

チリ北部マリクンガ帯の斑岩金鉱床

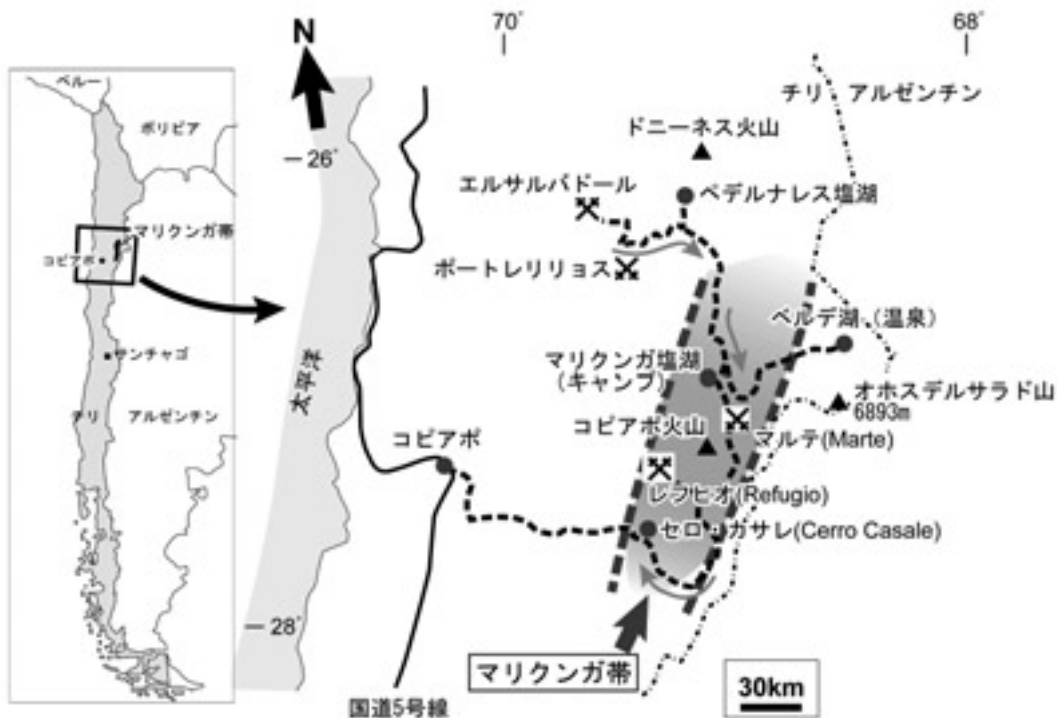
村上 浩康¹⁾・実松 健造²⁾

1. はじめに

金はその輝き・稀少性と化学的な安定性により、有史以来人々を魅了し続けてきた(山本, 1992)。現代文明においても、金はエレクトロニクス産業に不可欠な機能材料として、携帯電話、パソコンなど我々の日常生活に欠くことのできない多くの電化製品に使用されている。金の産地も、発見・採掘・枯渇のサイクルを繰り返しながら、時代の移り変わりと共に変化し続けている。

チリ北部のアンデス山脈にはマリクンガ帯と呼ばれる一画がある(第1図)。この地域は、1970年代後半から1980年代初頭にかけて中近東の政情不安による金価格高騰に伴う金探鉱ブームの際、南米での多くの金鉱床発見にあいまって一躍脚光を浴びた地域のひとつである。

2004年11月14日から20日にかけてチリのプコンで国際火山学・地球内部化学協会会議(IAVCEI)が開催された。この会議に先立ち行われた巡検において、筆者らはチリ北部・マリクンガ帯の斑岩金鉱床群を観



第1図 巡検コース概略図。太点線で挟まれた灰色部はマリクンガ帯の位置を示す。黒色点線は通過した道路、矢印はエルサルバドルからコピアポに向かう時計回りの巡検行程を示す。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門
2) 九州大学大学院 工学府 地球資源システム工学専攻

キーワード: 斑岩金鉱床, チリ北部, マリクンガ帯, 中新世, 縞状石英脈, IAVCEI

察する機会を得た。この小文ではガイドブック (Mpodozis and Vivallo, 2004) に基づき、現地を観察した産状を中心としてマリクンガ帯に分布する斑岩金鉱床を紹介する。なお、マリクンガ帯の斑岩金鉱床に関する地質・鉱床成因の詳細については村上 (2005) を参照されたい。

