

北薩・串木野地域における 一つの金鉱床成因研究物語

森 下 祐 一¹⁾

1. はじめに

鉱床学はeconomic geologyとして、地質学発展の原動力になってきた。鉱床学の第一歩は地質調査であり、層序学、構造地質学、岩石学(火山学、深成岩岩石学など)が基本である。更に、鉱床成因研究のためには地化学探査、安定同位体分析、放射年代分析や重力調査、比抵抗調査等の電気探査が有用である。このように応用科学とも言うべき性質を内在しているため、どのような手法に重点を置くかは研究者のオリジナリティに依存する部分が多い。

本特集号のテーマは、北薩地域の金鉱床に関する様々な調査・研究の結果、何が得られたのかを述べる事である。しかし、鉱床専門家以外の読者には、鉱床そのものの記載よりも「どのように研究したか」という点に焦点を当てる方が、興味が持てるのではないかと考えた。そこで、北薩・串木野地域金鉱床について長文になるレビューを避け、私ができるような観点・手法で研究してきたのかを述べてみたいと思う。小論はそのような主旨で書かれたものである。文章の流れに沿った研究しか引用していない事を予めお断りしたい。

2. 北薩・串木野地域

鉱床学の手法・知見を結集して、日本一の金山となる菱刈鉱床を発見したのは画期的な出来事だった。その調査を金属鉱業事業団の広域調査課長として指揮した佐藤壯郎博士(後に地質調査所長、工業技術院長、現：人事院総裁)が、1981年に地質調査所鉱床部の探査研究課長として戻ってこられた。当時、私は石原舜三課長(後に地質調査所長、工

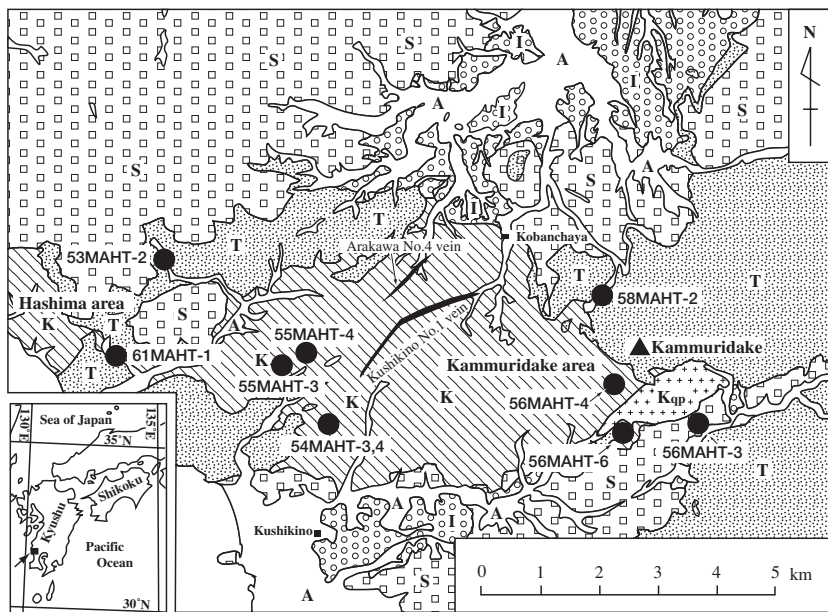
業技術院長、現：産総研特別顧問)の指示で、花崗岩に関連した熱水鉱床やスカルン鉱床の酸素同位体的成因研究を行っていた。佐藤壯郎さんは、菱刈鉱床の発見で重要性が急上昇した金鉱床の研究を重視したため、後に石原さんの後任となった松久幸敬博士と共に私は串木野鉱床の研究を行う事になった。串木野鉱床は、鹿児島県北薩地域の代表的な浅熱水性鉱脈型金銀鉱床で、それまでに多数の論文が公表されていたが、鉱化溶液に関しては流体包有物に関する研究(例えば、Izawa *et al.*, 1981)だけであった。そこで、鉱化溶液の性質を明らかにするために、私は酸素・炭素同位体的研究を行なう事にし、石英・方解石脈の酸素・炭素同位体比を1982年のICOG国際会議で初めて報告した。

このような経緯で金鉱床の同位体的研究を進めていた1984年の末に、佐藤壯郎さんは広域調査の北薩・串木野地域現地検討会に私を連れて行って下さった。広域調査は地質調査から始めて、物理探査、地化学探査、ポーリング(試錐)を行なうのが普通である(詳細は中山 健さんにより本誌に紹介されている)。現地検討会では、野外での露頭やコア観察の後に、室内で物理探査、地化学探査の調査結果が報告され、大学、地質調査所や鉱山会社の地質専門家からなる検討員を交えて室内討論が行われる。当時の検討員には金鉱床を永年研究されてきた鹿児島大学の浦島幸世教授を筆頭に、多彩なメンバーが任命されていた。

このような検討会は、当時は全国10地域ほどで行なわれていたが、この北薩・串木野地域現地検討会では大変活発な議論がされていたと、当時の金属鉱業事業団の担当者から聞いた事がある。広域調査課長に外向していた佐藤壯郎さんを始めとする関係者

1) 産総研 地質情報研究部門

キーワード：北薩・串木野地域、金鉱床、酸素・炭素同位体比、石英・方解石脈、浅熱水系、熱水変質



第1図
串木野鉱床を中心として東に冠岳地区、西に羽島地区を取めた地域の概略地質図(通商産業省資源エネルギー庁, 1979による)上に示すボーリング位置。

- A : 沖積層
- I : 始良火砕岩(シラス)
- S : 北薩新期火山岩類
- T : 北薩中期火山岩類
- Kqp : 石英閃緑斑岩
- K : 北薩古期安山岩類

