

岩石元素組成比を用いた鉱床探査手法 -山ヶ野金銀鉱床の例-

村上 浩 康¹⁾

1. はじめに

皆さんは“宝探し”に少なからず興味をお持ちではないだろうか。宝探しを題材にした映画や小説では、解読不能な地図や古文書に宝の在処が示されていたりするものである。それらの古文書等には何らかの規則性が隠されており、その規則性を発見しそれらを読み解いていくことで、実際の宝に巡り会うわけである。本稿で紹介する鉱床探査も、金などの鉱床を見つける一種の“宝探し”である。

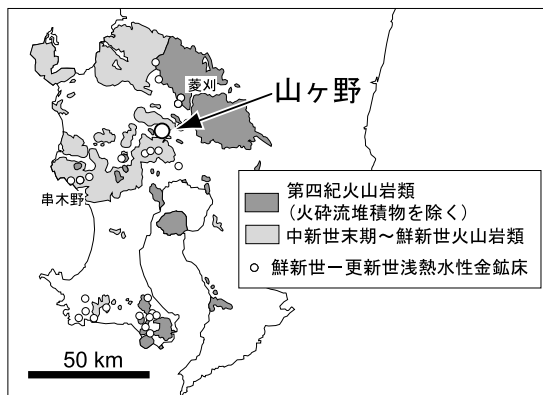
鉱床探査では、正確な鉱床生成モデルに基づいた探査手法を適用しているかが重要な鍵となる。ここでの「鉱床生成モデル」は熱水性鉱物の生成に伴う鉱床を中心とする元素の累帯構造であり、「探査手法の適用」とは累帯構造を検出する手法を用いて地図を読み解きお宝を探すことである。

ここでは、地質調査及び岩石地化学探査の結果明らかになった熱水性鉱物の生成に伴う累帯構造の特徴と、その形成メカニズムについて述べると共に、岩石微量成分組成と熱水性鉱物との間に認められる規則性を用いた簡易で安価な鉱床探査手法について提案する。果たして、新規の金鉱床(お宝)は発見できるのであろうか?

2. 山ヶ野鉱床の概要

2.1 歴史と生産量

山ヶ野金銀鉱床は鹿児島県北部(北薩地域)に位置し(第1図)、日本全体で第7位にあたる28.4トンの産金量を誇る浅熱水性金銀鉱床である(資源・素材学会, 1989)。山ヶ野鉱床は、17世紀初頭から開発され、明治、大正時代に設備を近代化しつつ島



第1図 山ヶ野鉱床位置図。

津家や薩摩興業株式会社などによって経営されたものの、政府の産金整備令が出た1943年に休山し現在に至っている(松尾・浦島, 1995)。

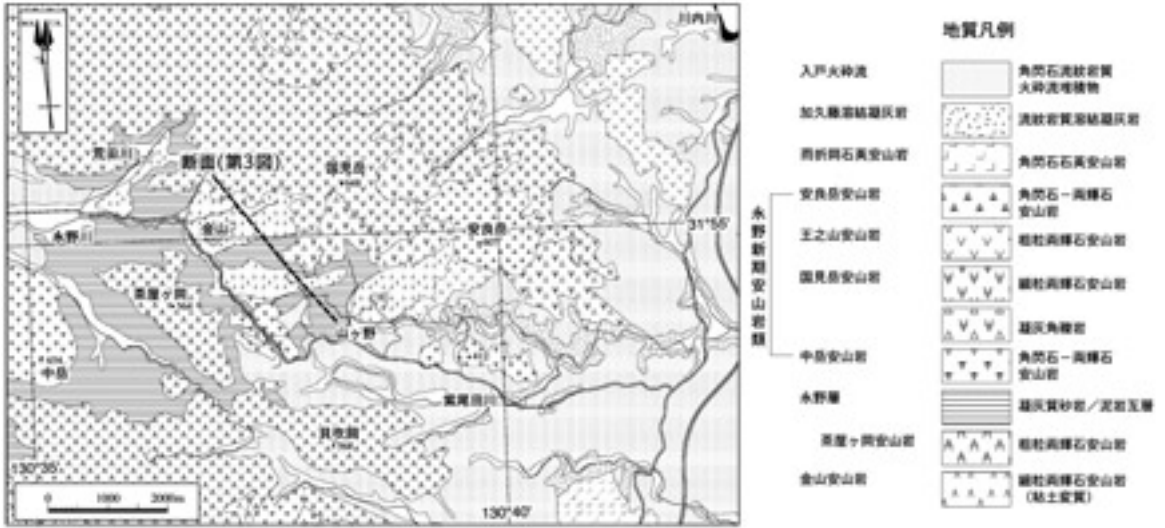
2.2 地質概要

山ヶ野鉱床周辺の地質は、鮮新世の金山安山岩を基盤岩とし、鮮新世～更新世の火山岩類や堆積岩類が広くこれを覆って分布する。第2図に山ヶ野鉱床周辺の地質図を、第3図に断面図を示す。鹿児島県薩摩郡永野周辺地域の地質をまとめた山本・大塚(1995)では下位から金山安山岩類、湖沼性の堆積物である永野層、永野新期安山岩類からなり、各層は不整合関係にある。第四系は加久藤火砕流堆積物や入戸火砕流堆積物からなり、本地域東縁付近の河川沿いの低地に分布する。その中でも、金山安山岩及び永野層が山ヶ野鉱床含金石英脈の母岩となっている。

なお、本地域の地質、重力構造及び空中物理探査等の詳細についてはMurakami and Feebrey

1) 産総研 地図資源環境研究部門

キーワード: 鉱床探査手法, 浅熱水性金銀鉱床, 熱水変質帯, 累帯構造, 元素比マッピング, 地化学探査, 山ヶ野



第2図 山ヶ野鉱床周辺の地質(山本・大塚, 1995; 通商産業省資源エネルギー庁, 2000).