2. 巡検の概要

マリクンガ帯は、チリ第Ⅲ州の中でも南緯 26° ～ 28° のアルゼンチン国境に近い標高4,000mから6,000mのアンデス山脈中央に位置する。マリクンガ帯の東方には世界最高峰の活火山である6,893mのオホスデルサラド山をはじめ、標高5,000mを超える火山が分布する(第1図)。

巡検は、斑岩銅鉱床を採掘する鉱山城下町であるエルサルバドルから始まり、マリクンガ帯に分布する火山や塩湖を眺め、マルテ (Marte)、レフヒオ (Refugio)、セロ・カサレ (Cerro Casale) の斑岩金鉱床を観察し、コピアポに至る4泊5日の行程であった(第1図、写真1-3)。この地域はアタカマ砂漠の南縁にあたり、年降水量が250mm以下の砂漠気候に分類される。このため、水量不足により川の水が海まで達せず途中で消失する末無川も機上から認められる(写真4)。サンチアゴからエルサルバドルに至る空路では、多くの斑岩銅鉱床の露天採掘場や乾燥気候下でのブドウ栽培用灌漑施設などの上空を通過するので、チリの主要輸出品目である銅やワインの原料産地を実感することができ、飽きることがない(写真5、6)。



写真1 エルサルバドル鉱床(写真奥)と円形に区画された街並(写真手前)。



写真3 コバルトブルーの湖面を持つベルデ湖。塩分濃度が高く、湖岸には塩が析出している。



写真2 アルゼンチン国境沿いに分布する火山群。手前の暗色部は約3.0Maの石英安山岩、奥の成層火山は5.0Maの安山岩からなる。

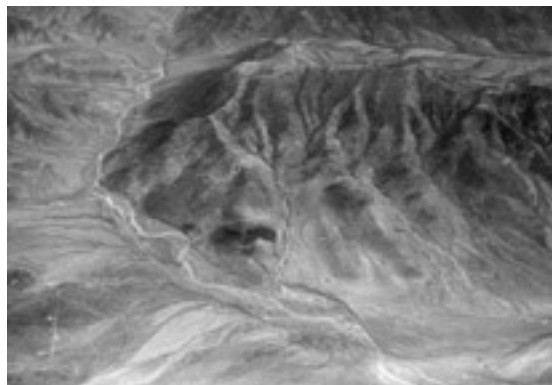


写真4 航空機上から認められる末無川。写真左上が川の上流。写真右下の下流域では河川が干上がっている。



写真5 斑岩銅鉛床露天採掘場。ラ・セレナー・コピアポ区間の航空機から撮影。



写真6 コピアポ郊外に広がるぶどう畑。チリ産ワインの原料になる。

3. 地質概要

マリクンガ帯には、金-銀-銅を産する高硫化系浅熱水性鉛床や斑岩型鉛床及び鉛徴地が多数分布している(Vila and Sillitoe, 1991)。1980年代以来実施された調査を総合すると、マリクンガ帯には約1,300tの金が埋蔵するとされている(Camus, 2003)。以下、今回の巡検ガイドブック(Mpodozis and Vivallo, 2004)に基づくマリクンガ帯の地質図を第2図に示す。マリクンガ帯の地質は北北東方向に帯状分布する後期漸新世～鮮新世の火山岩類で構成されており、その火山岩類の中を縫うように、古生代から三疊紀の花崗岩類や火山岩類から成る基盤が高角逆断層で境された帯状地塁ブロックとして北～北北東方向に露出する。

マリクンガ帯では火成活動に伴う鉛化作用として浅熱水性金鉛床と斑岩金鉛床が卓越する。浅熱水性金銀鉛床であるエスペランサやラ・コイバ鉛床などは石英安山岩質ドームに伴われている。一方、斑岩型金鉛床は斑岩を中心として鉛床が認められ、レフヒオ鉛床は前期中新世の石英安山岩質斑岩、マルテ鉛床及びセロ・カサレ鉛床(アルデバランとも呼ばれる)では中期中新世の角閃石を特徴的に含む閃緑岩質斑岩が鉛床関連火成岩となっている(Vila and Sillitoe, 1991)。



第2図 マリクンガ帯の地質図。Kay et al. (1994)を一部改編。

4. 斑岩金鉱床の実例

マリクンガ帯では、典型的な斑岩金鉱床であるレフヒオ鉱床のベルデ鉱体や、“金に富む”斑岩銅鉱床であるセロ・カサレ鉱床などで、斑岩金鉱床の多様な産状を垣間見ることが出来る。

