

浅熱水性金鉱化作用ワークショップ

松久 幸敬・青木 正博 (鉱物資源部)

Yukihiko MATSUHISA・Masahiro AOKI

1. はじめに

金の価格は、ひと頃ほどではないにしても高値で安定しており、世界的な金探鉱ブームは衰えることを知らない。とくに西太平洋地域では、近年、日本をはじめパプア・ニューギニア、インドネシア、ソロモン群島等からいわゆる“浅熱水性金鉱床”と呼ばれる若い鉱床が続きと発見され、金探鉱ブームに拍車をかけている。このような社会的状況を背景にして、国連 ESCAP 天然資源部では、日本の地質調査所と共同で、ESCAP 地域の諸国を対象とした標記のワークショップを、1989年5月9日から18日の間、つくばと九州で開催した。ワークショップは前半(5月9日~12日)のつくばでのセミナーと、後半(5月13日~18日)の九州での地質巡検からなっている。小文では、その様子をかいつまんで紹介したい。ワークショップ参加者は、ESCAP 地域13ヶ国(ビルマ、中国、フィジー、インド、インドネシア、韓国、マレーシア、パプア・ニューギニア、フィリピン、タイ、ヴェトナム、ソロモン群島、ラオス)から18名、講師陣として5ヶ国(オーストラリア、インドネシア、日本、ニュージーランド、米国)と UNESCO から9名、オブザーバーとして CCOP/SOPAC から R. Howorth 氏、オーガナイザーとして ESCAP から P. J. Bakker, 高橋 清の両氏の合計30名に加えて、日本国内からの一般参加者が総勢50名にのぼってこのテーマへの関心の高さをうかがわせた。

つくばでのセミナーは、工業技術院の共用講堂を会場に開催され(写真1)、初日は参加者登録のち、ESCAP の高橋 清氏による開会の辞(写真2)同じく Bakker 氏の挨拶、地質調査所の井上英二所長(当時)の歓迎の辞(写真3)と続き、佐藤壮郎氏以下3名の講師による基調講演が行なわれた。以下各講演の概要を順を追って紹介する。

2. 第1日目

(1) T. Sato (Geological Survey of Japan) : What is "Epithermal" ?

すでに述べたように、今回のワークショップのテーマは Epithermal Gold Mineralization (浅熱水性金鉱化作



写真1 工業技術院共用講堂で開催されたワークショップ

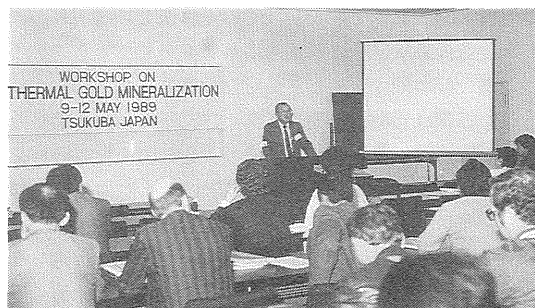


写真2 ESCAP の高橋清氏による開会の挨拶。

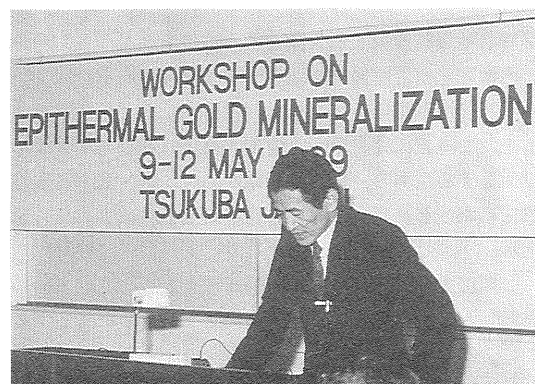


写真3 歓迎の挨拶をする地質調査所井上英二所長(当時)。

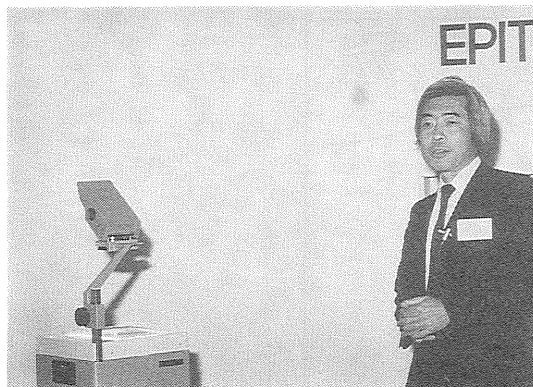


写真4 基調講演で“what is epithermal?”の問いに答える地質調査所の佐藤壮郎氏。

用)であるが、佐藤氏は、この Epithermal という語に焦点をあてつつ、この型の鉱化作用の基本的特徴は何か、鉱床探査の要点はどこにあるのかについて、九州北薩地域における探査の経験をまじえてすぐれた講演を行なった。彼の“Epithermal は epidemic である”という表現は、ワークショップを通じての“流行語”になったほどである(写真4)。

よく知られているように、“Epithermal”という語は、Lindgren が鉱床を生成深度で分けたときに mesothermal や hypothermal という語とともに用いた概念で、彼の定義によれば、epithermal deposits とは“上昇する熱水によって地表近くに、また火成岩と成因的關係をもって、形成された金属鉱床”である。その後、塊状硫化鉱床やポーフィリー・銅型鉱床といった成因的概念のはっきりしたモデルが確立するに及んで mesothermal や hypothermal といった語が死語となりつつある一方で、epithermal deposits の方はそのまま生きのびてきた。Epithermal deposits についての Lindgren の概念は、基本的には現在でも正しいと思われる。浅熱水性金鉱化作用についての現在の我々の知識を要約すれば次のようであろう。

- (1) 鉱化作用をもたらす熱水系は、地下浅所に貫入したマグマの熱源によって形成され、経済的価値のある金鉱化作用は、系全体からみればそのほんの小さな部分、多くの場合、熱水が物理的・化学的变化を強く受ける地表付近で起るものである。
- (2) 鉱化流体は天水起源の水を主体として、それにさまざまな程度マグマ起源の物質(水、イオウ、金属元素、塩化物等)が加わったものである。
- (3) 金はおそらく硫化物錯体として流体中を運ばれ、地表付近での沸騰や pH の変化、酸化作用によって硫化物イオンが急激に解離することによって効果的に沈殿する。

に沈殿する。

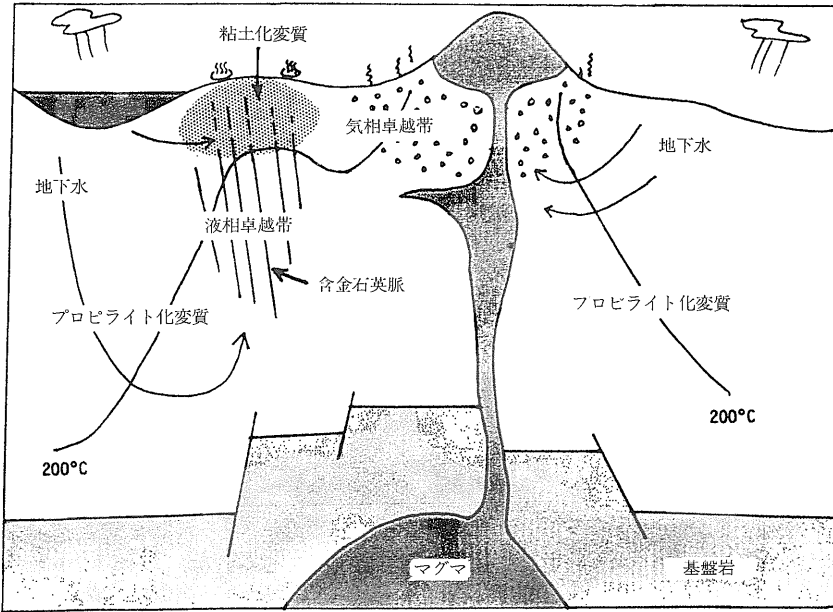
しかしながら、これらの特徴は、浅熱水性金鉱床の共通点を概念的にまとめた場合に言えることであって、この型の鉱床の実際の現れ方、産状は実にさまざまで、とてもひとつのモデルで表現しきれものではない。このような多様性は、地表付近の環境の多様性—局所的な母岩の違いや地質構造、地形、温度分布、地下水系、熱水系の発達の時期的違いということに左右されているので、まさにこの型の鉱床が地表付近で形成されるということに由来する特徴なのである。今日、浅熱水性鉱床は、母岩の違い(火山岩か堆積岩か)、変質鉱物ひいては熱水の化学的性質の違い(水長石-セリサイト型か酸性硫酸塩型か)、あるいは鉱石の産状の違い(温泉型、鉱脈型、溶脱珪化岩型、あるいは鉱染型)によってさまざまな分類が試みられている。そのあるものは直接探査に結びつく産状を基準にしており、あるものは成因の見地から論じられている。しかしながら、現実の鉱床を見るとき必ずしもこのような分類は完全ではなく、多くの中間型や例外が存在する。探査においては、このことを念頭に置かなければならない。

浅熱水性金鉱床の探査で最も重要なことは、金の鉱化作用が大きな熱水系の中でほんの局所的な出来ごとであることを認識することと、対象となる地質環境でのそのような系の論理的帰結を予言することである。そのためには、対象地域内の既知の鉱床を、熱水系の中のどのような場所に鉱化作用が現われるかという観点から注意深く研究することが役に立つ。金属鉱業事業団による九州北薩地域の広域調査では、串木野鉱床地域の詳細な研究が1981年の菱刈鉱床の発見に結びついた。菱刈鉱床は、浅所の低比抵抗異常より下位、深所の高重力・高比抵抗異常より上位の、地表下 200m の位置で発見された。第1図は、このときの探査方針のもとになったモデルである。このモデルは、現在の我々の知識からすれば単純すぎるかも知れない。しかし、簡単に適用できる探査手法に見合うだけ単純だったからこそ、モデルはうまく機能したのである。

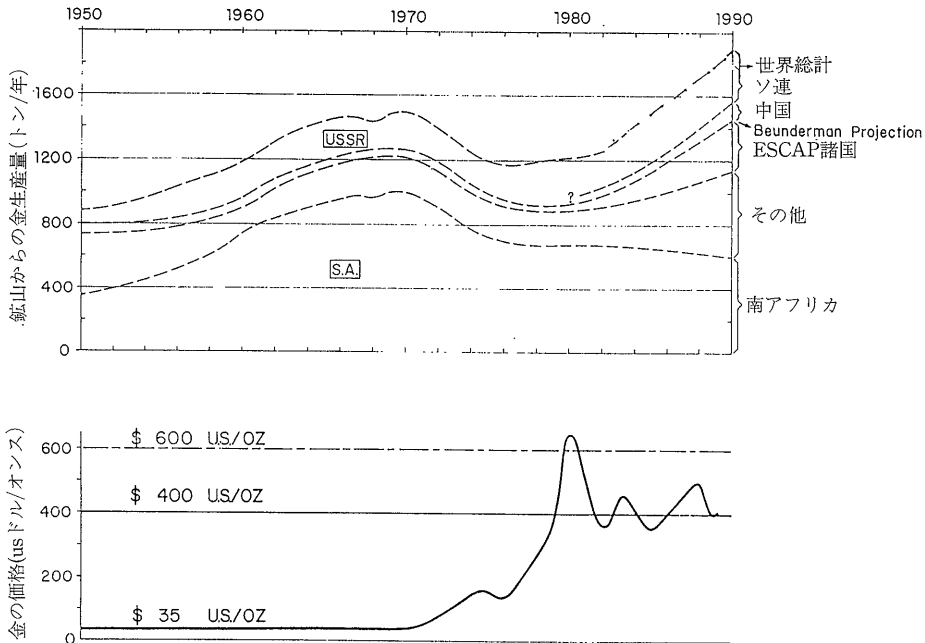
(2) P. J. Bakker (ESCAP): The present gold rush — Role of Asia-Pacific countries