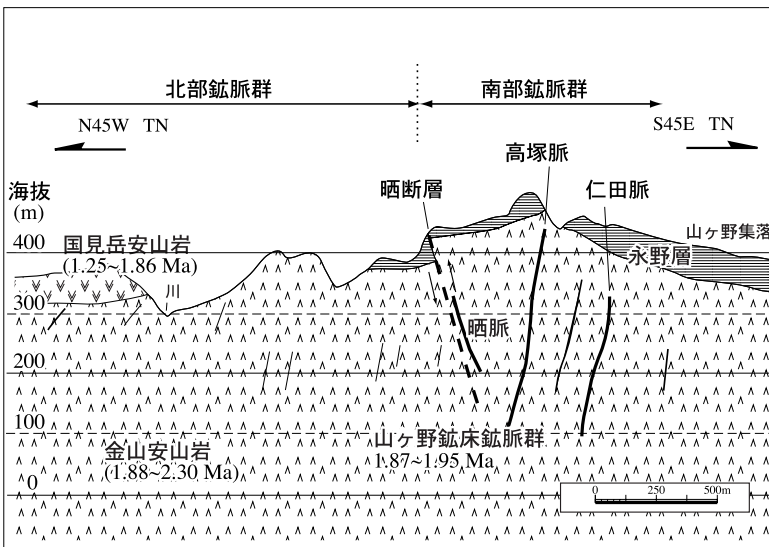
(2001) 及び Feebrey *et al.* (1998) を参照されたい。

2.3 鉱化作用・鉱床

山ヶ野鉱床には40条以上の鉱脈があり、走向は東西、北東-南西及び西北西-南南東のものが多く、脈幅は数cmから最大数m、傾斜延長は概ね150-200m程度である(宮久, 1970)。第3図の山ヶ野鉱床の南北断面図に示したように、山ヶ野鉱床の中央を剪断帯がほぼ東西方向に走り、これに沿って晒脈が形成されている。剪断帯の南側(鉱床南部)では鉱脈が60-80m間隔と北方に比べて密

に分布し、高塚脈や晒脈系鉱脈群が幅・延長共に優れ、主な出鉱源となっていたようである。

鉱脈の鉱石鉱物は主に石英・方解石・沸石から成り、部分的に氷長石、セリサイト、緑泥石などを伴う。金品位27.7g/tを示す石英脈露頭の氷長石のK-Ar年代値として1.87±0.07Maが得られている(通商産業省資源エネルギー庁, 2000)。金は肉眼でも認められるいわゆる“トジ金”をなすものが山ヶ野鉱床の多くの鉱脈に認められ(浦島ほか, 1990)、黄鉄鉱・黄銅鉱・閃亜鉛鉱・濃紅銀鉱・輝銀鉱などが共生する縞状銀黒鉱石も少量認められる。



第3図

山ヶ野鉱床断面図。安山岩及び鉱脈群のカッコ内の数字はK-Ar年代値を示す(通商産業省資源エネルギー庁, 2000)。凡例及び断面線の位置は第2図を参照のこと。

3. 鉱床探査の概念

ここでは、露頭や試錘コア等から採取した岩石を分析することにより、変質鉱物や元素の分布パターンを把握し、これを未探鉱地区に適用して新規鉱床の探査を行うことを「岩石地化学探査」と呼ぶことにする。

鉱床周辺に発達する鉱化帯や変質帯中の熱水性鉱物や重金属元素の分布は、鉱床が潜在することを示すことがあり、有益な探査指標となる。探査目的の金属以外でも、特定の元素(As, Hgなど)の分布パターンや濃度比から、探鉱するべき価値があるのか否かを判定することができる。取り扱う変質帯や鉱化帯の規模や性質に応じ調査面積や岩石採取密度を柔軟に変化させ、有用金属元素の有無の確認から探査対象範囲(有用元素の濃集域)の絞り込みまで幅広く本手法は応用できる。

それでは、実際の変質鉱物や元素の分布パターンを見ていくことにしよう。

4. 試料と分析方法

山ヶ野鉱床を含む東西5km、南北4kmの調査範囲内において採取された210個の岩石及び脈試料(通商産業省資源エネルギー庁, 2000)の分析結果を解析に用いた。試料は採取密度が均質になるよう設定されたルート沿いの露頭において、約50m間隔で採取された。産状、色調等の異なる部分を含む露頭では、20倍ルーペやタングステンカーバイド製ペン型引っ掻き棒を用いた岩石や鉱物の硬度判定、露頭全体または部分的な色調変化、斑晶鉱物の同定と変質鉱物の有無、粘土鉱物の手・舌触り、黄鉄鉱染の有無、などが考慮され試料が採取された。岩石の鉱物組成・化学組成を把握するため、X線粉末回折試験と化学分析が実施され、脈試料は流体包有物の均質化温度測定も行われた(通商産業省資源エネルギー庁, 2000)。化学分析はカナダALS chemex社により行われ、分析法は岩石の王水溶解成分のICP分析(誘導結合プラズマ発光分光分析)、AuについてはFA-AAS(乾式分析:鉛を用いた灰吹き法により得られた合金を王水で溶解した成分の原子吸光分析)である。