斑岩金鉱床では斑岩を中心とする熱水変質帯の累帯分布が認められる。熱水変質帯は下記の3種類に分類され、鉱床上部では石英や明ばん石で代表される高度粘土変質帯が発達し、鉱床深部の斑岩中には黒雲母やアルカリ長石を伴うカリウム変質帯が認められ、斑岩縁辺部やその周辺母岩には広範囲に石英、セリサイトや緑泥石などを特徴的に含む中性変質帯が分布する。これらの変質帯中には金鉱化を伴う幅0.1～3cmほどの脈と変質部が認められる。それらは、斑岩銅鉱床における鉱脈形成時期に基づく区分(Gustafson and Hunt, 1975)に従い、A脈、縞状石英脈、D脈及び石英-明ばん石変質部の4種類に区分されている(Muntean and Einaudi, 2000)。このうち、A脈はカリウム変質帯に、縞状石英脈は主に中性変質帯に伴われる。

A脈は石英-磁鉄鉱を主体として鉱床形成初期に形成され、その脈際にはアルカリ長石の変質ハローが一般に発達している。A脈はセロ・カサレ鉱床地で顕著に認められる。一方、縞状石英脈や緑泥石に富む中性変質はベルデ鉱体で卓越するが、セロ・カサレ

鉱床では変質累帯の頂部付近にのみ発達している。以下、マリクンガ帯に分布する斑岩金鉱床の主な産状を見てゆくことにしよう。

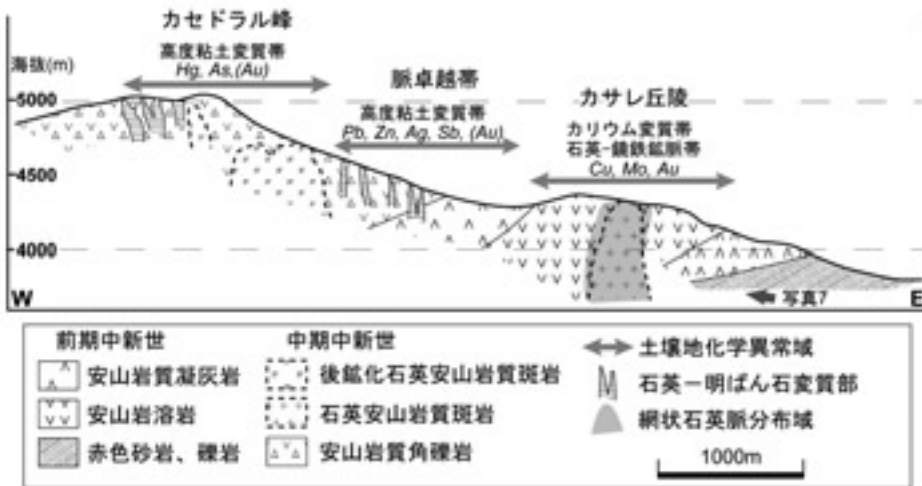
4.1 セロ・カサレ鉱床

セロ・カサレ斑岩型金・銅鉱床はマリクンガ帯南部の標高約4,100～4,400mに位置している(写真7)。セロ・カサレ鉱床の金品位は約0.70g/t、金量は約900t、銅品位は0.35%、銅量は約450万tと見積もられている(Camus, 2003)。現在、カナダのPlacer Dome社が探査を継続中で、開発はまだ行われていない。