Bakker 氏は、1971年に金の固定相場制が放棄されて以降の世界の経済情勢を背景とした金の生産活動の推移を概観し、その中でアジア・太平洋地域の果す役割の増大を強調した(写真5)。

第2図は、1950年以降の世界の金生産量と金価格の推移である。1987年現在、世界の金生産量は約1,700トンであるが、このうち1,390トンが鉱山の生産によるもので、325トンはスクラップから回収されている。一方、



第1図 北薩地域の金鉱脈の形成モデル。



第2図 1950年以降の世界の金生産量と金価格の推移。

金の需要は、65%が装飾貴金属によるもので、12%が電子部品等の工業用でこれに次いでいる。金の需要の特殊な面として、いまでもなく国際通貨としての各国の中央銀行や個人投資家による売買がある。金融市場での金の需要は、米国ドルをはじめとした各国通貨の強さやさ

まざまの経済・政治情勢に依存している。

第2図の世界の金生産量の推移を見ると、過去40年間に2つの主要な増大期があることがわかる。ひとつは1960年代のもので、他のひとつは1980年以降現在に至る増大である。1960年代の増大は、ひとえに南アのウィッ



写真 5 世界の金鉱業におけるアジア・太平洋地域の役割の重要性を強調する ESCAP の P.J. Bakker 氏。



写真 6 熱水系モデルからみた金鉱床探査の要点を説く R. W. Henley 氏。

トウォータースランドにおける新富鉱帯の発見によるもので、南アの金生産量は、1950年の400トン/年足らずから、1970年には1,000トン/年に急上昇した。この当時南アの金生産量は世界のおよそ65%を占めた。この時期はまた、金1オンス=35米国の固定相場制のもとで、世界の多くの坑内掘り鉱山が採算割れから次々に閉山する時期でもあった。その後1970年代に入って、ウィットウォータースランドの富鉱部が終掘に向うとともに南アの金生産量は低下し、1980年には600トンそこそまで落ちた。

1980年以降の世界の金生産量の増大は、いうまでもなく1971年の金の変動相場制への移行に伴う金価格の高騰を背景とするものである。金の価格が上昇し始めた1970～1980年代は、同時にベースメタル市場が崩壊した時期であり、鉱山業界はこぞって金の探査・生産へと方向転換していった。方向転換が始まったのは1970年代であるが、生産量に実際にその効果が現われたのは1980年代であり、1987年には世界の総生産量は1,760トンに達した。もし金価格が1オンス=300米ドルを下まわらなければ、生産量の増大傾向は今後も続くだろう。

この時期浅熱水性金鉱床に関する地質学的・地球化学的研究が進み、それにもとづいてこの型の新しい鉱床が次々に発見されたことが、南アの金生産量の低下にかかわらず世界の金生産量が増大したことに大きく貢献した。地球化学的試料の分析技術や物理探査技術の進歩も、鉱床探査の成功につながった。また、heap leaching や carbon-in-pulp といった金の抽出技術の新しい発展も、低品位鉱を採算ベースにのせるのに役立った。

環太平洋の若い火山地域は浅熱水性金鉱床の胚胎環境として最も有望な地域のひとつであり、近年続々と大規模な鉱床が発見されている。アジア・太平洋地域では現在主要な産金国はオーストラリア、中国、日本、パプア

・ニューギニアおよびフィリピンで、1980年の生産量は約100トンであるが、1990年には、その周辺の地域も含めて、年産400トン、世界の生産量の20%を占めるに至るだろう。

(3) R. W. Henley (Epithermex, Australia) : Epithermal gold mineralization and epithermal exploration in the Circum-Pacific Rim

Henley氏は、浅熱水性金鉱化作用に対する近年の急速な理解の深まりが、エネルギー資源の開発のために行なった活動的地熱系に関する地球科学的研究の蓄積に負うところが大きいことを強調し、そこから得られた探査指針のうちで一般的に重要なことからを要約した(写真6)。

金の鉱化作用が地表近くに達したマグマの活動と密接な関係があるという観点から、近年の探査活動は環太平洋の若い火山地域に的を絞って行なわれている。その結果、パプア・ニューギニアのリヒア島(167Mt, 3.4g/t)、日本の菱刈(1.4Mt, 70g/t)のような大鉱床や、インドネシアのケリアン(>40Mt, 2g/t)、パプア・ニューギニアのボルゲラ(80Mt, 3.7g/t+5.2Mt, 25.5g/t)のような有望地域の発見につながっている。また、ニュージーランドのワイヒ(14Mt, 3.5g/t)やゴールドン・クロス(5Mt, 4.4g/t)のように、既知の鉱床の再開発も進んでいる。現在、浅熱水性型とポーフリー型を含めた南西太平洋地域の金の推定埋蔵量は2,100トンで、この数字は、同じ地域の過去の生産量600トンと比べていかに大きなものであるかわかる。

浅熱水性金鉱床は、火山地帯の大きな熱水対流系の上部数100mの部分に形成される。大部分の鉱脈型および鉱染型鉱床は、セリサイト/粘土鉱物-カリ長石組合せの変質岩中に胚胎する。金の沈殿はしばしば沸騰によって

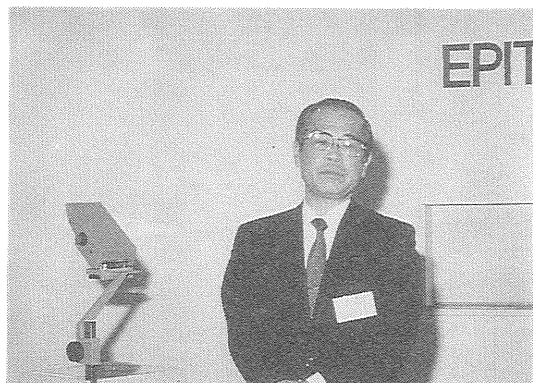


写真 7 日本の浅熱水性金銀鉱床を総括する地質調査所の神谷雅晴氏。

ひきおこされ、多量のシリカと氷長石を伴う。このような例として、ネバダ州のラウンド・マウンティンやカリフォルニア州のマクラフリン、日本の菱刈がある。もうひとつの一般的な現われ方は、金と銅(しばしば硫砒銅鉱)の組合せで、高温の粘土化変質帯を伴う。この場合、粘土化変質は火山性ガスによって形成され、その後に引き続き熱水対流系の活動でもたらされる金属の“chemical trap”として作用する。このような鉱床(明ばん石-カオリナイト型または硫酸酸性型鉱床)の例として、ネバダ州のゴールドフィールドや日本の岩戸、チリのエル・インディオがある。

母岩の広域的な地球化学や変質帯のマッピングは、探査にとってきわめて重要である。金そのものの地化学探査は有効であるが、それは多分に分析精度に依存している。砒素、アンチモン、水銀は金と行動を共にする元素で、探査に有効である。ベースメタル、銅も或るタイプの鉱床では有効である。

多くの浅熱水系は、長石と苦鉄質鉱物の分解、珪化作用および黄鉄鉱化作用による広範囲な変質ハローを伴う。還元硫黄の存在によって、母岩は広範囲に非磁性化を受ける。そこで、空中磁気探査や電気抵抗探査は、浅熱水系の存在を見いだすのに大変有効である。これらの探査は、鉱化地域を規制している広域的な地質構造を見いだすにも役立つ。

露頭が見つかったり試験試錐が行なわれている場合には、変質帯の記載が重要である。複数の変質ステージの認識は、時に大変重要となる。同様にして、角礫のタイプの記載は、鉱化作用の型や目標となる鉱床の種類を定めるのに重要な役割をする。

変質帯の中で、電気伝導度の高い粘土-黄鉄鉱帯とその低い珪化帯は、電気抵抗探査である程度識別出来る。また、多くの浅熱水系では、原地形を知ることが鉱

化作用当時の水理の復元に役立つ、それが探査目標を絞る助けになる。いずれにせよ、どれかひとつの方法だけで探査が可能なわけではなく、物理探査や地化学探査と結びつけた注意深いマッピングが、有望地域の発見につながる。そして、試錐が最終的な検証の手段となる。

環太平洋の若い火山地域における最近の鉱床の発見は、我々の探査指針と探査法の有効性を実証しており、また、今後の発見の可能性を示すものである。

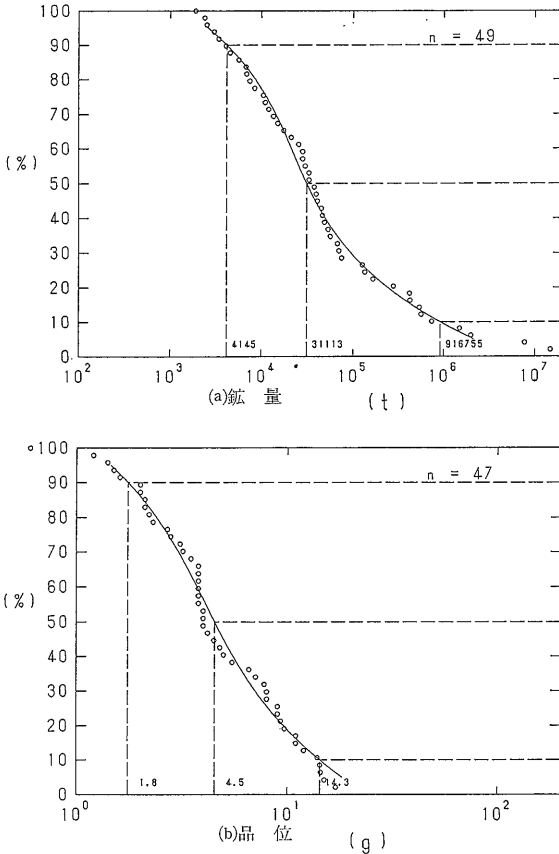
3. 第2日目

第2日目は、今回のワークショップのホスト国である日本の浅熱水性金銀鉱床の紹介と、マグマの活動により直接的に関係した熱水系における鉱化作用に焦点をあてた講演が行なわれた。とくに後者は、中性熱水の地熱型の熱水系における鉱化作用の様子がほぼ明らかになった現在、世界の研究者の議論の中心になっているテーマである。