が、アクティブな研究者を幅広く検討員(その何人かは本誌特集号に寄稿されている)に委嘱した賜物であった。その検討会で私は短いプレゼンを求められ、串木野鉱床試料の酸素・炭素同位体比測定値を示し、熱水系の拡がりについて私の推論を述べた。

3. 串木野鉱床の酸素・炭素同位体的特徴

3.1 地質・鉱床

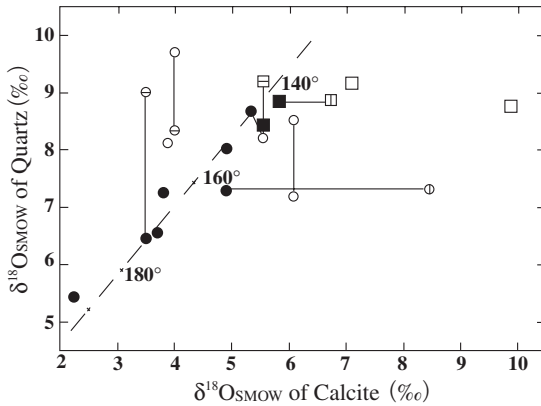
四万十累層群の基盤を不整合に覆う北薩古期安山岩類(およそ4Ma, Izawa and Zeng, 2001)は、主として紫蘇輝石普通輝石安山岩からなる(第1図)。串木野鉱床は、プロピライト化変質した北薩古期安山岩類中に生成した浅熱水性鉱脈型金銀鉱床である。鉱化年代(石英・方解石脈中のアデュラリアのK-Ar年代)は $3.64 \pm 0.05\text{Ma}$ (通商産業省資源エネルギー庁, 2000)を中心にして、3.4~3.8Maの範囲に収まる(Izawa and Zeng, 2001)。鉱脈はNE-SW系で南東傾斜のものが卓越している。主脈である串木野1号ヒ(金へんに通の漢字が正しいが、以下ヒを脈と表す)は、走向N50-70°E、傾斜35-45°Sで走向延長2,600m、最大脈幅は50mである。鉱脈の脈内構造は複雑で、鉱石・脈石鉱物の帯状配列や母岩・鉱石レキが普通に見られる。鉱石鉱物は主にエレクトラム(Au, Ag)、ナウマン鉱 Ag_2Se 、ポリバス鉱(Ag, Cu) $_{16}\text{Sb}_2\text{S}_{11}$ 、黄鉄鉱 FeS_2 、黄銅鉱 CuFeS_2 等であり、

Ag/Au比は10程度である。脈石鉱物は石英、方解石を主体とし、アデュラリアを含む。

3.2 酸素同位体比と平衡温度-同位体平衡確認の重要性-

串木野1号脈の試料E1020-2($\delta^{18}\text{O}_{\text{Quartz}} = 6.6\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} = 3.7\%$)は、鏡下で細粒の石英と方解石が密に共存しており、両鉱物が同時に晶出した平衡組合せ(同一の同位体組成を持つ熱水から同一温度で晶出した鉱物対)であると認められた。酸素同位体地質温度計(例えば、松久, 2003; 森下, 2003)をこの石英-方解石に適用すると、酸素同位体平衡温度は約170°C(Matsuhisa *et al.*, 1985)となる。これらの鉱物と平衡にあった熱水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は、この地方の天水の値 -7%と一致し、鉱化溶液の大部分は天水起源であったことを示唆する。

ここで、注意すべき点は、「同位体平衡温度は、同位体比の測定から自動的に求められるものではない」ことである。鉱物と熱水の系が生成時に平衡にあったことが前提であり、それを確認する手段として、地質学的な産状を確認する事が必要である。第2図の破線は、-7%の酸素同位体比を持つ熱水から平衡下で晶出する石英、方解石の $\delta^{18}\text{O}$ 値を、温度の関数として表示したものである。細粒の石英、方解石が密に共存している試料(以下、平衡組合せと呼ぶ)の同位体比測定値はこの平衡分別曲

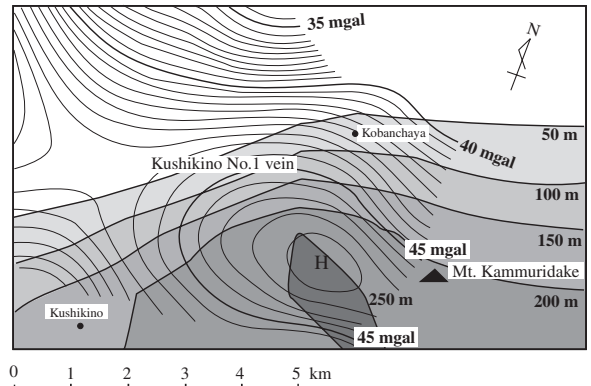


第2図 串木野鉱床串木野1号脈(丸印)と荒川4号脈(四角印)から採取した石英と方解石の酸素同位体比(森下, 1987)。黒印は石英と方解石が細粒で密に共存する(平衡)試料, 白抜きは結晶が粗粒で互いに偏在する(非平衡)試料を表わす。縦線, 横線の入った印はそれぞれ対になる石英と方解石がないことを示す。詳細は本文参照。