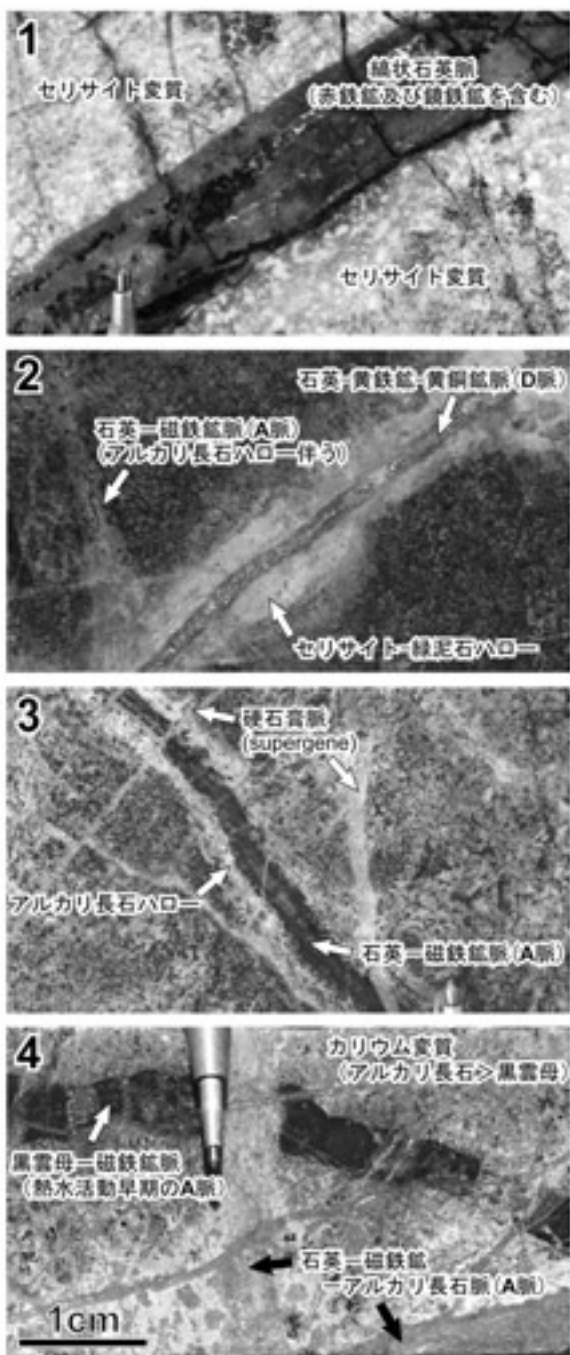
Vila and Sillitoe (1991)によれば、セロ・カサレ鉱床



写真7 探鉱継続中のセロ・カサレ鉱床(手前右)及びカセドラルピーク(写真中央の山頂)を西方に望む。



第3図 カサレ丘陵の斑岩を中心とするカリウム変質帯から、高度粘土化変質帯を伴うカセドラル峰までの東西約3.5kmに渡る、セロ・カサレ鉱床模式断面図 (Villa et al., 1991)。



第4図 セロ・カサレ鉱床における脈。写真1から4に向かって産出深度が深くなり、1はカサレ丘陵地表から394m、2及び3は556m、4は904mに産する。それぞれ、1は縞状石英脈。2はD脈に切られるA脈、3は石膏脈に切られるA脈、4はA脈に切られる黒雲母-磁鉄鉱脈。説明は本文を参照。4のスケールはすべての写真共通。

では中粒の石英閃緑斑岩が前期中新世の安山岩に貫入し、細粒の長石斑岩、アプライト、角れき岩といった多数の不規則な岩脈に切られている。

鉱床は東西3.5km、地表からの深度1kmの範囲内に分布し、斑岩金鉱床から浅熱水性環境における鉱化・変質作用の変遷を追跡することができる(第3図)。石英閃緑斑岩中のカリウム変質帯には金-銅鉱化作用を伴う石英-鏡鉄鉱脈群が発達し、その西方の標高4,600m付近では緑泥石変質した安山岩中に石英-明ばん石黄鉄鉱が発達するようになる。石英-明ばん石を伴う変質部とカリウム変質帯の間には漸移帯としてセリサイト-電気石変質帯が認められる。更に西方の標高4,800mを超えるカセラル峰周辺には、溶脱型珪化岩が卓越する。これらを一連の変質帯として見ると、東から西へ、つまり標高の低い方から高い方に向かってCu-Mo→Pb-Zn-Ag→Hg-Asという土壌中の金属元素に明瞭なゾーニングが認められる。

本鉱床で実施されたボーリングコアに認められる特徴的な脈の産状を第4図に示す。鉱床深部のコアには黒雲母-磁鉄鉱脈が認められる(第4図4)。この脈はA脈に切れ、脈際の形状が不規則なことから斑岩貫入直後に深部で形成したと考えられる。石英-磁鉄鉱を主体とするA脈の脈際にはアルカリ長石の変質ハローが発達する(第4図2, 3)。A脈の分布はカリウム変質帯に限られ長石斑岩周辺に多い。A脈周辺で唯一観察される硫化物の黄銅鉱は、磁鉄鉱や鏡鉄鉱を伴うカリウム変質帯に鉱染している。一方、