(1) M. Kamitani (Geological Survey of Japan): Distribution and grade-tonnage relations of Au-Ag deposits in Japan

神谷氏は、500以上あるといわれる日本の金銀鉱床について、その分布、形成時期、品位-鉱量の関係を総括した。また東北北海道の北見地域をモデルにして、金銀の資源予測を試みた(写真7)。

日本の金銀は、主として、新第三紀～第四紀の火山岩地域に胚胎する鉱脈型の浅熱水性鉱床から生産されてきた。それらは大きく次の8地域に分けられる。①北上地域および西兵庫地域：これらは、他の地域とは異なって後期白亜紀～古第三紀の火成作用に伴って金または金銀の鉱脈型鉱化作用のみられる地域である。②北見地域：鴻之舞鉱床(1917～1974年に金71.4t、銀1,200tを生産)をはじめとして50以上の鉱床が、グリーン・タフの基盤の中に分布する。鉱化期は中期中新世で、主として石英-氷長石-方解石組合せの鉱脈型鉱床である。③南西北海道地域：千歳、轟、手稲鉱床を代表とする地域で、50tの金を生産している。④佐渡地域：1542年以来金83t、銀2,400tを産出した日本の代表的鉱脈型鉱床地域である。最大の青脈脈は東西方向に長さ2,100m、平均脈幅6mで、平均品位金6g/t、銀60g/t、鉱量1,700万tに達する。⑤伊豆地域：金銀脈は、フィリピン海プレートの衝突(2～6百万年前)の際の圧縮応力割れ目にそって形成されたと考えられる。鉱化期は1～2.5百万年前で、1914年以降金50t、銀1,000tを産出した。⑥日田地域：鯛生、馬上鉱床を含む鉱脈型鉱床が中新世火山岩



第3図 北見地域の金鉱床の品位-鉱量関係。

類、一部鮮新世堆積岩類中に分布し、55 t以上の金を産出した。⑦鹿児島地域：150 t以上の金を産出した地域であるが、ここで最近菱刈鉱床(金量120 t以上)が発見された。北部(北薩地域)では石英-氷長石-方解石組合せを特徴とする大規模な鉱脈型鉱床が分布し、南部(南薩地域)は珪化岩中の金鉱化作用で特徴づけられる。

日本全体では、鉱量と品位の頻度分布は対数正規分布で近似され、中央値はそれぞれ 30,000 t、6.8g/t である。一般に、大規模な鉱脈型鉱床は中新世の火山岩類中に分布する。

北海道の北見地域では、NNW-SSE 方向に伸びたバズン状構造に沿って金銀鉱床が分布している。多くの鉱床は、地下の貫入岩に由来すると思われる正の磁気異常部をとりかこんで分布している。第3図は、北見地域の金鉱床の品位-鉱量モデルである。中新世層中の鉱脈の分布密度をもとに、この地域の金の資源量予測を行った。その結果、北見地域全体の鉱量は1,900万 t、金量にして96 tが見積もられた。

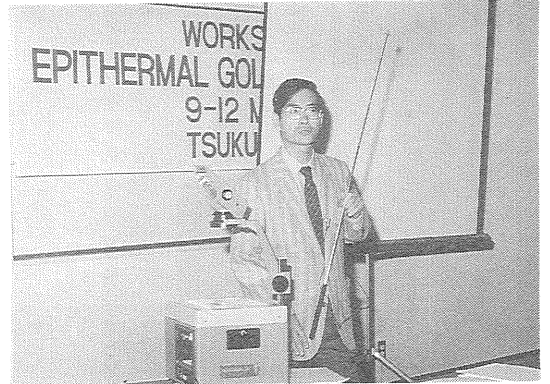


写真8 九州に分布する特徴的な2つの型の浅熱水性金鉱化作用(氷長石-セリサイト型と硫酸酸性型)を紹介する地質調査所の松久幸敬。

(2) Y. Matsuhisa (Geological Survey of Japan):
Epithermal gold mineralization in Kyushu, Japan

松久は、日本の主要な産金地域のひとつであり、このワークショップの地質巡検地域である九州について、浅熱水性金鉱化作用の地質条件、特徴的な2つの型の鉱化作用(氷長石-セリサイト型と硫酸酸性型)の地質学的・鉱物学的特徴、および、金鉱化作用と火山性熱水系との密接な関係についてまとめを行なった(写真8)。

九州は、琉球弧と西南日本弧の結合点に位置し、金鉱化作用は、今日まで続く新生代後期の火山作用と密接な成因的關係を持っている。浅熱水性金鉱床の分布は、中九州、北薩、南薩の3地域に区分され、いずれも火山性陥没構造に対応している。この火山性陥没構造にそって、後期鮮新世からくり返し大規模な火山砕屑岩の噴出があった。金鉱化作用の年代は、北薩・南薩地域では5.0~0.9百万年前、中九州では3.6百万年前以降である。北薩・南薩地域では、鉱床は東に向かって若くなるが、このことは、火山活動が時代とともに東に移動することと調和的である。火山活動と金鉱化作用の場の時代による一方向への移動は、中九州地域でも認められる。一部の基盤岩(白亜紀~古第三紀の堆積岩)で金の高濃度(~137 ppm)が報告されているが、一般的にみて、基盤岩の種類と金鉱床の分布との対応は認められない。

菱刈鉱床、串木野鉱床で代表される北薩地域、中九州地域の鉱床は、典型的な氷長石-セリサイト型の、鉱脈型鉱床である。串木野鉱床は、第三紀安山岩類中の裂かを充填する浅熱水性金鉱脈からなり、脈鉱物は、含金銀石英、方解石、少量のスメクタイト、氷長石、セリサイト、および硫化鉱物からなる。平均品位、金 6.7g/t、銀 61g/tで、今日までに金55トンを生産した。鉱脈群の東方2~3 kmに高温の珪化帯が存在し、熱水系の中心



写真 9 種々の異なる型の火山作用に伴う浅熱水性金鉱床の現われ方について紹介する U.S.G.S. の J.J. Rytuba 博士。

と考えられている。菱刈鉱床は、白亜紀～古第三紀の堆積岩類と上位の鮮新世安山岩類の不整合面付近に発達した鉱脈群からなる。鉱脈群を胚胎する局所的な高重力異常は、基盤岩の上昇に対応している。鉱脈群の上部の母岩は下部にくらべてより強い熱水変質を受けているが、とくに、鉱脈群の 50～100m 上位に、水平方向に広くひろがったスメクタイト・黄鉄鉱変質帯が分布する。鉱化作用の時期は 0.8～1.1 百万年前で非常に若く、現在でも NaCl-重炭酸型、65℃ の熱水の多量の湧出がみられる。推定鉱量は、平均品位 80g/t で金量にして 120 トンである。

一方、南薩地域では硫酸酸性型の金鉱床が特徴的にみられ“南薩型”と呼ばれている。鉱化作用は、強い酸性溶脱を受けた塊状珪化岩 (>95%SiO₂) 中に鉱染状あるいは割れ目にそって現われる。平均品位は金 3.2～5.0g/t で、金銀比は 1 に近い。珪化岩体 (直径 100～200m) は、上部中新世の安山岩熔岩および火山砕屑岩中に集合をなして、あるいは弧状に分布して形成され、周囲に、カオリナイト、明ばん石、スメクタイトからなる幅 1～2 m の粘土化変質帯を伴う。主要な金属鉱物は黄鉄鉱、針鉄鉱、自然金 (と恐らくエレクトラム) だが、少量の硫砒銅鉱、ルズナイト、コペリン、自然硫黄を伴う。地質条件や変質鉱物の解析から、この型の鉱化作用は、氷長石-セリサイト型の浅熱水性鉱化作用に比べて、より直接的に高温の酸性火山性流体に関係して生ずるものと考えられている。

浅熱水性金鉱化作用には、現在活動的な地熱系や火山性熱水系との間に多くの類似点がみられる。南薩型鉱化作用は、カルデラ中のマグマの上昇によるドーム・アップに関係して形成したようである。一方、氷長石-セリサイト型の含金石英脈は、基盤の上昇によって発達した

裂か中に形成される。その形成の場合は、硫酸酸性型に比べてマグマからは遠いと考えられる。

(3) J. J. Rytuba (U. S. Geological Survey): Epithermal precious metal deposits associated with volcanic systems

Rytuba 氏は種々の異なるタイプの火山作用に伴う浅熱水性貴金属鉱床の現われ方について紹介した(写真 9)。いずれのタイプの火山作用に伴う場合でも、鉱床は火山作用の最末期の活動に関係して形成される。

Valles 型のカルデラに伴う鉱化作用の場合は、マグマの“再生”(resurgence) 期のドーム・アップが、すでに存在している環状構造や放射状裂かを開いて熱水の通路をつくるのに重要な働きをしている。再生カルデラ期のマグマは、また、熱水系の熱源となり、恐らく鉱床をつくる金属の源ともなるだろう。スペインの Rodalquilar 鉱床のような石英-明ばん石型の金鉱床は、時期的にも空間的にも再生カルデラ期のマグマに関係している。鉱床は、環状割れ目や放射状断層にそって、また、これらの構造付近の透水性の高い凝灰岩層中に形成される。変質帯の形成は、母岩の透水性に著しく規制される。

成層火山や楯状火山の上に形成される火山性クレーターや小規模なカルデラ (直径 2～5 km) は、石英-氷長石型やアルカリ質マグマに伴う金銀テルル化物型の、大規模な高品位金鉱床を胚胎する。その例は、フィジーの、Tavua カルデラに伴う Emperor 金テルル化物鉱床や、パプア・ニューギニアの Luise カルデラに伴う Lihir 鉱床である。Lihir 鉱床では、金鉱化作用は、陥没後のマグマの貫入とドーム・アップに時期的にも空間的にも伴っている。

カルデラに関係しない火山性ドームや岩脈群に伴う浅熱水性貴金属鉱床の例がある。アメリカ西部 (オレゴン州東部・アイダホ州西部・カリフォルニア州北東部・ネバダ州北西部) では、長さ 200km、幅 25km の断層帯にそって火山性ドームが分布する。この断層帯は、地下浅所へのマグマの貫入がひきおこした背斜状構造の頂部に形成されている。ドームの形成にひき続く断層の活動が、熱水の通路をつくるのに重要な役割をした。このような鉱床の例は、アイダホ州の DeLamar 鉱床である。

火山性ドームに伴う温泉型貴金属鉱床は、シンターやドームの頂部の酸性溶脱帯中に現われる辰砂鉱化作用と強い累帯構造をなす。そのような例は、オレゴン州の Quartz Mountain 鉱床や、ネバダ州の Buckskin 鉱床にみられる。断層にそった石英-氷長石脈や網状脈、熱水性角礫がドーム内や周囲の母岩中に出現する。ネバダ州の Sleeper 鉱床の高品位脈 (金 300g/t 以上) もこの型



