

ボリビアの錫多金属鉱化帯と花崗岩系列

石原舜三¹⁾

1. ゼノサーマル型鉱床と私

ゼノサーマル型鉱床とは、マグマから分かれた高温の熱水性鉱液が地下浅所に上昇・急冷し、高温鉱物と低温鉱物とが一緒に産出する鉱床であり、古くからあった高温の深成鉱床、低温の浅成鉱床の分類概念に、Buddington (1935) が新しく導入したものである。記載的にはW, Sn酸化物や, Cu, Pb, Zn, Ag, As, Sbなどの硫化物を伴う多金属鉱床と言える性格を持つ。

ゼノサーマル型鉱床が私にとって身近なものとなったのは、スタンフォード大学の鉱床学の教授であったC. F. Parkが彼の教科書 (Park & MacDiarmid, 1964) で、日本の生野・明延鉱床をボリビアの錫石を含む多金属鉱床と共に、ゼノサーマル鉱床の世界的代表例として最初に取り上げた以降である。ゼノサーマル鉱床を認めそれを探す動きは1960年代の国際的な流行であり、我が国でも関根良弘らによって新第三紀のグリーンタフ帯で行われ

た。現在では彼らの予想を超えたものが豊羽鉱山で発見され、詳しく研究されている (Ohta, 1995)。

生野・明延鉱床は、花崗岩系列の立場から見ればチタン鉄鉱系花崗岩類からなる山陽帯の北縁に存在するから、チタン鉄鉱系花崗岩と成因的に関係しているように見える。錫が多い鉱床の性格はチタン鉄鉱系との関連性を暗示し、多くの硫化物を伴う点は磁鉄鉱系の性格である。しかし、直ぐ近くには花崗岩類が分布しないので、火成岩との関連性が不明であった。そこで花崗岩系列を発表する前の1975年春にボリビアの錫鉱床についてその点を確認すべくミシガン州立大学のケリー教授を訪ねた。第二次大戦中から調査していた彼の上司に当たるターネア教授の岩石コレクションがあることを推察してのことである。

コレクションは主に鉱石と変質岩であり、新鮮な一般の火成岩類は少なかったが、それでも十数個のサンプルがありその大勢はチタン鉄鉱系に属し、ごく一部が磁鉄鉱系に属することが判明したが、そ

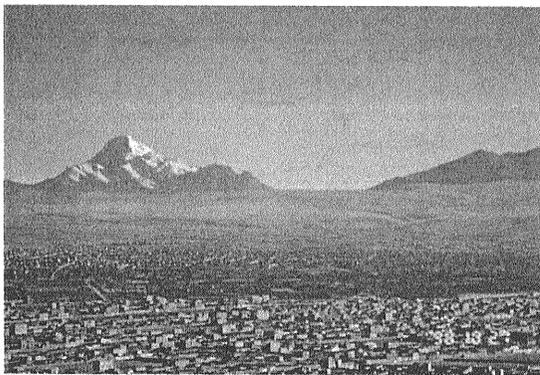


写真1 ラパス空港は海拔4025メートルの高原エルアルトにある。着陸前に見える名峰ワイナ・ポトシ (6088m)。

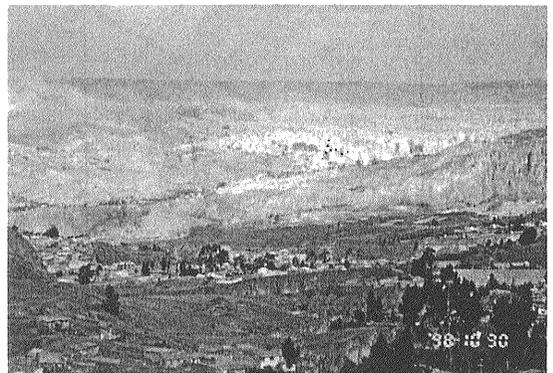


写真2 エルアルトから見るラパスの中心街。

1) 地質調査所 顧問

キーワード: ボリビア, ポトシ, 花崗岩, チタン鉄鉱系, 磁鉄鉱系, 帯磁率, ゼノサーマル型鉱床, 多金属, 錫, 銀



写真3 空港から約800m下って谷間の首都ラパスに入る。



写真4 大統領官邸などがあるマリジョ広場と教会。

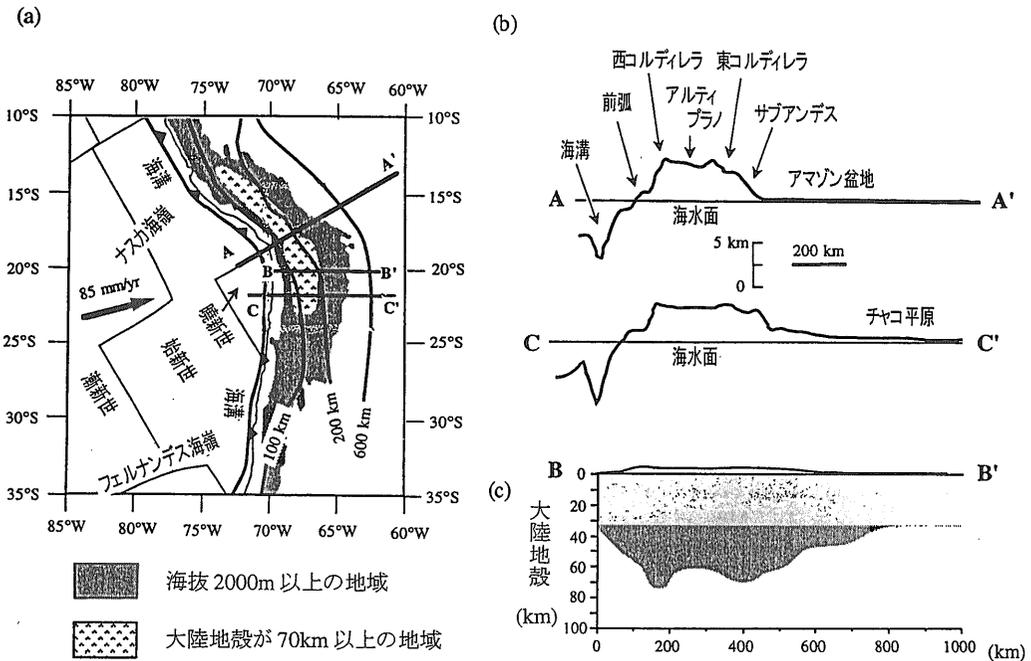
の詳細は不明であった。花崗岩系列と鉍化作用について最初に発表した論文(石原, 1975)の第1表で磁鉄鉍系の項目に一部のゼノサーマル型(?)としたのは, 明延・生野鉍床のほかにその点に配慮したものである。