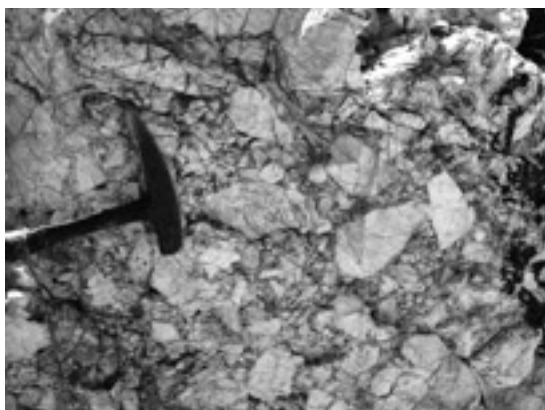
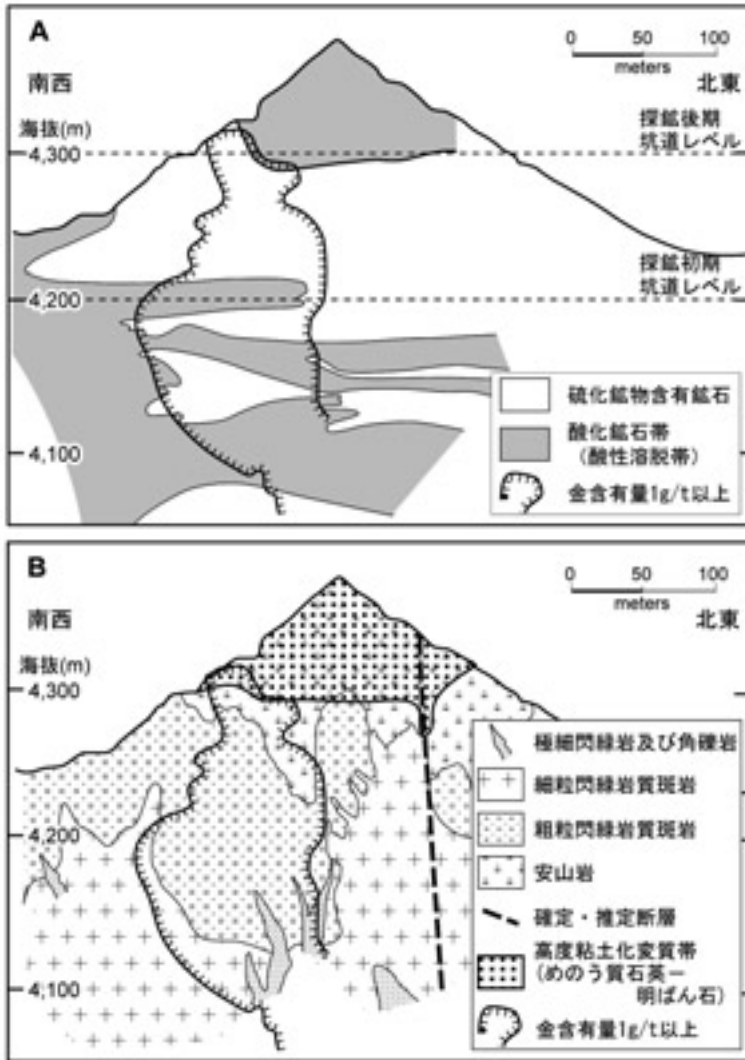


写真8 セロ・カサレ鉱床上部、セリサイト変質した角礫岩中に発達する石英-鏡鉄鉱の縞状石英脈。



第5図
マルテ鉱床地質(A)及び鉱石分布(B)
断面図 (Villa *et al.*, 1991).

A脈と同様の深度で、A脈を切る石膏脈が認められる(第4図3)。このような石膏脈は局所的に酸化鉄や黄銅鉱を含むとされ、浅成酸性溶脱起源とは異なる鉱化作用初期の硬石膏脈の存在を示唆している。縞状石英脈は標高4,300m以上のセロ・カサレ鉱床上部に卓越し、鏡鉄鉱や磁鉄鉱等を伴う(写真8)。周辺母岩にはセリサイト変質が発達し(第4図1)、石英閃緑斑岩岩脈、長石斑岩岩脈、A脈を切る。

D脈は黄鉄鉱と少量の石英や黄銅鉱を伴い、A脈や縞状石英脈を切って産する(第4図2)。多金属脈は自形の石英、重晶石、少量のイライト、そして鉄鉱物が酸化してできたと考えられる褐鉄鉱から成る。多金属脈の観察結果から、硫化物として黄鉄鉱、黄銅

