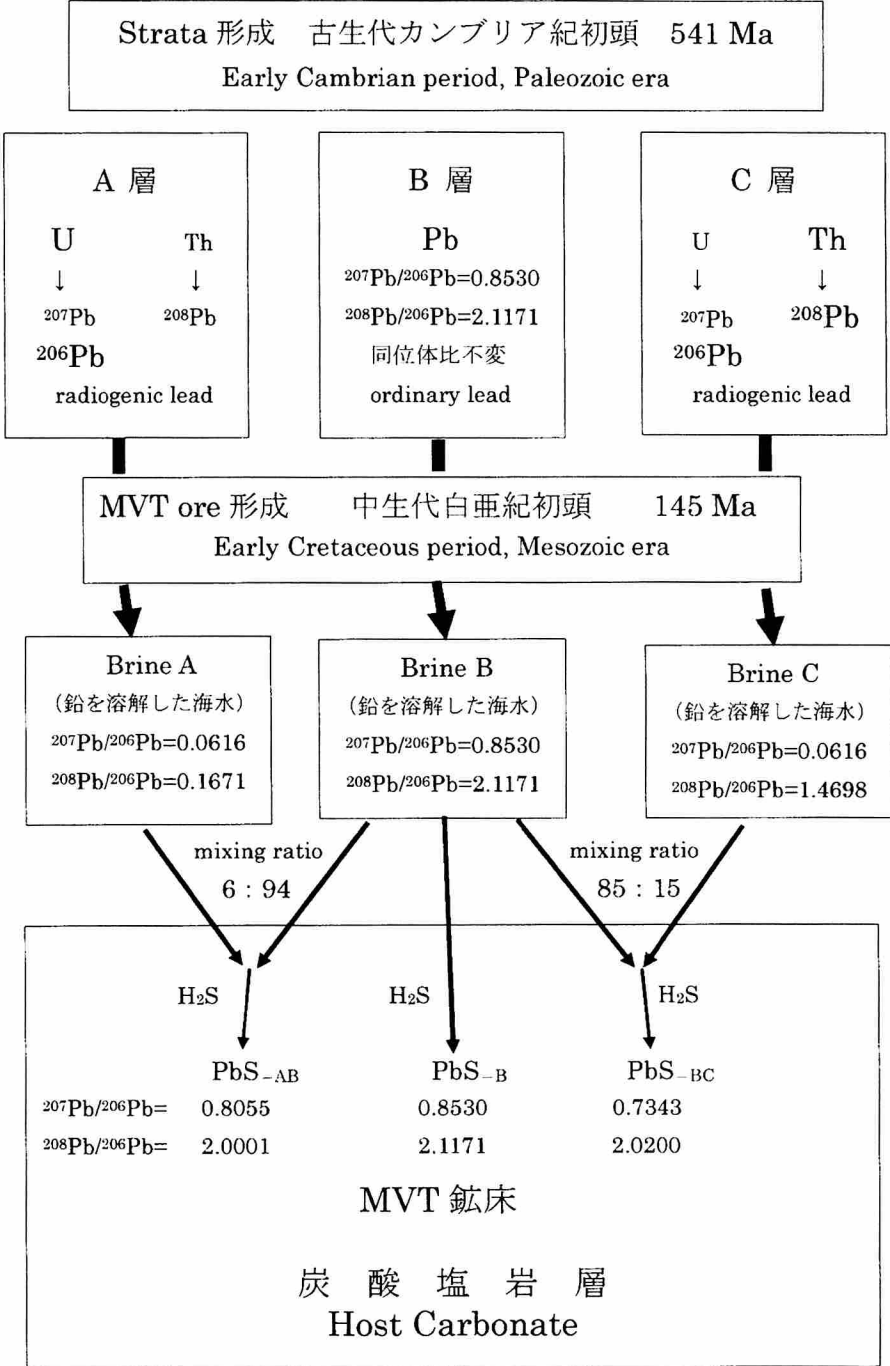


図3 MVT 鉍床鉛の異常同位体比生成の模式図

Figure 3 Schematic diagram for the formation of anomalous lead isotope ratios in MVT ore deposits

図3の模式図には最も相応しいと考えられる。

c) 生成した MVT 鉱床の方鉛鉱の鉛同位体比

図3下段の炭酸塩岩層を見ていただきたい。この岩層のなかで、Brine B に Brine A が6%混入（汚染）した溶液が H_2S と遭遇して作られる方鉛鉱を PbS_{-AB} とする。同様に、Brine B に Brine C が15%混入した溶液が作る方鉛鉱を PbS_{-BC} とする。これら2種類の方鉛鉱の鉛同位体比を図4に示す。

図4は、異常鉛の鉱石をプロットした図1と同じスケールで描かれているので、 PbS_{-AB} も PbS_{-BC} も、実在する数値の範囲内に存在することが分かる。Brine B が汚染を受けずに炭酸塩岩層に侵入して作った PbS_{-B} は図4の右上方の普通の鉛の範囲に位置する。 PbS_{-B} から PbS_{-AB} および PbS_{-BC} に向かって引いた直線 Line AB, Line BC は汚染の度合いによって変わる混合ラインである。

