

ペルー南部のポーフィリー銅鉱床

石原舜三¹⁾

1. まえがき

最近の5~10年間におけるペルー, チリ, アルゼンチンなど鉱業界の活況を聞いて久しい。ペルーでは1991年の探鉱区は320万ヘクタールであったが, 1999年には1,680万ヘクタールに達している。その背景としては探鉱を促進するための法改正, 探鉱基金の設立, 政治・経済の安定化, テロ活動抑制の成功などがある (Benavides & Vidal, 1999)。

このような鉱業界の活況には外資の導入が大きな役割を果たし, 金属鉱業事業団によるセロリコ鉛亜鉛鉱床の発見や国有鉱山のセロヴェルデポーフィリー銅鉱床, ティンタヤスカルン銅鉱床のサイプラス社 (後にフィルプスドッチ社) あるいはブロークンヒル社 (BHP) による取得は注目を集めた。そして最大の話は1994年のヤナコチャ金鉱床の開山である。これは高硫化型の低品位大規模鉱床であり, その採掘条件の良さから巨大鉱山に成長した。

ペルーには何と言ってもプレインカ時代からの発見例を基本とした, 新鉱床発見に対する地質学的な優望性にある (Petersen *et al.*, 1990)。昨年8月にブラジルで開かれた第31回万国地質学会議 (IGC) の付随巡検として「ペルー南部の銅鉱床」が実施され, 筆者も長年の夢が叶ってこれに参加することが出来た。時期的には激しい大統領選挙 (写真1) の後であり, 大規模な反対デモが予想されたフジモリ大統領就任式の日 (7月28日) にリマに到着すると言う波乱の幕開けであったが, 無事に8日間の巡検を終了することが出来た。

ペルーの主要な銅鉱床は同国南部に多く (INGEMMET, 2000), 世界最大の銅山チュキカマ



写真1 交通標識も巻き添えとなった大統領選挙の名残。アレキバ県の北部にて。

タを含むチリ北部の銅鉱化帯へと移行する。この地域では今後とも新鉱床の発見が期待され, 更に砂漠地帯で人口密度が低く開発に伴う環境問題が少なく, 鉱山開発を行いやすい。ここではこの巡検で見聞したペルー南部の地質概要と銅鉱床について記してみたい。

2. ペルーの金属鉱産量

最近のペルー経済は1997年後半に発生したエル・ニーニョ現象被害からの回復を継続し, 国内総生産量 (GDP) の伸び率は1999年には3.8%と高いものであった。金属鉱産物もその一端を担い, 金属市況の全般的な低迷にも拘わらず, 成長率10.0%を達成し, その生産額は約33億米ドル, 輸出額は30億ドル (前年比10.1%増), 輸出額全体の48.2%を占めた (塩川, 2000)。また鉱業は雇用の面でも重要な役割を果たし, その依存人口は約100万人と言われている。

キーワード: ペルー, ポーフィリー銅鉱床, セロヴェルデ, カホネ, トケハラ, 磁鉄鉱系花崗岩

1) 産総研 特別顧問

第1表 ペルーの鉱産物の生産実績(塩川, 2000).

鉱種		1997年	1998年	1999年
銅	(TM)	506,498	483,338	536,320
鉛	(TM)	262,466	257,713	270,549
亜鉛	(TM)	867,691	868,757	899,458
金	(Kg)	79,117	94,214	128,088
銀	(Kg)	2,090,311	2,024,570	2,217,105
鉄鉱石	(TL)	2,960,165	3,230,431	2,624,631
モリブデン	(TM)	4,262	4,344	5,471
錫	(TM)	27,952	25,747	30,404
タングステン	(TM)	285	76	0
カドミウム*	(TM)	474	132	462
アンチモン*	(TM)	242	364	255
砒素*	(TM)	837	624	611
インジウム*	(Kg)	3,799	4,231	5,100
セレン*	(Kg)	12,678	18,006	23,000
テルル*	(Kg)	24,754	21,682	17,000

*精練ベース. その他は山元ベース.

第1表は最近3年間の金属鉱産量であるが、金生産量の伸びが最も著しく、これはヤナコチャ(1994年開山)の生産量増を反映している。亜鉛についてはスカルン型のイスクアルス(Zn 10-20%、1996年開山)、銀についてはウチュチャクワ スカルン鉱山の増産が大きい(Benavides & Vidal, 1999)。世界的には1999年に銀第2位、錫第3位、鉛第4位、亜鉛第4位、銅第7位、の地位を確保し、ラテンアメリカ諸国では金・鉛・亜鉛について第1位、銅・銀・錫で第2位の地位を占める。

生産物は精練され地金類として輸出されるが、鉛・亜鉛・銀については下記のように精鉱輸出の

比率が高く、これは日本の精錬業を支えている。銅54.5万トン(うち精鉱販売7.7万トン、14%)、鉛25.2万トン(精鉱13.0万トン、51.6%)、亜鉛76.5万トン(精鉱56.3万トン、73.6%)、金127.8トン(精鉱6.0トン、4.7%)、銀2,133トン(精鉱1,001トン、46.9%)(1999年)。

金額的には輸出総額30.09億ドル(1999年)のうち銅7.76億ドル、鉛1.77億ドル、亜鉛4.62億ドル、金11.93億ドル、銀1.69億ドル、錫1.33億ドル、鉄鉱石0.67億ドル、その他0.32億ドルであり、金、銅、亜鉛の順に重要である。