なお、Au以外の岩石の王水溶解成分、特に主要

元素は必ずしもその岩石の全岩化学組成を反映していない。岩石を王水や塩酸により溶解する場合、鉱物の選択的溶解が起こることは良く知られており(Murakami and Nakano, 1999)、ある特定の変質鉱物や硫化鉱物の組成変化に注目しようとする場合、岩石の分別溶解手法は有効である。溶解に費やす時間にもよるが、一般に緑泥石などのマフィック鉱物や方解石は溶解し、ケイ酸塩鉱物、リン酸塩鉱物及び沸石などは溶解残渣として認められる場合が多い(Chao, 1984)。一方、今回の分析結果では、ケイ酸塩鉱物である斜長石や混合層粘土鉱物中のNaやKといったイオン半径の大きい元素が選択的に一部溶出しているようである。各種鉱物における酸溶解成分の詳細な研究は今後の課題である。

5. 結果

5.1 変質鉱物の分布

浅熱水性金鉱床では鉱床を中心とした粘土鉱物組み合わせの変化が知られている(Henley, 1984)。山ヶ野鉱床周辺においても以下に示す熱水性鉱物の累帯構造が認められる。第4図に本地域の変質鉱物分帯図を示す。変質鉱物組み合わせは、Izawa *et al.* (1990)及び茨城・鈴木(1990)に基づき、第4図にⅠ、Ⅱ、Ⅲの3帯の変質帯分布を示した。ここで用いた変質帯の分布は、特定の変質鉱物が出現するか否かで便宜的に定義しているものである。従って、各変質帯は特定の変質鉱物のみから成るということではなく、その他の鉱物も当然存在する。

クリストバライト+スメクタイト±ハロイサイト

(Ⅰ帯)

石英+スメクタイト±カオリン(Ⅱ帯)

石英+混合層粘土鉱物(Ⅲ帯)

Ⅲ帯は山ヶ野鉱床脈群周辺(以下、山ヶ野変質帯)に広く分布しており、他にも安良岳南部(以下、安良岳南部変質帯)に分布している。Ⅲ帯中には含金石英脈が卓越し、多くの旧坑が認められる。それらⅢ帯を取り巻くようにスメクタイトで代表されるⅡ帯が分布している。Ⅱ帯の外側にはⅠ帯が分布する。つまり、石英脈が卓越するⅢ帯を中心とし、鉱床スケールで各変質帯が同心円状に分

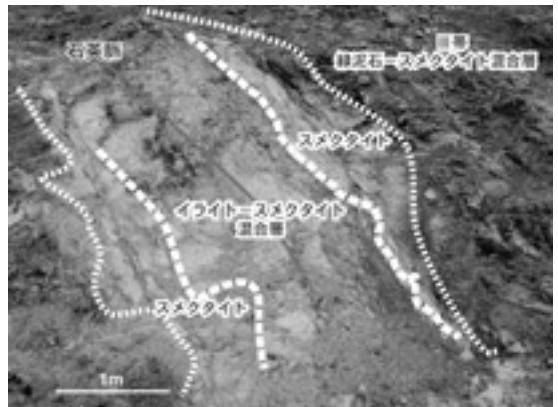


第4図 山ヶ野鉱床周辺地表における熱水変質鉱物の分布。

布していると解釈される。

安良岳南部変質帯西方の採石場跡では、鉱床スケールでの変質累帯構造が露頭スケールでも観察できる。この露頭では、含金石英細脈を中心としてイライト-スメクタイト混合層が卓越し、その外側にスメクタイトが認められ、緑泥石-スメクタイト混合層を主体とするⅢ帯の金山安山岩に移化している(第5図)。Ⅲ帯においてもスメクタイトが認められることは、鉱化作用に関連する局所的な熱水活動に伴う温度構造の変化によって一部の鉱物組み合わせがリセットされたことを示している。石英細脈中の流体包有物均質化温度は140-177°Cを示し、浅熱水環境における一般的なスメクタイトや混合層鉱物の形成温度に相当する。

一方、Ⅲ帯中の石英脈の脈際には特徴的にカオリンが形成されているものが多く、第5図の露頭における石英細脈際にもカオリンを伴うゾーンが幅2-3cmほど形成されている。このカオリナイトは、石英脈と周辺母岩の空隙部を埋めるような産状を示すことから、「蒸気加熱型変質」と呼ばれるメカニズムによって形成された硫酸酸性熱水が古地下水面上部の石英脈沿いに浸透・環流した結果生じたも



第5図 安良岳南部変質帯西方の緑泥石-スメクタイト混合層鉱物の卓越するⅢ帯変質帯中に発達するイライト-スメクタイト混合層鉱物を伴う石英脈を中心とする累帯変質帯。この変質帯縁部には混合層鉱物より低温の熱水によって形成されるスメクタイトが卓越している。

のと推察される。この硫酸酸性水は、1) 熱水の沸騰によって分離した蒸気が岩石中の割れ目などを通路として古地下水面上部より上にまで到達し、2) 酸素を多く含んだ地表水と蒸気が混合し、気体成分のひとつである H_2S が酸化されて形成される。熱

水の沸騰を想定したのは、沸騰現象を示すとされる葉片状石英を含む石英脈が旧坑周辺の廃石として認められることによる (Murakami and Feebrey, 2001). 酸性熱水によって形成される鉱物や溶脱型珪化岩といった蒸気加熱型酸性変質帯が現在の地表には存在しないことは、浅熱水性鉱床の層序学的浅部に認められる熱水変質帯が削剥されていることを示唆している。

イライト-スメクタイト混合層鉱物を含むⅢ帯では、石英脈を伴う珪化帯が密接に伴って出現し、これは100~200℃の中間的な温度及び中性に近いpHの流体の活動を反映している (Corbett and Leach, 1998). この珪化帯は緻密・堅硬であり、浅部の蒸気加熱型変質の硫酸酸性水によって形成される空隙を多く含む溶脱型珪化岩とは産状が明らかに異なる。従って、珪化帯は浅部の蒸気加熱型の変質過程ではなく、鉱化作用に伴う熱水が低温の循環天水と混合することにより冷やされシリカが沈殿するという、低硫化系浅熱水性鉱床の深部のプロセスによって形成されたと考えられる。特に、永野層凝灰質泥岩の高い浸透性は、高い水/岩石比を実現し、粘土化やⅢ帯が分布する山ヶ野鉱脈群上部などの珪化作用に効果的に機能したと考えられる。