線の上に乗っており, これらの石英・方解石試料は, 酸素同位体比が一定(−7‰)の熱水から温度の低下に伴って晶出したと考えられる。つまり, 熱水を媒介として石英と方解石が事実上平衡を保ちながら晶出したと考えられる。一方, 石英と方解石が粗粒で互いに偏在している試料(以下非平衡組合せと呼ぶ)や片方の鉱物しか存在しない試料は平衡分別曲線から外れている。破線から外れて $\delta^{18}O$ の大きな値を持つ試料は, 熱水の温度が低下したステージで晶出したものと考えられることができる。第2図で実線で結んだ2点は同一試料番号を持つが, 産状が異なるために試料を分離して測定したものである。このように, 鉱脈から任意に採取した試料は複数の鉱化ステージで晶出した鉱物を同一手標本中に含む事が多いが, 肉眼または鏡下における観察と酸素同位体比測定値が調和的であり, 串木野鉱床では平衡組合せと非平衡組合せの区別がつくことが明らかになった。

4. コンピュータ・シミュレーション実験

ここで述べた串木野鉱床のような浅熱水性(epithermal)鉱床の鉱液は, 同位体的研究により, ほとんどの場合天水起源であることがわかってきた。一方, 花崗閃緑岩中に生成した深熱水性(hypother-



第3図 串木野鉱床地域におけるシミュレーション最適基盤変位(単位:m)に深部重力コンター(単位:mgal)を重ねて表示したもの(Morishita and Kodama, 1986を一部改変)。

mal)の含タンゲステン石英脈である京都府の大谷鉱床は, 初期の熱水はマグマ水だが, 後期には天水の混合が見られた(Morishita, 1991)。このように, 深熱水性であっても天水の寄与が認められるので, 浅熱水性鉱床では同位体的には天水の寄与しか認められないのが普通である(例えば, 森下, 1994)。このため, 熱水の起源を探るためにはマグマ-熱水系全体の構造を考える必要がある。

串木野鉱床地域の鉱脈系(断層系)を解析して鉱床探査に役立てようとの試みが金属鉱業事業団の構造解析総合調査委員会で1985年に提案され, 小玉喜三郎委員(後の地質調査所長, 現:産総研副理事長)の手法を用いて私が行なう事となった。研究は, 詳細な鉱脈系記載をした既存論文に基づき, 鉱床成因を地質セッティングとの関係で捉える事とし, 鉱脈系が基盤の変位によって生じた可能性を検証するために, 仮想基盤変位法を用いてコンピュータ・シミュレーション実験を行なった。その結果, 串木野鉱床東側の冠岳付近の基盤が上昇した事を示した。串木野-冠岳地域においてこの上昇部の頂点は高重力異常の中心地点と一致しており(第3図), 四万十層基盤のドーム状上昇は, 広域応力場に貫入したマグマの上昇により生じたと解釈された(Morishita and Kodama, 1986)。

北薩地域では古くから高重力異常の頂部や肩に金鉱床が分布すると言われていたが(例えば, 通商産業省資源エネルギー庁, 1976, 1980; 石原・森下, 1987), このドーム状の上昇がマグマの貫入によ

て起きたとすると、裂カ、熱源と高重力異常を同時に説明出来る事になる。冠岳の南方には細粒完晶質の石英閃緑斑岩が分布している(第1図)が、この斑岩は安山岩質火山のネックであり、さらに下部の石英閃緑岩～石英閃緑斑岩が貫入マグマであったと考えた(石原・森下, 1987)。また、その場所には磁性体の潜在が指摘されている(Okubo and Okuma, 1986)。マグマの上昇様式が広域応力場に規制されるのは当然だが、Morishita and Kodama (1986)の主張は、広域応力場が原因で割れ目が生じるのではなく、鉱脈はマグマ活動に関連して必然的に生じた、とした点であった。この研究手法はその後、梁ほか(1987)や内藤ほか(1993)に引き継がれたが、私自身は同位体挙動の素過程の方により興味があり、鉱物中の酸素拡散に関する研究(Morishita *et al.*, 1996)をブラウン大学で行なうために1989年に渡米する事になった(森下, 1992)。

5. 熱水変質の重要性

5.1 検討会での重要な探査指針

さて、広域調査に話を戻すと、1984年12月にオプザーバで参加して有益な刺激を受けた現地検討会だが、1985年(昭和60年度)からは大先輩の佐藤壮郎さんの後を継いで検討員となった。当時、広域調査課長だった佐藤 彬さん(現:石油天然ガス・金属鉱物資源機構理事)は、楽しい雰囲気を保ちつつ、確固たるリーダーシップを発揮された。私は米国留学中を除き、その後ずっと検討員(後のアドバイザー)としてプロジェクトに参加する事になった。そういう経緯で、北薩地域は私にとって思い入れの深いフィールドとなり、この特集号を企画しようという大きなモチベーションになった(第4図)。

広域調査検討会に参加して良かった事は、様々な調査手法と調査結果を詳細に知る事ができた点である。物理探査の一環として行った電気探査のうち、シュランベルジャー法による比抵抗調査は良く用いられた。浅熱水性鉱脈型金鉱床の調査では電気探査で鉱脈そのものを探し出す事は出来ないが、深部の高比抵抗帯の上に載る低比抵抗帯が鉱床に関連した熱水変質帯を示すと解釈される事が多い。調査結果の解釈が行われる検討会で、手法の限界(可探深度や精度、前提モデルへの依存性など)が



第4図 広域地質構造調査北薩・串木野地域の現地検討会(2003年菱刈鉱山会議室)において本特集号の企画を提案する著者(提供NHK)。

確認される場合があり、特に有益だった。このほか、熱水変質帯と解釈した低比抵抗帯が、後のボーリング調査で湖成堆積物であると判明した事もあった。

このように有益なケーススタディに接する機会があった現地検討会だが、九州大学の井澤英二博士(現:九州大学名誉教授)に出会ったことが特に印象に残っている。井澤さんはX線回折法などにより詳細な変質分帯を行なっており、更に熱水系の規模や温度に関するモデルを作り上げていた。このため、変質分帯は検討会における重要な探査指針になった(井澤さんはこれら一連の研究に対して今年、資源地質学会の加藤武夫賞を受賞された)。検討会や懇親会の席での井澤さんとの会話は大変新鮮だった。地質分野では新鮮な岩石が好まれる。岩石のサンプリングに際して風化部を除外するのは当然だとしても、熱水変質は立派な地質現象である。それにもかかわらず、「石が腐っている」と言っても、熱水変質岩に見向きもしない人が多い。しかし、腐り方にもいろいろあって、井澤さんのように詳細に調べれば、そこから多くの情報を引き出す事ができるのである。以下のエピソードは北薩地域ではないが、熱水変質に関する興味深い事例と思われるので、御紹介したい。