鉱、閃亜鉛鉱、テトラヘドライト-テナンタイトが確認されている。D脈と多金属脈は共に貫入岩、岩脈、A脈を切っていることから鉱化作用末期の産物と考えられる。D脈と多金属脈との時間的な関係は明らかになっていない。

4.2 マルテ鉱床

マルテ鉱床は、金に富む斑岩銅鉱床とは異なる“斑岩金鉱床”として初めて記載された(Vila *et al.*, 1991)。1981から1987年にかけて、アングロアメリカ社及びコミンコ社(現在のテック・コミンコ社)の現地子会社による探鉱の結果、平均金品位1.43g/tで4,600万トンの埋蔵鉱量が確認された。この探査活動によ



写真9 マルテ鉱床の露天採掘跡。

り、4,300mレベルの坑道では黄鉄鉱などの初生硫化物が卓越し、鉱床下部の4,200mレベルで浅成酸性溶脱作用により、初生の黄鉄鉱がジャロサイト(鉄明ばん石)に置換された酸化鉱石帯が分布するという特異な鉱石分布が明らかになった(第5図A)。なお、酸化鉱石帯中の金含有量の二次富化は認められず、銅含有量は初生鉱石(500-800ppm)に比べてむしろ低い(100-300ppm)。1989年から、露天採掘鉱石を人工的に堆積させ、そこに直接シアン溶液を散布して金属を回収する青化処理法ヒーブリーチングによる操業が開始されたが、操業は開発から間もない1年後に休眠状態となった(写真9)。これは、4,000mを超す標高における硫化鉱石主体のヒーブリーチングでは、シアン化物による硫化鉱物の溶解に長時間を要するため金がほとんど回収できなかったことに起因するらしい。

鉱床は斑岩状安山岩溶岩に貫入した角閃石-黒雲母を含有する閃緑岩質粗粒斑岩、細粒斑岩、極細粒斑岩及び角礫岩中に発達している(第5図B)。熱水変質帯は、鉱床上部で帽岩様に発達する明ばん石を伴う高度粘土変質帯と鉱床下部の緑泥石・イライト中性変質帯の2種類に分類され、後者に含金縞状石英脈ネットワークが伴われる(第5図B)。高度粘土化変質帯では、めのう質石英が安山岩溶岩の石基を交代し、明ばん石及びカオリナイトが斑晶斜長石を交代して産するほか、脈状の石膏や溶脱した斜長石の空隙を埋める自然硫黄も認められる。この明ばん石のK-Ar年代値として 13.3 ± 0.4 Maが得られている(Sillitoe

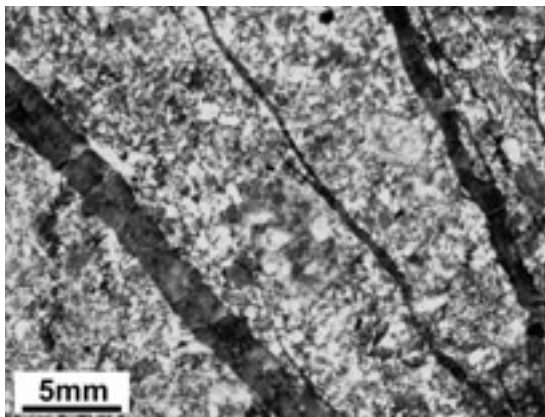


写真10 マルテ鉱床の中性変質帯に発達する縞状石英細脈。脈の中心に黄鉄鉱が濃集。

et al., 1991)。一方、黄鉄鉱や赤鉄鉱及び磁鉄鉱も斑岩中に鉱染状に認められ、最も卓越する赤鉄鉱は、地表水による風化生成ではなく、その多くがマグマ-熱水系初期に深部で生成したと考えられている。

マルテ鉱床深部の斑岩中では、カリウム変質帯に特徴的な黒雲母やアルカリ長石が緑泥石化している場合がある。具体的には、1) 葉片状の熱水性黒雲母や斑岩中の斑晶角閃石の仮像を示す黒雲母が緑泥石化、2) 斑晶や基質の斜長石を交代したアルカリ長石のリムに沿って緑泥石が晶出している。従って、斑岩金鉱床における一連の熱水活動初期に発達していたカリウム変質帯に中性変質帯や縞状石英脈が重複して形成されたことを示している。