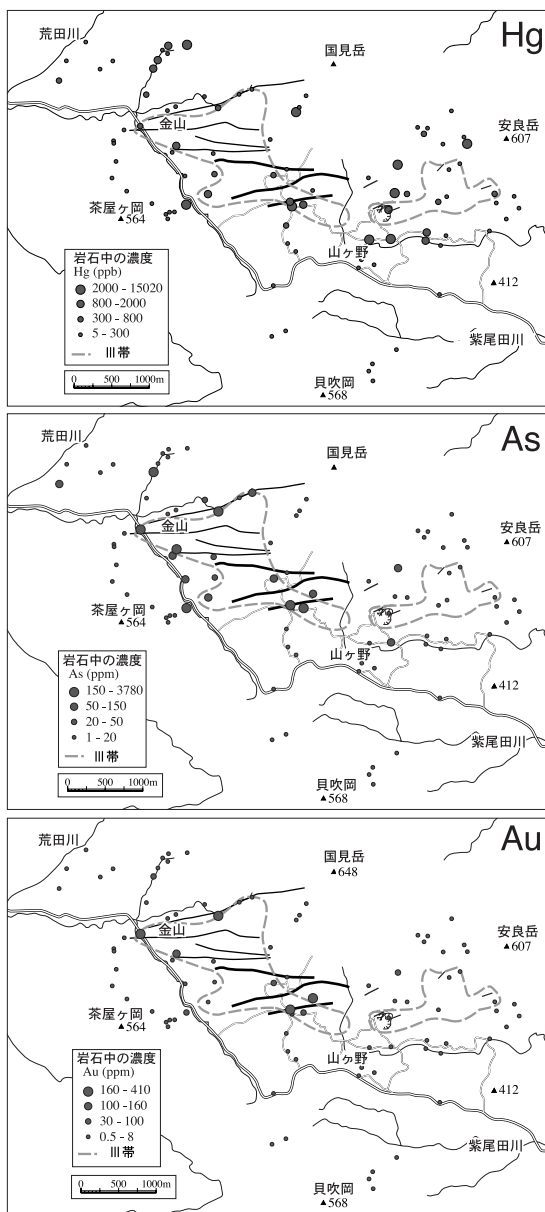
5.2 石英脈形成温度

地表露頭の石英-方解石脈等の流体包有物均質化温度測定結果から、最低温度が200℃を示す等温線は混合層鉱物の卓越するⅢ帯に、150℃の等温線はスメクタイトの卓越する範囲をカバーするようにⅢ帯を取り囲んで分布する (Murakami and Feebrey, 2001). この結果は浅熱水性鉱床形成に関連する粘土化変質帯の一般的な形成温度構造と非常に調和的である (茨城・鈴木, 1990; Corbett and Leach, 1998).

従って、山ヶ野鉱床及び安良岳南部変質帯を形成した熱水活動の中心はⅢ帯の分布域に一致することを示している。

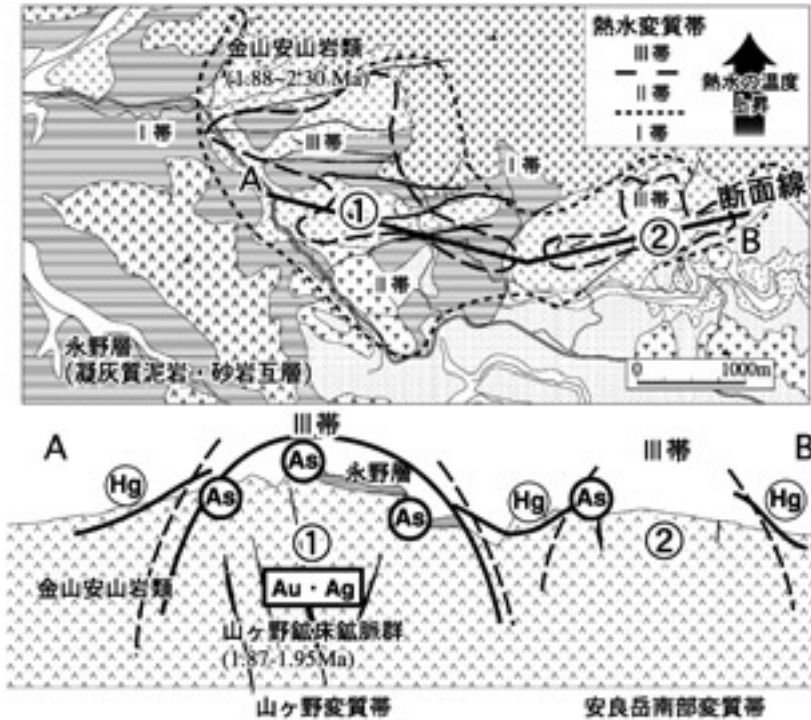
5.3 岩石地化学探査

ここでは岩石中の化学組成を用いて、鉱化に関連する各変質帯の地球化学的な特徴について明らかにする。取り扱う元素は、Au, Ag, As, Hg,



第6図 山ヶ野鉱床周辺における岩石に含まれるの Au, As, Hgの濃度分布。

Sb, K, Na, Ca, Srである。通常、岩石微量化学組成データは、分布する地層固有の化学組成要素 (バックグラウンド値) や鉱化作用に関連する元素変動要素を含んでいる。経験的に、大雑把な試料採取間隔 (1km²で1-2個) では分析値の80-90%, 細かな試料採取間隔 (1km²で50個) では60-70%が、分布する地層固有の化学組成を反映する傾向がある (Fletcher, 1997, 私信)。これら各分析元素