写真10 熱心に講演に耳を傾けるワークショップ参加者。



写真11 マグマ性熱水による“High sulfidation”型金鉱化作用を強調する地質調査所の J. W. Hedenquist 氏。

の例である。断層や母岩の透水性が鉱化作用の局在性を支配している。

(4) R. W. Henley (Epithermal, Australia): Magmatic and structural controls on epithermal gold mineralization

Henley 氏は、浅熱水性鉱化作用において近年注目されはじめたマグマの役割について、また、鉱床探査における構造規制の重要性について論じた(写真10)。

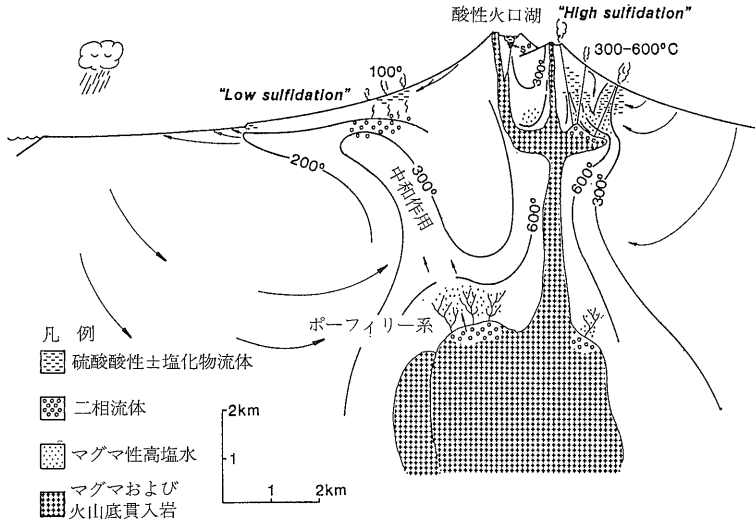
浅熱水性鉱化作用についての近年の研究は、流体包有物や安定同位体、鉱物の安定関係の熱力学などを駆使して貴金属の沈殿する物理的、化学的環境を明らかにすることに焦点をあててきた。その結果、温度 300℃ 程度までの比較的低塩濃度の流体を含む化学的環境については、かなりよく判ってきた。そこで最近では、今までよく判らなかった浅熱水性鉱化作用におけるマグマの役割に注意が向けられるようになった。多くの野外観察の結果は、浅所に貫入したマグマが金の源として、また金を運ぶ錯体を形成する硫黄の源として重要であることを示している。

ニュージーランドの Taupo 火山帯では、火山帯にそってガスと金に富む地熱系が分布しているが、そこから得られた化学的データは、熱水が、熱伝導で熱せられた低塩濃度の地下水と、地下 5~8 km で形成された恐らく蒸気相のマグマ性流体との相互作用で形成されたことを示している。熱収支や物質収支の議論とともに、これらのデータは、浅熱水系の金のマグマ起源を暗示しており、また、ポーフィリー金や他の貫入岩に関係した鉱床とのつながりを示唆している。最近の研究では、火山のマグマから放出されるガスが、HCl や SO₂ とともに、金をはじめとするかなりの金属を運んでいることが明らかになりつつある。

浅熱水性鉱床相互の違いは、主として貫入したマグマの相対的な深さの違いに依存しているのであろう。すなわち明ばん石-カオリナイト型(硫酸酸性型)の鉱床は、脱ガスしつつある浅所貫入のマグマ(たとえば流紋岩ドーム)と、より大きな、深所のマグマによってつくられる後期の熱水系に関係しており、一方、氷長石-セリサイト型の鉱床は、脱ガスが上位の地下水系に向って起きるような、より深い(4~8 km) マグマに関係している。透水性の高い地層中では、マグマ性流体が地下水の対流によって拡散してしまっただけで鉱床が出来ない。透水性の低い地層中では、熱水の流れは構造規制を受けて集中し、鉱床を形成する(たとえば菱刈鉱床)。

鉱床探査にあたっては、浅熱水性鉱床が形成される裂かに対する構造規制を理解することが重要である。構造規制は、カルデラやドームの形成を通じてマグマの活動に関係するか、広域的なテクトニックの場に関係している。ネバダやボリビアでは、プレートの動きに関連した裂か系の発達と、マグマの貫入や鉱化作用の局在化の間に明瞭な関係が認められる。探査の初期の段階で鉱床形成における地質構造の役割を認識するのに最もよい方法は、空中磁気探査である。高分解能で低高度の探査を行ない、結果をコンピュータで解析、画像処理する方法は、露出の悪い地域での地質構造の解析に有効である。この空中磁気探査法は、一方で、貫入岩のような主要な岩石群を区別したり、磁気異常にもとづいた変質帯を識別するのに役立つ。

現在の探査は、露天採掘が出来、経済効率のよい地表近くの鉱床の発見に力点が置かれているが、将来は、菱刈鉱床のような、より深い、高品位の鉱脈型鉱床の探査にかかっている。その探査の鍵は、これまで無視されてきた地域の、地質構造解析と結びつけた精密な物理探査である。



第4図 “Low sulfidation” 型と “high sulfidation” 型の生成環境を比較する模式図

(5) J. W. Hedenquist (Geological Survey of Japan):
Mineralization of volcanogenic hydrothermal systems in the Circum Pacific, and their recognition

Hedenquist 氏は、火山岩中に胚胎し、火山作用に関係した熱水系によって形成された浅熱水性鉱床を “low sulfidation” と “high sulfidation” の2つの型に分けてその特徴を比較し、とくに後者の重要性について論じた(写真11)(第4図)。

“Low sulfidation” 型は氷長石-セリサイト型とも呼ばれその形成環境は多くの活動的地熱系に類似している、鉱液はほぼ中性の pH を持っている。その変質鉱物は、氷長石・セリサイト組合せに代表されるように、中性 pH の熱水を反映しているが、地表付近には、蒸気凝縮水によって形成された酸性粘土化変質がみられる。熱水対流系の深部にはマグマ成分の供給があるだろうが、それは上昇過程で岩石と反応して完全に中和されている。一方の “high sulfidation” 型は Goldfield 型とも硫酸酸性型とも呼ばれ、日本では南薩型と呼ばれている。鉱液はより酸化性的かつ酸性で、硫黄は酸化状態にある。この型の鉱化作用や熱水系の研究はまだあまり進んでおらず、はっきりしない点も多いが、浅所に貫入したマグマから放出された酸性流体に密接に関係していると考えられている。それは、時間的にも空間的にも、また恐らく成因的にもポーフイリー・銅系につながっているだろう。

“High sulfidation” 型の金鉱化作用は一般に硫砒銅鉱を伴っており、ときに黄鉄鉱、四面銅鉱、コペリン、輝銅鉱、明ばん石、重晶石を伴う。これらの鉱物は、強い酸性溶脱を受けた珪化岩中に胚胎することが多い。鉱化帯は、幅数mのせまい変質ハロー(石英、明ばん石、カオ

リナイト、ダイアスポア、パイロフィライト、イライト、スメクタイト)を伴う。“High sulfidation” 型の鉱化作用に伴う粘土化変質は、“low sulfidation” 型に伴うそれと一見類似しているが明瞭な違いがある。すなわち、後者では硫酸酸性水は地表近くで形成され、比較的低温で、カオリナイト、黄鉄鉱、クリストバライト、自然硫黄からなる薄く広がった粘土化変質帯を形成する。

“High sulfidation” 型鉱床の例としては、ネバダの Goldfield, コロラドの Summitville, ドミニカの Pueblo Viejo, チリの El Indio, フィジーの Mt Kasi, パプア・ニューギニアの Frieda River, フィリピン の Lepanto, そして日本の南薩地域などがある。鉱床の現れ方は、母岩の透水性や裂かや角礫パイプに支配される。あるものは貫入岩を伴い、また、ポーフイリー・銅系鉱化作用につながっている(例: Summitville El Indio Lepanto)。また、“low sulfidation” 型の鉱化作用につながるものもある。

流体包有物のデータは、“high sulfidation” 型の鉱液が一般に180~270°Cであったことを示している。また流体包有物のデータは、流体が一般に低塩濃度であったことを示しているが、これは、データが末期の晶洞石英から得られていることが多いせいかも知れない。酸素及び水素同位体のデータは、鉱液が主として天水起源であることを示しているが、一方で、硫黄同位体のデータは、マグマ起源の SO₂ の不均等化反応を示唆している。はじめガス成分がマグマから供給されたが、マグマの活動の低下に従って、系が、より中性の、還元性性質に変化していった可能性がある。

今後、環太平洋地域で “high sulfidation” 型の鉱床がさらに見つかる可能性は非常に高い。探査にあたって

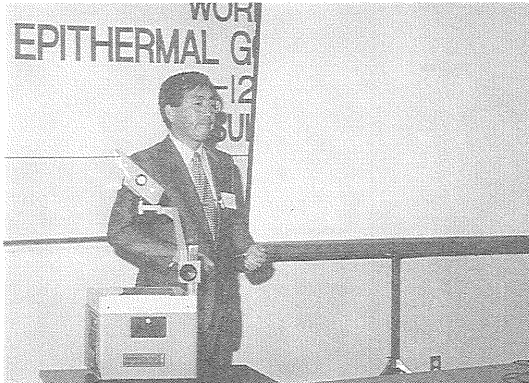


写真12 恐山噴気帯にみられる現在進行中の金鉱化作用を紹介する地質調査所の青木正博。

は、“high sulfidation”型の鉱化作用に伴う粘土化変質を、噴気凝縮水や“low sulfidation”系の地表付近に出来る類似の粘土化変質と区別するように、気をつけなければならない。透水性の高い地層や熱水性角礫の存在は、鉱床の形成に有利である。鉱化作用のある場合は、酸性変質や溶脱珪化に加えて、ひき続く硫化物や石英の沈殿の証拠がある筈である。一般に変質や元素濃度は規則的な累帯構造を示すので、金や銀、ヒ素の地化学探査が有効である。

(6) **M. Aoki (Geological Survey of Japan): An active gold mineralization in evolving volcanogenic hydrothermal system in Osorezan**

青木は、恐山噴気帯の現在活動的な地熱系の温泉沈殿物に見られる金の濃集の例を報告し、その熱水系の地質学的、地球化学的解析が、年代の若い浅熱水性金鉱床の探査に有用な指針を与えることを述べた(写真12)。

恐山は、本州弧の火山フロントの北端に位置し、頂上にカルデラ湖と再生ドームを持つ複成火山である。火山活動は終息に向っているが、カルデラ内のデイサイトドームの裾に活発な噴気と温泉湧出が見られる。噴気帯の地表部は、酸性の蒸気凝縮水やpHの低い温泉水によって強い粘土化変質を受けている。温泉水の一部に中性pH、NaCl型のものがあり、深部熱水が湧出しているものと考えられる。このような中性pH型で、 H_2S 濃度の高い温泉の沈殿物に金の濃集がみられる。とくに、熱水性爆発クレーターを埋めた沈殿物では、400ppmを越える高濃度の金が検出されている。