5.2 大分県馬上鉱床地域の熱水変質

1992年の1月、当時地質調査所の九州地域地質センターに所属していた星住英夫さん(現:火山活動研究グループ長)と一緒に、私は大分県山香町の緑色をした岩石露頭に囲まれながら歩いてい



第5図 豊岡圏幅地域の金鉱床(黒丸)と熱水変質帯(網かけ). 斜線部は宇佐火山岩類より上位の地層(星住・森下, 1993).

た、星住さんはこの地域の5万分の1地質図幅「豊岡地域」をほぼ作り上げていたが、図幅の東端には大変大きな金鉱床である馬上鉱床と、随伴する一連の鉱床が分布しており、西端にはやはり金山としてかつて開発された宇佐鉱床、麻生鉱床があった。5万分の1地質図幅説明書(地域地質研究報告)には「応用地質」という章があるが、鉱床の有無等は地域毎に異なるので、図幅毎に趣が異なる。この豊岡図幅に関しては金鉱床が大変多かったので、私は当時の佐藤壮郎地質調査所次長に命じられて報告書作成に参加した。

地質図の方は星住さんの担当だが、鉱床やそれに伴う熱水変質帯も地質の一部である。そこで、10日間のフィールドワークの初日に星住さんと一緒に歩いたのだった。熱水変質岩が広く分布するフィールドを歩きながら、星住さんに「森下さん、この石の原岩はLavaではなくてTuffだと思うのですが?」と、問いかけられた。その辺りは既存の地質図によると溶岩だが、プロピライト変質しているため、緑色のマシブな石でしかない。従って、肉眼は勿論、ルーペでも見分けがつきにくい。しかし、そのような石を顕微鏡下でよく見ると、細かいレキが入っている。それで、星住さんは疑問に思っていたようだ。私は、「断言できないけど、Tuffでしょうね」と答えた。根拠は色だった。同じプロピライト変質でも岩石によって反応の仕方が異なる。勿論、熱水変質の場合での到達温度や時間は同じなので、同じような鉱物組合せを持った変質岩となる。しかし、岩石組織により変質の進み方は異なる。溶岩

に比べて凝灰岩の方が熱水とミクロのオーダーで十分に反応する。このため、比較的鮮やかな緑色をしている事が多い。アナログとしては、拡散係数が同じでも細粒鉱物の方が鉱物粒毎の拡散が十分に進むため、放射年代の閉鎖温度が低くなるようなイメージである。凝灰角礫岩では礫部の変質が弱いために原岩が容易に推定できることが多いが、更に変質が進むと分かりにくくなる。特に、凝灰岩ではほぼ一様なために溶岩と見誤りやすい。多分、既存の地質図を書いた人は腐った石が大嫌いで、困惑しながらルートマップに溶岩と記載したのだろう。私は、地質図で溶岩になっている熱水変質岩の何%かは凝灰岩ではないかと疑っている。

これは熱水変質を正しく評価しないとマッピングを誤ってしまう、という例だが、さらに本質的な問題も明らかになった。地質調査を終えて戻った宿で、夕食をとりながら星住さんが、「昔は変質の進んだ岩石を含む層序を宇佐層群、変質の弱い所を耶馬溪層と呼び、それぞれ中新統、鮮新統とされてきた。でも、これでは層序に矛盾が見られるので、整理したい」と話してくれた。この問題の根はかなり深く、経緯も色々ある。そもそも、プロピライト変質岩がいわゆる「グリーンタフ変動」で生じた緑色凝灰岩と非常に似ていたために、昔の地質構造図を見るとこの地域の変質岩は陸成の火山活動にもかかわらず、グリーンタフ変動によるものとされ、従って中新統という事になってしまった。両者は鉱物組合せが同じなので見掛けは似ているが、産状や成因が異なる。

グリーンタフ変動は広域的な地質現象が想定されていたが、プロピライト変質帯の大きさは高々熱水系(～10km)の範囲である(第5図)。しかも、熱水系の中心から離れていくと到達最高温度が下がり、低温での鉱物組合せへと移行していく。この観察は重要で、変質度と層序が斜交することが明らかになるはずである。しかし、変質に関する誤った先入観を持っていると、呪縛から逃れられない。詳細は図幅説明書を見て頂くとして、地質を見直し、多数の放射年代値を再検討した結果、宇佐層群と耶馬溪層を宇佐火山岩類と再定義して豊岡図幅が完成した(星住・森下, 1993)。熱水変質は重要な地質現象であり、正当に評価する必要がある。

因に、熱水変質により放射年代が若返ることが一般に知られているが、フィッシュトラック年代の方がK-Ar年代より古い年代を示す場合がある事が指摘された(星住・森下, 1993)。このデータに関する議論をきっかけにして、私達はフィッシュトラック法の専門家と共同で、実験によりその一端を明らかにした(檀原ほか, 1997)。それによると、熱水活動によりフィッシュトラックがシールされ、その後の温度上昇による若返りが起こらないケースがある事が示唆された。