図4から分かることは、MVT 鉱床の方鉛鉱の位置が、(i) 海水 (Brine) が通過する層の Th/U 比、および (ii) 汚染の度合い、によって敏感に変わることである。つまり、一つの鉱床でも場所によって PbS の鉛同位体比が大きく変動することがあるということで、産地推定を目的として鉛同位体比が「一致する」とか「近い」とかいう判定基準は成り立たないことになる。

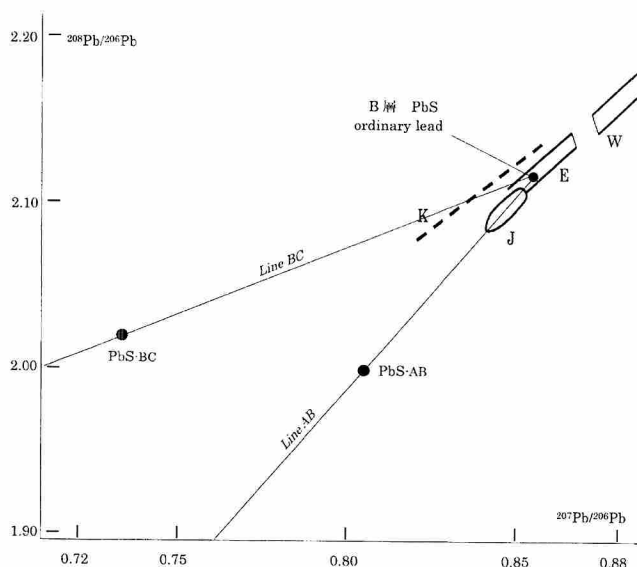


図4 模擬 MVT 試料 (PbS_{-AB} , PbS_{-BC}) の鉛同位体比分布図

Figure 4 Lead isotope diagram for simulated MVT specimens (PbS_{-AB} and PbS_{-BC})

4. 異常鉛を含む2面の銅鏡の原材料産地

MVT 鉱床の異常鉛について一応の理解ができたので、小論のはじめに提示した愛媛県樹之本古墳出土の細線式獣帯鏡と京都府椿井大塚山古墳出土の画文帯対置式神獣鏡に含まれる異常鉛の産地について考察しよう。思考の順序として、まず漢式鏡と同じように中国で製作されて日本列島に将来された鉛バリウムガラスを調べ、その結果を踏まえて漢式鏡を見直すことにする。すでに前報 (馬淵:2016) で紹介したように、鉛バリウムガラスにも MVT 鉛を含むものがあり、最近、湖南省で出土した新資料について中国で鉛同位体比が測定されていて、2面しか測定例がない漢式鏡よりも議論を深めることができるからである。

4.1 鉛バリウムガラスの鉛の産地

表2に、既報の論文のなかでデータを示した異常鉛を含む2面の銅鏡の鉛同位体比を再録する (No.1, 2)。同表には、同じような異常値を示した鉛バリウムガラスを文献から採録した (No.3~7)。図5は表2の遺物の鉛同位体比の分布状況を図示したものである。

表2の遺物のなかで4個のガラス璧 (No.4~7) のデータは MVT 鉛の産地推定の上で重要な示唆を与える。測定者の Cui (崔劍鋒, 北京大学考古文博学院) らによると、璧は4個とも鉛バリウムガラスで、1個 (M653) が戦国時代 (475 BC~221 BC), 3個 (M680A, M621, M1575) が戦国時代後期 (306 BC~221 BC) の製作と判定されている (Cui ら:2011)。出土は図6に示すように、湖南省常陽の北西150 kmにある3基 (あるいは4基) の楚墓からである。これらのガラス璧の鉛同位体比分布 (図5) から、次のようなことが分かる。

a) 4個のガラス璧は戦国時代の楚の領内で製作された。それらに含まれる鉛の産地は一か所ないし近接する MVT 鉱床と考えられるが、鉛同位体比は大きく分散している。特に M653 は、著しい異常値である。

b) 日本の立岩遺跡から出土した塞杆様ガラス (表2の No.3) は、戦国時代の楚国内で作られた璧の再加工品と推測されているが (山崎:1987, p.277), 鉛同位体比も図5に示すように Cui らの璧の分散分布範

表2 MVT 鉛を含む考古遺物

Figure 2 Archaeological objects with MVT lead

No.	資料名	出土地	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	文献
1	細線式獣帯鏡	愛媛県樹之本古墳	20.017	0.7906	1.9792	馬淵：2011
2	対置式神獣鏡	京都府椿井大塚山古墳	19.176	0.8221	2.0658	馬淵：2014
3	寒杆様ガラス	福岡県立岩遺跡	22.17	0.7301	1.944	山崎：1987
4	璧 M 1575	中国湖南省常德市楚墓	20.747	0.7682	1.9792	Cui ら：2011
5	璧 M 653	中国湖南省常德市楚墓	19.364	0.8149	2.1268	
6	璧 M 680A	中国湖南省常德市楚墓	21.962	0.7300	1.9190	
7	璧 M 621	中国湖南省常德市楚墓	21.931	0.7310	1.9235	