第7図 山ヶ野変質帯及び安良岳南部変質帯における金属元素分布と変質帯の関係。

の地層固有の化学組成値と熱水変質作用に起因する異常値の単元母集団間の境界値(しきい値)は、各元素の分析値の累積頻度分布図を描き、直線、すなわち正規分布からの偏倚に着目し、主要線分間の変曲点を読みとることによって決定した(Lepeltier, 1969; 大津ほか, 1984)。単元母集団が3-4個に分割される場合、分析値の高い方から2つの母集団を異常値として抽出する方法が効果的である。

第6図にAu, As及びHgの濃度変化分布図を示す。Ⅲ帯の分布域で山ヶ野鉱床の含金石英脈分布域北部でもある金山集落周辺を中心としてAu高濃度異常域、外側に向かってAs→Hg高濃度異常域の順に分布する傾向が読みとれる。一方、同じくⅢ帯が分布する安良岳南部変質帯では、高濃度のHgはドーナツ状にⅢ帯を囲んで分布するが、Au及びAsの異常域が殆ど見受けられない。

低硫化系浅熱水性金鉱床における垂直方向の元素変動の特徴は以下のものである(Berger and Eimon, 1983)

- 1) Hg等の揮発性元素は熱水変質帯中で最も形

成温度の低い変質帯、特に古地表面で最も濃度が高い。

- 2) 古地表面より下位の石英が晶出するような粘土化・珪化変質帯では、AsやSb等の元素が深度の増加に伴い濃度が上昇。
- 3) 石英とイライトまたは水長石が卓越するような比較的高温で形成される変質帯では、AuやAgなどの金属元素が濃集する傾向がある。

一方、低硫化系浅熱水性金鉱床の中でも高品位鉱床である菱刈鉱床の場合、地表では鉱脈直上にHgの高アノマリを形成するものの、金鉱脈の発達する下位レベルでは散発的にしか認められない(通商産業省資源エネルギー庁, 1992)。つまり、Au及びAsの高アノマリーとHgの低アノマリーの組み合わせで特徴付けられるⅢ帯は、実際の含金石英脈の分布域と一致していることから、これらの元素出現パターンは金鉱化作用の卓越するレベルを表していると考えられる。しかしながら、同じくⅢ帯の分布する安良岳南部変質帯ではHgアノマリーの消える中心に認められる石英脈が顕著な金の高アノマリーを示さない(第7図)。このことは、地表レベ

ルでの安良岳南部変質帯の金鉱化ポテンシャルが低いことを示していると推察され、残念ながら今回の調査では新規鉱床を発見するには至らなかった。

以上の結果に基づき、次章以降に岩石化学組成比を用いた探査指標の開発を試みたので、その内容を紹介することとした。

6. 変質鉱物と元素変動の関係

山ヶ野鉱床地域では金鉱化作用を伴う変質帯とそうでない変質帯とが分布することが明らかとなった。

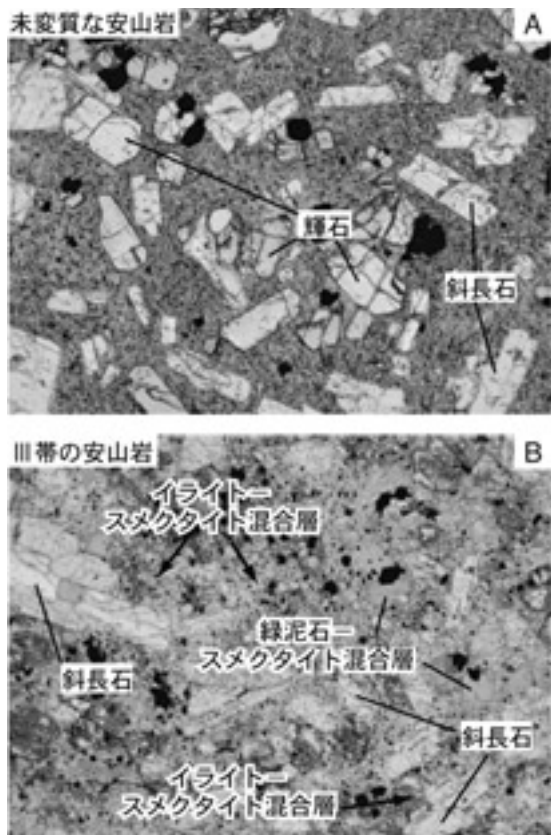
ここでは、この変質帯の違いを熱水変質鉱物と岩石化学組成変化との関係を相関係数による解析で検証する。なお、相関係数の計算にはX線回折試験の結果算出された各鉱物の石英指数(林・山崎, 1979)を用いた。石英指数とは、以下の式により試料の鉱物組成比を半定量的に求めるものである。(試料中の各鉱物の最強ピーク強度(cps)) / (標準石英の最強ピーク強度(cps)) × 100

上式の実最強ピークはASTMカードに記載されている各鉱物のX線回折強度の一番強い回折線、標準石英は石英のみからなる試料であり、標準石英の実最強ピーク強度は未知試料のX線回折直前に測定したd値=3.34における回折線強度である。実際には試料のX線質量吸収係数や各鉱物の底面反射強度の違いがあるため、計算された石英指数は誤差を含んでいる。

AuはAg, As, K, Sb(相関係数の高い順)、鉱物では石英、イライト-スメクタイト混合層鉱物などのⅢ帯を代表する鉱物組み合わせとの間で正の相関を示す。一方、AsやSbは相関係数ではイライト-スメクタイト混合層鉱物との非常に弱い相関を示す。