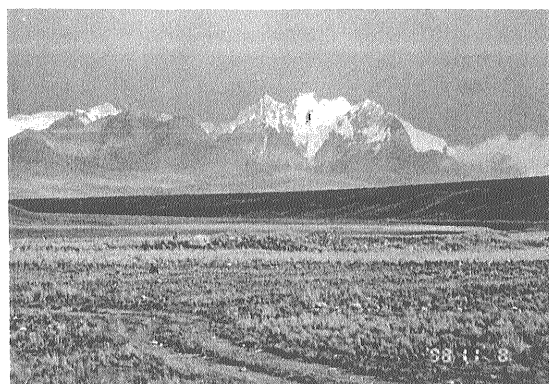


写真2 西コルディレラ、白い山脈(Cord. Blanca)の高峰。ワラス南方。

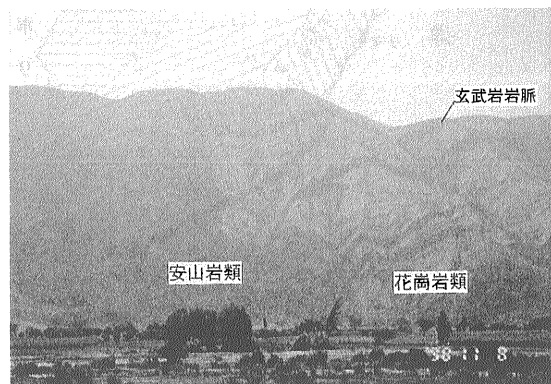


写真3 西コルディレラ、海岸に近い黒い山脈(Cord. Negro)の全面露頭。リマ北方。安山岩類に花崗岩類が貫入し、玄武岩岩脈の貫入を受ける。

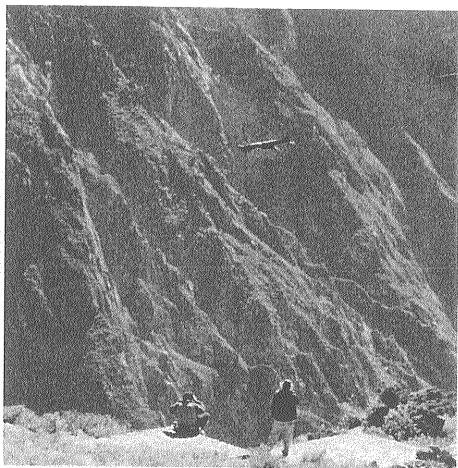
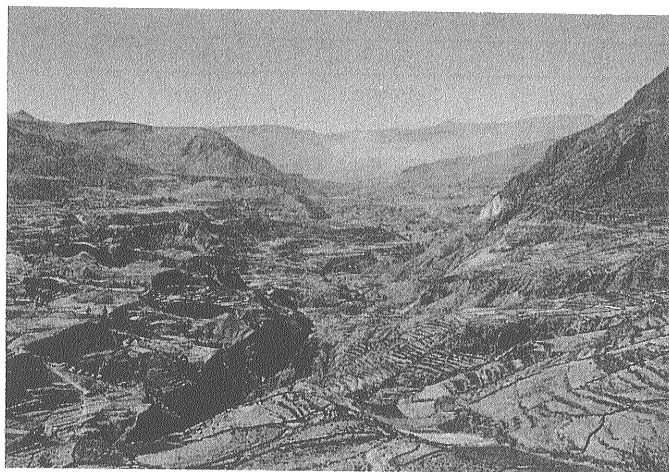
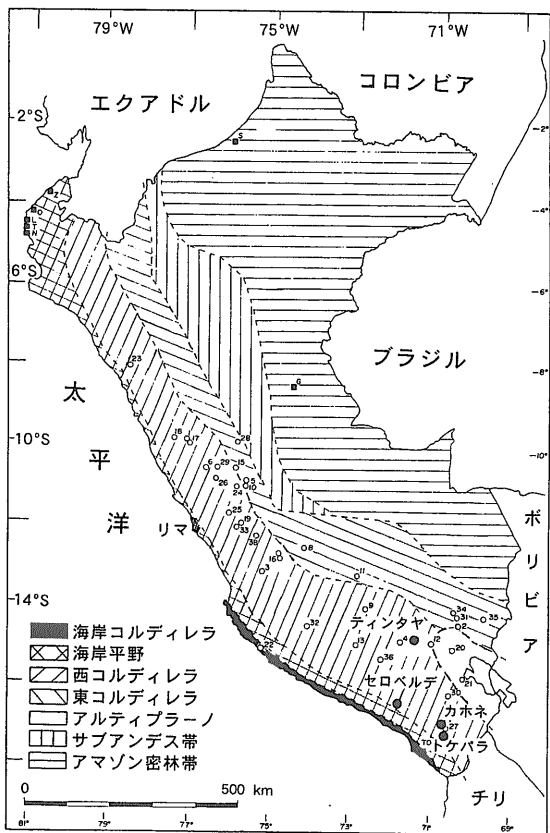


写真4 左 西コルディレラ, ワルカワルカ山 (6,025m) 北西方のコルカ峡谷上流部. 右 コルカ峡谷では名曲“El condor pasa”で知られるコンドルが眼下に舞う.



第1図 ペルーの地勢区分と鉱床の分布 (Petersen et al., 1990). 白円は金属鉱床, 黒円は本誌に紹介した鉱床. 黒四角は石油と天然ガス鉱床.

3. ペルー地質構造の概要

ペルーは地勢的には太平洋から内陸へ向けて, (1) 南部にのみ発達する海岸コルディレラ, (2) 海岸平野, (3) 西コルディレラ, (4) 東コルディレラ, (5) アルティプレーノ, (6) サブアンデス帯, (7) アマゾン密林帯からなる (第1図).

西コルディレラはワラス北方のワスカラン山 (6,768m) を最高峰とする巨大な山脈で, 巨大な峡谷が発達し, コンドルが舞う (写真2-5). イギリス隊の研究で著名な海岸バソリスは西コルディレラに属し, その内側の東コルディレラと共に“アンデス山

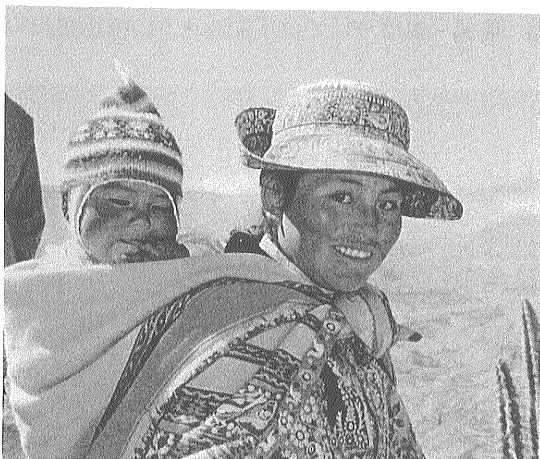


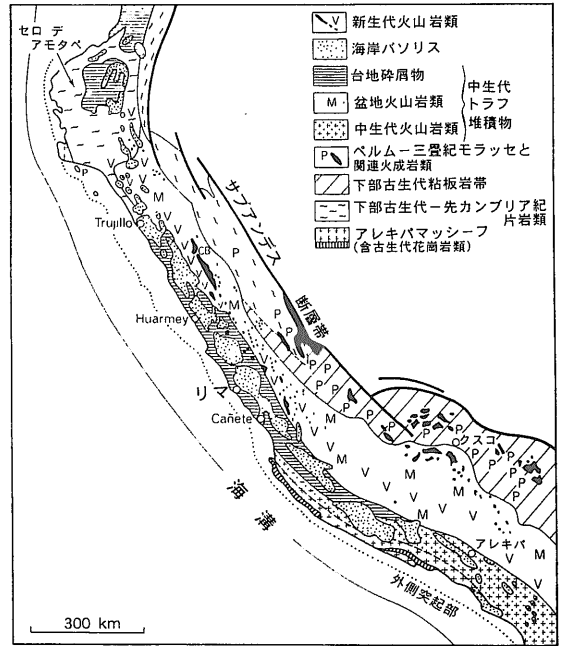
写真5 コルカ峡谷の土産物店で見た親子.

脈”を構成する。古生代後期の花崗岩で造られた古代都市マチュピチュは東コルディレラの山岳地帯に位置する(写真6, 7)。東コルディレラはサブアンデス帯を経てアマゾン密林帯へと高度を下げる。

ペルーの地質は先カンブリア紀に始まり、南部海岸山脈では片麻岩類(20億年前)に上部古生代と中生代堆積岩類が堆積し、北西部では先カンブリア紀後期の結晶片岩類を中生層が直接覆う。

古生層は東コルディレラ南部に広く分布し、それは主として古生代下部の粘板岩・珪岩類からなる。これらは褶曲を受け、ペルム紀の花崗岩類の貫入を受ける。これはヨーロッパにおけるヘルシニア変動と見ることが出来る。この花崗岩類はマチュピチュ遺跡での帯磁率の測定によると、チタン鉄鉱系であった。ヘルシニア変動終了後ペルム紀上部の赤色のモラッセが堆積し(第2図)、東コルディレラは安定地塊となる。

一方、西コルディレラはほとんど中生層・第三紀層からなる堆積物が構造的な沈降帯を埋める。東



第2図 ペルーの地質概略図 (Pitcher & Cobbing, 1985)。

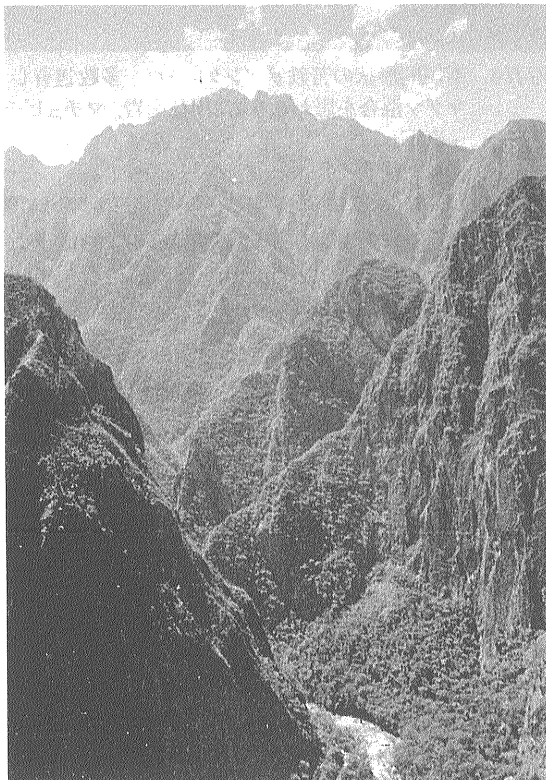


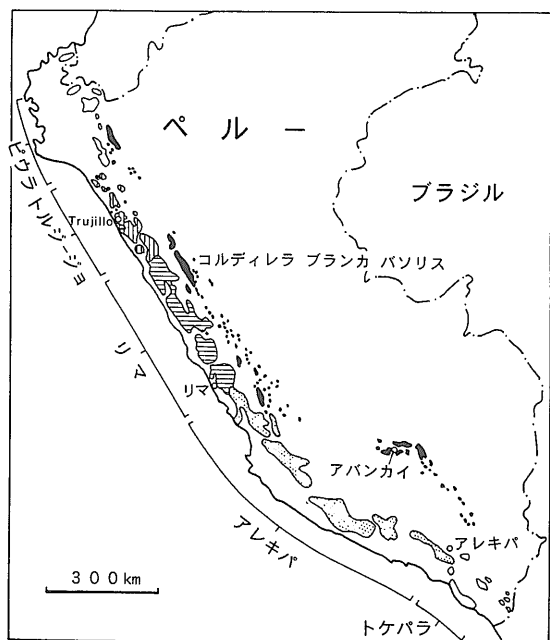
写真6 マチュピチュ付近の東コルディレラ。急峻な山地に注目。

部では下部に碎屑物、上部に炭酸塩岩類を伴うミオ地向斜性堆積岩類、西部では海成火山岩類を主体とするユー地向斜生成物からなる。これらは2回に亘り変動を受ける。一つはバソリス形成前、白亜紀アルビアン期末のもので、これはユー地向斜堆積岩類を変形する。他の一つは古第三紀のインカ変動で、これは西コルディレラ全般に及ぶが、特にミオ地向斜堆積物を変形・褶曲せしめた。インカ変動は白亜系の褶曲、地殻肥大化、地殻上昇などをもたらした(INGEMMET, 1995)。