この様な経験からボリビアの錫鉍床帯を訪問したく思っていた所へ, ボリビア地質学会から特別講演と引き替えに鉍化帯を案内して下さる提案を得て, 喜び勇んで出かけたのが昨年の11月であった。ここでは昔の零戦パイロットが酸素マスク無しで空中戦をしたであろう3000~5000メートルの大気の

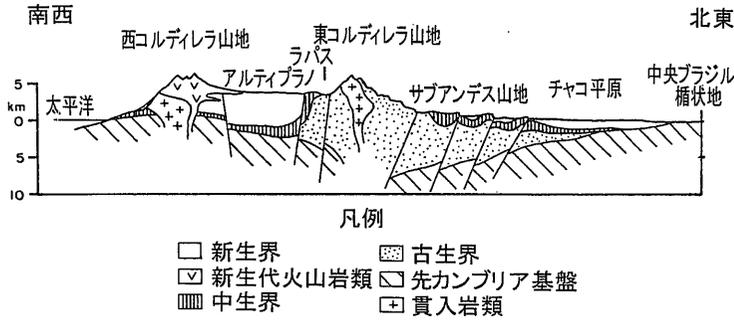
薄い空間で, 私が得た感想を記してみたい。

2. ボリビアの歴史・地勢・地質

ボリビアは面積110万km²で日本の約3倍, 人口は約750万人である。ケチュア族, アイマラ族のインディヘナ55%, メスティソ(インディヘナと白人との混血)32%, 白人12%, その他1%である。ボリビアの歴史は, アイマラ族による旧石器時代に遡ると言われるが, 明らかな文明はティティカカ湖付近で発見されたティワナコ文明(約3000年前), 古代



第1図 南アメリカ大陸屈曲部の地形と地質概況 (Lamb et al., 1997).



第2図
ボリビア錫鉱化帯
の模式的断面図
(James, 1971).

(プレ・インカ)文明、ケチュア族の侵略により築かれたインカ文明(15世紀)などである。そして記録に残るボリビア史はインカ帝国末期(16世紀)以降である。インカ帝国の一部だったボリビアは1532年にスペイン軍によって征服され、以後植民地となるが、18世紀の独立気運に乗って1824年に独立を成し遂げた。当時は太平洋に出入口を持っていたが、チリ硝石をめぐるチリとの太平洋戦争(1879-83年)に破れ、港を失った。1903年のブラジル、1928-35年のパラグアイとの戦争でもボリビアは敗れ、国土の一部を失っている。

ボリビアは南アメリカ大陸西海岸の屈曲部にある。ここでは西方のナスカ海嶺を含む海洋プレートに、南アメリカ大陸が8.5cm/年の速度、低い角度(5-15°)で押し上げていると推定されている。こ

の運動によりアンデス山地の隆起が生じ、海拔2000m以上の高所が広く分布しており、また地下では厚さ70km以上の大陸地殻の肥大化という特殊な現象が起こっている(第1図)。

ボリビアは地形的に、東から西へ、アマゾン上流域の楕状地、ベニーチャコ準平原、隆起帯に入ってサブアンデス帯(写真10)、東コルディレラ(Cordillera Oriental)帯(写真9)、アルティプラノ帯、西コルディレラ(Cordillera Occidental)帯に分けられ、隆起帯は全体として国土の40%を占める。

ボリビアの基盤は中央ブラジル楕状地に属する先カンブリア系で、最東部のブラジルと国境を接するアマゾン川最上流地域に分布する。その西側はベニーチャコ準平原で、ここでは第三紀以降の堆積岩類が基盤上に発達し、ボリビアの主要油田・ガス



写真5 谷間にあるため坂道が多いラパス市街。

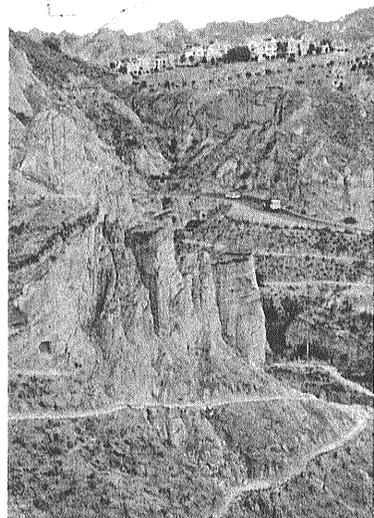


写真6 ラパス郊外の白亜紀堆積岩地層。

田地帯を構成する。これらの地域は冬は乾燥し、夏には雨が多い熱帯気候である。雨は北方で多く、南方に少ない。ボリビア第二の都市サンタ・クルスは南部のチャコ地方に位置し、現在急速に拡大している。

東コルディレラ帯は総延長1000km、幅150-400kmの規模を持つ古生代初期の海成堆積岩類の隆起帯であり、一部に中生代陸成層を含み、更には新生代の内陸盆地が局在する。東コルディレラ帯がボリビアを代表する鉱物資源の宝庫である。その北部のコルディレラ・リアルには花崗岩類が貫入し、6421mのイリヤンプで代表される雪で覆われた花崗岩ピークを構成する。雪線は5300mである。東コルディレラ帯の中-南部は中新世の溶結凝灰岩プラトーと同時代の小貫入岩体が分布し、ポトシ鉱床に代表される多金属鉱床が付随する。

アルティプラノは標高約3900mの高原である。最低地は3653mのウイニ塩湖である。ボリビア地内

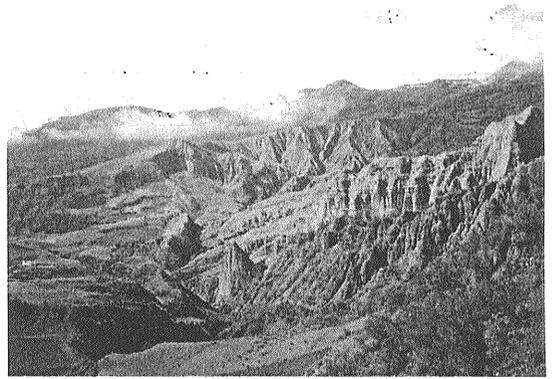


写真7 ラパス南方の堆積岩類とそれに貫入する火山ネック。

では幅約200km、南北延長850kmであるが、ペルー、チリ、アルゼンチン(ここではプナと呼ばれる)を加えるとその延長は1800kmにも達し、チベット高原に次ぐ大きな規模を持つ。アルティプラノは一般に第四紀湖沼堆積物に覆われており、現在でも



第3図
ペルーボリビアの東コルディレラ帯の火成岩区
(Grant et al., 1980).