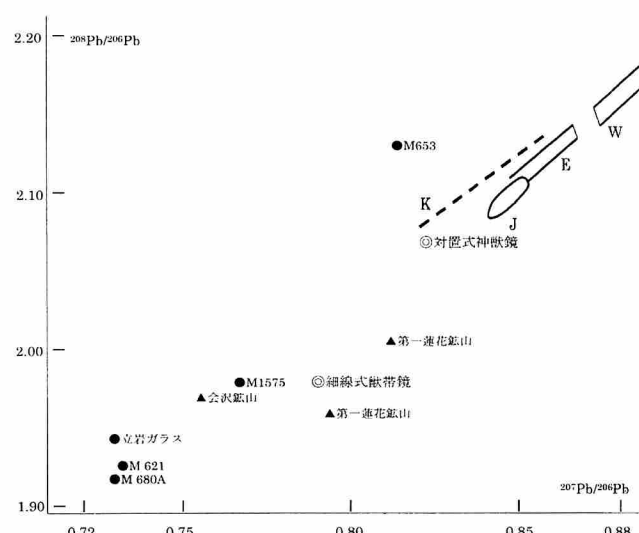


図5 MVT 鉛を含む考古遺物と鉱石の鉛同位体比分布
Figure 5 Lead isotope diagram for archaeological objects and lead ores with MVT lead



図6 楚墓および中国の MVT 鉱床の位置
Figure 6 Locations of the Chu tombs and MVT ore deposits in China

1. 関門山 Guanmenshan
2. 花垣 Huayuan
3. 后江橋 Houjiangqiao
4. 凡口 Fankou
5. 天宝山 Tianbaoshan
6. 大梁子 Daliangzi
7. 会沢・礦山廠 Huize-Kuangshanchang
8. 会沢・麒麟廠 Huize-Qilinchang
- ▲ 楚墓 Chu tombs

囲に入っているの、湖南省常德市出土の4個の璧と同類のものと考えられる。

c) これらの鉛バリウムガラスに見られる異常鉛同位体比の現象は、3.3の理論的考察の結論の通り、通常の鉛で見られる鉛同位体比のグルーピングという分別法には利用できない。すなわち、鉛同位体比の役割は、MVT 鉱床鉛であることを識別するだけで、産出鉱床を特定することはできない。

d) 残る方法は、遺物（璧）が作られた文化圏からの推論である。鉛バリウムガラスが作られたのは戦国時代の楚の国内であったから、図6で見ると、湖南省西部から広東省北部にかけての花垣（No.2）、后江橋（No.3）、凡口（No.4）に代表される MVT 鉱床帯が異常鉛の産出鉱床として可能性が高いといえる。

e) Cui らは MVT 鉛の産地について次のように記している（Cui ら：2011, p.1677）。

表3 ガラス璧と宝山鉍山鉛鉍石の鉛同位体比
Table 3 Lead isotope data for glass bi and an lead ore from the Baoshan mine

No.	試料	出土地	$^{206}\text{Pb}/^{201}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	文献
1	ガラス璧 M641	湖南省常德市	18.632	0.8443	2.0942	Cui et al. 2011
2	ガラス璧 M655	湖南省常德市	18.646	0.8437	2.0933	Cui et al. 2011
3	ガラス璧 M704	湖南省常德市	18.668	0.8438	2.0963	Cui et al. 2011
4	方鉛鉍	湖南省宝山鉍山★	18.614	0.8442	2.0945	馬淵・平尾 1987

★ 所在：湖南省郴州市桂陽県宝山路

「1990 年代になるまでは、MVT 鉍床は中国南西部（雲南省、四川省、貴州省）に存在するというのが常識だった。しかし近年、中国中央部に続々と発見された。Zhong and Mao (2008) は湖南省西部で常德市に極めて近いところに、大規模な MVT 鉛・亜鉛鉍床帯が走っていることを報告した。しかし鉛同位体比の報告がないために、常德市で発掘された鉛バリウムガラスがこの大規模鉍床帯と関係があるかどうかは判断できない」。

筆者の考えでは、すでに考察した通り、たとえこれらの鉛・亜鉛鉍床帯の鉛同位体比が測定されていたとしても、鉍床内部および試料内部でのバラツキが大きく、場所を同定できないと思う。しかし、Cui らが測定した鉛バリウムガラスを通覧すると、別の手掛かりがあるように思える。前報（馬淵：2016, p.41）で紹介したように、Cui らは 11 種類の鉛バリウムガラスを測定しているが、表 3 に示すように、そのうちの 3 試料（M641, M655, M704）の同位体比が、宝山鉍山の鉛（馬淵・平尾：1987）と一致する。産地はここと見て間違いはない。

宝山鉍山は湖南省郴州市桂陽県（湖南省の東南部）にあり、図 6 で后江橋鉍床（No.3, 湖南省永州市道県）の東 120 km に位置する。このように湖南省の南部（楚の領域の最南端）で産出する鉛を使っていたことから考えて、湖南省の西部を北（No.2, 花垣）から南（No.3, 后江橋）へかけて走り、さらに広東省北部の凡口（No.4）にまで及ぶことが判明している MVT 鉍床帯のどこかで鉛が採取されていた可能性は大きい。錫と違って、鉛は楚の 国内に十分産出するので、雲南や四川の方まで資源を求める必要はなかったと思われる。ガラス璧と、錫を必要とする銅鏡の違