その後これら全ての構成岩類が浸食を受け、その上に始新世から中新世にかけて陸成の安山岩、デイサイトが噴出し少量の湖成堆積作用を伴った。

ペルーはアンデス山塊の屈曲部に近く、いくつかの横断構造帯に切られる。東コルディレラでは最も南にアバンカイ線があり、古生代堆積盆がこれに沿って発達する傾向を示す(第2図)。この北側は北西系の通常の走向を示す。

第2の不連続面はリマ付近を東西に走り、北側の先カンブリア紀結晶片岩と南側の古生代下部層とに分けるものである。ここでは両者の走向方向には変化はなく、共に北西系である。第3はペルー北部のホアンカバンバ不連続線で、これは結晶片岩類



第3図 セグメント分けした白亜紀海岸バソリスと内陸側の第3紀花崗岩体の分布 (Pitcher & Cobbing, 1985).

の広範囲な分布とその層理面の走向変化で表される。また中央アンデスと北部アンデスを分ける所にも当たる。

4. ペルーの花崗岩類

ペルーの花崗岩活動は、(1)先カンブリア紀末期-古生代初期(970-540Ma)、(2)古生代中期(346Ma)、(3)ペルム-三畳紀(270-180Ma)、(4)白亜紀後期(100-53Ma)、(5)新生代中期(15Ma)の5時期に大別される(Pitcher & Cobbing, 1985)。第1期は“パンアメリカン変動”に相当するもので、アレキパ マッシュフに分布する。閃緑岩～花崗岩質でミグマタイトを伴う。変動期及び変動後期花崗岩と見なされるものである。Iタイプに属し、変火成岩起源と考えられる。

第2期の花崗岩類は東コルディレラに分布し、両雲母花崗岩類からなる。緑色片岩相の広域変成作用を受ける粘板岩帯に貫入する。早期晶出相は著しい変形を受け、変動期及び変動後期花崗岩類に属すると見なされる。Sタイプに属し、堆積岩起源である。第3期は主に黒雲母(一角閃石)花崗岩類

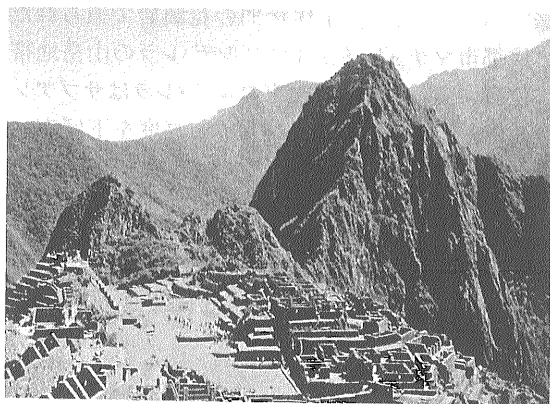


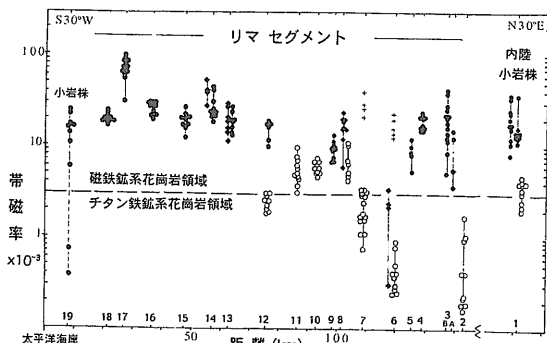
写真7 第3期の黒雲母花崗岩で造られた古代都市、マチュピチュ。



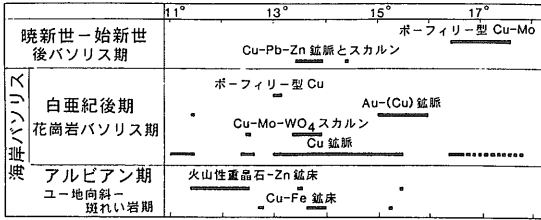
写真8 不規則形状の苦鉄質アングレーヴを多数包有し、マグマ混合を思わせる第3期花崗岩。マチュピチュ直下。

で、東コルディレラに分布する。変形を受けない塊状花崗岩類で(写真8)、第2期花崗岩帯形成後にリフト帯に上昇した。Caに乏しいIタイプに属し、変火成岩起源である。

第4期は西コルディレラに広く分布する海岸バソリス(写真3)を構成するもので(第3図)、全体的に



第4図 海岸バソリス、リマセグメントにおける北東-南西方向の帯磁率変化 (Ishihara et al, 2000).



第5図 ペルー南部における深成マグマ活動と鉱化作用との関係 (Vidal, 1985).

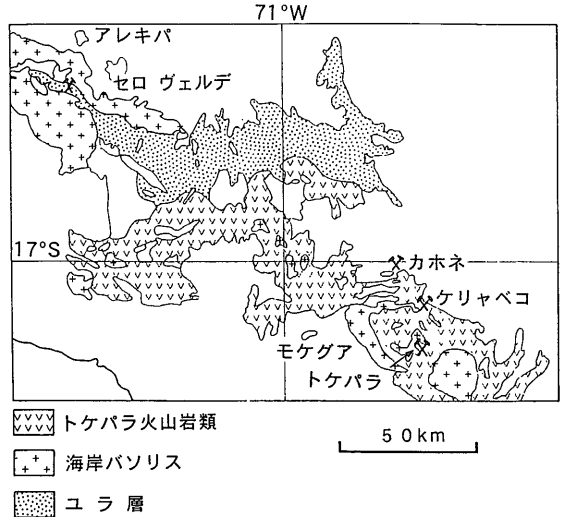
斑れい岩-閃緑岩 15%, トナル岩-花崗閃緑岩 50%, 花崗岩 35% の比率を持つ (Cobbing et al., 1981). 最早期のごく一部を除き塊状花崗岩類であり, 張力場あるいは弱い圧縮場にマグマが上昇し, 形成されたものである. 全体にCaに富むIタイプでマントル起源と考えられる (Pitcher & Cobbing, 1985).

第5期は海岸バソリスの内陸側に, 主に断層規制を受けたストック状岩体として分布するもので, コルデラ ブランカ バソリスはその最も大規模なものである. 主に花崗閃緑岩とモンゾ花崗岩からなり, 塊状・細粒であり斑状組織を示すことが多い. Iタイプに属し, 海洋地殻・大陸地殻起源である (Pitcher & Cobbing, 1985).

第4-5期花崗岩類は主として磁鉄鉱系花崗岩類から構成される. 既発表分析資料のFe₂O₃/FeO比では, 第4期花崗岩類の85% (n=130), リマ セグメントの帯磁率測定によると80% (n=70) が磁鉄鉱である (Ishihara et al., 2000). そして帯磁率は内陸側で低いものが多い (第4図).

第5期花崗岩類は基本的には磁鉄鉱系であるが, 厚い堆積岩地帯に貫入するため地殻物質との反応によるチタン鉄鉱系の存在も予想される.

第4-5期花崗岩類に付随する鉱床としては, 最早期のユー地向斜火山活動に伴う層状重晶石-閃亜鉛鉱床, 斑れい岩に伴う銅-磁鉄鉱床がある. 花崗岩類に関連する鉱床は鉱脈, スカルンおよびポーフイリー型であるが (第5図), 鉱量的にはポーフイリー型が最も重要であり, スカルン型がこれに次ぐ. ここではペルーの銅生産量の大部分を出産するセロ ヴェルデ, カホネ, トケパラのポーフイリー型3鉱床と (第6図), 高品位で魅力的なティンタヤ スカルン鉱床について紹介したい.