1. ヤニ
2. ソラタ
3. ゾンゴ
4. ムルラタ
5. イヂマニ
6. キムサ・クルズ
7. サンタ・ベラ・クルズ
8. サン・パブロ岩株
9. モロコカラ溶結凝灰岩
10. サルバドラ岩株, ジャジャグワ
11. コルケチャカ
12. ロス・フラレス溶結凝灰岩
13. カリ・カリ深成岩体
14. セロ・リコ岩株
15. タスナ
16. チョロルケ
17. チョカヤ
18. タタシ
19. イスカ・イスカ

北部の著名なティティカカ湖(海拔3810m, 深度284m)をはじめ, 多くの湖がある. 乾燥気候の南部には塩湖が多い.

西コルディレラ帯はペルー, チリと接する火山帯であり, 海洋プレートの沈み込み帯に関係して生じた中央アンデス火山帯の一部である. 北部のサハマ山(6542m)はボリビア最高峰である. 第三紀陸成層と火山岩類を基盤として噴出した安山岩-デイサイト質火山であり, 北部で成層火山が多く, 南部では4500mの火山プラトーを構成する. ここでも山頂は雪で覆われ, 雪線は5500mである. 水蒸気活動は認められるが, 有史に噴火の記録はない.

3. ボリビアの深成活動

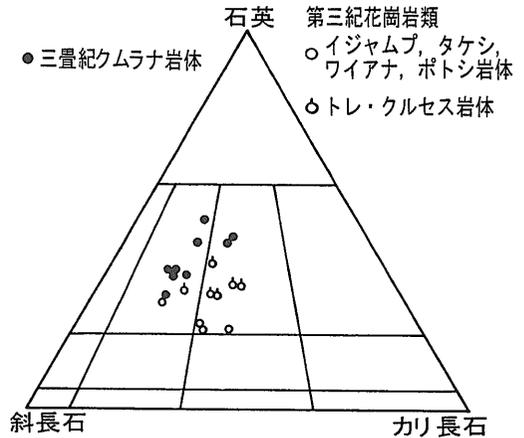
南アメリカ大陸の中西部における顕生代の火成活動では古生代末期のヘルシニア造山期のものが顕著で, アルゼンチン, チリ, ペルーにかけて広く断



写真8 モレインが作り出す浸食地形. ラパス南東方. “月の谷”と呼ばれている.



写真9 ワイナ・ポトシと鉱夫達が眠る墓地.



第4図 ボリビア錫鉱化帯花崗岩類のモード組成 (Sugaki et al., 1988).

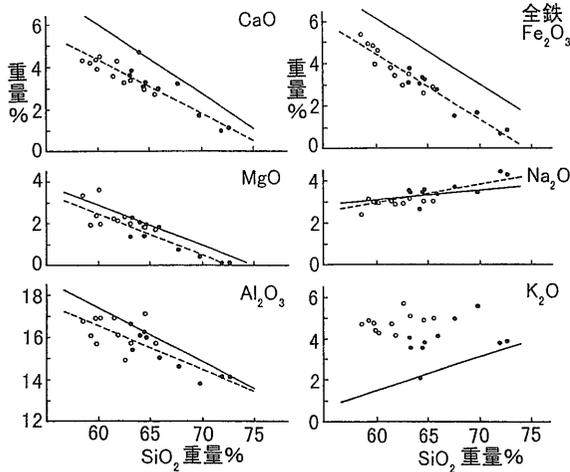
片的に分布している. チリ北部ではこれは主にタン鉄鉱系の黒雲母花崗岩類である (Ishihara & Ulriksen, 1980). ボリビアではこの時期のものは分布せず, 三疊紀花崗岩が最も古い.

ボリビアの深成活動は東コルディレラ帯の北部に見られ, 時代と関連鉱化作用の性質から南北の2群に分けられる.

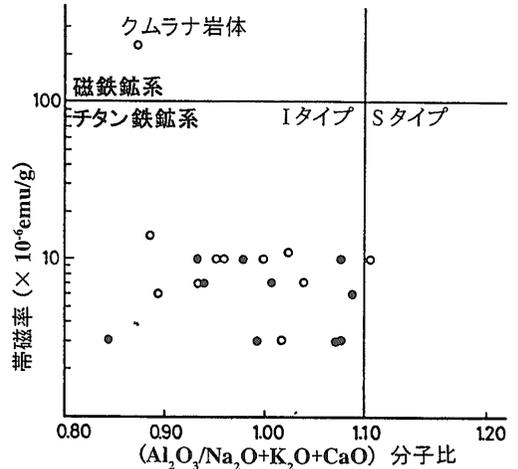
北部深成岩群は北からヤニ, ソラタ, ゾンゴ, ムルラター-タケシ (写真11参照) などのバソリスからなり (第3図), シルルー-オールドビス紀の褶曲した砂岩, 頁岩, 珪岩類に貫入する. 岩質は花崗閃緑岩ないし花崗岩で, 三疊紀-ジュラ紀のK-Ar年代を示す. その南方のイデマニ, キムサ・クルズ, サンタ・ペラ・クルズなどは第三紀のK-Ar年代を示すが, 岩



写真10 高原からサブアンデスに下り, 熱帯植物も増えたゾンゴルートの発電所.



第5図 ボリビア錫鉱化帯花崗岩類のハーカー図 (Sugaki et al., 1988).



第6図 ボリビア錫鉱化帯花崗岩類の帯磁率とアルミナ過剰度 (Sugaki et al., 1988).

質的には花崗閃緑岩ないし花崗岩で、三疊紀のものとの大きな差はない。これら花崗岩類は多数の鉱脈を伴うが鉱量的には小規模である。

これに対し、サンタ・ベラ・クルズ岩体以南の南部鉱化帯では東コルディレラは幅広くプラトー状となり、貫入岩類は主にストック状、岩脈状に古生層に貫入し、浅成相的な岩相を示す。K-Ar年代は23-19Maであるが、ポトシ以南では17-12Maであ

り、全体として南部が若い。

Sugaki et al. (1988)はこれら貫入岩類のうち花崗岩類のモード分析・化学分析などを行い、次の諸点を明らかにした。

- (1) 第三紀花崗岩類は三疊紀花崗岩類よりも石英に乏しい(第4図)。
- (2) 三疊紀花崗岩類には白雲母含有相がある。特にタキシ岩体では白雲母16.7容量%に達する。筆者の今回の観察では、タキシ岩体のほかゾングルート(写真9~10)でも細粒ないし粗粒の両雲母花崗岩類が一般的に見られた。
- (3) 化学的には日本の花崗岩類と較べて、全鉄、CaOに乏しく、K₂Oに著しく富んでいる(第5図)。