いはここにある。

4.2 漢式鏡の MVT 鉛の産地

小論の冒頭で述べたように、MVT 鉍床に由来すると思われる異常鉛を含む銅鏡は、筆者らが測定した前漢・後漢・三国・晋の鏡 201 面のなかの 2 面だけである。すべて日本出土という但し書き付きだが、わずか 1 %なので、例外的な事象である。2 面それぞれについて考察する前に、両者に共通する三つの事柄に触れておこう。

①産地判別は不可能

ここまでの考察のなかで述べたように、2 面の鏡の鉛については、鉛同位体比を見て産地を特定することは不可能である。できることは、鏡の形式系譜の方から推定される製作地を調べ、その地と既知の MVT 鉍床の位置関係を議論することだけである。中国の MVT 鉍床はすべて解明されたわけではないので、小論での議論は「研究の指針」を示すだけで、特に中国の研究者による今後の研究に期待するものとなる。

②遼寧省関門山鉍山

図 6 の No.1（遼寧省関門山鉍山）は、楚国内で作られた鉛バリウムガラスの場合と違って、MVT 鉛産地として無視できない。2 面の鏡が日本出土のためである。そこで当該鉛鉍床を調べたところ、次のことが分かった。

まず、鉍山名であるが、関門山鉍山は別名を柴河鉍山とよび、筆者らが表 4 のように鉛鉍石を 2 個測定して本誌に報告していた（馬淵・平尾：1987）。1980 年代半ばには、MVT 鉍床鉛のメカニズムが十分に理解されていなかったため、表 4 の 2 試料の異なる数値が MVT 鉍床によることに気が付かなかった¹⁾。

改めて見直してみると、柴河鉍山の鉛同位体比は、変動するにしても $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} > 0.90$ という高い数値の範囲

で起こっていて、鉛バリウムガラスのみならず漢式鏡の異常鉛にも関連付けられないと判断できる。このような大きな数値の原因は、柴河鉍山の基盤が中朝地塊であって、2.2 で述べた MVT 鉍床をつくったホスト岩石層の年代が先カンブリア時代だったことにある。そのような MVT 鉍床の発生頻度は世界全体で 6 % と小さいことも、すでに 2.2 で紹介した。

③ 錫材との関連

筆者らが鉛同位体比を測定した漢・三国・晋の時代の鏡は、ほとんどが銅や鉛を、長江を挟んで北側の秦嶺山脈系地域および南側の中下流域と華南から調達して製作されていたことが分かってきた。これらの鏡のなかで、なぜ 2 面だけが MVT と思われる鉛を含んでいたのだろうか。鉛材は長江の中下流域で豊富に産出するので、遠隔地から運んでくる必要がないのである。検出例の少ないこの難問に、一つだけ可能性が考えられる。それは何らかの理由で、銅鏡に不可欠の錫材に伴って調達されたのではないかということである。

現在知られている中国の鉍床についていうと、錫鉍床が MVT 鉛鉍床と共存している地域が 2 カ所存在する（馬淵：2015、本論文の図 6）。雲南省北東部で四川省と貴州省に接する川滇鉍床帯と、湖南省南部と広東省北部の地区を東西に走る南岭鉍床帯である。現在の鉍床名を挙げると、前者（雲南省）では岔河（錫鉍）とその 30 km 南の会沢（MVT 鉛鉍床）、後者（湖南省）では、同じ永州市道県にある道県湘源（錫鉍）と后江橋（MVT 鉛鉍）である。

以上の 3 点を前提にして、2 面の鏡について考えてみよう。

a) 細線式獣帯鏡（愛媛県樹之本古墳出土）

この鏡は型式からいうと漢鏡 5 期の細線式獣帯鏡ⅣA 式で、1 世紀中葉の製作であるが、樹之本古墳が古墳時代中期（5 世紀後半）の築造であるため、踏み返し鏡の

可能性が指摘されている。この種の踏み返し鏡は「同型鏡群」と呼ばれ、「倭の五王の遣使に伴って輸入されたと考えられ、製作地は南朝・宋とする説が有力である」（辻 田：2011）。辻田淳一郎がまとめた「同型鏡群の種類と系譜」には 26 種類 127 面（参考 3 面）が表示されている。樹之本古墳出土鏡はその一つであるが、同型鏡は出土していない。

もし辻田の言う「有力な説」の通り、同型鏡群が 5 世紀に劉宋の都であった建業（南京）あたりで踏み返されたものとする、原材料の仕入れ先が漢・三国・晋の時代とは違うこともありうる。その状況を知る手はかりはあるだろうか。幸いに、十分とは言えないが、筆者の既報のデータのなかに手がかりがあった。漢式鏡の化学的研究（4）で解析した漢・三国・晋の鏡のなかで中期・後期の古墳から出土した鏡である（馬淵：2014）。

辻田の表と照合すると、その内訳は次のようになる。

浮彫式獣帯鏡	5 面
画像鏡	7 面
画文帯環状乳神獣鏡	5 面
画文帯同向式神獣鏡	9 面
八鳳鏡	1 面
画文帯仏獣鏡	4 面

これら 31 面の同型鏡群の鉛同位体比は、漢三国晋鏡と同じ武昌系あるいは呉会系の原材料を示し、それらから外れるのは、いま論じている樹之本古墳出土鏡だけである。32 面のなかの 1 面（3 %）という小さな割合なので、多くを論じることはできないが、今後の研究のために、いま考えられる二つの点を挙げておこう。