第6図 トケパラ セグメントのポーフイリー型銅鉱床 (Vidal, 1985).



写真9 セロ ヴェルデ鉱山入り口とフィルプス ドッジのマーク.



写真10 門柱に使われた電気石角礫岩. コインの直径は2cm.

5. セロ ヴェルデ鉱床

セロ ヴェルデ鉱山(写真9, 10)はアルキパの南西30km (W71° 34' S10° 33'), 高度2,200-2,900mに位置する。その鉱床はポーフイリー型のMo-Cu鉱床で、厳密にはセロ ヴェルデ, サンタロサ, セロ ネグロの3鉱体からなり、前2者が現在稼行されている。1999年の銅生産量67,889トン, ペルー第4位である。

鉱床の発見は1868年, ペルーで最も古い。1881

年から160m立坑で採掘された。1916年にアナコンダ社が買収し、その子会社が第1期(1916-17)に64孔, 総延長9.9km, 第2期(1964-67)に32孔, 総延長3.2kmの試錐探鉱を実施した。1970年に国有化され, 国有企業ミネロ ペルーは262孔, 総延長8.3kmの探鉱を行い, 1972年にサンタロサは経済性を持つと宣言した。

1993年の民営化でサイプラス・クライマックスメタル社が落札し, 更に168孔, 総延長40km, の試錐探鉱を実施し, サンタロサ鉱床の南東3kmにセ

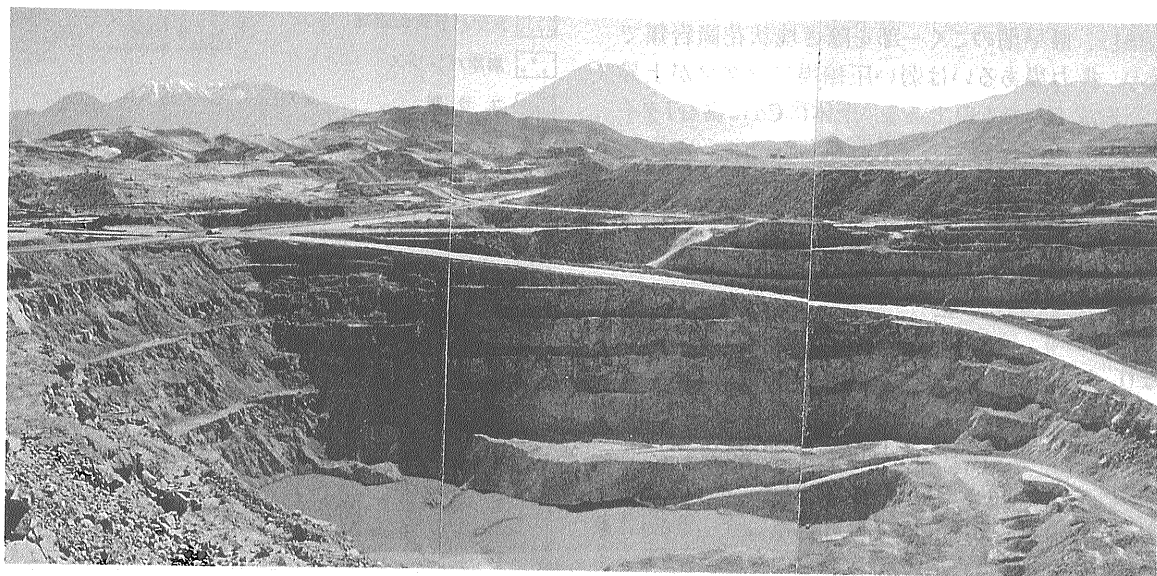


写真11 セロ ヴェルデ鉱山のサンタロサピット。北西-南東方向に伸長し、現在では1,500×600m(写真の左右)の規模

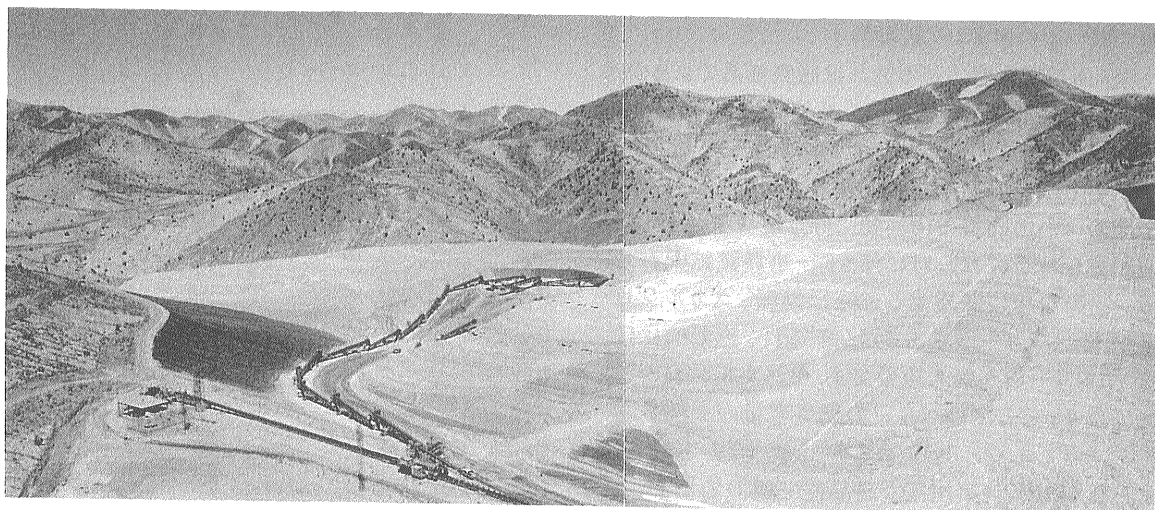


写真12 セロ ヴェルデ鉱山のリーチングプラント。ポリエチレン系のポリシン(黒色)を敷き、鉱石をおき希硫酸をかける。右端の池に集められる(口絵5参照)。

ロネグロ鉱床を発見した。1999年にはフィリップスドッジ社が買収した(Phelps Dodge, Geol. Dept., 2000)。

これまでの3期に亘る延べ155kmの試錐により1.71億トン(0.78%Cu)のリーチング鉱石と1.97億トン(0.70%Cu)の浮遊選鉱鉱石(口絵2)が発見されている。これらの含銅量は合計275万トンであり、中規模鉱床と言える。現在はオープンピット(写真11)により浸出処理用鉱石を採掘し、大規模に(処理能力32,000トン/日)浸出・沈殿銅を採取してい

る(口絵4-5, 写真12参照)。

当地域の基盤は先カンブリア紀-古生代初期の花崗岩質片麻岩で、セロヴェルデピットにも露出する。これを上部三畳紀-下部ジュラ紀の礫岩が傾斜不整合に覆い、チョコレート火山岩類とティアバヤ花崗閃緑岩の貫入を受ける。チョコレート火山岩類は暗緑-暗褐色の安山岩質溶岩・集塊岩からなり、割目・断層が著しく発達する。この火山岩はソコサニ層(下-中部ジュラ紀, 層厚40m)の石灰岩とユラ層(上部ジュラ紀-下部白亜紀, 層厚500m)



まで発展している。



120日で約65%の銅が溶出。2回目以降はポリシンを上重ね敷きし、同様な作業を繰り返す。溶出液はこの写真

の石灰岩を夾む珪質砂岩，緑色珪岩・粘板岩類に覆われる。

白亜紀には火山活動が活発化する。上部白亜紀-下部第三紀のトケパラ層(層厚100m)は安山岩-粗面岩質の集塊岩，火山角礫岩からなり，上部鮮新世のヤンカ火山岩類(層厚50m)は流紋-流紋デイサイト質凝灰岩からなる。

5.1 貫入岩類

貫入岩類は北西-南東に伸長して上記火山岩類の下部層に貫入し，鉱床付近に広く分布する(第7図)。早期の岩体はカルデラ パソリスと呼ばれる。その最も苦鉄質な岩相は普通輝石閃緑岩で，部分的に片状構造を示す。全般に緑簾石化が著しい。これは下記のティアバヤ花崗閃緑岩(78-80Ma)の貫入を受ける。この花崗閃緑岩は中-粗粒，角閃石，黒雲母，多量の磁鉄鉱を含む。ゼノリスは周縁部で多い。ペグマタイト，アプライト脈に切られる。鉱体周辺では熱水変質を受ける。