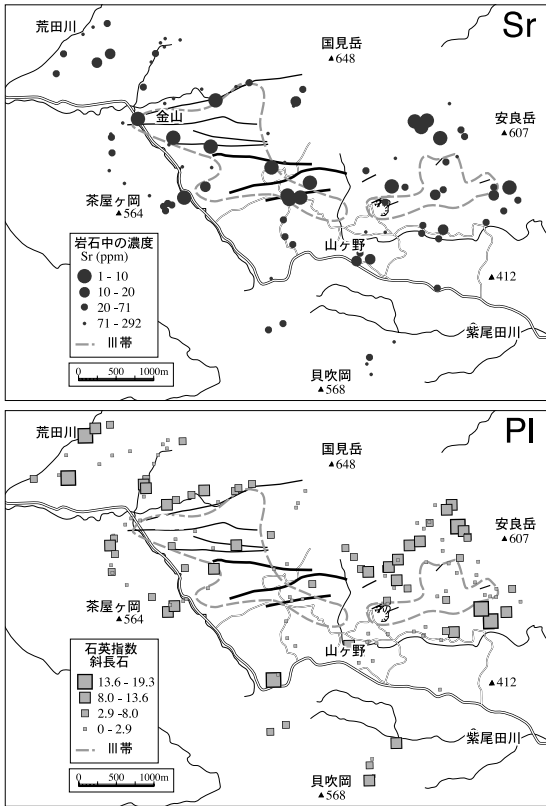
Ⅱ帯の変質鉱物組み合わせは、Sr及びHgと正の相関を示している。Ⅱ帯及びⅢ帯にオーバープリントする酸性変質鉱物のカオリナイトは、石英、イライト-スメクタイト混合層鉱物、Hgと正の相関を示す。Kはカリ長石ではなく、石英やイライト-スメクタイト混合層鉱物などと正の相関を示す

山ヶ野鉱床周辺に分布する火山岩類には主要構成鉱物として斜長石、単斜輝石及び斜方輝石が斑晶及び石基に含まれている(第8図A)。実際、変質を被っていない新鮮な岩石の場合、斜長石とNa, Ca, Srの元素群との間に正の相関が存在す



第8図 岩石薄片顕微鏡写真(開放ニコル)。未変質安山岩(A)とⅢ帯の安山岩(B)。斑晶の輝石及び斜長石は緑泥石-スメクタイト混合層に、石基の大部分は微晶のイライト-スメクタイト混合層に変質している。

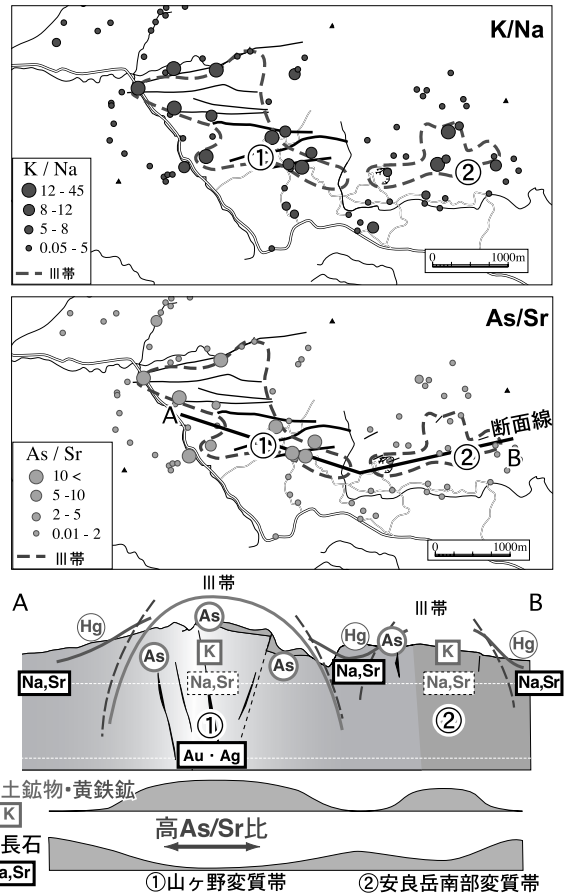
る。岩石薄片の顕微鏡観察の結果、斑晶や石基として含まれる斜長石や単斜輝石及び斜方輝石は混合層鉱物に置き換えられており、特に石基部にイライト-スメクタイト混合層が卓越する傾向がある(第8図B)。相関係数では、イライト-スメクタイト混合層鉱物、スメクタイトなどの粘土鉱物とNa, Ca, Sr各元素の相関係数は負の相関を示す。従って、熱水変質が進むにつれ、斜長石が変質しKを含有するイライト-スメクタイト混合層鉱物などが卓越するという岩石構成鉱物の変化は、Na, Ca, Sr濃度が減少し、K濃度が増加するという岩石化学組成変化に反映することを示している。特に、Sr濃度の低い岩石の分布域を示すことにより、斜長石の消失するようなⅢ帯に相当する粘土化変質帯分布域を表現できる可能性のあることを指摘しておきたい



第9図 山ヶ野鉱床周辺岩石のSr濃度分布及び斜長石量分布. 熱水変質を被っている岩石ほどSr濃度が低いと考えられることから、濃度の低いものはより大きなシンボルとして示している. 逆に、斜長石分布では石英指数の高い斜長石量の多いものをより大きなシンボルとして示している点に注意. Sr濃度の低い岩石は斜長石量の少ない岩石にほぼ対応している.

(第9図). なお、斜長石量の少ない区域とSr濃度の低い区域の分布は概ね一致するものの、安良岳南部変質帯のⅢ帯周辺のⅠ及びⅡ帯においてもSr濃度が低い区域が分布する. これらの低いSr濃度域は熱水変質による斜長石の消失に加えて、原岩の斜長石量が元々少なかったか、或いは王水による斜長石の分解が進まず真のSr濃度を反映していない可能性がある. 王水溶解による化学組成分析ではこのような構成鉱物の不均質性に強く影響を受けることから、各種鉱物の酸による可溶性及び溶解成分の詳細な研究が必要不可欠である.