これまでの地質調査、変質鉱物解析、熱水や沈殿物の化学的・同位体的解析によれば、恐山熱水系の進化の過程はおおよそ次のようである。

① 熱水対流系は、浅所に貫入したデイサイト・マグマ

によって引き起された。このマグマは熱源として作用すると同時に酸性のガス成分を熱水系に供給し、多孔質の残留シリカ、明ばん石、カオリナイトからなる強い酸性変質をもたらした。

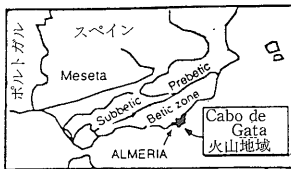
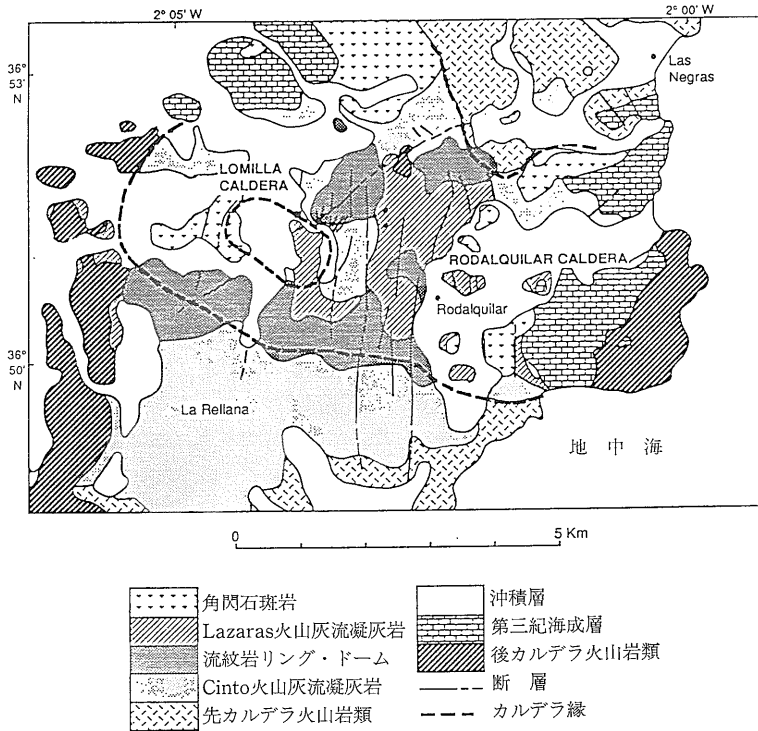
- ② デイサイト・マグマの噴出(ドーム形成)があり、既成の変質帯を破壊した。
- ③ 地下の岩石との反応で熱水のpHが上昇し、中性pHで H_2S に富む熱水が形成された。この熱水によって浅熱水性元素(金、ヒ素、アンチモン、水銀等)が運ばれ、鉱化作用が起きた。地下比較的深所では、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、四面銅鉱、黄鉄鉱を伴ない、氷長石、金を含む縞状石英脈が形成され、比較的浅所では、輝安鉱一玉ずい脈が形成された。
- ④ 割れ目がシリカや炭酸塩の沈殿で封じられることによって地下の流体圧が増大し、熱水性爆発が起きた。カルデラ湖の水面低下か、マグマの上昇が爆発の引き金になったのだろう。爆発によって、地下の鉱化部分の岩片が地表に放出された。
- ⑤ 爆発クレーターは、岩片や湖水堆積物で埋められると同時に、上昇する深部熱水の通路となった。深部熱水は硫化物錯体として金、ヒ素、アンチモン、水銀を運び、またテルルを含んでいた。上昇した熱水は硫酸酸性の比較的低温の浅層水と混合を起し、雄黄(As_2S_3)、コロロアイト($HgTe$)、クレーナイト($AuTe_2$)、重晶石等に富む沈殿物を生じた。局所的には、初期の段階にベースメタルに富む沈殿物もみられる。
- ⑥ クレーター上部から湧出している中性pHで H_2S に富む温泉水は、現在でも湧出孔付近にヒ素の硫化物や金に富む硫黄の沈殿を生じている。

(7) **J. J. Rytuba (U. S. Geological Survey): Gold-alunite and base metal vein mineralization within the Rodalquilar caldera complex, Spain**

Rytuba氏は、スペイン南東部の海岸に分布する中新世のカルデラ内にみられる硫酸酸性型の金鉱化作用について、紺碧の地中海とカルデラ構造をよく保存した美しい地形のスライドを駆使して紹介した(第5図)。

Rodalquilarカルデラは、中新世のCabo de Gata火山地域(長さ150km)の西部に形成された3つのカルデラのひとつで、カルデラ内および周辺部に、石英一明ばん石型の金鉱床とベースメタル鉱脈鉱床が生じている。カルデラ内には、粘土化変質が広く分布している。

Rodalquilarカルデラは、Cerro Cinto火山灰流凝灰岩の噴出後に生じた、東西8km、南北4kmの陥没である。カルデラ内には、厚さ200mのカルデラ内崩壊角礫

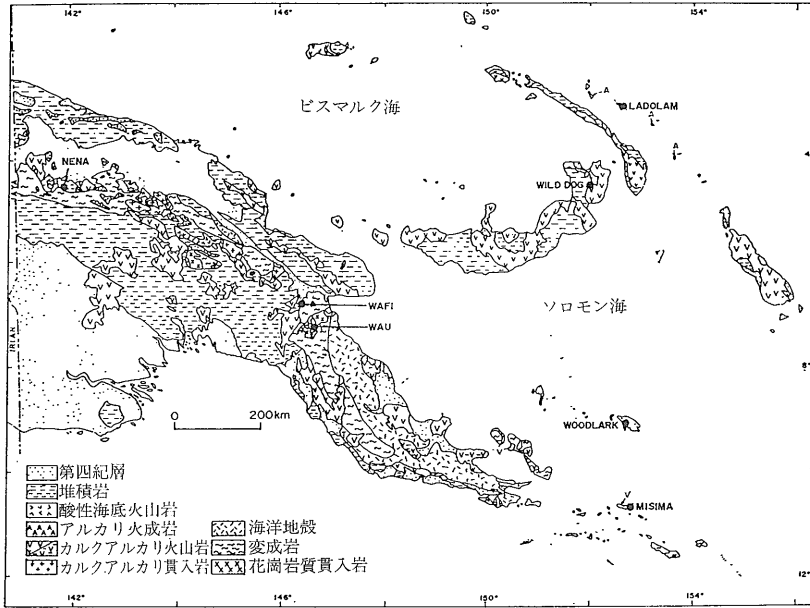


第5図 スペインの Rodalquilar カルデラの地質図。

と Cerro Cinto 火山灰流凝灰岩が分布する。Rodalquilar カルデラ形成後すぐに、中央部の再生とドーム・アップがあり、カルデラの北と南の縁にそって火山性ドーム（流紋岩質）の形成があった。カルデラ中央部の再生はさらにひき続き、ついに再生ドームの一部が崩れて Lazaras 火山灰流凝灰岩を噴出し、Lomilla カルデラ（直径 2 km）を形成した。Lomilla カルデラの形成に伴って、カルデラ壁を切って、弧状および放射状裂かが発達した。Lazaras 火山灰流凝灰岩の噴出後、カルデラは、頁岩と珪藻土からなる湖成層でおおわれた。その上を湖水中で珪化した凝灰岩がおおい、さらに角閃石安山岩の熔岩がくる。この安山岩に対比されるブラグや岩脈が Lomilla カルデラ壁中にみられ、カルデラ内の金鉱化作用に時間的にも空間的にも密接に関係している。このマグマの活動に対比される地下の貫入岩体の存在が、重力と磁気異常で捕捉される。角閃石安山岩マグマの貫入の最末期近くに Rodalquilar カルデラ内に後期の再生が起きた。この後期の再生が、カルデラ内に大きな熱水系を発達させる際の熱水の通路となった断層や裂かを開くの

に、重要な働きをした。

Rodalquilar カルデラ内の鉱床は、金-明ばん石、明ばん石、ベースメタル鉱床からなる。明ばん石鉱床は塊状の置換型鉱体からなり、カルデラ東北縁と再生ドームの東麓の崩壊角礫と凝灰岩中に局在している。ベースメタル鉱床は含鉛・銅・銀・金石英脈からなり、南北性の断層にそっている。金鉱床は幅 1.5m までの玉ずい脈からなり、Lomilla カルデラの東壁の環状および放射状断層や裂か中に限定されている。現在の埋蔵鉱量は、平均品位金 2.5g/t で 65 万トンである。金鉱化作用に伴う熱水変質は典型的な硫酸酸性型で、深さ 860m 以上まで続く。深部のセリサイト帯は、上方に向かって粘土化帯、珪化帯に移化し、金は珪化と粘土化の最も強い最上部に現われる。鉱化帯から得られた明ばん石の安定同位体データ ($\delta^{34}\text{S} = 26 \pm 4\%$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4} = 7 \pm 5\%$, $\delta\text{D} = -25 \pm 5\%$) は、明ばん石がマグマからの脱ガスでもたらされた SO_2 の不均等化反応で生じたマグマ性熱水環境で形成されたことを示している。



第6図 パプア・ニューギニアの地質概念図と6つの浅熱水性金鉱床の位置。

4. 第3日目

第3日目からは、ワークショップ参加諸国の代表によるカントリー・レポートが発表された。カントリー・レポートの最初は、Lihir 島をはじめとして、近年 ESCAP 諸国の中で最も活発に浅熱水性金鉱床の探査と開発が行なわれているパプア・ニューギニアで、第3日目の午前中を使って3つの講演があった。

(1) パプア・ニューギニア

① A. Wangu (Geological Survey of PNG) : Principle features of epithermal gold deposits in Papua New Guinea (写真13)

パプア・ニューギニアは、オーストラリア-インド・プレートと太平洋プレートの接するところに位置し、サブダクション帯にそって火山作用がみられ、それに伴って浅熱水性金鉱化作用が起きている。ここでは、氷長石-セリサイト型に属する4つの鉱床 (Ladolam (Lihir)・Misima・Wau・Wild Dog) と、硫酸酸性型の2つの鉱床 (Nena・Wafi) について報告する (第6図)。

Ladolam 鉱床と Wild Dog 鉱床はカルデラの内部に形成されている。Wau 鉱床は火山性ドーム地域内に分布する。一方、Misima 鉱床は大きな断層帯中に胚胎する。これらの鉱床は、主要な火山活動の後に、地熱系に類似の熱水系によって形成された。硫酸酸性型の2つの鉱床は断層活動の影響を受けた複雑な地質構造の地域に