ヤラバムバ花崗閃緑岩は細-中粒で上記と漸移する。2岩相に分けられ，北部相は累帯斜長石，黒雲母，Mg角閃石がカリ長石に埋められる。南部相は同様な岩相に単斜輝石とチタン鉄鉱を含む。化学的にはカルクアルカリ岩系の典型的なマグマ分化傾向を示す。

ヤラバムバ花崗閃緑岩角礫岩は花崗閃緑岩体の北部に接する所で，珪化角礫岩とデイサイトモンゾニ斑岩の周辺に分布する。角礫化の外観を呈し，時には珪質角礫-垂角礫が石英細脈を含む花崗閃緑岩マトリックスに埋められる。従ってこれはヤラ

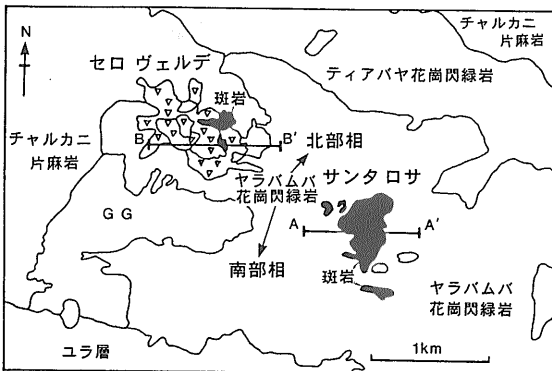
バムバ花崗閃緑岩活動の最末期斑岩活動に伴う角礫化と珪化によって生成したものと考えられる。

デイサイト-モンゾニ斑岩は北西-南東方向の一般的な構造線に規制されて小規模ストックまたは岩脈状にヤラバムバ花崗閃緑岩の南部岩相に貫入し，鉱体と密接に関係する(第8図)。地域により岩相が変化し，サンタ ロサ地域では岩体中心で粗粒，周縁部で細粒である。また一部では角礫化や珪化を受ける。ジルコンのU-Pb年代は60Ma，K-Ar年代は58±2.3Maである。

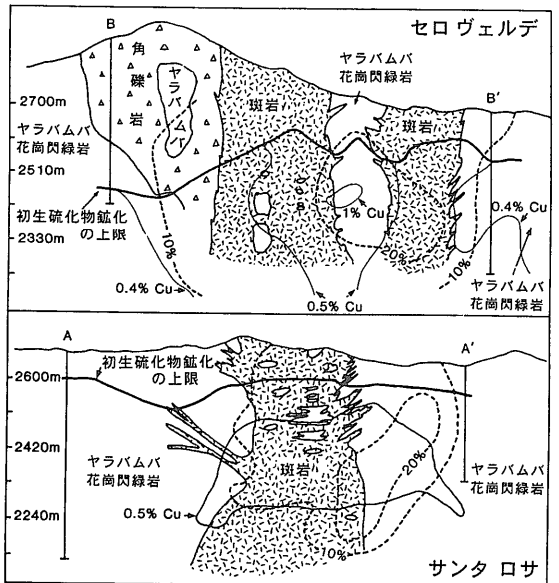
5.2 角礫岩

ペルーのポーフイリ-型銅鉱床の特徴は何と言っても角礫岩の伴う鉱化作用である(口絵3)。そこでここではやや詳しく紹介してみたい。

角礫岩は北西-南東方向の規制を受け，斑岩類の貫入部の周辺に存在する(第7図)。北西から南東にセロ ヴェルデ，サンタ ロサ(角礫ボナンザ)，セロ ネグロ，サン フェルナンドと名付けられており，その分布延長は20kmに及ぶ。セロ ヴェルデで最も大きな岩体として発達し(第8図)，次いでサンタ ロサ，セロ ネグロなどである。共に不規制楕円形の断面を示し，斑岩分岐脈と関連して逆円錐形状を示す。マトリックスの鉱物組合せと，一部角礫



第7図 セロ ヴェルデ鉱山付近の地質略図と断面線の位置 (Le Bel, 1985)。黒はデイサイトモンゾニ斑岩。



第8図 セロ ヴェルデおよびサンタ ロサ鉱床の東西断面図 (Le Bel, 1985)。断面線の位置は第7図。

の種類を考慮して、角礫岩は次のように分類される。

(1) 電気石角礫岩

これは珪化角礫岩中に見られる。径数mに達するヤラバムバ花崗閃緑岩の変質角礫を電気石マトリックスが埋めるものである。揮発性のポロンを含む電気石を多く含むことから、最も揮発性が高かった角礫岩と考えられる。

(2) 石英-電気石角礫岩

このタイプが最も広く分布し、特にセロ ヴェルデ、セロ ネグロ、サン フェルナンドで重要である。角礫は近傍の原岩種を反映して様々の種類からなる。マトリックスは微細な石英と電気石からなる。セロ ヴェルデの最東部ではこの角礫岩が逆円錐形状に直立して煙突状を呈し、そのマトリックスは石英・電気石に加えて多量の硫化物を伴っている。この角礫岩は野外視察から次の珪化角礫岩より後期の生成である。

(3) 珪化角礫岩

これはサンタ ロサで最も重要である。ここでは鉱体の中心に分布し、角礫ボナンザと呼ばれており、最も高品位部であったが、既に採掘済みである。この角礫岩は垂角礫-垂円礫、直径1-20cmの石英片が黄銅鉱を伴う珪質マトリックスに埋められる。

(4) その他角礫岩

デュモルチェライト角礫岩がセロ ヴェルデの最上部から深度120mに亘り、またピットの西部に小規模に分布する。これは直径1-5cmの垂円礫石英を微細な石英、デュモルチェライトからなるマトリックスが埋める。

ペブル角礫岩はペブルが既存の断層に貫入するもので幅10-60cmの岩脈状を呈し、セロ ヴェルデ、サンタ ロサに点在する。垂円礫の片麻岩、花崗閃緑岩、斑岩類が変質岩粒のマトリックスに埋められる。

5.3 変質作用

セロ ヴェルデとサンタ ロサ鉱床ではポーフィリー型鉱床に特徴的な同心円的なゾーニングが知られている。すなわち中心から外側へカリウム質、フィリック、アドバンス 粘土化、プロピライト化である。これら変質帯は5×1.5kmの拡がりを持つ。

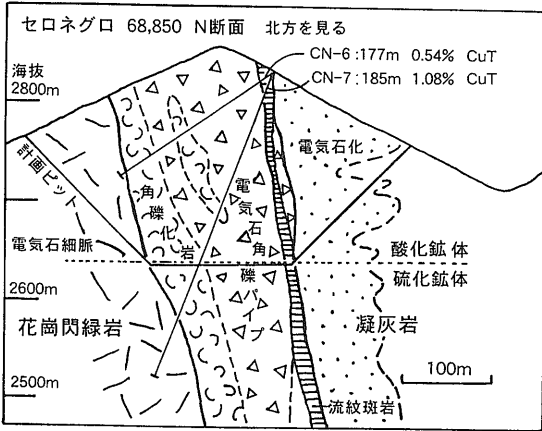
カリウム質変質は深部、セロ ヴェルデではピットの底の海拔2,603m、サンタ ロサでは2,378mの試錐孔に見られる。原岩はヤラバムバ花崗閃緑岩とデイサイトモンゾニ斑岩の周縁相である。カリ長石が細脈状かパッチ状、黒雲母も鉱染状、クロット状、希に石英と共に産する。少量鉱物として絹雲母、緑泥石、方解石、硬石膏、黄鉄鉱、ルチル、黄銅鉱、輝水鉛鉱がある。

フィリック変質は両鉱床で最も広く分布するがサンタ ロサよりもセロ ヴェルデで著しい。構成鉱物は石英・絹雲母に少量の粘土鉱物、微量の黒雲母、緑泥石、緑簾石、電気石、ルチル、チタン石からなる。硫化物は黄鉄鉱、輝水鉛鉱、黄銅鉱である。この変質はカリ長石の絹雲母化に始まる自変質作用と考えられ、プリズム状・針状・放射状の電気石が特徴的である。黄銅鉱が絹雲母と共存して産出することがあり、この変質が銅鉱化と密接であったことが推定される。

プロピライト変質は主に緑泥石、緑簾石からなるため緑色を呈し、鉱体の周辺100mに亘って分布する。少量の方解石、微量のルチル、リューコクシン、アルバイトを含む。硫化物は黄鉄鉱が主体で、黄銅鉱は微量である。粘土化変質は一般に乏しく、セロ ヴェルデ鉱床で数10mに亘って産するに過ぎない。