中性変質帯中の縞状石英脈網状密集する部分は金品位1g/t以上の鉱石分布域に一致し、部分的に比較的高い金品位(2.5g/t)を示す。このような金の高品位部で赤鉄鉱・磁鉄鉱及び緑泥石が卓越するのに対し、鉱床の外側や上部に向かうにつれセリサイト及び黄鉄鉱が増加する傾向がある(写真10)。なお、明ばん石を伴う高度粘土変質帯の金品位は0.5g/tを超えることはない。これら含金石英脈中の流体包有物の研究から、マルテ鉱床は古地表面から600-700m下部に貫入した閃緑岩質斑岩類の活動に関連する沸騰を伴う熱水活動によって形成されたと考えられている(Villa *et al.*, 1991)。

4.3 レフヒオ鉱床

レフヒオ斑岩金鉱床はマリクンガ帯の南西部に位



写真11 レフヒオ鉱床のパンチョ露天採掘場。

置し、標高約4,000～4,600mに分布する。鉱床は、1984年の金鉱化帯発見を端緒とし、1995年から1日あたり3万tの鉱石処理能力で露天採掘により開発されている(写真11)。精錬にはシアンを用いた青化処理法ヒーブ・リーチングを採用し、1996～2001年に出鉱した金量は約44t、平均金品位は約0.97g/tである。以下のレフヒオ鉱床の記述は、Muntean and Einaudi (2000)に基づく。

レフヒオ斑岩金鉱床は後期漸新世～前期中新世(24-22Ma)のレフヒオ火山岩類に胚胎されている。レフヒオ火山岩類は安山岩質～デイサイト質の溶岩流、角れき岩、石英安山岩質斑岩ドームから成り、これらに石英閃緑岩質斑岩や角れき岩が貫入している。

レフヒオ鉱山にはベルデ(Verde)鉱床とパンチョ(Pancho)鉱床の2つの鉱床があり、両鉱床とも石英閃緑岩質斑岩を中心として発達している。鉱床には変質累帯が認められ、緑泥石-磁鉄鉱-アルバイト変質部(緑泥石変質帯)が斑岩を中心とする半径数100mの範囲に発達し、その外側には黄鉄鉱-アルバイトを伴う粘土変質帯(中性変質帯)が分布する。また、鉱床浅部には石英-明ばん石脈が分布する。パンチョ鉱床の深部では貫入岩中やその周辺にA脈とカリウム変質帯が見られ、A脈は磁鉄鉱、黒雲母、石英、黄銅鉱を含む。A脈とその周辺の鉱化作用初期のカリウム変質帯の金品位は0.5-1g/t、銅品位は約0.1%である。一方、縞状石英脈はベルデ鉱床とパンチョ鉱床の上部の緑泥石変質帯で卓越し、A脈よりも後期生成である。縞状石英脈は金品位0.5-2g/t、銅品位約0.05%であり、A脈に比べ金に富んでいる。

5. 斑岩型鉱床における金の存在形態

自然金粒の存在形態は、精錬工程での金抽出の効率や可採鉱量の算出などに大きく影響を与えることから経済的に重要である。

斑岩金鉱床における金は、極細粒自然金として、縞状石英脈の磁鉄鉱を含む暗色部の石英結晶中に多く認められるほか、石英中の黄鉄鉱とも共生することが記載されている(Muntean and Einaudi, 2000)。更に、脈際母岩中の熱水変質鉱物であるアルカリ長石や緑泥石と共生する自然金も認められている。レフヒオ鉱床では、自然金が脈形成末期の脈際変質鉱物と共に産することから、縞状石英脈形成末期にも金鉱化が卓越したと考えられている。

一方、Kesler *et al.* (2002)はバツヒジャウなどの金に富む斑岩銅鉱床における金の存在形態の多様性について、SIMS(二次イオン質量分析装置)を用いて明らかにした。それによると、微粒の自然金として産する金が最も多く、通常それらは斑銅鉱粒境界に晶出している。銅または鉄を含む鉱物自体にも様々な濃度で金が含まれており、斑銅鉱には1ppm、輝銅鉱やコペリン中には10～20ppm程度の金が固溶されている。しかしながら、黄銅鉱中に固溶する金は0.12ppm以下と極微量であり、とりわけ磁鉄鉱は、金含有量の高いゾーンに認められる傾向があるにも関わらず、黄銅鉱に比べて更に低い金含有量を示している。このような鉱物間における金含有量の違いは、斑岩銅鉱床形成初期の高温環境下(400～600℃)におけるCu-Fe系硫化鉱物中に固溶される金含有量の違いによって規制されているらしい(Kesler *et al.*, 2002)。なお、輝銅鉱やコペリン中の高い金含有量は、酸化地

表水の環流による風化作用(いわゆる supergene 変質)によって金が二次的に濃集していることによる (Cloke and Kelly, 1964).