6. マスコミから見た広域調査の意義

世間では「鉱山」に関心を持つ人は少ない。鹿児島県のように古くから鉱山があった地域では、行政も市民もそれを違和感なく受け入れてきたが、身近に鉱山がないと色眼鏡で見える人も多い。市民の理解があるかどうかで、地質調査のやりやすさも大きく異なる。しかし、金鉱床は特別だ。金やダイヤモンドは社会的に特別な関心を持たれる事が多い。そこで、「金鉱床発見」などというニュースが流れると大騒ぎになる。

特に、高品位金鉱床である菱刈鉱床の発見は、社会的な影響をもたらす事になった。株が投機の対象になり、その後も各地で自称山師がマスコミに取り上げられたりした。つまり、多くのマスコミは「鉱床発見」を「その科学的な背景」とか「我が国の資源ポテンシャル評価」ではなく、「社会現象」として捉えがちである。そこで、何かが発見されたとの情報を得るとすぐにやってきて取材するが、その意味を調べる間も



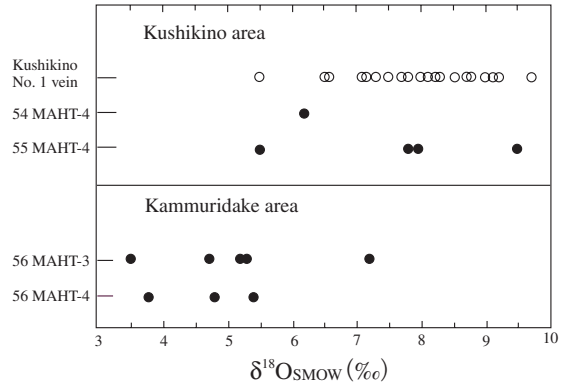
第6図 1994年1月27日に放送されたNHK「イブニングネットワークかごしま」でボーリングコアを用いた研究の意義を説明する著者(提供NHK)。

なく報道し、そして一般の人よりも早く忘れ去る。

私が検討員になった時には菱刈鉱床は既に発見されて開発に移っていたので、マスコミの取材はなくなっていた。しかし、そんな中で一人のNHK記者が長期間に渡りほとんど毎年、熱心に現地検討会を取材していた。私は1987年2月11日の現地検討会で初めて森永満郎記者(NHK川内通信部)に出会い、その後も話をするようになった。森永さんは調査の意義を「新鉱床発見」だけだとは思っていなかった。もちろん、鉱床探査の最終的な目的は鉱床を見つける事だが、「その過程で、郷土鹿児島県の地質が明らかになるのは、鹿児島県にとって重要な事だ」との思いがあった。私は、その考え方に共感した。国の研究所の研究者として、調査・研究により国土に関する科学的な財産目録を知的基盤の一環として充実させる事も、科学立国を標榜する我が国としては重要だと思っていたからである。私は森永記者の取材を受け、その一部はNHKの鹿児島版で放送された(第6図)。あるときは、論文の別刷りを謹呈したが、森永さんは私の論文に関する質問を投げかけてくれただけでなく、驚く事に資源地質学会の会員になって、学術刊行物を受け取るようになった。目的意識を持って地道に取材し、郷土・地元の人にとっての意義を考えながら報道の仕事をしてきた森永記者の姿(第7図)は、現地検討会に溶け込んでいたが、先日定年を迎えられた。森永さんには、報道する側から見た調査について、本誌特集号(9月号)に寄稿して頂くことになっている。



第7図 取材中の森永さん(1999年2月). 右は後根則文さん(菱刈鉱山探査課).



第8図 串木野-冠岳地域における脈石英の酸素同位体比(Morishita, 1993).

7. 串木野-冠岳地域における石英・方解石脈

7.1 酸素・炭素同位体比

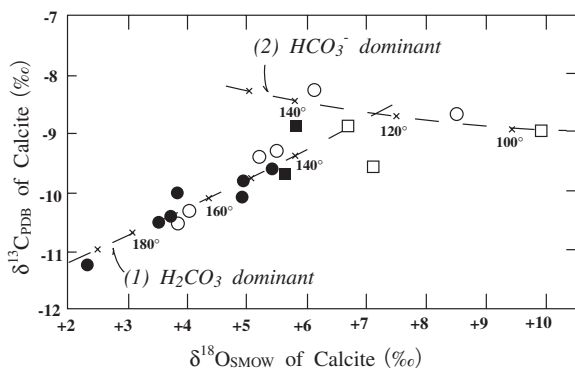
串木野1号脈の石英の酸素同位体比は東で低く西で高いが、これは鉱脈の東側に高温部分があり、西側では低温になることを意味する(Matsuhisa *et al.*, 1985). このことから、熱水は温度が下がりながら東から西へ流れたと考えた。串木野鉱床の東方には北薩中期火山岩類から成る冠岳があり(第1図)、その周辺には多くの珪化岩や石英脈が分布している。珪化岩脈中の流体包有物の均質化温度は串木野鉱脈のものより高く、冠岳南東部(石英閃緑斑岩分布域)が串木野-冠岳地域全体の熱水活動の中心であった可能性を示している(Izawa, 1987). また、冠岳地域では方解石が地表には見られないが、地下には普遍的に存在する事がボーリングにより明らかになった。そこで、串木野鉱床地域の鉱化熱水系を広域的に調べるため、ボーリングコアを使って串木野-冠岳地域における石英・方解石脈の同位体比を測定した。

ボーリング位置図(第1図)において、54MAHT-4号と55MAHT-4号は、串木野鉱脈群の周辺に位置し、脈の性質も鉱脈と類似している。一方、56MAHT-3号と56MAHT-4号は、冠岳地域の珪化岩脈の下部を貫いていると考えられるが、下部では石英脈に移化しており、方解石も含まれている。第8図は、コア中の石英の酸素同位体比を串木野1号脈の値と並べて描いてある。串木野鉱床周辺の54MAHT-4号と55MAHT-4号の値は串木野1号脈の値と同様の値であるが、冠岳地域の56MAHT-3