第一は、樹之本古墳出土鏡に含まれる MVT 鉛が本当に同型鏡群のなかの 3 % の確率で起こっているかどうかの疑問である。それはこの鏡の原鏡である細線式獣帯鏡の製作時期が 32 面のなかで最も早く、後 1 世紀中葉～末（上限）とされるからである。もし、辻田の表にある

表 4 柴河（関門山）鉍山鉛鉍石の鉛同位体比
Table 4 Lead isotope data of lead ores from the Chaihe (Guanmenshan) mine

No.	鉍山名	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁷ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	モデル年代	文献
204	柴河（関門山）	15.300	0.9957	2.2820	1,600 Ma	馬淵・平尾：1987
205	柴河（関門山）	17.094	0.9045	2.0735	750 Ma	馬淵：2012

他の細線式獸帯鏡 11 面の多くに MVT 鉛が含まれていれば、浮彫式獸帯鏡以降の同型鏡群とは原材料が違ふこと、つまり原鏡の型式と製作工人・製作地の間に何らかの関係があることになり、鉛同位体比が同型鏡群の研究に役立つ可能性が出てくる。今後の測定に期待したい。

第二は、小論が目的とする原材料の産地である。図 5 から分かるように、樹之本鏡の同位体比は、MVT 鉛に汚染されたという程度ではなく、しっかりと MVT 鉛であることを示している。劉宋の時代には、雲南は領内であり、水上交通網も整えられていたようである（岡本隆司編：2013, p.99）。樹之本古墳出土鏡が踏み返し鏡とすると、雲南省北東部で製錬された錫材が水路によって比較的容易に建業まで運ばれていたことが想像される。その際、錫材と一緒に鉛材（MVT）が運ばれることもあったのではないだろうか。このように、本鏡が含む MVT 鉛の出所は湖南省南部・広東省北部よりも雲南の可能性の方が高いと思われる。

b) 画文帯対置式神獸鏡（京都府椿井大塚山古墳出土）
対置式神獸鏡は 3 世紀の鏡とされるが、この鏡は三角縁神獸鏡が多量出土した椿井大塚山古墳から出土しているため、しばしば環状乳神獸鏡や同向式神獸鏡とともに議論の対象になってきた。岡村は 220 年代に江南（長江下流域）で作られ、政治的な外交関係で呉→公孫氏（→倭）と移動したと考えている（福永ほか：2003, p.236）。

図 5 で分かるように、この対置式神獸鏡の鉛同位体比の異常度はあまり大きくない。これは銅材に含まれる「普通」鉛と混合した結果かもしれない。江南の呉の 220 年代とすると、鏡の鑄造は呉郡呉県（江蘇省蘇州）または会稽郡山陰（浙江省紹興）で行われたと思われるが、この場合にも錫材に伴って入手した MVT 鉛が混入したのであろう。錫材・鉛材の入手先としては湖南省南部－広東省北部地域が優先的に考えられる。雲南省は 3 世紀前半には呉の支配領域にはなっていなかったためである。

5. 総括－漢式鏡に含まれる鉛の産地－

2010 年から本誌に掲載してきた「漢式鏡の化学的研究」(1)～(6)において、筆者は日本出土の前漢・後漢・三国・晋の時代の銅鏡の鉛同位体比を、筆者の理解の範囲内で、編年と型式分類を導入して分別することを試みた。その総括を図 7、図 8 および表 5 にまとめた。

図 7 は漢式鏡の鉛同位体比の分布領域を示したものである。研究の初期段階であった 1980 年代には領域 A（前漢鏡タイプ）と領域 B（後漢鏡タイプ）と呼んでいたが、考古学の編年と対照する際の混乱を避けるために、領域 W（Western Han の略）と領域 E（Eastern Han の略）と改称した。図 7 には、この小論で扱った出現例がわずかに 1 % の MVT 鉛の分布領域を拡散する 3 本の矢印で表した。理論的には、MVT 鉛の分布領域を設定することは不可能であるが、中国鉛の実際は図 7 の左下方に分散分布すると考えられる。

今回のシリーズ論文の解析で、領域 W と領域 E は、それぞれ細分されることが分かってきた。その状況をまとめたのが表 5 である。表 5 には、参考として戦国時代の楚国で作られた蟻鼻銭と鉛バリウムガラスのデータを加えた。

筆者が限られた数の中国産鉛鉱石の測定から導いた漢式鏡の鉛産地は、北は秦嶺山脈系（前漢鏡タイプ）、南は長江の南に広がる揚子地塊・南中国褶曲系（後漢鏡タイプ）で、すべて楚の領域内であった。楚国で作られたことが確かな蟻鼻銭と鉛バリウムガラスのデータが漢式鏡のデータと重なり合うことは、推論の大枠が誤っていないことを証する。図 8 は以上の状況を地図のなかで表したものである。