As異常域はAuやAgに比べて比較的浅部(低温)の環境で出現し、特に古地表面からの深度の



第10図 山ヶ野鉱床周辺における岩石のK/Na比及びAs/Sr比分布、並びに岩石微量元素と鉱物組み合わせの空間分布. As/Sr比の高い岩石は金鉱化作用を伴う山ヶ野鉱床地表の変質帯Ⅲ帯中に分布.

増加、すなわち金鉱化帯に近づくに伴いAs濃度が上昇する傾向があることが知られている(Berger and Eimon, 1983). 一方、熱水活動が最も卓越する、つまり熱水/岩石比が高い部分では斜長石は消失し、NaやSr濃度の低下が最も大きい. 従って、熱水変質作用の進行とともに濃度が増加する元素群と減少する元素群とを組み合わせた元素比を用いることにより、熱水変質作用に加えて金鉱化作用の良い指標になると期待される.

なお、母岩から溶脱された元素(Na, Ca)は、これらの元素を鉱物化学組成に持つ沸石や方解石といった含金鉱脈の脈石鉱物、すなわち鉱化作用を伴う熱水活動の中心に再濃集していると考えられる.

第1表 元素比マッピングにより期待される費用対効果.

	従来の一般的な探査	元素比マッピング	元素比マッピングによって期待される効果
◆調査項目	多い 地質調査 (変質帯調査) 川砂地化学探査 岩石地化学探査 土地化学探査	少ない 地質調査 (変質帯調査) 岩石地化学探査	→探査の効率化
◆調査期間	長い	短い	
◆調査のコスト	高い	低い 従来型の50%以上 圧縮可能	→探査の低コスト化
◆長所・短所	長所：各調査でのサンプル不均質性を問題としない ：各種調査の比較検討が可能 短所：探査が多段階になるため時間を費やし、解釈も熟練が必要 ：探査コスト高い	長所：探査コスト低い ：鉱化作用を高精度・短時間で抽出可能で、解析も容易 短所：原岩の不均質性による影響有り ：鉱床の剝離レベルによって適用できない可能性あり	

7. 元素比マッピング

山ヶ野鉱床周辺では、熱水変質作用の進行とともにAu, Ag, As, Sb, Kが増加し、Na, Ca, Srが減少している。これらの元素組成を指標にして熱水変質帯を抽出する場合、単一の元素にのみ注目すると原岩の組成不均質性に強く影響されるといふ弱点があるため、その適用に変質帯原岩の性質をしっかりと把握しておくことが必要である。

この点で、変質による斜長石のみに起因する変化や、微量元素の変化に着目した場合、元素組成比は単一元素の変化に比べて原岩の化学的不均質性による影響を受けにくい。元素比は適用する地域によって絶対値の変動はあるものの、元素濃度単独での指標に比べてより一般性のある指標として熱水変質に伴う元素変化をより鋭敏に捉えることができると考えられる。

この解釈に基づき、濃度スケール(%オーダーまたはppmオーダー)が同じ元素組み合わせを用いた元素比K/Na比及びAs/Sr比の元素比変動を示した分布図(元素比マッピング)の結果を第10図に示す。K/Na比が高い岩石の分布範囲によってⅢ帯を明瞭に識別出来ているのがわかる。特に、As/Sr比では、第4図の変質鉱物分布では識別できなかった金鉱化作用を伴うⅢ帯のみを明瞭に識別できている(第10図)。従って、本地域のようなⅢ帯の露出する地域では鉱化作用や変質鉱物分布の情報を併せ持った探査指標としてK/Na比やAs/Sr比を利用できると考えられる。ただし、この

指標を適用する際には、1) 変質帯の原岩の組成不均質性の定量的評価、2) 粘土鉱物種の変化を用いた温度構造解析による鉱床の剝離レベル(現在の地表面が変質帯や鉱床のどこに位置づけられるか)の検討が必要不可欠である。

実際の探査現場では、経済的にも時間的にも常により効率的な探査が求められている。今回紹介した岩石の化学分析のみによる探査手法は従来の土壌、岩石、川砂調査などを併用していた探査(Meldrum *et al.*, 1994)と同等程度の探査区域の絞り込みが可能である。特に、近年のICP分析などを用いた多元素同時分析技術の発展により、岩石粉碎等も含めた岩石化学組成分析価格は安価となっている。従って、これらの元素比変動と粘土鉱物種の変化を用いた必要最小限の温度構造解析を組み合わせることによって、より精密で、安価で効率の良い探査が可能となると考えられる(第1表)。

8. まとめ

北薩地域、山ヶ野鉱床周辺には山ヶ野変質帯及び安良岳南部変質帯の2カ所の変質帯が確認でき、両変質帯は金を含む200℃付近の中性熱水の活動域の最上部まで剝離されている。山ヶ野変質帯では優勢な金鉱化帯の最上部が露出しているが、安良岳南部変質帯では山ヶ野変質帯と同程度の優勢な金鉱化帯の存在は確認出来ないことが明らかとなった。

2つの変質帯の性質の違いを利用して、岩石の

王水溶解による化学分析結果と熱水変質に起因する鉱物組成変化を用いた探査指標の開発を試みた。山ヶ野鉱床周辺では熱水変質作用の進行とともにAu, Ag, As, Sb, Kが増加し、斜長石の変質に伴いNa, Ca, Srが減少していることが特徴的に認められる。この傾向を応用した元素比K/Na比、As/Sr比マッピングは、鉱化作用や変質鉱物分布情報を併せ持った探査指標として利用できることを示した。