号と56MAHT-4号ではこれよりも低い値となった。冠岳地域における熱水も串木野鉱床と同様に天水起源であると考えられるが、仮にマグマ水等が混入したり、水-岩石反応が起こった場合には、 $\delta^{18}\text{O}$ 値が-7‰より高くなる。このため、いずれにしても石英-熱水間の同位体分別が小さくなるため、56MAHT-3号と56MAHT-4号における石英脈は串木野1号脈より高温(220℃以上)で生成したと結論付けられた(Morishita, 1993)。ボーリングコア中方解石の $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 値は串木野地域、冠岳地域とともに概ね串木野1号脈と荒川4号脈の方解石の酸素・炭素同位体比トレンドに乗っており(Morishita, 1993)、串木野-冠岳地域は同位体的に同一の熱水系に属していたと考えられる。このことは、石英・方解石脈のK-Ar年代が串木野地域と冠岳地域で同じ範囲にある(Izawa and Zeng, 2001)ことから言える。以上より、串木野鉱床を形成した鉱化熱水系は冠岳地域を含み、冠岳近傍に高温部(熱水の上昇域)があったと考えられる。

7.2 中性子放射化分析

串木野鉱脈の金品位は坑内において詳細に調べられていたが、周辺地域に分布する脈の化学分析値は、1985年当時はほとんど報告されていなかった。そこで、熱水系における元素の挙動を明らかにするため、青山学院大学の木村幹教授らと共同で串木野-冠岳地域におけるボーリングコア中の石英・方解石脈の中性子放射化分析を行った。石英・方解石試料は化学的に分離・濃縮せずに中性子照射し、照射試料から放出される γ 線スペクトル



第9図

串木野1号脈(丸印)と荒川4号脈(四角印)から採取した方解石の酸素・炭素同位体比(Matsuhisa et al., 1985). 曲線(1)および(2)は、溶存卓越炭素種がそれぞれH₂CO₃, HCO₃⁻である鉱液(炭素同位体比-10.8‰酸素同位体比-7.0‰)から晶出した方解石の同位体比トレンドを計算で求めたもの. 鉱液の温度低下に伴い、溶存卓越炭素種がH₂CO₃からHCO₃⁻に変化したと推定された(Matsuhisa et al., 1985)が、酸素同位体比測定値はそのトレンドに沿う. 黒印, 白抜きはそれぞれ石英と共存する方解石, 共存しない方解石を表わすが、いずれも2本のトレンドに乗り、方解石は同位体平衡下で鉱液から晶出したことを示唆する.

を測定する非破壊放射化分析法により分析することができる. 分析対象とした9本のボーリング(第1図)のうち、4本は同位体比測定を行ったものと同じである.

串木野鉱床地域のボーリングコアでは金の濃度が10ppb以上のものが多く、中には数百ppbの濃集が認められるものがある. 一方、冠岳地域では多くは数ppb以下であり、深部においても金濃度は増加しない(森下ほか, 1991). 金の沈澱は石英・方解石の平衡組合せと相関することを指摘したが、ボーリングコアにおいても石英または方解石のいずれかを欠く試料で金が10ppb以上検出されたものはほとんどない. Ag/Au比は串木野鉱床地域のボーリングコアでは約10であり、串木野鉱床内の値と概ね一致している. 一方、冠岳周辺地域では金濃度が低いためにAg/Au比は約100であった. 希土類元素定量値の規格化パターンは軽希土上がりで、Euの正のアンローマリーが認められる. 森下ほか(1991)は、熱水中のEuが相対的に還元的な環境下で+2価として存在したために、方解石のCaを置換したと考えた.

8. 鉱脈中の方解石

8.1 不毛脈のイメージと意義

方解石脈は一般に注目されない. 方解石は温度の上昇で沈澱する事から、鉱化熱水系とは無関係な地表付近での降下天水から方解石脈が生成する事が多く、そのために「金属元素を含まない不毛脈」とのイメージが出来上がってしまった. しかし、串木野鉱床では石英、方解石、アデュラリアが普遍的に見られる. 荒川3号脈における石英、方解石、

アデュラリアの量比は浦島ほか(1973)により調べられているが、鉱液の性質を反映したデータとして重要である. また、石英・方解石の平衡組合せが確認された地点(非平衡組合せが共存している場合もある)は金の富鉱部(Au > 3ppm)に対応しており、非平衡組合せか単独の鉱物(石英または方解石)しか存在しない地点では金の濃集は見られない(森下, 1987). Matsuhisa et al. (1985)では流体包有物に沸騰の証拠が見られないとの文献を引用したが、その後浅熱水性鉱床生成における沸騰の重要性が研究され、菱刈(Izawa et al., 1990)、野矢(森下・竹野, 1993)、Broadlands-Ohaaki地熱系(Simmons and Browne, 2000)などで、沸騰による方解石の普遍的な晶出が示された. 従って、方解石単体ではなく、石英、方解石、アデュラリアの産状における位置付けが必要である. 一方、熱水から方解石を含む石英脈が生成しても、後の熱水で方解石が溶解し、残存していない事もしばしばである. 例えば、菱刈鉱床の鉱脈には方解石はないが、方解石の溶解跡が見られる. またボーリングコアの細脈にのみ方解石が残っている場合もある.