写真11 高所のガスが舞うタキシ岩体の花崗岩露頭。タングステン採掘時の石造りの小屋がある。



写真12 深成型タングステン石英脈のボルサ・ネグラ鉱山部落と鉱床(遠方雲の下)。



写真13
ボルサ・ネグラ
鉱山。急峻な山
腹に石で造られ
た鉱山施設。

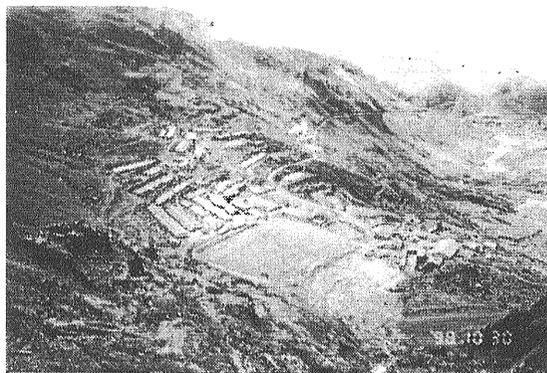


写真14 ボルサ・ネグラ鉱山。鉱山施設と選鉱の尾鉱池。

- (4) 第三紀花崗岩は特に K_2O に富んでおり、また三疊紀花崗岩類より SiO_2 に乏しい(第5図)。
 (5) アルミナ過剰度を示す $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ 分子比は第三紀花崗岩類の1個を除き、1.1以下であり(第6図)、アルミナに過剰なSタイプの要素に乏しい。

白雲母含有量は最高16.7容量%に達するが、これら両雲母花崗岩類も $Al_2O_3 / (Na_2O + K_2O + CaO)$ 比は1.1以下である(Sugaki *et al.*, 1988)。筆者の観察範囲では堆積岩源のエンクレープは少なく、柘榴石やAl珪酸塩鉱物も報告されていないので、マグマの起源物質はCなどの還元物質を含むものの Al_2O_3 には富んではいなかったものと思われる。

4. 帯磁率から見た花崗岩系列

1975年時点のターネア コレクションの花崗岩類12個の測定によると、帯磁率が $100 \times 10^{-6} \text{ emu / g}$ より小さいもの10個、同値を超えるもの2個であった。すなわち、全体としてチタン鉄鉱系の帯磁率を示した。Sugaki *et al.* (1988)も第三紀花崗岩類の1個を除き、チタン鉄鉱系の値を報告している(第6図)。磁鉄鉱系の値 ($230 \times 10^{-6} \text{ emu / g}$) を持つ1個は、クムナラ岩体の第三紀苦鉄質岩(59.8% SiO_2)で得られている。この値は山陰帯の典型的な磁鉄鉱系の同種岩石が示す平均値 $1074 \times 10^{-6} \text{ emu / g}$ と比較して著しく低い値である。今回の調



写真15
チョフジヤ鉱山
遠望。急峻な山
腹に位置する。

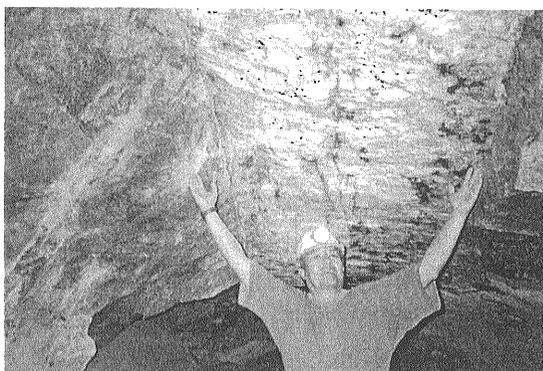
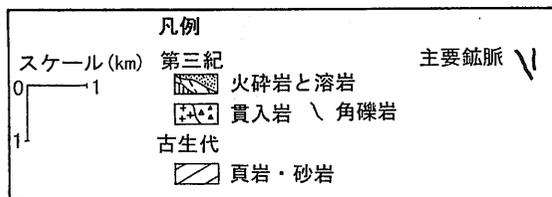
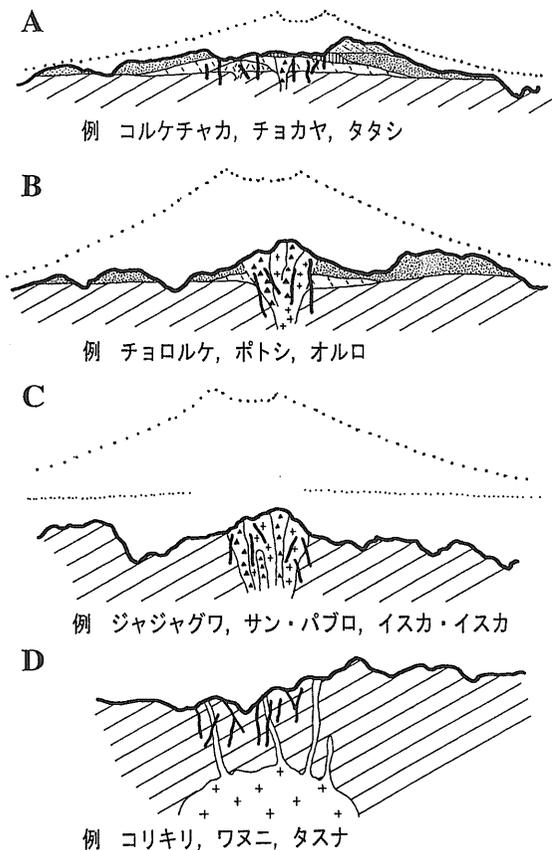


写真16 チョフジヤ鉱山の鉄マンガン重石-石英脈。-150 mL。モデルはサンヒネスさん。

査で筆者はタケシ岩体3カ所、ゾンゴルートで8カ所の測定を行ったが、いずれもチタン鉄鉱系の低い値を示し、高い値は得られなかった。



第7図 ボリビア多金属鉛床の4つのタイプ (Grant et al., 1980).

ターネア コレクションの磁鉄鉛系花崗岩はコロロ産の石英閃緑岩2個 ($1341, 1653 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$) であるが、これは非常に細粒な岩石であり、バソリスよりも小規模ポーフイリー岩体の産状を示す可能性がある。

ターネア コレクションのポーフイリー類については、3個がチタン鉄鉛系、2個が磁鉄鉛系の値を示した。後者はチュピサ地方のイスカ・イスカ鉛垂鉛鉛脈を伴う石英斑岩 ($710 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$)、ポトシ銀-錫鉛山近くのカリカリ貫入岩体の閃緑ひん岩 ($317 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$) で得られたが、このうち、カリ・

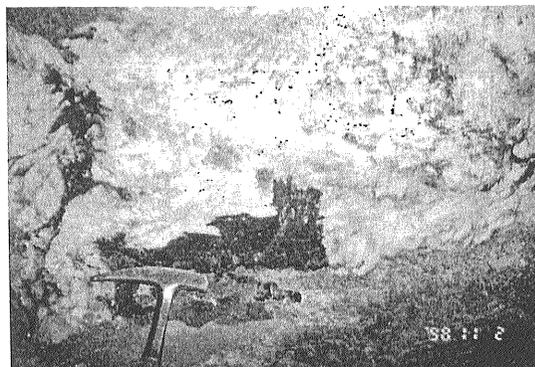


写真17 チョフジャ鉛山の鉄マンガン重石巨晶。-150 mL.