謝辞

MVT 鉱床の文献についてご教示いただきました東京大学地震研究所の中井俊一教授に厚くお礼申し上げます。

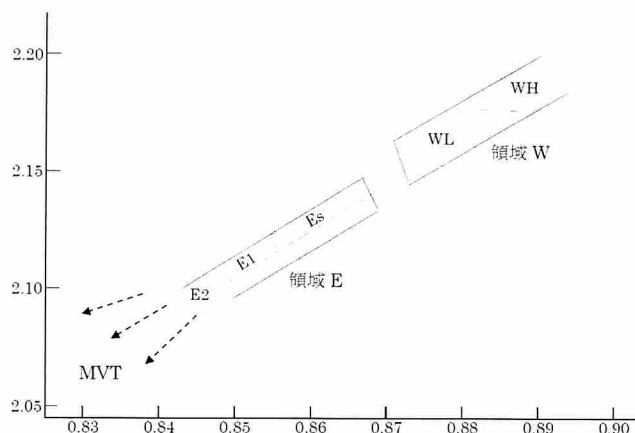


図7 漢式鏡の鉛同位体比総括図

Figure 7 Overall diagram for lead isotope ratios of Han-style mirrors



図8 漢式鏡の鉛鉱床分布地図

Figure 8 Locations of lead mines used for Han-style mirrors

表5 漢式鏡の鉛同位体データの総括

Table 5 Summary for lead isotope data of Han-style mirrors

鉛同位体比の 領域記号		産地推定地域	日本出土の漢式鏡	蟻鼻鏡 (金正耀：2008)	鉛バリウムガラス (Cui ら：2011)	漢式鏡の化学的 研究
W 前漢鏡タイプ	WL	秦嶺山脈系	前漢鏡のほとんど	3 点	—	(2) 2011
	WH	秦嶺山脈系	前漢鏡、平原遺跡出土 方格規矩四神鏡	2 点	2 点	(2) 2011 (5) 2016
E 後漢鏡タイプ	Es	湖南省北部	魏鏡、復古鏡、「舶載」 三角縁神獣鏡	4 点	2 点	(4) 2014
	E1	浙江省	画像鏡、神獣鏡の多く	—	—	(4) 2014
	E2	湖南省南部	なし	—	3 点	本論文
MVT ミシッピバ レー・タイプ	MVT1	雲南省北東部	細線式獣帯鏡 1 面（？）	—	—	本論文
	MVT2	湖南省西部	なし	—	4 点（？）	本論文
		湖南省南部 広東省北部	対置式神獣鏡 1 面（？）	—	—	本論文

註

- この研究は、東京国立博物館の西田守夫氏（考古学）のご指導のもと、青山学院大学理工学部 of 平尾良光氏（分析化学）の協力を得て始められた。
- Total Dissolved Solids の略
- 鉱床学でのベースメタルとは銅・鉛・亜鉛を指す。
- 柴河鉱山が MVT 鉱床であることは 1983 年に古宇田亮一によって日本でも紹介されていたが、この情報は筆者に届かなかった（古宇田：1983）。1980 年代の筆者が柴河鉱山の鉛を MVT と認識できなかった理由は、表 4 のように横軸の数値 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ が高いためであった。高い理由は 3.3 で示したメカニズムによって説明

できる。図 3 の MVT 鉱床モデルについていうと、Strata 形成が先カンブリア時代の 1,600 Ma（モデル年代として 16 億年前）とすると、Brine B の $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ が 0.9957 (No.1) のようにきわめて大きい値になり、これに放射性起源鉛が汚染しても 0.9045 (No.2) のように相対的に大きい値に留まるのである。筆者が過去に MVT 鉛の判別に使ってきた $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ が 0.840 より小さいという条件は、カンブリア紀よりも若い地層基盤のなかで MV 現象が起こったときの話で、頻度は少ないにしても例外は存在するのである。さらに付言すると、表 4 の No.2 の $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ の数値は極端に小さい。図 5 にプロットすると右の枠外で下

方（縦軸 2.0）に位置し、これは同図の鉛バリウムガラス M653 と同様に、縦軸が乱高下するのである。これは 3.3 の MVT モデルの説明で「Th/U 比はさまざまな地層があるので、どのように決めても構わないが・・・」と述べたことに相当する。ウランの場合には、天然の同位体比という拘束条件があるため、 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ は自由に変化ができないが、 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ はトリウム

（分子）とウラン（分母）という違う元素から生成するため、岩層を通過する Brine（海水）が Th/U 比の違いによって、どんな値でもとれるのである。以上のように、3.3 のモデルは鉍石や遺物の異常性を十分に説明できるので、もっと詳細な研究が進むまでは有効なモデルとして使うことができると思う。