アドバンス粘土化変質は一般的には粘土鉱物が主体であるが、ここでは明ばん石、葉ろう石、紅柱石変質に対して用いられる。この変質は常に細脈として産し、ほぼ角礫岩体中に限られる。少量鉱物として石英・ボーマイト・カオリナイト・ハロイサイトが付随する。明ばん石は角礫岩上部に細脈状に多く産し、カオリナイト・石英・硫化物を伴うほか、電気石を交代する。カオリナイトは明ばん石のほかに葉ろう石、時にはハロイサイト、ジャロサイトと共存する。

これに対してセロ ネグロ鉱床では電気石化が著しい(第9図)。鉱化の中心である角礫パイプは流紋デイサイト凝灰岩と花崗閃緑岩との境界部にほぼ直立するが、そのマトリックスは塊状電気石で満たされる。下盤側の花崗閃緑岩は細脈状に電気石化を蒙り、上盤側の流紋デイサイト凝灰岩は浸透性の電気石化を受ける。



第9図 セロ ネグロ鉍床の東西断面図。電氣石化が著しい点に注目(Bidgood, 1999)。

5.4 鉍化作用

稼行し得る鉍体はセロ ヴェルデで海拔2,300m, サンタ ロサで同2,150mに達する。前者における母岩の割合はヤラバムバ花崗閃緑岩54%, 斑岩22%, チャルカン片麻岩24%である。鉍化はカリウム質変質帯で最も著しく, 黄銅鉍1.5~4%, 黄鉄鉍1~3%, 平均して硫化物総量3%, 黄鉄鉍/黄銅鉍=3である。量的にはフィリック変質帯が大きく, その硫化物総量は5~7%, 黄鉄鉍/黄銅鉍=3/1~3/2である。

黄銅鉍は他形粒状あるいは絹雲母を取り巻いて

産出し, 黄鉄鉍とも密接である。少量鉍物として輝水鉛鉍, 斑銅鉍, 磁鉄鉍(一部黄鉄鉍化), チタン鉄鉍などがある。輝水鉛鉍と斑銅鉍はセロ ヴェルデ鉍体の中心で多い傾向がある。

流体包有物の塩濃度は4~30重量%のNaCl, その充填温度と硫黄同位体温度計から, 鉍床の生成温度は400℃前後, 生成圧力は0.3~1.5kbと考えられている。

本鉍床発見時には溶脱帯が0~250m, 平均70mの厚さで発達しており, 種々の含水鉄酸化鉍物, 粘土鉍物, 二次的明ばん石, 及び残存石英と電氣石などが見られた。

酸化鉍体がその下位に発達し, 平均厚50m, 特にセロ ヴェルデで大規模であり, 稼行された。主要鉍物はブロッシャンタイト, これはカルセドニー, 明ばん石, ジャロサイト, アントレライト, メランテライト, 珪孔雀石, 赤銅鉍などと共存する。

二次富化帯はその下位に発達し, セロ ヴェルデでは一般に地表下60-80mから, 中心の角礫岩では150mから産出し, その平均厚さは100m, 鉍体の西部, 南部や角礫化部で厚い傾向があった。サンタ ロサでは平均厚さ20-45mであり, やや深い。構成鉍物は輝銅鉍とコペリンが主体で少量の斑銅鉍とダイジェナイトを伴う。黄鉄鉍や輝水鉛鉍が残存する。

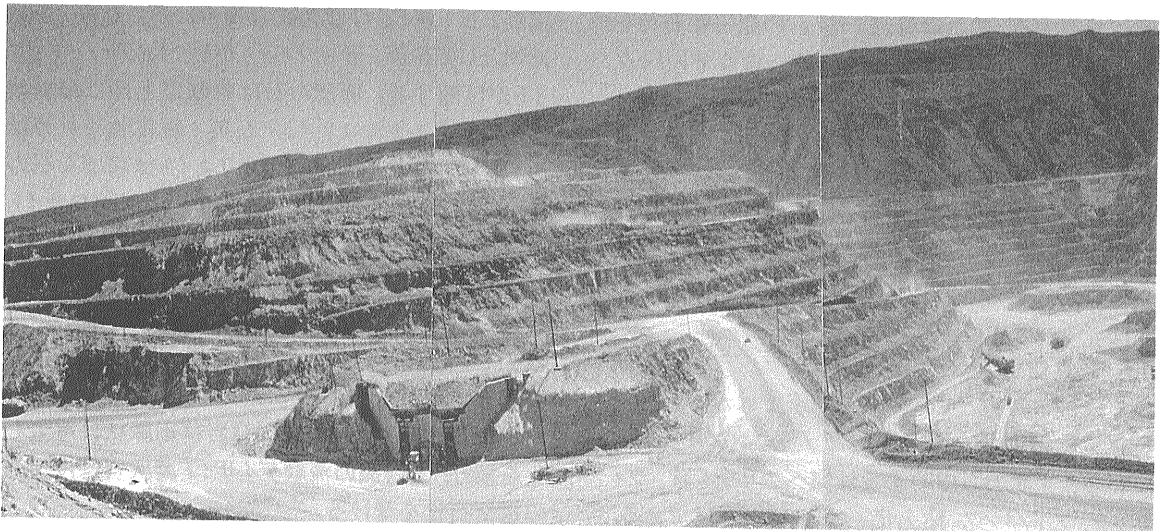


写真13 カホネ鉍山のオープンピット。北西-南東方向の角礫岩。

6. カホネ鉱床

カホネ鉱床はペルー南部 (W17° 02′ 40″, S70° 42′ 15″), 海拔3,500mの高所, トケパラの北北西25kmに位置する。その発見は1942年, 1965-69年にサザンペルー銅鉱会社が組織的な探鉱を行い, 1970年より削土を開始し, 1976年より生産開始, これまでの全削土量は13.7億トン, 採掘鉱石量は4.13億トン, 平均品位Cu 0.97% (銅量約400万トン), 現在のピット深度730m (写真13), 計画ピットは最終的に2.3×3 km, 深度1,090mとなる予定である。現在の選鉱処理能力は87,000トン/日 (Cu 0.64%), 浸出処理能力は2,100トン/日である。地質鉱量は21.71億トン (Cu 0.6%銅量約1,300万トン) と計算されている (Cuajone Geol. Dept., 2000)。

当地域の構成岩類は上部白亜紀-古第三紀トケパラ層の玄武岩質安山岩とこれを整合的に覆う斑状 (石英2mm以下) 流紋岩 (層厚250m以下) であり, これにラタイト斑岩プラグが貫入する。ラタイト斑岩は2-4mmの石英, 希に長石斑晶を持つ。熱水変質と鉱化が著しい。

鉱化後の岩石として後鉱化角礫岩と火山岩類がある。後鉱化角礫岩は円形-垂円形, ペブルサイズの変質・鉱化岩石礫がラタイト斑岩マトリックスに埋められるもので, 部分的に珪化や石英晶洞を伴う。後鉱化火山岩類は珪長質な火砕

岩で, 22-17Ma (ウアリジャス層) と14-9Ma (チュンタカラ層) の年代を持つ。

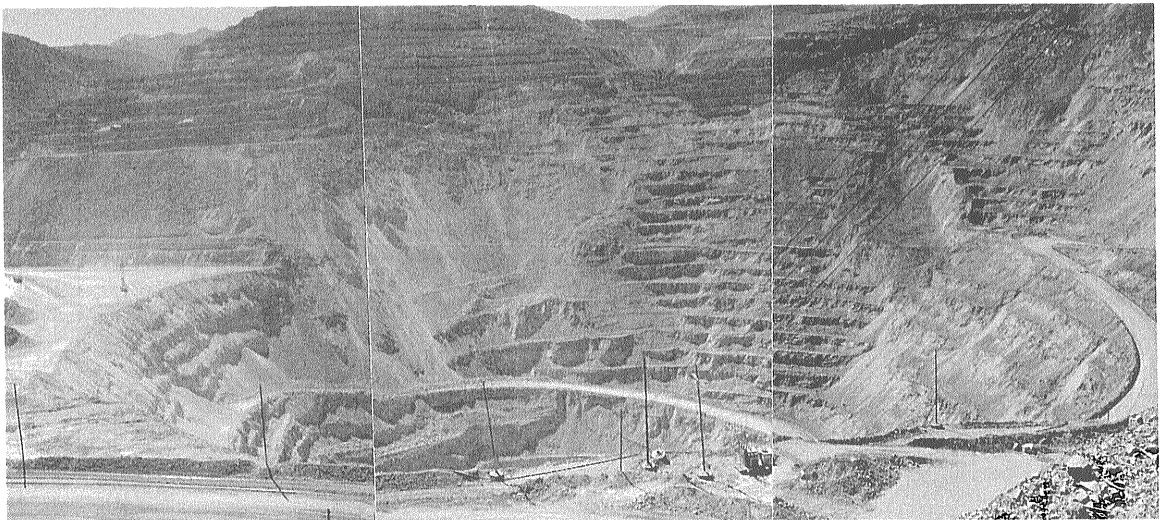
鉱床付近の構造は基本的には北西-南東方向の断層で代表される。鉱床中央の角礫岩やラタイトプラグなどはこの方向に伸長する (第10図)。鉱体内では多方向の割目が著しく発達し, 網状鉱石の生成原因になったことを暗示する。