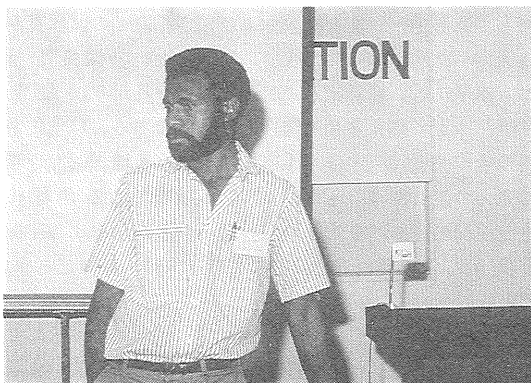


写真13 パプア・ニューギニアの浅熱水性金鉱床を紹介する P.N.G. 地質調査所の A. Wangu 氏。

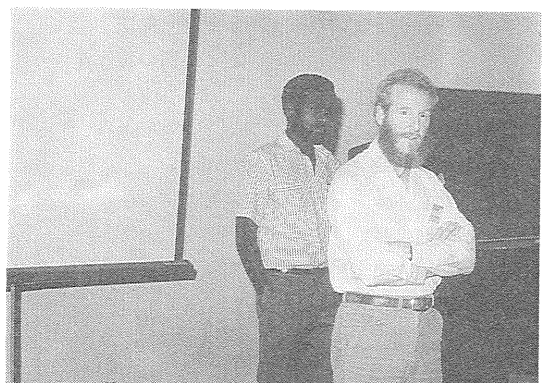


写真14 沖積堆積物からの探査を論ずる P.N.G. 地質調査所の M.S. McCulla 氏 (右)。

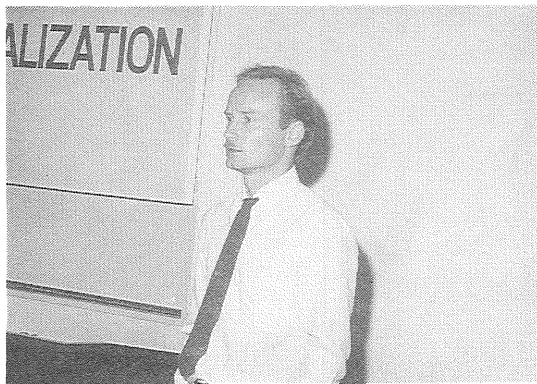


写真15 Lihir 島の金鉱化作用を紹介する Austpac Gold の R. M. Davies 氏。

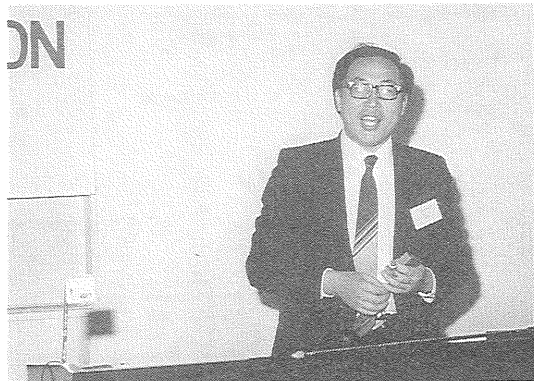


写真16 中国広西省の浅熱水性鉱床を紹介する広西省地質鉱産局の Zhao Xun 氏。

分布する。硫砒銅鉱-ルズナイト-黄鉄鉱組合せが特徴である。これらの鉱床は、空間的に、大きな貫入岩体やポーフィリー・銅型鉱化作用と近い関係にある。

② M. S. McCulla (Geological Survey of PNG) : Characteristics of gold in alluvial deposits as indicators of epithermal-mesothermal, porphyry copper-molybdenum, and ultramafic/ophiolite sources (写真14)

バプア・ニューギニアの金鉱床の開発は、沖積礫層中の金の採掘から始まった。沖積層中の金の特徴の解析から、供給源となった金鉱床のタイプを知ることができた。その特徴は次のようにまとめることができる。

浅熱水性—中熱水性鉱脈：

- (i) 無数の硫塩鉱物やテルル化鉱物の包有物を持つ。
- (ii) からみあったネットワーク状または板状を呈す、結晶度の高い金粒からなる。
- (iii) 大きなナゲットをなす。
- (iv) 低純度が一般的である。
- (v) 金を含む沖積層はひとつの流域に限られる。

ポーフィリー・銅型・モリブデン鉱床：

- (i) 金は、磁鉄鉱、緑れん石、ざくろ石のようなスカロン鉱物と共生する。
- (ii) 金は細～中粒である。
- (iii) 含金礫層は数ヶの流域にまたがる。

超塩基性岩／オフィオライト地域：

- (i) 金の純度は高い。
- (ii) 沖積層中の白金属元素ないしクロム鉄鉱の含有量が高く、金と共生ないし合金をつくる。
- (iii) 含金沖積層の分布は数本の河川の流域にまたがる。

③ R. M. Davies (Austpac Gold, Australia) : Geology of the Ladolam gold deposit, Lihir Island, Papua New Guinea (写真15)

Lihir 島の Ladolam 鉱床 (第6図) は、熱水性角礫中に胚胎する鉱染状の金鉱床で、ショショナイトの成層火山の崩壊カルデラ中に貫入したモンズナイト岩株 (35万年) の頂部に形成されている。

カルデラ内の岩石は、深さに応じた層状の変質分帯を示す。鉱化帯の最深部は硬石膏帯で、カリウム変質を伴う。鉱化作用の主要部は硬石膏帯の上部 (-50~-150m) にほぼ水平にひろがる“沸騰帯”で、径1~3cmの角礫～亜角礫からなり、基質を欠く多孔質の角礫帯からなる。硬石膏、石英、方解石、氷長石および硫化物が、しばしば角礫の間の空隙の壁に沈着している。“沸騰帯”の上、酸化帯の下には粘土化変質帯 (カオリナイト-明ばん石-オパール-黄鉄鉱-自然硫黄) が発達し、採掘可能品位の鉱化作用を伴う。地表から50~70mは、酸化帯で、鉱量の約7%は酸化鉱からなる。金の多くは0.01 μ mより小さな粒子で、主として黄鉄鉱中に、一部は黄銅鉱や硫砒鉄鉱に含まれる。

カルデラ底の地下では地熱活動が普遍的にみられ、温泉水の大部分は、硫酸酸性で、蒸気加熱型の天水起源の熱水であるが、一部の温泉および深さ750mの試錐孔から湧出した熱水は中性pHで、海水に近い塩濃度を持つ。水平に近い変質帯および鉱化帯のひろがりには“沸騰水位”モデルによる金の沈殿と調和的である。粘土化帯内の金の沈殿は、中性pH塩化物型熱水と地表近くの酸性水との混合によるものだろう。広域にわたる角礫化と、沸騰帯における角礫基質の硬石膏の溶解による空隙の発達が、大規模な金の沈殿に有利に作用したのだろう。

(2) 中国

Zhao Xun (Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi, China) : Case study of geological characteristics of two epithermal gold depo-



写真17 Bau 地域の金鉱床探査について報告する マレーシア地質調査所の V. Hon 氏。



写真19 インドのグリーンストーン帯の金鉱化作用について紹介するインド地質調査所の K.V. Krishnamurthy 氏(左)。



写真18 ルソン島 Baguio 地域の浅熱水性金鉱化作用とボーフィー型鉱化作用とのつながりを強調するフィリピン鉱山地質局の M.E.C. Comsti 氏。

sits in Guangxi, South China (写真16)

広西省に分布する浅熱水性鉱床について、2つの例(Lungtuoshan 鉱床と Gaolung 鉱床)をあげて紹介した。鉱化作用は、揚子江プラットフォームと南中国褶曲帯の境界の断層帯にそって、燕山期の構造運動・火成作用と、それにひき続く熱水作用によって形成された。Lungtuoshan 鉱床は貫入岩にそった断層帯中に5つの不規則な形の鉱体をなす、角礫状鉱染状鉱床である。鉱石は、自然金、エレクトラム、黄鉄鉱、方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄銅鉱、硫砒鉄鉱、赤鉄鉱、石英、電気石、セリサイト、重晶石を含み、母岩の珪化、黄鉄鉱化、セリサイト化、緑泥石化、炭酸塩化、電気石化を伴う。Gaolung 鉱床は、石炭紀-二畳紀の炭酸塩岩を主とするドーム構造をとりまく断層にそって形成されている。断層にそって強い珪化があり、鉱体(8個)は不規則なキノコ状を呈して下方に消滅する。母岩の変質作用はカオリナイト化と珪化である。

1989年11月号

(3) マレーシア

V. Hon (Geological Survey of Malaysia): Geological setting and some exploration criteria of gold mineralization in the Bau area, Sarawak, Malaysia (写真17)

Bau 地域の金鉱化作用は、中新世の花崗閃緑岩質岩株の貫入に関係している。貫入岩は NNE 方向に配列しており、これと ENE 方向の向斜軸とが交叉するところに鉱化作用の中心がある。鉱化作用は、NNE 方向の断層や石灰岩と碎屑岩の境界に規制されている。砒素の異常が全体を通じてみられる。粘土化変質、珪化、碧玉質石英、角礫化、縞状石英-方解石脈、黄鉄鉱、硫砒鉄鉱がみられる。

(4) フィリピン

M. E. C. Comsti, R. I. Villones, Jr., C. V. De Jesus, A. R. Natividad, L. A. Rollan and A. C. Duroy (Mineral and Geosciences Bureau, Philippines): Mineralization at the Kelly gold mine, Baguio District, Philippines: Fluid inclusion and wallrock alteration studies (写真18)

当地域の含金石英脈の変質鉱物組合せと流体包有物の研究から2種類の熱水の存在が推定される。即ち、初期の、低硫化物、低塩濃度、中性 pH の塩化物-炭酸塩型熱水(充填温度 175~230°C)と、後期の、高硫化物、高塩濃度の酸性熱水(充填温度215~270°C、多相型包有物は350°C以上)である。後者の流体包有物は、260~385°Cでの沸騰を示す。前者の熱水のもたらす変質はイライト・白雲母変質、後者のそれは粘土化変質(パイロフィライト、ダイアスポア、明ばん石)である。前者は石英-方解石-イライト脈中に金(2~3g/t)とベースメタル(閃亜鉛鉱・黄銅鉱・方鉛鉱)の鉱化作用をもたらし、後者はそれに重



写真20 フィジーの Emperor, Nasomo 両鉱床を紹介するフィジー鉱物資源省の A. Rahiman 氏。

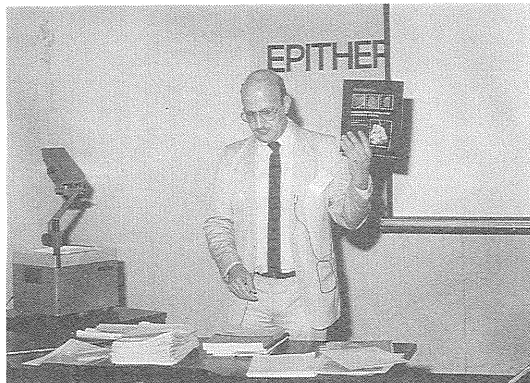


写真21 ユネスコの鉱物資源分野での活動を紹介して新しいワークショップの提案を呼びかけるユネスコ地球科学部門の R. Missotten 氏。



写真21 ヴェトナムの金鉱床と探査活動を紹介するヴェトナム鉱山地質省の Do Hai Dzung 氏。

復して、初期の脈中の金の再濃集をもたらしたり、含金硫塩銅鉱物（四面銅鉱）、斑銅鉱の沈殿をもたらした。この後者の高塩濃度の高温熱水はポーフィリー銅液に類似しており、深部にポーフィリー金・銅鉱化作用が存在する可能性を示唆している。