6. 巡検を終えて

マリクンガ帯は標高3,000m以上の高地に位置しているため、南半球では初夏となる11月でも、朝晩には10℃前後と冷え込む。巡検2日目の標高3,500mのキャンプでは、食欲も失せるほどの激しい頭痛や悪寒を伴う“高山病”に見舞われた。特に鉱山では、空気中の酸素濃度の低下は採掘に使用する重機の性能を低下させ、高度順応するとはいえ労働者にとっても大きな負担である。加えて、アタカマ砂漠に代表されるマリクンガ帯周辺の乾燥気候は、人間が居住することを長年に渡り拒んできた。

このような厳しい環境・気候条件リスクがあるにも関わらず、マリクンガ帯において多くの斑岩金鉱床が探査・開発・採掘されてきた背景には、低品位鉱石からでも経済性に見合う金回収を可能にしたヒーブリーチングなどの精錬技術の発達がある。また、低品位鉱床では大型重機を投入する労働集約型の大規模露天採掘も行われ、これが採掘コストの更なる低減化をもたらしている。従って、低品位でも大規模であれば採算がとれることから、金鉱床の探査対象地域は今後も世界中のあらゆる辺境にまで拡大し続けるだろう。

一方、これら大規模・低品位鉱床における露天採掘及び金回収化学プラントによる鉱業活動は自然環境の変化(破壊)を必ず伴う。また、旺盛な経済活動が見込まれる中国、インド、ロシアは世界人口の約4割を占め、2000年以降もGDP成長率約5%以上を示している(内閣府, 2005)。このような現状は、日本のみならずこれらの国々の近代化、経済成長に見合う鉱物資源を確保するため、正確な見通しに立った効率の良い探査、製錬、鉱害防止技術の開発が今後も

必要であることを強く物語っている。

謝辞: チリで開催された国際火山学会 (IAVCEI) への参加費用につき、独立行政法人日本学術振興会「科学研究費補助金」及び「国際学会等派遣事業」からの助成金の一部を使用しました。

文 献

- Camus, F. (2003) : Geología de los sistemas porfiricos en los Andes de Chile, Servicio Nacional de Geología y Minería. 267 p (スペイン語).
- Cloke, P. L. and Kelly, W. C. (1964) : Solubility of gold under inorganic supergene conditions, *Economic Geology*, 59, 259-270.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P. (1975) : The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol.*, 70, 857-912.
- Kay, S. M., Mpodozis, C., Tittler, A. and Cornejo, P. (1994) : Tertiary magmatic evolution of the Maricunga mineral belt in Chile. *International Geological Reviews*, 36, 1079-1112.
- Kesler, S. E., Chryssoulis, S. L. and Simon, G. (2002) : Gold in porphyry copper deposits: its abundance and fate. *Ore Geology Reviews*, 21, 103-124.
- 内閣府 (2005) : 世界経済の潮流.
- Mpodozis, C. and Vivallo, W. (2004) : Cenozoic arcs and mineral deposits of the southern central Andes, El Salvador-Maricunga-Ojos del Salado region. IAVCEI general assembly 2004, Field Trip Guide-A4, 28 p.
- Muntean, J.L. and Einaudi, M.T. (2000) : Porphyry gold deposits of the Refugio district, Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 95, 1445-1473.
- 村上浩康 (2005) : 斑岩金鉱床の成因; 斑岩型鉱床のCu/Au比は何に規制されるか?. 資源地質, (印刷中).
- Sillitoe, R. H., McKee, E. H. and Vila, T. (1991) : Reconnaissance K-Ar geochronology of the Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 86, 1261-1270.
- Vila, T. and Sillitoe, R. H. (1991) : Gold rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. *Economic Geology*, 86, 1238-1260.
- Vila, T., Sillitoe, R. H., Betzhold, J. and Viteri, E. (1991) : The Porphyry Gold deposit at Marte, Northern Chile. *Economic Geology*, 86, 1271-1286.
- 山本博信 (1992) : 貴金属の話. 技報堂出版, 213p.

MURAKAMI Hiroyasu and SANEMATSU Kenzo (2005) : Porphyry gold deposits in the Maricunga belt, northern Chile.

<受付: 2005年8月29日>