一方、これらの元素比が有効に機能するためには、1) 鉱床・変質帯削剥レベルの把握が必要不可欠で、2) 鉱床や変質帯の母岩の化学組成における不均質性を出来る限り取り除く必要がある。また、I帯やII帯の変質帯が地表に分布するような、削剥があまり進んでいない地域における探査については、低温変質帯中でも濃度の高いSbなども併用したSb/Srといった元素比の適用を考える必要があるだろう。

山ヶ野鉱床周辺の変質帯中に認められた熱水性粘土鉱物等は多くの熱水鉱床や周辺の熱水変質岩で普遍的に認められる。今回紹介した王水溶解による化学組成分析では、熱水性鉱物や硫化鉱物が選択的に溶解するため、変質に起因する岩石組成変化を鋭敏に抽出できる利点を持っている。熱水鉱床の地化学異常を抽出する方法として簡便、迅速、安価である点からも斑岩銅鉱床などの熱水性鉱床探査へと応用が期待できると考えられる。

謝辞：本稿の寄稿にあたり、有益な助言を頂いた井澤英二博士、森下祐一博士、渡辺 寧博士、須藤定久博士、中山 健氏には厚く御礼申し上げます。石油天然ガス・金属鉱物資源機構には貴重な内部資料・データの提供を快く承諾して頂きました。鹿児島県関係市町村及び関係営林署、住友金属鉱山株式会社菱刈鉱山探査課及び三井金属鉱業株式会社の皆様には調査の遂行に際し終始様々なご協力を頂き、ここに深甚な感謝の意を表します。

文 献

Berger, B. R. and Eimon, P. I. (1983) : Conceptual models of epithermal precious metal deposits. In: Cameron Volume on Unconventional Mineral Deposits, ed. Shanks, W. C. Soc. Mining Engineers of AIME, 191-205.

Chao, T. T. (1984) : Use of partial dissolution techniques in geochemical exploration., *Journal of Geochemical Exploration* 20,

101-135.

- Corbett, G. and Leach, T. M. (1998) : Southwest pacific rim gold-copper systems: Structure, alteration, and mineralization. *Society of Economic Geologist Special Publication* 6, 237p.
- Feebrey, C. A., Hishida, H., Yoshioka, K. and Nakayama, K. (1998) : Geophysical expression of low sulphidation epithermal Au-Ag deposits and exploration implications-examples from the Hokusatsu region. *Resource Geology*, 48, 75-86.
- 林 正雄・山崎達雄 (1979) : 全岩X線粉末データの1表示法 (演旨). *日本地質学会西日本支部会報*, 69, 16.
- Henley, R. W. (1984) : Hydrolysis reaction in hydrothermal fluids. In *Fluid-mineral Equilibria in Hydrothermal Systems* (Robertson, J. M., Ed), *Review in Economic Geology*, v.1, 65-82.
- 茨城謙三・鈴木良一 (1990) : 菱刈鉱山鉱床母岩の熱水変質について. *鉱山地質*, 40, 97-106.
- Izawa, E., Urashima, Y., Ibaragi, K., Suzuki, R., Yokoyama, T., Kawasaki, Koga, A. and Taguchi, S. (1990) : The Hisikari Gold Deposit : High Grade - Epithermal Veins in Quaternary Volcanics of Southern Kyushu, Japan., *Journal of Geochemical Exploration*, 36, 1-56.
- Lepeltier, C. (1969) : A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. *Economic Geology*, 64, 538-550.
- 松尾千歳・浦島幸世 (1995) : 山ヶ野金山. *地質ニュース*, no.489, 62-65.
- Meldrum, S. J., Aquino, R. S., Gonzales, R. I., Burke, R. J., Suyadia, A., Iriantia B. and Clarke, D. S. (1994) : The Batu Hijau porphyry copper-gold deposit, Sumbawa Island, Indonesia *Geochem. Explor.*, 50, 203-220.
- 宮久三千年 (1970) : 鹿児島県山ヶ野・王ノ山地区の金銀鉱床 調査報告書, 鹿児島県地下資源開発促進協会. 40p.
- Murakami, H. and Nakano, T. (1999) : Hydrothermal alteration of limestone and mineral exploration of Zn-Pb skarn deposits in the Sako-nishi area of the Kamioka mine, central Japan., *Resource Geol.*, 49, 259-280.
- Murakami, H. and Feebrey, C. A. (2001) : Geology and Geophysical expression of the Ymagano low-sulfidation epithermal Au-Ag deposit, southwest Kyushu, Japan. *Society of Economic geologist gidebook series*, 34, 31-47.
- 大津秀夫・窪田 亮・松田陽一 (1984) : 地化学データの頻度分布分割法. *鉱山地質*, 34, 51-56.
- 資源・素材学会 (1989) : 日本金山誌, 第1編 九州. 144p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1992) : 平成3年度広域地質構造調査報告書 構造解析総合調査, 261p.
- 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・上野隆正・宮内信重・山下正道 (1990) : 山ヶ野, 赤石, 春日, および, 鹿籠鉱床のトジ金 (粗粒金) を含む鉱石. 浦島幸世教授退官記念論集, *地球のめぐみ*, 1-15.
- 山本憲史・大塚裕之 (1995) : 鹿児島県薩摩郡永野・東郷地域の鮮新-更新統の層序ならびに永野層の花粉化石群集について. *鹿児島大学理学部紀要 (地学・生物学)*, 28, 153-179.

MURAKAMI Hiroyasu (2004) : Elemental ratio as an indicator for geochemical exploration: Application for the Yamagano Low sulfidation epithermal Au-Ag deposit.

< 受付 : 2004年8月4日 >