(5) インド

K. V. Krishnamurthy (Geological Survey of India): Status of gold exploration in India (写真19)

金鉱化作用は、主として南インドの始生代のグリーンストーン帯にみられる。現在、探査活動は、Karnataka と Andhra Pradesh の地域に集中している。

(6) ビルマ

U. Htun Sein (Geological Survey and Mineral Exploration, Burma): Kwinthonze project

当日病気のため、講演はキャンセルされた。

(7) フィジー

J. Lum and A. Rahiman (Mineral Resources Department, Fiji): Gold exploration and mining in Fiji (写真20)

フィジーにおける金鉱床の探査活動は、PNG の Lihir 島における大規模金鉱床（第1節参照）の発見に刺激されて、数年前に新しい段階に入った。ここでは、2つの主要な金鉱床である Emperor 鉱床と Nasomo 鉱床について報告する。Emperor 鉱床は、Tavua カルデラの西縁に構造規制を受けて出来た浅熱水性金銀鉱脈鉱床で、平均品位金 6.4g/t、埋蔵鉱量 120万トンである。この鉱床の詳細は、地質ニュース 415号（1989年3号）に紹介されている。Nasomo 鉱床は、Emperor 鉱床の南 2km に位置し、Emperor 鉱床の延長と考えられている。平均品位、金 14g/t、推定鉱量 30万トンといわれている。金は、Emperor 鉱床同様、石英脈中にテルル化金として現われる。1988年6月に生産が始まった。

(8) ヴェトナム

Do Hai Dzung (General Department of Mines and Geology, Vietnam): Gold mineralization in Vietnam (写真21)

金鉱化作用は、褶曲帯、中生代に構造運動を受けた卓状地、構造凹地の縁、ドーム状上昇地に構造規制を受けて分布し、多くは熱水性である。鉱化作用の型は、石英-金、石英-金-硫化物、金-銀、金-硫化物、プラーサーに分けられる。石英-金-硫化物型の鉱床（含金石英脈）では、推定埋蔵量が金量にして 130トン（Paclang 鉱床）、190トン（Bongmieu 鉱床）に達するものがある。

(9) ユネスコ



写真23 インドネシアの金鉱床探査活動について紹介するインドネシア鉱物資源局の Y. Sunarya 氏。

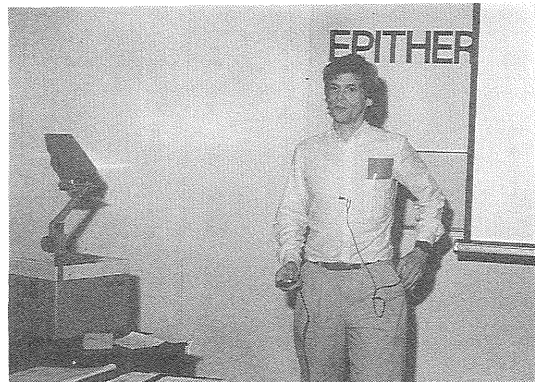


写真24 中部カリマンタンの Mt. Muro 地域の浅熱水性金鉱化作用について報告する Auckland 大学の S.F. Simmons 氏。

R. Missotten (Division of Earth Science, UNESCO): UNESCO/IUGS Deposit Modeling Programme (写真22)

ユネスコが IUGS (International Union of Geological Sciences) と協同で組織している“Deposit Modeling Programme”について紹介があった。ユネスコは、よく知られているように、IGCP (International Geological Correlation Programme) を通じて地球科学についての国際的共同研究を組織してきたが、1980年代になって、地球科学の応用面に関する要請が強くなった。“Deposit Modeling Programme”は、そのような要請を受けて出来た、新しい計画のひとつである。この計画にそって、ユネスコに対して新しいワークショップの提案をしてくれるよう、呼びかけがあった。

5. 第4日目

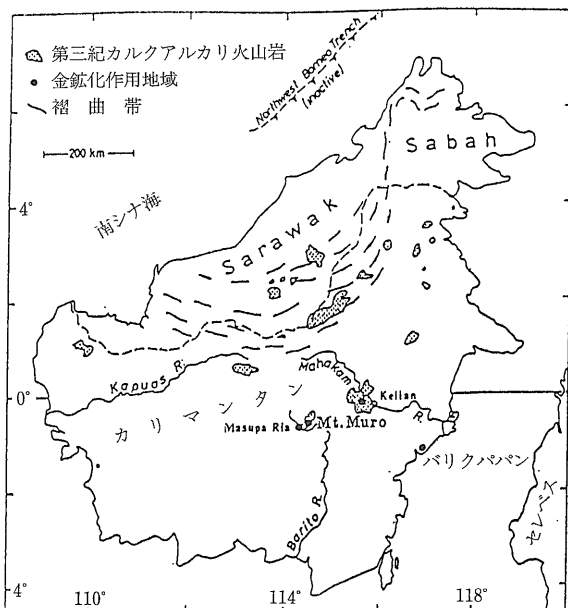
ワークショップ最終日は、インドネシア、ラオス、タイ、韓国からの報告と、ワークショップを締めくくるパネル討論が行なわれた。ラオスの代表は、交通の便が悪くて参加を危ぶまれたが、どうやら最終日に間にあった。また、ニュージーランドの Stuart F. Simmons 氏 (オークランド大学) は、今回のワークショップに特別参加をして、インドネシアの金鉱化作用に関する氏の最近の研究結果を報告した。

(1) インドネシア

① Y. Sunarya (Directorate of Mineral Resources, Indonesia) and D. Sinambela (P. T. Aneka Tambang Ltd.): Overview of gold exploration and exploitation in Indonesia (写真23)

カルク・アルカリ質火山作用を伴う多くのサブダクション帯を持つインドネシアは、浅熱水性金鉱床の有望地域である。1899-1989年の期間の産金量は、130トン以上 (平均品位金 8g/t) で、それは、スマトラの Bengkulu 鉱床 (80トン)、西部ジャワの Cikotok 鉱床 (10トン)、北部セレベスの諸鉱床 (20トン) およびカリマンタン、イリアン・ジャヤからなる。近年、金鉱床の探査と発見が続いているが、その多くは、平均品位金 3~10g/t である。探査の目標は、浅熱水性鉱床のほかに、ポーフリー金鉱床や沖積金鉱床がある。

② Y. Sunarya, S. Soeharto (Directorate of Mineral Resources, Indonesia), Sudirman and T. Kosasih



第7図 カリマンタンの第三紀火山岩類の分布と Mt. Muro 鉱徴地の位置。

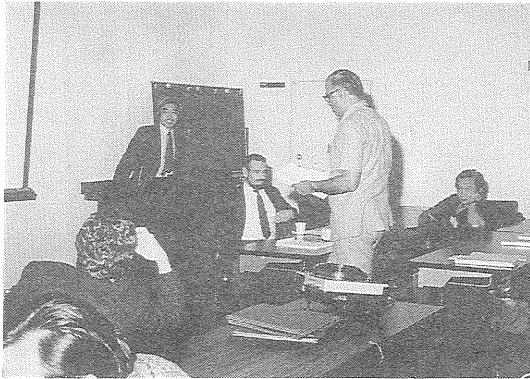


写真25 R. W. Henley, 佐藤壯郎氏の司会でパネル討論が行われた。

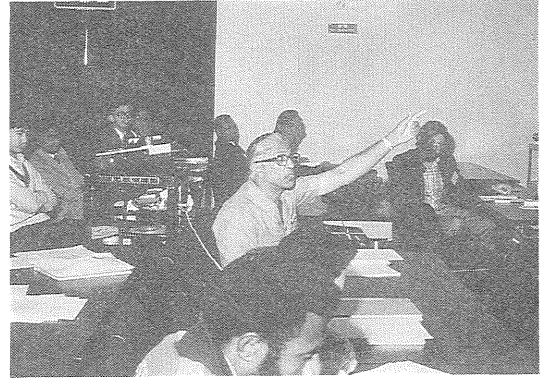


写真26 熱心に討論に参加するワークショップ参加者。

(P. T. Aneka Tambang Ltd.): The epithermal gold deposits in Cikotok area, West Java

Cikotok 鉱床は、プロピライト化した漸新世～中新世の安山岩類を母岩とした断層角礫帯中に発達する含金石英脈である。基盤のドーム・アップが鉱脈の形成にかかわったと考えられている。鉱石は、ベース・メタル硫化鉱物、黄鉄鉱、輝銀鉱、エレクトラムを含み、バラ輝石、菱マンガン鉱が主要な脈石鉱物である。流体包有物の充填温度は140～320℃、塩濃度は0～2.4重量%である。1936年以来、金6.9トン、銀206トンを生産しているが、酸化鉱を終掘して硫化鉱に移って以降、金の回収率が低下している（平均品位金4g/t）。最近、プロピライト化安山岩の下位の堆積岩も鉱化を受けていることが判明した。

③ S. F. Simmons and P. R. L. Browne (Auckland Univ., New Zealand): Mineralogic, alteration and fluid inclusion studies of epithermal gold veins at the Mt. Muro prospect, central Kalimantan (Borneo), Indonesia (写真24)

この地域の金鉱床は、第三紀中頃のカルク・アルカリ質火山作用に伴う浅熱水性環境で、構造規制されて形成された含金石英脈群からなる（第7図）。鉱化作用の中心は約10kmはなれたGunung BaruhとLuitの2地域からなり、前者のKerikil 鉱脈群がこの地域の鉱化作用の特徴をよく表しており、探査の中心となっている。鉱脈は南北ないし北西方向に1,000mに亘って断続する。母岩は斑岩状安山岩、玄武岩質安山岩の貫入岩、火山角礫からなる。

金の濃度は熱水性角礫帯で最も高い。脈石は主として石英からなり、少量の氷長石、方解石、菱マンガン鉱を含む。細粒（ $\leq 30\mu\text{m}$ ）のエレクトラムと輝銀鉱が少量の黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、コペリンを伴う。

石英-イライト-黄鉄鉱ハローが鉱脈をとり囲む。母岩の透水性の悪いところでは、緑れん石-緑泥石-曹長石±黄鉄鉱±イライト±方解石の弱変質帯が形成されている。流体包有物によれば、鉱液は低塩濃度（ $\text{NaCl} \leq 4.1$ 重量%）で温度207～253℃である。これらの鉱物組合せや流体包有物の特徴から、鉱化作用をもたらした熱水は深部まで対流を起した、ほぼ中性pHの、塩化物型流体であると結論される。金の沈殿は、熱水性角礫形成時の熱水の沸騰に伴って効果的に生じた。