カリ岩体についてはこのひん岩の帯磁率とその岩質と比較して低い上に、同一岩体の花崗岩からチタン鉄鉛の値が得られたので、全体としてはチタン鉄鉛系の可能性がある。

Lehmann et al. (1990) および Lehmann (1994) は花崗岩類と火山岩類の微量Sn含有量は大陸地域のSn鉛化帯のものとしては特には多くはなく、Rb/Sr比などの指数によれば、錫鉛床は結晶分化度の高い花崗岩類に伴われている。そこで花崗岩類が還元的であり、マグマ分化度が高いことが、ボリビアの錫鉛化作用にとって重要であると指摘した。

今回の調査ではポーフイリー類はいずれも変質しており、新鮮な岩石を見ることができなかった。火山岩類には未変質岩が得られ、ポトシ、オルロ近くのラホヤ、サン・ペドロの銀-錫鉛床の付近ではいずれも低い帯磁率を示すが、金銀鉛床であるコリ・コジョ鉛山では $25 \times 10^{-3} \text{ SI}$ ($600 \times 10^{-6} \text{ emu/g}$ 相当) に達する高い帯磁率を示すものがあつた。

5. 鉛床のタイプ

ボリビアの鉛業はプレ・インカ時代に遡り、純金で作った多数の装飾品が発掘されている。そして興味深いことに、ラパスにおける博物館の見学によると、プレ・インカ時代のものがインカ時代よりも精巧にできており、古い時代の方が板金技術は優れていた。その当時の原料は砂金であったであろう。

スペインの植民地時代 (1825~1932年) は世界の有数の産銀国であり、特に1825年から20世紀にかけては銀、次いで錫で世界一の生産国となっ

た。その他タングステン、アンチモンなどの生産で世界の国別上位を占めていた。

これらの鉱物資源は既述のように東コルディレラ帯に産するが、それらは北群と南群に分けられる。北群の鉱床は(1)コルディレラ・リアルの花崗岩類に伴われる中～高温の深成鉱脈鉱床(ラパス地域のミジュニ、チョフジャ、サン・アントニオ、ボルサ・ネグラなど;写真11～17)。脈石鉱物は主に石英、若干の電気石、錫石、鉄マンガン重石を伴う。少量の硫化物も伴われ、それは硫砒鉄鉱、磁硫鉄鉱、黄鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱からなる。

南群の鉱床は第三紀の浅成貫入岩体に伴われる錫多金属鉱脈鉱床であり、As, Ag, Pb, Zn, Cu, Sn, Sbなどを含む多数の硫化物、硫酸塩鉱物を含む。Grant *et al.* (1980)はそれを貫入岩との関係において4タイプに分類した(第7図)。

A型: 岩脈に伴われるもの: 古生代堆積岩類を不整合に覆う溶岩・火砕岩などにデイサイト-流紋岩質ポーフリー岩脈が貫入、粘土化、絹雲母化変質を伴う。Ag, Pb, Zn硫化物に富み、Snは少量。この型の代表鉱床例はコルケチャカ、チョコカヤ、タタンなど。日本では生野鉱床。

B型: 小規模ストック(岩株)状のポーフリーや角礫岩からなるもの: 上方に開いた火道に関連。火山岩・貫入岩共にデイサイト-流紋岩質。母岩の変質は石英-電気石、石英-絹雲母、緑泥石、粘土化などで、ゾーニングを示すことがある。鉱化作用は石英-錫石型と石英-錫石-硫化物型。Agの供給源として重要である。一部に鉱染-細脈状鉱床があり、ポーフリー型錫鉱床とみなされた(Grant *et al.*, 1980)。チョロルケは特に硫化物が少なく錫石のみからなる。この型の代表例はチョロルケ、ポトシ、オルロなどの重要な鉱床である。

C型: 堆積岩に貫入するポーフリーストック、角礫岩に付随するもの: 噴出岩を伴わない。上記B型の深部相と思われる。貫入岩ストックは地上で直径1km程度、下方へ細くなる。ストックの大部分は熱水性角礫岩で占められる。熱水変質は著しく、鉱脈のほか鉱染-網状脈も著しく発達する。鉱脈は石英-錫石、石英-錫石-硫化物の2種類に分けられる。代表例: ジャジャグワのサルパドラストック、オルロ南方のサン・パブロストック、トピザのイスカ・イスカ角礫パイプなど。



写真18 ワヌニ鉱山の全景。



写真19
ワヌニ鉱山の
運搬用インク
ライン。

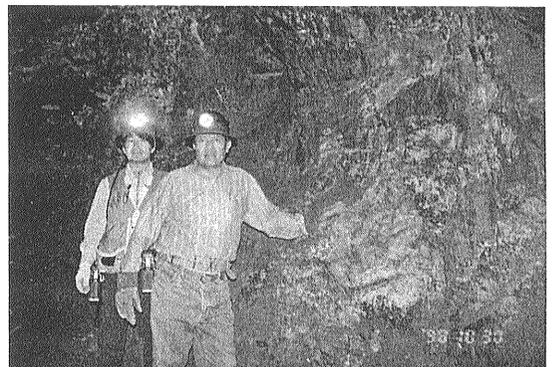


写真20 ワヌニ鉱床の高品位部に立つ安達・サンヒネスの両氏。

D型: 古生層のホルンフェルス化、変質堆積岩中に胚胎し、火成岩としては少数の岩脈があるのみ。しかし深部に潜在岩体が予想される。代表例はコ

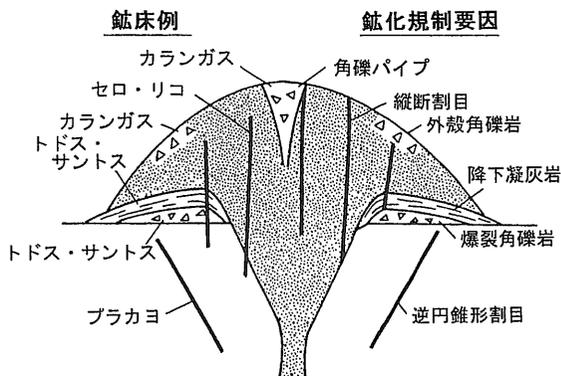
ルキリ, ワヌニ, サンタフェ, モロコカラ, タスナなど。全てが鉱脈鉱床で, 構成鉱物は鉱床ごとに著しく異なる。コルキリでは螢石-硫化物-錫石鉱脈で, 閃亜鉛鉱に著しく富む。ワヌニでは錫石-石英鉱脈が主体であり, サンタフェ, モロコカラでは硫化物-錫石鉱脈であるが, 硫化物は黄鉄鉱が主体であるため, 経済価値に乏しく錫石のみ回収されている。タスナはBiとCu硫化物が主体で, 錫石は少量である。日本では明延鉱床がこの型に入る。