カホネにおける熱水変質作用は直径3-4kmにも及び, 全体的に粘土化変質が著しい。その原因として初生と二次的な粘土化が重複すること, 及び破碎化と割目化が著しく, 上昇熱水と下降天水の流通を容易ならしめたことが考えられる。

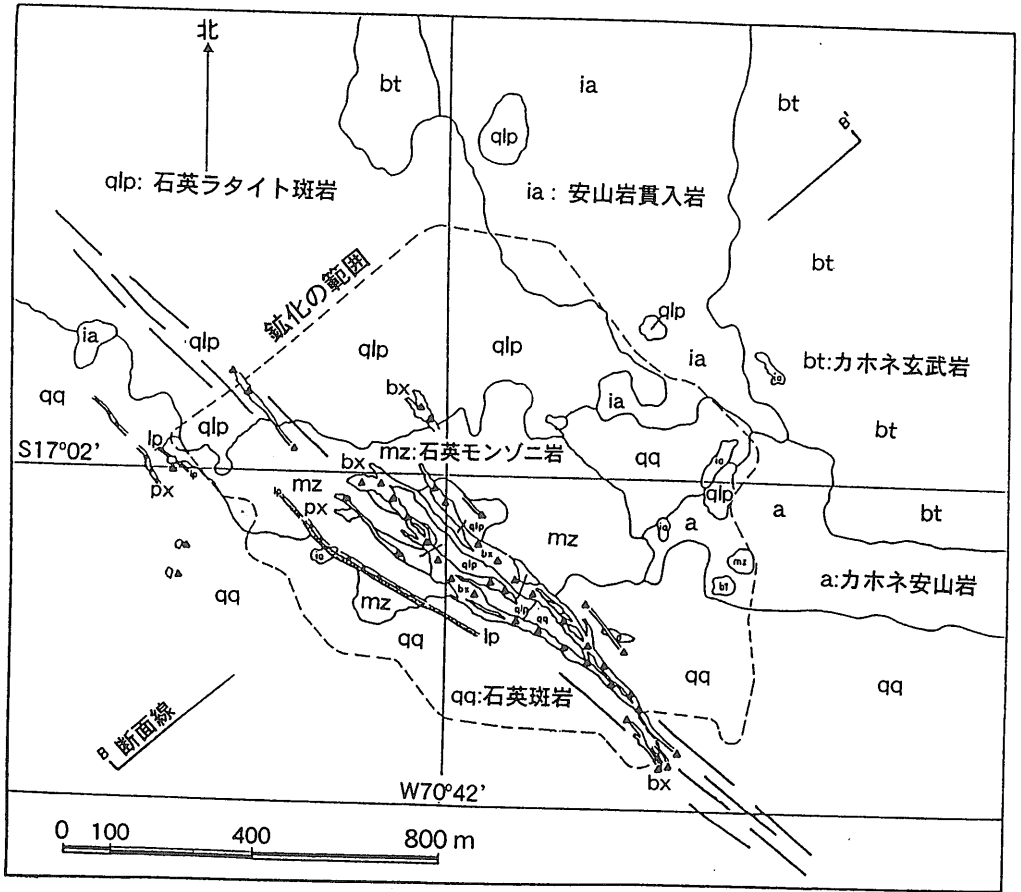
カリウム質変質は鉱床北東部の試錐で発見されたに過ぎず, 玄武岩質安山岩の二次的黑雲母, 磁鉄鉱, 緑泥石, 硬石膏の組み合わせを持って, また鉱床南東部のラタイト斑岩の深部ではカリ長石, 磁鉄鉱, 二次的黑雲母を含む細脈として見られる。

フィリック変質はほぼ等量の石英・絹雲母に少量の粘土鉱物を伴うもので, カホネ鉱床の全般的に, 特にラタイト斑岩プラグで特徴的である。石英斑晶は残存するが, 長石は絹雲母と粘土鉱物に変質し, これらが石英細脈や珪化岩に包まれる。珪化は南部の流紋岩で著しく, また中央の角礫岩帯でも顕著に発達する。

粘土化変質は全般に広く発達し, カオリナイト, モンモリロン石, イライト, ディカイトからなるが, 苦鉄質火山岩類では多量の緑泥石と黒雲母を含む。



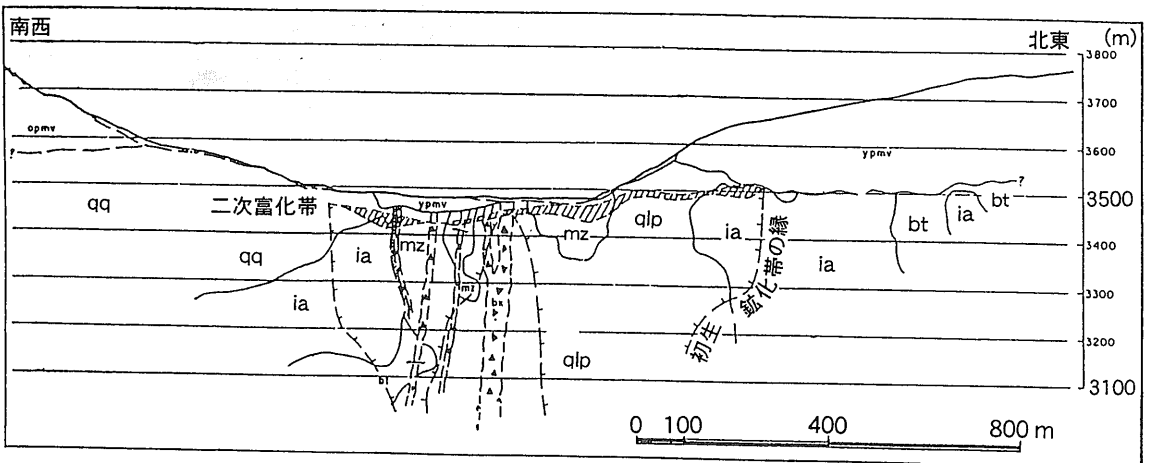
岩脈。断層に沿って鉱化し, ピットの地表延長は2.2kmをこえる。



第10図 カホネ鉱床の地質略図 (Manrique & Plazolles,1975). Bxは角礫岩, lpはライト斑岩.

カホネの鉱化作用は北西-南東に伸長する2.2×1.0kmの規模を持ち、深部で急斜する壁岩を持つ漏斗状の断面を示す(第11図)。初生鉱体は黄鉄鉱と黄銅鉱がライト斑岩中に網脈と鉱染状に産

するもので、少量の斑銅鉱と硫砒銅鉱を伴う。安山岩中では黄銅鉱が緑泥石を交代する形で見られる。角礫帯深部では硫砒銅鉱、四面銅鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱が産出する。



第11図 カホネ鉱床の北東-南西地質断面図 (Manrique & Plazolles,1975). 記号は第10図と同じ.