8.2 方解石の酸素・炭素同位体比

第9図は串木野1号脈と荒川4号脈の方解石のδ¹⁸O値とδ¹³C値の関係を示したものである. 串木野1号脈の方解石試料E1020-2(δ¹⁸O = 3.7‰, δ¹³C = -10.4‰)がδ¹⁸O = -7.0‰の熱水から晶出した時、方解石中の炭素が熱水中のH₂CO₃(app)(= H₂CO₃ + CO₂(aq))と平衡にあったとすると、H₂CO₃(app)のδ¹³C値は-10.8‰と計算される. この値は地殻平均の炭素同位体比である約-7‰と

比べてやや低い。第2図で示した平衡組合せの方解石だけでなく非平衡組合せの方解石も第9図の破線(1),(2)に乗り、これらの方解石はすべて上述の熱水から晶出したと考えられる。この特徴的な酸素・炭素同位体トレンドは四万十累層群を基盤岩とする北薩の他の鉱脈でも同様に見られ、基盤の四万十層群に規制されていると考えた(Morishita, 1993)。このため、四万十層の基盤岩を通過してくる鉱化熱水系から生成した鉱脈中の方解石と、基盤岩の中を通らない小規模な浅所熱水系から生じた不毛方解石脈を同位体的に区別出来ることが明らかになった(Morishita, 1993)。この差異は、Sr同位体比にも現われる(Morishita and Nakano, in prep.)。

9. 串木野鉱床隣接地域の基盤岩

9.1 羽島地区

話は遡るが、串木野鉱床の西に隣接する羽島地区(第1図)の鉱床ポテンシャル評価の一環として、1986年度からボーリング調査が実施される事となった。61MAHT-1号ボーリングは基盤の堆積岩に到達し、コア検討会は活気づいた。串木野鉱床地域には基盤岩の露出はなく、また、ボーリングも基盤を抜いていなかったが、周辺地域における四万十累層群の分布や地質構造を勘案すると、本地域の基盤は下部四万十層群に属する佐伯亜層群(白亜系)であると見なされていた。その基盤岩が西に隣接する羽島地区で捉えられたわけで、検討員は皆、そのコアに注目した。そこで、浦島教授の話術が炸裂する。いわく、「皆さんソコが問題だと言われるので、(ボーリングコアの)底を観察しましょう」、「このコアの堆積岩にはごまんと礫が入っているの、ゴマント(四万十)層でしょうかね?」。

このコアで捕捉した堆積岩は、この年の報告書では四万十層に属すると記載された(通商産業省資源エネルギー庁, 1987)が、既存の地質図ではこの辺りを仏像構造線が通る事になっていて、大変微妙な地質環境であった。先に述べたように金鉱床を生成させた鉱化溶液の性質が基盤岩により規制されている事が明らかになり、基盤岩の重要性が指摘された(Morishita, 1993)。この意味でも基盤岩の所属を明らかにしておく必要があった。

9.2 砂岩のモード分析

堆積岩のキャラクタリゼーションには砂岩のモード分析が有効である(例えば、寺岡・奥村, 1992)ため、61MAHT-1号コアから採取した砂岩試料のモード分析を行なった。この結果、この堆積岩は下部四万十層群のものとは異なる特徴を持ち、羽島鉱床地域の基盤岩は三宝山帯に属するものと結論付けられた(森下・寺岡, 1996)。61MAHT-1号ボーリングは多数の熱水性石英・方解石脈を捕捉しているが、脈中の金濃度は低い(通商産業省資源エネルギー庁, 1987)。串木野鉱床を模式とした北薩地域の金鉱床地域で見られる方解石の酸素・炭素同位体比トレンド(Morishita, 1993)と比較すると、61MAHT-1号コアの脈方解石はこのトレンドより $\delta^{13}\text{C}$ が2‰程度高く、このことは基盤岩の相違に起因すると考えた(Morishita, 1993)。つまり、羽島鉱床は基盤の相違に対応して北薩地域の他の鉱床と性質が異なるものと解釈された。四万十層群が北薩金鉱床地域の基盤である事が、日本一の金鉱床地域の要件の一つではないかと想像させる。

10. おわりに

日本は大量の鉱物資源を使用しているにもかかわらず、高コストなどのために現在では国内鉱山数は大変少なく、ほとんどすべてを輸入でまかなっている。しかし、未来永劫そのような資源の需給が続く保証はないだろう。また、現代社会の基本は経済学であるように見受けられるが、これのみによって世界の資源が取引される環境では、資源の安定的供給という担保は得られないと危惧する。もちろん、取引には様々な保険的な仕組みが導入されているだろうから、「短期的」かつ個別のリスクマネジメントはなされるだろう。しかし、有限の地球からの資源の安定的な産出という概念を世界中の資源関係者が共有しないと、「長期的」な持続可能な発展は見込めない。

地球の地質現象の一環として元素が局所的に濃集して鉱床が生成し、それを人類が利用し、有限な地球上で環境との調和を考えて廃棄物を処理する事が求められている。そこでは、溶解、移動、濃集など元素の挙動を予測することが必要だが、このような下流分野でも鉱床学の知見が求められるこ

とになる。現在の日本ではマイナーな学問になってしまった鉱床学だが、開発、環境の両面において元素の挙動研究を通して貢献できるはずである。また、外国への技術移転や共同研究も重要である。従って、国としてはこの分野での研究ポテンシャルを長期間保っておく事が重要であると考えられる。

謝辞：北薩・串木野地域における研究に用いた試料の提供と現地調査に際して、三井金属鉱業(株)、三井串木野鉱山(株)、住友金属鉱山(株)・資源事業部菱刈鉱山、金属鉱業事業団(現：石油天然ガス・金属鉱物資源機構)の方々に御世話になりました。NHK森永記者には映像を提供して頂きました。また、共同研究者や検討員(現：アドバイザー)の方々には様々な議論をして頂きました。以上の方々に厚く御礼を申し上げます(役職は当時)。