これらのうちワヌニは過去22万トン以上の錫石精鉱を生産し, 出鉱品位は最近までSn 2.45%で, 世界最優良の錫鉱山として紹介された(小原, 1993)。

6. ポーフイリー錫鉱床について

既述のようにボリビアの多金属鉱床は鉱脈型ではあるものの, 成層火山の火道付近に分布している。そこでポーフイリー型鉱床との類似性が想定され, 鉱染網状鉱体が多い鉱床についてポーフイリー型鉱床として大きく取り上げられたことがある(Sillitoe *et al.*, 1975)。Grant *et al.* (1980)はその重要な根拠として次の諸点を挙げている。

- (1) 鉱化作用が中性-珪長質組成の小さな(1-2 km²)ポーフイリー ストックを中心に分布する。
- (2) ストックは垂火山性で, 成層火山のベント中か火山底に貫入したものである。
- (3) 熱水性角礫岩が一般的であり, ある場合には貫入ストックそのものが巨大な角礫パイプである。一般にマグマ貫入と角礫化に何回ものパルス



第8図 ボリビアの金銀鉱床生成モデル (Cunningham *et al.*, 1991).

が認められる。

- (4) 貫入岩と壁岩は浸透性熱水変質を受けている。その種類は長石が絹雲母化し, 電気石化も卓越する性質を持つ。水平, 垂直的な変質ゾーニングが一般的に見られる。
- (5) 錫石が硫化物, 特に黄鉄鉱, 次いで黄錫鉱, 黄銅鉱, 閃亜鉛鉱, 硫砒鉄鉱を伴う。ある場合には黄鉄鉱が少ないSn高品位鉱体を黄鉄鉱に富む低品位ハロが包むゾーニングが見られる。

Grant *et al.* (1980)はこの様な鉱床としてオルロ, サン・パブロ ストック, ジャジャグワ, セロ・リコ(ポトシ), チョロルケ, イスカ・イスカの6鉱床を取り上げている。Sillitoe *et al.* (1998)はポトシ鉱床最上部のバギー石英帯やプラカヨの不毛石英-明ばん石帯はポーフイリー銅鉱床の最上部で一般的なアドバンス粘土化帯であるとし, ポーフイリー型鉱化の最末期の浅熱水性変質を示すものと考えている。

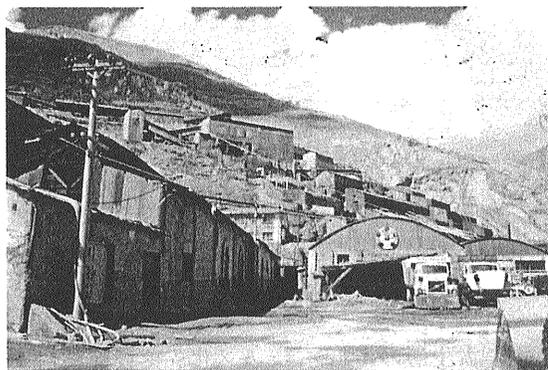


写真21 ワヌニ鉱山の選鉱場。



写真22 ワヌニ鉱山の選鉱尾鉱から更に錫石を回収する地元民。



写真23 コリ・コジョ金山のオープンピット。

一方, Cunningham *et al.* (1991) はポトシやアルティプラノ東部で最近開発されたコリ・コジョ金山を(写真23), 西コルディレラ帯のカランガスやトドス・サントス金鉱床と同様に珪長質溶岩の火山ドームに関連する鉱床として捉えている(第8図)。コリ・コジョ鉱床はラホヤ地方にあり, シルル紀堆積岩類に北西-南東に貫入・噴出する中新世中期のデイサイト斑岩ドームに伴われるもので(Culumba & Cunningham, 1993), 丸い丘のうち熱水性角礫化(写真24), 黄鉄鉱化・絹雲母化の変質部に金を伴う。黄鉄鉱量は10~20%に達する。開山前の全岩採掘法(bulk mining)の為に鉱量は酸化鉱 10.1×10^6 t, Au 1.61 g/t, Ag 24.7 g/t, 金量 16.3 トン, 硫化鉱 64×10^6 t, Au 2.26 g/t, Ag 13.8 g/t, 金量 144.6 トンである(Sillitoe, 1995)。Cunningham *et al.* (1991) はポトシをポーフィリー型でなく, ドーム型にする根拠として, 火砕岩層リング, 爆発性角礫岩, ガス抜けキャップの存在などを挙げている。

7. ポトシ鉱床

セロ・リコは“豊かな丘”を意味し, 綺麗な円錐形の山である(表紙参照)。ポトシの町のすぐ南方にそびえる, と言うよりこの鉱床の開発のために近くに町が造られたと言うべきであろう。

ポトシは1545年の開山以来20億オンス(56,700トン)もの銀メタル量を産出し, 世界最大の銀山である。16-17世紀には, 世界で2番目に人口の多い町(50万人)が生じ, この山に5000以上の坑口が開

けられ, Ag30-40%の高品位の酸化鉱を掘ったと言われている。現在では鉱区はCOMIBOLが保有し, 通洞レベルより上位をガリンペイロが, 以下を鉱山会社で小規模に採掘している。

ボリビア政府のために国連のUNDPがサンプリングを行い, 全岩採掘法の為に算出した残存鉱量は次の通りである。

- (1) 高品位鉱：鉱量 142.6×10^6 トン, 品位 Ag 174 g/t(銀量 $24,812$ トン), Sn $0.1-0.25$ % (錫量 25.0 万トン)
- (2) 低品位鉱：鉱量 298.2×10^6 トン, 品位 Ag 73.0 g/t(銀量 $21,769$ トン), Sn $0.1-0.15$ % (錫量 37.3 万トン)
- (3) 第四紀酸化鉱：鉱量 100×10^6 トン, 品位 Ag 75.7 g/t(銀量 7570 トン), Sn 0.12 % (錫量 12.0 万トン)
- (4) 往時の廃石：鉱量 5.6×10^6 トン, 品位