引用文献

- 石原舜三 1985「テネシー州のミシシッピバレー型鉍床」地質ニュース 375 号 pp.6-19
- 岡村秀典 1984「前漢鏡の編年と様式」『史林』第 67 巻 第 5 号 pp.1-42
- 岡村秀典 1993「後漢鏡の編年」国立歴史民俗博物館研究報告 第 55 集 pp.39-83
- 岡本隆司編 2011『中国経済史』名古屋大学出版会 344p
- 金正耀 2008『中国鉛同位素考古』中国科学技術大学出版社 313p
- 古宇田亮一 1983「中国の鉍物資源⑥：鉛・亜鉛鉍床（続）」地質ニュース 352 号 pp.50-55
- 地質解析委員会報告書 1985『世界の鉛・亜鉛鉍床』金属鉍業事業団資源情報センター pp.139-140
- 張長青・毛景文・吳鎖平・李厚民・劉峰・郭保健・高德榮 2005「川滇黔地区 MVT 鉛鋅礦床分布、特征及成因」礦床地質 第 24 巻 第 3 期 pp.336-348
- 辻田淳一郎 2013「古墳時代中期における同型鏡群の系譜と製作技術」史淵 第 150 輯 pp.55-93
- 福永伸哉（司会）・岡村秀典・岸本直文・車崎正彦・小山田宏一・森下章司 2003『シンポジウム三角縁神獸鏡』学生社 260p
- 馬淵久夫・平尾良光 1982「鉛同位体比からみた銅鐸の原料」考古学雑誌 68 巻(1) pp.42-62
- 馬淵久夫・平尾良光 1987「東アジア鉛鉍石の鉛同位体比」考古学雑誌 73 巻(2) pp.71-82
- 馬淵久夫 2007「鉛同位体比による青銅器研究の 30 年－弥生時代後期の青銅原料を再考する－」考古学与自然科学 55 号 pp.1-29
- 馬淵久夫 2010「漢式鏡の化学的研究（1）－鏡鑄造時に鉛は加えられたか－」考古学与自然科学 61 号 pp.1-16
- 馬淵久夫 2011「漢式鏡の化学的研究（2）－鉛同位体比の「前漢鏡タイプ」から「後漢鏡タイプ」への移行について－」考古学与自然科学 62 号 pp.43-63
- 馬淵久夫 2012「漢式鏡の化学的研究（3）－鉛同位体比法に鉛モデル年代の導入を提案する－」考古学与自然科学 63 号 pp.1-27
- 馬淵久夫 2014「漢式鏡の化学的研究（4）－後漢中期以降の漢三国晋鏡の原材料産地－」考古学与自然科学 66 号 pp.1-24
- 馬淵久夫 2015「漢式鏡に含まれる錫の産地について－」考古学与自然科学 68 号 pp.47-59
- 馬淵久夫 2016「漢式鏡の化学的研究（5）－平原遺跡出土銅鏡の製作地について－」考古学与自然科学 70 号 pp.29-48
- 山崎一雄 1987『古文化財の科学』思文閣出版 352p
- 林方成 1994「四川省東大梁子鉛鋅礦床成因新探」礦床地質 第 13 巻 第 2 期 pp.126-136
- Bastin, E.S. 1939 "Theories of formation of ore deposits" Scientific American Vol.49 No.6 pp.538-547

- Brill, R., Tong, S. and Dohrenwend, D. 1991 "Chemical analysis of some early Chinese glasses" in Brill, R. and Martin, J. (eds), Scientific research in early Chinese glass, Proceedings of the Archaeometry of Glass Sessions of the 1984 International Symposium on Glass, Beijing, September 7, 1984, The Corning Museum of Glass pp. 21-26
- Cui Jianfeng, Wu Xiaohong and Hunag Baoling 2011 "Chemical and lead isotope analysis of some lead-barium glass wares from the Warring States Period unearthed from Chu tombs in Changde City, Hunan Province, China" *Journal of Archaeological Science* Vol.38 pp.1671-1679
- Forey, M.H., Sinha, A.K., and Craig, J.R. 1981 "Isotopic composition of lead in the Austinville-Ivanhoe Pb-Zn district, Virginia" *Economic Geology* Vol.76 pp.2012-2017
- Heyl, A.V., Delevaux, M.H., Zartman, R.E. and Brock, M.R. 1966 "Isotopic study of galenas from the Upper Mississippi Valley, the Illinois-Kentucky, and some Appalachian Valley mineral districts" *Economic Geology* Vol.61 No.5 pp.933-961
- Kamona, F. 2011 "Carbonate-hosted base metal deposits" *Earth and Environmental Sciences*, Dr.Imran Ahmad Dar (Ed.) ISBN 978-953-307-468-9 pp.393-422
- Leach, D.L., Taylor, R.D., Fey, D.L., Diehl, S.F. and Saltus, R.W. 2010 "A deposit model for Mississippi Valley-Type lead-zinc ores, Chap. A of Mineral deposit models for resource assessment" U.S. Geological Survey Scientific Investigation Report 2010-5070-A, 52p
- Li, W.B., Huang, Z.L. and Yin, M.D. 2007 "Isotope Geochemistry of the Huize Zn-Pb ore field, Yunnan Province, Southwestern China: Implication for the source of ore fluid and metals" *Geochemical Journal* Vol.41 pp. 65-81
- Li, X.N. 2002 "Deposit genesis and geological characteristics of the Houjiangqiao Pb-Zn deposit in Hunan" *Contrib. Geol. Miner. Resource* Vol.17 pp. 41-46 (in Chinese with English abstract)
- Lu, H.Z. 1983 "Fluid inclusion study of Fankou Pb-Zn ore deposit, Fankou, Guangdong, China" *Chinese Journal of Geochemistry* Vol.2 Issue 1 pp. 45-57
- Nakai, S., Halliday, A.N., Kesler, S.E. and Jones H.D. 1990 "Rb-Sr dating of sphalerite from Tennessee and the genesis of Mississippi Valley type ore deposits" *Nature* Vol.346 pp.354-357
- Nakai, S., Halliday, A.N., Kesler, S.E., Jones H.D., Kyle, J.R. and Lane, T.E. 1993 "Rb-Sr dating of sphalerite from Mississippi Valley-type ore deposits" *Geochimica et Cosmochimica Acta* Vol.57 pp.417-427
- Schneider, J., Lapponi, M.B.F. and Bechstadt, T. 2002 "Carbonate-hosted zinc-lead deposits in the lower Cambrian of Hunan, South China: a radiogenic (Pb, Sr) isotope study" *Economic Geology* Vol.97 pp.1815- 1827
- Sicree, A.A., Barnes, H.L. and Hart, S.R. 1998 "Anomalous lead isotopes of a galena from the Upper Mississippi Valley zinc-lead district" *Mineralogical Magazine* Vol.62a pp.1396-1397
- Sverjensky, D.A. 1981 "The origin of a Mississippi Valley-type deposit in the Viburnum Trend, Southeast Missouri" *Economic Geology* Vol.76 No.7 pp.1848-1872
- Taylor, R.D., Leach, D.L., Bradley, D.C. and Pisarevsky, S.A. 2009 "Compilation of mineral source data for Mississippi Valley-type and clastic-dominated sediment-hosted lead-zinc deposits" U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1297, 42p.