文 献

- 檀原 徹・岩野英樹・吉岡 哲・森下祐一・星住英夫(1997)：ジルコン中のフィッシュン・トラックのナチュラルエッチング-いくつかの電解溶液及び天然温泉水を用いた室内実験による検証-。フィッシュン・トラック ニュースレター, 10, 1-9.
- 星住英夫・森下祐一(1993)：豊岡地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 75p, 地質調査所。
- 石原舜三・森下祐一(1987)：北薩とくに菱刈の金鉱床：その構造規制と生成モデル。地質ニュース, no.389, 7-20.
- Izawa, E. (1987) : The Kushikino gold-silver deposit. In Gold deposits and geothermal fields in Kyushu. Soc. Mining Geologists of Japan, Guide-book 2, 23-26.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaraki, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, K., Koga, A. and Taguchi, S. (1990) : The Hishikari gold deposit: high-grade epithermal veins in Quaternary volcanics of southern Kyushu, Japan. Jour. Geochem. Explor., 36, 1-56.
- Izawa, E., Yoshida, T. and Sakai, T. (1981) : Fluid inclusion studies on the gold-silver quartz veins at Kushikino, Kagoshima, Japan. Mining Geol., Spec. Issue, 10, 25-34.
- Izawa, E. and Zeng, N. (2001) : Kushikino gold mineralization in a Pliocene volcanic region, Kyushu, Japan. SEG Guidebook Ser., 34, 53-60.
- 梁 一鴻・小玉喜三郎・島津光夫(1987)：仮想基盤変位法による佐渡鉱山の割れ目系の予察的解析。鉱山地質, 37, 337-346.
- 松久幸敬(2003)：同位体地質温度計：原理、資源環境地質学-地球史と環境汚染を読む-, 資源地質学会, 285-292.
- Matsuhisa, Y., Morishita, Y. and Sato, T. (1985) : Oxygen and carbon isotope variations in gold-bearing hydrothermal veins in the Kushikino mining area, southern Kyushu, Japan. Econ. Geol., 80, 283-293.
- 森下祐一(1987)：酸素・炭素同位体比と熱水性鉱床。月刊地球, 9, 609-614.
- Morishita, Y. (1991) : Fluid evolution and geobarometry on the Ohtani and Kaneuchi tungsten-quartz vein deposits, Japan: oxygen and carbon isotopic evidence. Mineral. Deposita, 26, 40-50.
- 森下祐一(1992)：二次イオン質量分析法による安定同位体比分析-造岩鉱物中の拡散キネティクス研究-。地質ニュース, No.450, 42-52.
- Morishita, Y. (1993) : Carbon and oxygen isotopic characteristics of epithermal veins in the Hokusatsu gold district, southern Kyushu, Japan. Resource Geol., Spec. Issue, 14, 103-114.
- 森下祐一(1994)：マグマによる熱水性鉱床の生成-鉱脈型、スカン型及び斑岩型鉱床から得た2, 3の知見。地質学論集, 43, 98-108.
- 森下祐一(2003)：同位体地質温度計：応用、資源環境地質学-地球史と環境汚染を読む-, 資源地質学会, 293-298.
- Morishita, Y., Giletti, B.J. and Farver, J.R. (1996) : Volume self-diffusion of oxygen in titanite, Geochemical Journal, 30, 71-79.
- Morishita, Y. and Kodama, K. (1986) : Simulation analysis of the gold-quartz vein systems in the Kushikino mine area, southern Kyushu, Japan. Mining Geol., 36, 475-485.
- 森下祐一・佐々木祐二・木村 幹(1991)：串木野-冠岳化石熱水系における石英・方解石脈の放射化分析。地質調査所月報, 42, 149-166.
- 森下祐一・竹野直人(1993)：大分県野矢地熱地域における金鉱化作用。資源地質, 43, 173-186.
- 森下祐一・寺岡易司(1996)：串木野地域における秩父・四万十両帯の境界と熱水活動。資源地質, 46, 189-195.
- 内藤 耕・小玉喜三郎・丸山裕一・久保田喜裕(1993)：菱刈鉱山の鉱脈群の形成場。資源地質, 43, 435-446.
- Okubo, Y. and Okuma, S. (1986) : Magnetic-gravity models for the Au-Ag mineralized Hokusatsu district of southern Kyushu, Japan, Mining Geol., 36, 445-457.
- Simmons, S. F. and Browne, P. R.L. (2000) : Hydrothermal minerals and precious metals in the Broadlands-Ohaaki geothermal systems: Implications for understanding low sulfidation epithermal environments. Econ. Geol., 95, 971-999.
- 寺岡易司・奥村公男(1992)：四万十帯北帯の構造区分と白亜系砂岩組成。地質学論集, 38, 261-270.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1976)：昭和50年度金鉱山の基礎的地質鉱床調査報告書、北薩地域, 21p.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1979)：昭和53年度広域調査報告書、北薩・串木野地域, 92p.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1980)：昭和54年度広域調査報告書、北薩・串木野地域, 69p.
- 通商産業省資源エネルギー庁(1987)：昭和61年度広域地質構造調査報告書、北薩・串木野地域, 137p.
- 通商産業省資源エネルギー庁(2000)：平成11年度広域地質構造調査報告書、北薩・串木野地域, 104p.
- 浦島幸世・山本温彦・若林健介(1973)：串木野鉱山荒川3号ヒにおける石英、方解石および水長石の量比。鹿児島大理科報告, 22, 59-72.

MORISHITA Yuichi (2004) : A story of the ore genesis study in the Hokusatsu-Kushikino gold district.

<受付：2004年5月31日>