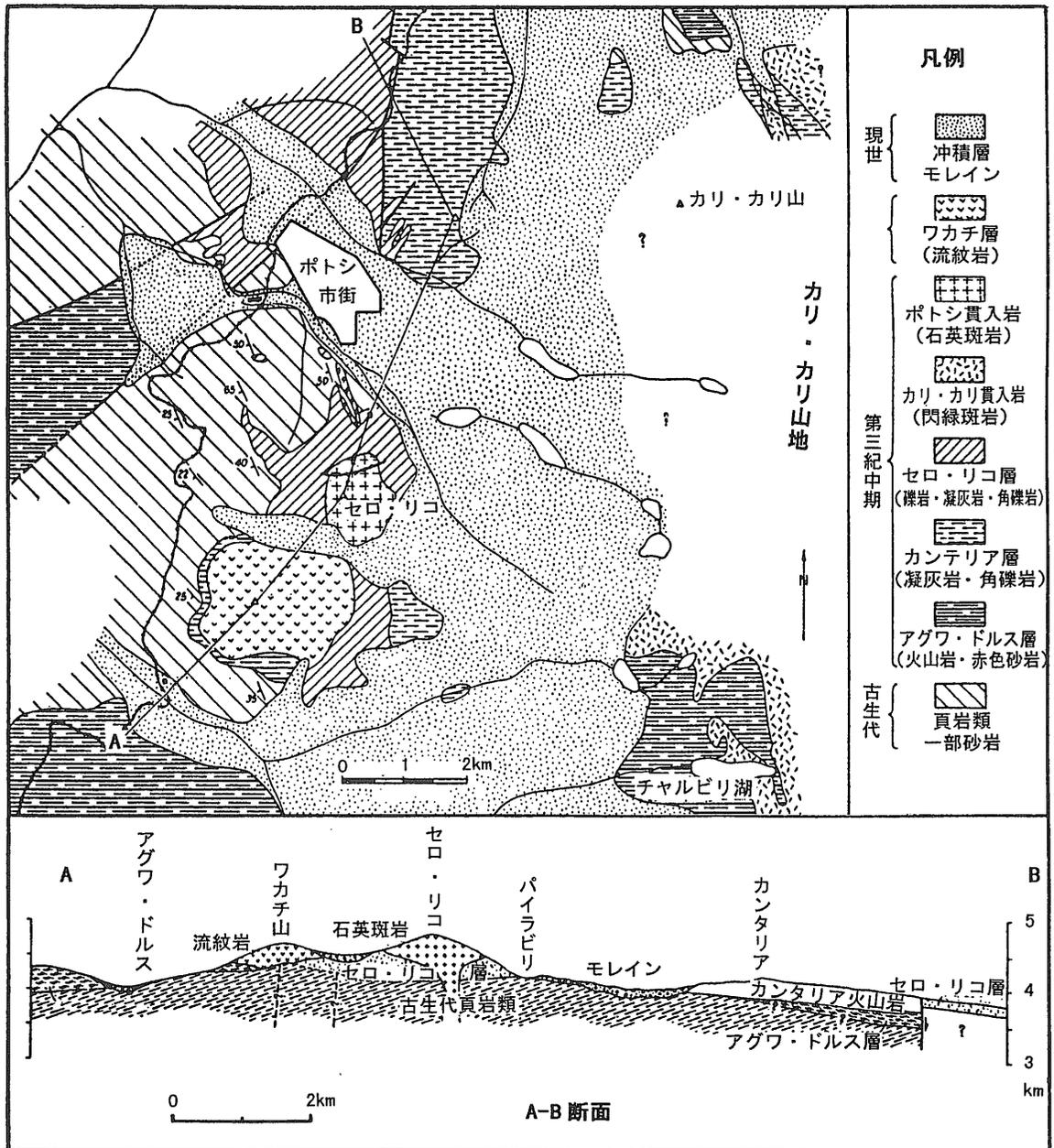
写真24 コリ・コジョ金山の熱水性角礫岩。

Ag213.1g/t(銀量1193トン), Sn0.1-0.25%
(錫量9800トン)

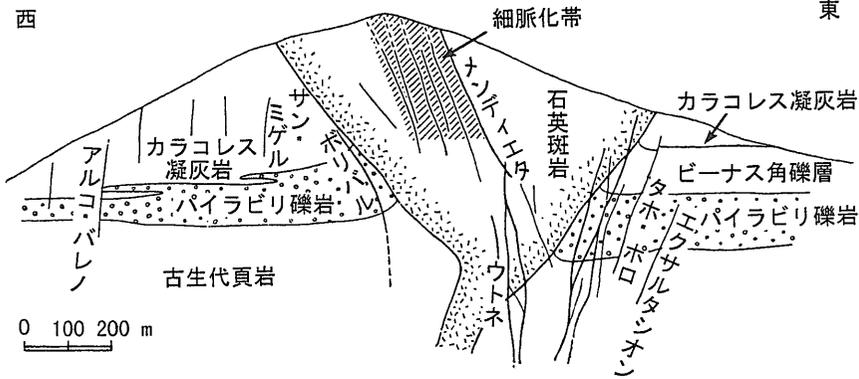
すなわち合計銀量55344トン, 錫量75.3万トンの残存メタル量が推定される(Bernstein, 1989).

ポトシ鉱山の付近の地質はオルドビス紀堆積岩類(主に頁岩, 一部に砂岩), 中新世堆積岩, 火山岩類が不整合に覆う。これらにカリ・カリ岩体に属

する閃緑ひん岩とポトシ貫入岩と呼ばれる“石英斑岩”ストック状に貫入する(第9図)。この貫入岩は地表面で1680×1200m, 地下495mで, 直径98mの円形となる。その原岩は鏡下観察によってデイサイトないし石英ラタイトと推定されている(Turneure, 1960)。貫入岩の生成年代はジルコンのU-Th-Pb年代によって13.8±0.2 Maと考えられ, 石英-



第9図 ポトシ鉱床付近の地質図 (Turneure, 1960).



第10図
ポトシ鉱床の南北断面図
(Turneaure, 1960).

絹雲母-黄鉄鉱変質岩の絹雲母の $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代は 13.60 ± 0.10 Maであることから、鉱化・変質作用は貫入活動にほぼ連続的に生じた(Cunningham *et al.*, 1996).

この斑岩は著しい変質(プロピライト化、絹雲母化、黄鉄鉱化、珪化)を受けているが、鉱化作用は主に斑岩とその近傍の断層破砕帯や正断層を充たす鉱脈型であり、脈幅は1~1.2m以下、大きくないが脈品位が高いタイプである。その走向は厳密には $N31^\circ E$, $N53^\circ E$, $N6^\circ E$ の3群からなる北東-南西系で、東または西に急傾斜する。鉱脈は上部では石英斑岩中に、下部では古生層や中新世火山岩類中に胚胎する(第10図)。下部で優勢な鉱脈は $N6^\circ E$ 系のタホ・ポロ鉱脈群、 $N53^\circ E$ 系のウトネ鉱脈群である。山頂付近には素晴らしい高品位鉱を産した $N31^\circ E$ 系東傾斜の細脈密集帯がある。これは最大幅175mで幅1-5cmの細脈が密集するものである。この部分の鉱石がポーフリー型に最も近い。