熱水対流系の縮小に伴って、凝縮水から生じた表層の酸性水が割れ目を伝って下部に浸透し、カオリン変質を生じた。この酸性水による炭酸塩や氷長石等の部分的溶出が2次的空隙を作り、透水性を増して浅性酸化作用の進行に重要な役割を果たした。浅性期の金の再濃集がみられるが、酸化帯と硫化帯で金属の存在比に差はなく、金はチオ錯体で運ばれたものが非晶質酸化物の表面に吸着されたと考えられる。

(2) ラオス

B. Komphasouk (Department of Mines and Geology, Lao PDR): Gold mineralization in Lao PDR

ラオスでは、今までのところ金鉱床についての記録はなく、プラーサーについてのわずかな徴候があるだけである。1982年から全国をカバーする地質図作成のための調査と鉱物資源予備探査が始まっており、1988年からは資源探査のために海外からの投資を受け入れる法律が整備された。

(3) タイ

W. Channipa (Department of Mineral Resources, Thailand): Gold exploration in Doi Tung Development Project

Doi Tung Development Project は、タイ北部、ビルマ・ラオスとの国境に接する Chiangrai Province の 150km² の地域を、鉱物資源を含めて総合開発する計画である。1987年に五万分の一の地質図および地球化学図が完成し、金鉱化作用の3つの有望地域が見つかった。とくに Ban Pa Hee 地域で現在精密調査が行われており、河川堆積物、風化母岩、石英脈に60ppb~11.5ppmの金の異常が見つまっている。

(4) 韓国

Hwang, Duk-Hwan (Korea Institute of Energy and Resources): A study on geology and epithermal gold mineralization of Chungmu-Mirugdo area in southeast part of Korea

Tongyoung 鉱床は、後期白亜紀の安山岩および安山岩質火山砕屑岩中に胚胎する浅熱水性鉱脈型鉱床で、平均品位金8.4g/t、銀140g/t、日産140~150トンである。4つの主要鉱化期があり、第I期は、黄鉄鉱がベースメタル硫化鉱物、輝銀鉱、含金銀硫塩鉱物を伴う。第II期は、炭酸塩鉱物のうち含銀閃亜鉛鉱が“銀グロ”を形成する。閃亜鉛鉱のFeS含有量は鉱化期ごとに変化する。MnS含有量が相対的に高いのが特徴である。石英中の流体包有物の充填温度は134~223℃、塩濃度は1.2~3.8重量%である。

Mirugdo 鉱床は、安山岩質~流紋岩質凝灰岩中の硫化鉱物鉱染型(一部細脈)の鉱床で、パイロフィライト、明ばん石、カオリナイト、珪化岩からなる幅300m、長さ1kmの変質帯を伴う。この鉱床の規模と鉱化作用のタイプを確定するには、今後の研究が必要である。

(5) パネル討論

R. W. Henley 氏と佐藤社郎氏の司会のもとに、鉱床成因モデルをいかに探査に応用するかについて、討論が行なわれた(写真25~26)。しばしば見られる誤りは、モデルを固定的に考えて、目の前の鉱床を無理にどれかのモデルにあてはめようとするやり方である。モデルが主張している本質を理解したうえで、探査対象地域の地質や熱水系をよく観察することが大事である。Y. Sunarya 氏と J. W. Hedenquist 氏から、ともにインドネシアにおけるご自分の探査経験が披露された。

一方、インドの Krishnamurthy 氏からは、海外から資源探査に入る鉱山会社が地元の政府に協力的でなく、得られた情報も持ち帰ってしまっただけで地元にとって何のメリットもない、という問題が提起された。今後国際協力を進めるに当たっては、これは充分考慮されなければならない問題だろう。

1989年11月号

6. 地質見学会

この地質巡検では、熱水性金鉱床の二つの典型……酸化イオウ卓越型(high sulfidation type)および還元イオウ卓越型(low sulfidation type)……を見ることと、マagma活動の地表面現としての火山噴気や活動的熱水系の地表面現としての熱水爆裂孔を見ることを目的として、鹿児島県の春日、岩戸、串木野、菱刈の四鉱山と阿蘇火山、別府熱水系を訪れた。巡検の後半の阿蘇火山と別府では、中岳火口活動活発化による登山規制と土砂降りの雨に阻まれ、予定の見学を断念せざるを得なかった。従ってここでは鉱山見学の模様と現地討論の一部を紹介するに留めたい。

(1) 春日鉱山・岩戸鉱山(南薩地域)

春日、岩戸鉱床は近傍の赤石、栗ヶ野両鉱床とともに南薩型金鉱床と呼ばれ、酸化イオウ卓越型鉱床の例として、米国コロラド州サミットビル鉱床と比較される。酸性熱水による溶脱作用の為多孔隙質となった珪質岩中の鉱染鉱床であり、硫砒銅鉱、銅藍、硫黄など高いイオウ分圧を示す鉱物を伴っている。この種の鉱床については、初期に活動した酸性熱水が透水性の高い溶脱珪化岩を生成し、引き続き循環した中性pH塩化物型熱水が金を運搬沈殿した可能性が指摘されている。化学的に異った熱水のオーバープリントがどのような変質パターンを残すのか、初期の酸性熱水の起源とその化学的進化の原因は何かを考察すること等が見学のポイントであった。春日鉱山では露天採掘場の見学に先立ち、鉱山側から鉱山の沿革、生産状況、鉱床の形態、周辺の地質学的背景等について詳細な説明を受け、約30分にわたって質疑応答の機会を得た。春日鉱床周辺には稼行中の本鉱体の他にも多くの溶脱珪化岩体が知られている。個々の岩体について金の含有率が調査されており、全ての珪化岩体が金を伴うとは云えないことが分かっている。本鉱体の富鉱部が東西方向に延びていること、鉱体の中軸部に東西系の割れ目や角礫化帯が発達していることから、酸性変質帯の形成後に発生した東西系のセンスをもった構造運動が、熱水の流動を活性化し鉱化作用をもたらした可能性が指摘された。この“破壊現象”の原因を巡り、議論が尽きなかった。鉱石には石英の二次的沈殿組織が卓越し、母岩(安山岩質凝灰角礫岩)が多孔隙珪化岩となった後に珪酸が再び付加されたことが読み取れた。珪化岩からカオリン質粘土化岩、更に外側のプロピライト化岩への移行は漸移的であり、熱水が母岩中へ浸透しやすかったためと解釈された。岩戸鉱山では、岩下鉱床、荒平鉱床、丸山鉱床の露天採掘場を見学出来た。複数の珪化岩体が相対して連らなっていること、硫化鉱物に乏しく富鉱部を

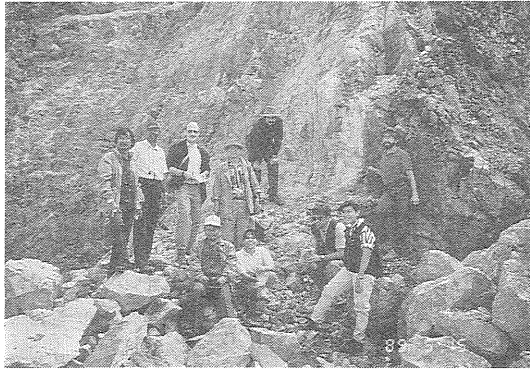


写真27 岩戸鉱床丸山鉱体の珪化岩体外縁部での討論風景。中央の白色部がカオリン質粘土化帯、その右側が溶脱珪化帯、左側がプロピライト化帯。(丸山第2鉱体西壁)

肉眼的に識別することが困難であることから、見学地点が鉱化作用の中心なのか縁辺なのか見当が付き難かった。鉱山側の説明によれば、溶脱珪化岩体そのものは東西に配列し、鉱体内にも東西系の割れ目群が卓越するが、これ等と金の高品位部は必ずしも対応しない。鉱化熱水は特定の割れ目に集中することなく、多孔質珪化岩中を三次元的に浸透していったものと想像され、東西系割れ目群は鉱化作用以降の構造運動の産物と解釈された。熱水の流動は母岩の透水性に強く影響される。その結果として、変質帯が高透水性の凝灰角礫岩中で肥大し、低透水性の安山岩中で縮少する傾向が表われる。今回の見学会では丸山第2鉱体で安山岩中の変質境界部を詳細に見ることが出来た(写真27参照)。多孔質珪化岩からカオリン質粘土化帯を経てプロピライト化帯に到る水平距離はわずか2 mに過ぎず、またその境界も極めてシ

ャープで垂直に近い。これは多孔質珪化岩と、未変質安山岩の透水性の大きな差を反映した現象と解釈された。

(2) 申木野鉱山・菱刈鉱山(北薩地域)

両鉱山の鉱床は還元イオウ卓越型(あるいは石英-氷長石型)鉱脈鉱床の典型に挙げられている。このタイプの鉱床では金の沈殿機構として熱水の沸騰の重要性がしばしば指摘される。沸騰現象はどのような鉱物組合せや沈殿組織を残すのか、それは肉眼的に如何に識別されるのか、急激な沸騰現象のきっかけが何であったのか等が見学のポイントであった。申木野鉱山は本格的採掘活動は終了しているものの、一般向けの見学コースが整備され“ゴールドパーク申木野”として営業されている。坑内見学コースの鉱脈露頭はクリーンアップされ見やすい。石英-氷長石金鉱脈と、末期生成になる方解石脈の示す縞状沈殿組織、角礫構造を詳細に観察し、金の沈殿が定常のプロセスではなく、進化しつつある熱水系の中で限られた期間に発生した破壊的イベントに伴われているとの印象を深めた。菱刈鉱山では、鉱山側からビデオ等を使用して、発見と開発の経緯、生産状況、地質学的背景に関する詳細な解説を受ける機会を得た。菱刈鉱床は系統的な探査活動により発見された潜頭性大規模高品位鉱床であり、参加者の関心も如何にして鉱床を発見し得たのかという点に質疑が集中した。石英-氷長石金鉱脈構成鉱物の結晶粒子は概して微細で硫化鉱物にも乏しく、縞状組織は存在するが顕著には見えない。結晶粒径が微細であることから、大きな過飽和度をもった溶液であったことが容易に推定される。溶液の沸騰に伴う急激な温度低下の帰結と解釈された。菱刈鉱床の高品位鉱が純白に近い玉髄質石英で一見高品位に見えないことは参加者に強い印象を与えた様である。

最近中国で発見された新鉱床

岸本文男(元所員)

Fumio KISHIMOTO

福建省の火山底性岩石区で稀土類鉱床

福建省周寧県の泗橋郷一帯に火山底性火山岩体が分布するが、その泗橋郷地区で地質調査中の福建省広域地質調査隊は多数の稀土類鉱体の露頭を発見、詳細に調査し、試料を採取して分析し、一応の地質鉱量を概算し、さらに同隊は呉厝坑(注:地名)を選んで重点探査区域

とし、トレンチ探鉱やピット探鉱を行って鉱量を把握し、地質調査・鉱床探査報告を取りまとめた。火山底性岩石区での稀土類鉱床の発見と探査は、中国の南嶺山脈以南の稀土類鉱床生成の規則性および賦存状態を研究するための重要な根拠を提供してくれたことになる。

晋文(中国地質報 1988.11.18)