- Tang, H.S., Chen, Y.J., Santosh, M., Zhong, H. and Yang, T. 2013 "REE geochemistry of carbonates from the Guanmenshan Formation, Liaohe Group, NE Sino-Korean Craton: Implications for seawater compositional change during the Great Oxidation Event" *Precambrian Research* Vol.227 pp.316-336
- Yin, M.D., Li, W.B. and Sun, X.W. 2009 "Rb-Sr isotopic dating of sphalerite from the giant Huize Zn-Pb ore field, Yunnan Province, Southwestern China" *Chinese Journal of Geochemistry* Vol.28 Issue 1 pp.70-75
- Zhong, J.S. and Mao, C.M. 2008 "The study of metallogenic mechanism and character of the Xiangxibei (Northwest Hunan) Mississippi Valley-type deposits" *Lead and Resources Herald* Vol.4 (6) pp.52-56 (in Chinese)

(2016 年 9 月 6 日受付, 2016 年 12 月 14 日受理)

Studies on Select Chemical Aspects of Chinese Han-Style Mirrors (6): “Mississippi Valley type” lead

Hisao MABUCHI

Researcher Emeritus, National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo

1-4-8 Nishikamata, Ohta-ku, Tokyo 144-0051, Japan (home address)

Among 201 specimens of Chinese Han-style mirrors so far studied, two specimens were found to contain lead of anomalous isotopic ratios called Mississippi Valley type (MVT) in isotope geology. The discussion of provenance of MVT lead has been put aside in the previous papers because of its difficulty in interpretation without the knowledge of the geological phenomenon. This paper focuses on this hitherto-neglected subject and attempts to estimate the provenance of lead contained in those two mirrors.

First, information was gathered on MVT mines mainly from the USGS database, and based on this information, a schematic diagram was established for simulating the mechanism of formation of anomalous MVT lead. The theory suggests that lead isotope data, because of its irregularity, cannot specify the location of the MVT mine from which the lead originates. What isotopic data tell is only the fact that lead is of Mississippi Valley type.

Secondly, according to the USGS database and Chinese geological reports, three areas with MVT mines are found in China: (1) a central region of Liaoning Province, (2) a western belt-line region of Hunan Province and (3) a border region between Sichuan and Yunnan Provinces. Although they are regions which gave birth to MVT mines in the past, the ages of their geological basements are totally different. The basement of (1) is North China craton of mainly Archaean eon (4.0-2.5 Ga) and that of (2) and (3) South China craton of mainly Proterozoic era (2.5 Ga-540 Ma). This age difference between north and south is reflected in the fundamentally different lead isotope ratios of MVT mines. Since lead isotope ratios of two mirrors belong rather to those of younger cratons, the MVT mine in Liaoning is excluded from a candidate of provenance.

Last, the provenance of lead contained in two mirrors were deduced from the cultural viewpoints of mirror production as follows;

a) *Shou-dai* (animal belt) mirror carved with thin lines (excavated from the Kinomoto-kofun, Ehime prefecture)

The style of the mirror is of the mid-first century in the Eastern Han dynasty, while the tomb (kofun) is of the late fifth century in Japan. The large discrepancy in time between the production and the burial makes Japanese archaeologists suppose that the mirror might have been cast in the fifth century Liu Song Kingdom (420-479), modeled after a mirror of ca.400 years

ago. If we adopt this hypothetical proposition, use of anomalous lead may not have been exceptional but usual, because the source of material supply must have been different in the Southern dynasty period from in the Han dynasty one. Most probably, MVT lead might have come from (3) Yunnan region which was then in the realm of Song Kingdom.

b) *Shen-shou* (god and animals) mirror in counter-position (excavated from the Tsubai Otsukayama kofun, Kyoto prefecture)

The mirror is estimated to be a product in the 220's at a workshop in Suzhou or Shaoxing, south China. The degree of anomaly of lead isotope ratios is not so high that ordinary lead material are thought to have been contaminated with MVT lead. The author supposes that the MVT lead might have been brought to the workshop along with tin from (2) the western belt-line region of Hunan Province.