鉱脈は複合脈で繰り返し鉱化が認められるが、Turneaure (1960)は大きく2分し、第一期晶出鉱物として錫石、黄鉄鉱、鉄マンガン重石、硫砒鉄鉱、石英、少量の磁硫鉄鉱。第二期として黄錫鉱、四価銅鉱、閃亜鉛鉱、ルビー銀、少量の黄銅鉱、アンドル鉱($\text{AgPbSb}_3\text{S}_6$)、マチルダ鉱、毛鉱、プーランジュ鉱、方鉛鉱などを認めている。これら硫化鉱物脈は最末期に明ばん石脈によって切られる。変質鉱物として緑泥石、絹雲母、石英、カオリナイト、明ばん石、少量の電気石、鉱床深部で絹雲母化が、浅所で珪化が特徴的である。

8. 結論

東コルディレラ帯の鉱化作用のうち、花崗岩類に関係する北部の深成型鉱床はSugaki *et al.* (1980)や筆者の調査から関係する花崗岩類がチタン鉄鉱系に属することは明らかであり、鉱床も磁硫鉄鉱を一般的に含むので(Sugaki *et al.*, 1990)、還元的花崗岩マグマから生成したものである。

一方、南部の錫多金属鉱床は関連する貫入ポーフリー類が変質しているために、その花崗岩系列の判定は充分とは言えない。ポトシ鉱床では早期に磁硫鉄鉱が晶出し(Turneaure, 1960)、花崗岩質マグマから分離した直後の鉱液が還元的であった。多くの多金属鉱床もチタン系マグマ活動においてもたらされ、鉱液が地表水と混合するなどして、引き続き鉱化期には酸化的となった可能性が考えられる。

一方、ターネア コレクションやコリ・コジョの火山岩類で示されたように、一部には帯磁率が高いものが存在する。コリ・コジョの南西方、アルティプラノの西縁にあるトドス・サントスやカランガス金鉱床も空中磁気図(USGS-SGB, 1992)で磁性が強い地域に分布している。これらに関係する火山岩類は錫多金属帯の西側地域に貫入・噴出したものであって、この地帯に至ると活動マグマの基本的性質が変わっている可能性もあり、今後の広域的な基礎調査が必要である。

謝辞：終わりに今回の野外巡検をお世話下さり、また同行を賜った三井金属鉱業(株)ボリビア支社の安達正敏、O. サンヒネスの両氏に心からお礼申し上げる。

文 献

- Bernstein, M. (1989) : Cerro Rico, Potosi: Expectations for bulk tonnage hard rock and Alluvial ores. UNDP Project Rept., Bol/87/012, 19 p.
- Buddington, A.F. (1935) : High-temperature mineral association at shallow to moderate depths. *Econ. Geol.*, v. 30, 205-222.
- Columba, C.M. and Cunningham, C.G. (1993) : Geologic model for the mineral deposits of the La Joya district, Oruro, Bolivia. *Econ. Geol.*, v. 88, 701-708.
- Cunningham, C.G., Zartman, R.E., McKee, E.H., Rye, R.O., Naeser, C.W. Sanjines, V.O., Eriksen, G.E. and Tavera, V.F. (1996) : The age and thermal history of Cerro Rico de Potosi, Bolivia. *Miner. Deposita*, v.31, 374-385.
- Cunningham, C.G., McNamee, J., Pinto Vasquez, J., Eriksen, G.E. (1991) : A model of volcanic dome-hosted precious metal deposits. *Econ. Geol.*, v. 86, 415-421.
- Grant, J. N., Hall, C. Sheppard, S. M. F. and Avila, W. (1980) : Evolution of the porphyry tin deposits of Bolivia. *Mining Geol. Spec. Issue*, no. 8, 151-173.
- 石原舜三 (1975) : 酸性マグマと関連鉱化作用-花崗岩類の酸化-還元性と鉱床の種類. *海洋科学*, v.7, p.756-759.
- Ishihara, S. and Ulriksen, C.E. (1980) : The magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Chile. *Mining Geol.*, v. 30, 183-190.
- James, D. E. (1971) : Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geol. Soc. America, Bull.* v. 82, 3325-3346.
- Lamb, S., Hoke, L., Kennan L. and Dewey, J. (1997) : Cenozoic evolution of the Central Andes in Bolivia and northern Chile. In : Burg, J. P. and Ford, M. Eds. *Orogeny Through Time*, *Geol. Soc. Spec. Pub.* no. 121, 237-264.
- Lehmann, B. (1994) : Petrochemical factors governing the metallogeny of the Bolivian tin belt. In: Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J. (eds.) *Tectonics of the southern Central Andes; Structure and evolution of an active continental margin*. Springer-Verlag, Berlin, 317-326.
- Lehmann, B., Ishihara, S., Michel, H., Miller, J. Rapela, C., Sanches, A., Tistl, M. and Windelmann, L. (1990) : The Bolivian tin province and regional tin distribution in the Central andes: A reassessment. *Econ. Geol.* 85, 1044-1058.
- 小原 実 (1993) : 世界最優良のスズ鉱山-Huanuni. *資源地質*, v.43, 144-148.
- Ohta, E. (1995) Common features and genesis of tin-polymetallic veins. *Resource Geol. Apec. Issue*, no.18, 187-195.
- Park, C. F. and MacDiarmid, R.A. (1964) : Ore deposits. W.H. Freeman Co., 475 p.
- Sillitoe, R. H. (1995) : Exploration and discovery of base- and precious-metal deposits in the Circum-Pacific region during the last 25 years. *Metal Mining Agency Japan*, 81-83.
- Sillitoe, R.H., Halls, C. and Grant, J.N. (1975) : Porphyry tin deposits in Bolivia. *Econ. Geol.*, v. 70, 913-927.
- Sillitoe, R. H., Steele, G. B., Thompson, J. F. H. and Lang, J. R. (1998) : Advanced argillic lithocaps in the Bolivian tin-silver belt. *Miner. Deposita*, v. 33, 539-546.
- Sugaki, A., Kusachi, I. and Shimada, N. (1988) : Granite-series and types of igneous rocks in the Bolivian Andes and their genetic relation to tin-tungsten mineralization. *Mining Geol.*, v. 38, 121-130.
- Sugaki, A., Ueno, H. and Hayashi, K. (1990) : Sulfur isotope reconnaissance of Bolivian hydrothermal deposits. *Mining Geol.*, v.40, 299-312.
- Turneure, F.S. (1960) : A comparative study of major ore deposits of Central Bolivia. *Econ. Geol.*, v. 55, 217-254, 740-606.
- USGS-SGB (1992) : Geology and mineral resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Baolivia. *U. S. Geol. Surv., Bull.* 1975, 56-62.
-
- ISHIHARA Shunso (1999) : Tin polymetallic mineralization and granitoid series in Bolivia.
-
- < 受付 : 1999年6月7日 >