輝水鉛鉱はカホネ鉱山では重要な随伴鉱物で、これは鉱染状、石英細脈状、割目沿いに煤状の産状を示す。銅硫化物種とは特定の関係を持たない。初生鉱体は形成後の風化作用を受けるが、カホネ鉱山では鉱床南部で鉱体最上部と鉱化後火山岩類との間に厚さ120mの溶脱帯が見られ、風化による酸化および二次富化作用が地質時代に生じたことを示している。北部では溶脱帯は無く、酸化鉱体が直接に鉱化後火山岩類に覆われる。

酸化鉱体は厚さ15m、ほぼ水平な層状に分布しており、これは珪孔雀石、孔雀石、カルカンサイト、自然銅、赤銅鉱、黒銅鉱を含む。酸化鉱は将来のリーチング銅採取のために現在貯えられている。

二次富化帯は平均厚さ20m、既に全て採掘済みである。銅鉱物を輝銅鉱を主体に、斑銅鉱、ダイジェナイト、コベライトを伴う。輝銅鉱は原鉱物の鉱染状・細脈状などの産状をそのまま維持して産出する。二次富化帯の下部には、輝銅鉱と黄銅鉱が共存する若干の初生鉱体への移行鉱化帯がある。

7. トケパラ鉱床

トケパラはペルー南部のS17° 14' W70° 36'、タクナの北東直85kmに位置する。その発見の歴史は古く19世紀には知られており、20世紀初期にはチリーの探鉱家の注目を集めた。しかし、真にその重要性が認識されたのは1937年にセロドパスコ銅社が地質家を送り込んで以降であり、チュキカマタ、ポートレリヨスなどと比べるとかなり遅い。そ

の理由の一つは交通が不便であったことによる(Richard & Courtright, 1959)。1938～42年のセロドパスコ銅社、1945～49年のASARCOの子会社による探鉱で鉱床の概要が明らかになった。

1956年に開発に着手、1959年11月から生産を開始し、露天掘り法(口絵8)により17.6億トンの岩石が採掘され、5.19億トンの鉱石(Cu 1.03%)から535万トンの銅が生産された(口絵10)。残存鉱量は7億トン(Cu 0.74%、含銅量518万トン)、リーチング用鉱石は10.97億トン(Cu 0.2%、含銅量219万トン)と公表されている。現在の処理能力は選鉱処理鉱石50,000トン/日、浸出処理鉱石18,738トン/日である(Toquepala Geol. Dept., 2000)。

トケパラ付近には白亜紀-古第三紀の流紋岩溶岩、安山岩溶岩、集塊岩類が厚さ1,500m以上に亘って発達し、トケパラ層と呼ばれている。これらは閃緑岩、花崗閃緑岩ストック、それらの分化相である斑状デイサイトの貫入を受ける。広域的に北西-南東方向の断層(トケパラ、ミカラコなど)が発達し、貫入活動やその後の角礫化、熱水活動を規制する。熱水活動の最末期には爆裂性のヴェント角礫が鉱床北部に発達し、種々の形と大きさのデイサイトや角礫は石英・電気石のマトリックスに埋められる(写真14)。最後にラタイト岩脈がトケパラ断層沿いに貫入する。トケパラ鉱床の鉱化年代は58-52 Maである。

変質作用はラタイト岩脈を除く全ての火山岩類と貫入岩類に及び、次の4帯に分けられる。(1)カリウム質-フリック変質帯:カリ長石-黒雲母、石英-絹雲母からなる。(2)フリック変質帯:石英-



写真14 トケパラの角礫鉱石。北部に大量に産出した。

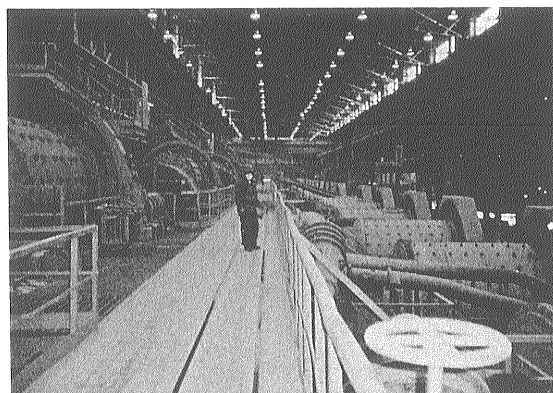


写真15 トケパラ鉱山のクラッシャー設備。

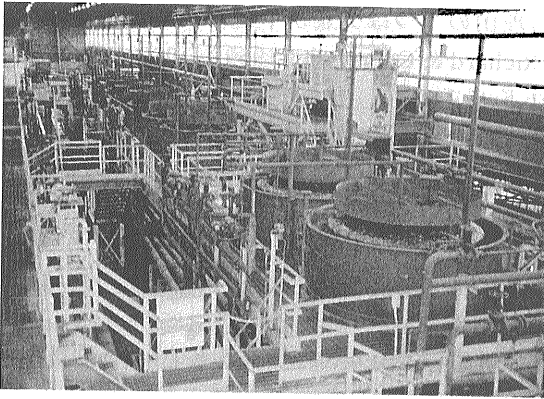


写真16 トケパラ鉱山の浮遊選鉱場。

絹雲母，黄鉄鉱からなる。(3)粘土化：石英-粘土鉱物。(4)プロピライト変質：緑簾石，方解石，緑泥石，黄鉄鉱。他に珪化が石英斑岩付近で著しい。初生鉱化は黄銅鉱と輝水鉛鉱が鉱染・網状に見られるもので，特に角礫化部で著しい。初生鉱体形成後の二次富化作用を受け，溶脱帯下位に厚さ0-150mの輝銅鉱ブランケットが発達している(Mattos y Valle, 1999)。

8. テンタヤ スカルン型鉱床

ポーフィリー銅鉱床には母岩に石灰質岩類が含まれる場合に，スカルン型の鉱床が伴われることがあり，それはポーフィリー型よりもしばしば高品位であって鉱業的には魅力的である。この種の鉱床は典型的なスカルン鉱床よりも浅成の環境で生成された可能性が高く，アメリカ合衆国南西部ではタク

タイト(tactite)と特別な名称で呼ばれている。

ペルー南部のテンタヤ鉱床も中生代堆積岩類に第三紀の閃緑岩-モンゾニ岩が貫入し，網状細脈が発達する以前に鉱液が石灰質岩類と反応してスカルン鉱床を形成したもので，黄銅鉱，斑銅鉱，磁鉄鉱に富む高品位鉱床である。

鉱床はペルー南部のクスコ県，ヤウリの近くの4,200mの高所にある。1940年代から銅酸化物を伴う磁鉄鉱・柘榴石スカルンの鉱徴が知られており，大規模鉱床の発見は1972-73年のIP法を含む組織的探査以降であり，1976年の試錐によって経済的な初生鉱床が発見された。

1994年の民営化に向けた売却時点(マグマ社が243万ドルで購入)での発見鉱量は下記の通りであった(Phelps, 1995)。

- (1) 硫化鉱 本体：5,800万トン，1.78% Cu，コロコウアイコ：1,940万トン(2.56% Cu，カットオフ1.0% Cu)
- (2) 酸化鉱2,680万トン(1.98% Cu，うち1.70% Cuが溶出銅)。このうち996万トン，2.0% Cu(うち1.61% Cuが溶出銅)は採掘済み。

現在はブローケンヒル社(BHP)が保有し，15,000トン/日(Cu1.5%)でオープンピット採掘している(写真18)。

鉱床付近の地質は下位から，上部ジュラ紀の珪質砂岩，下部白亜紀の泥岩類，中部白亜紀の厚さ880mに達する厚いフェロバンバ石灰岩層，これらを覆う上部第三紀の火山岩類からなる。第三系は貫入岩としても見られ，閃緑-モンゾニ岩(33~34 Ma)が上記中生層に貫入し，変質・鉱化作用を及

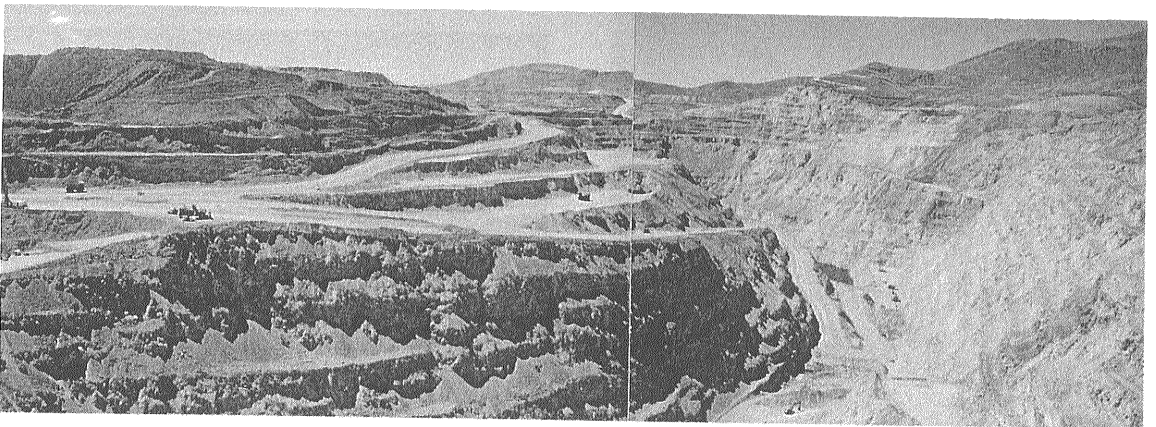


写真17 テンタヤ鉱山のオープンピット。

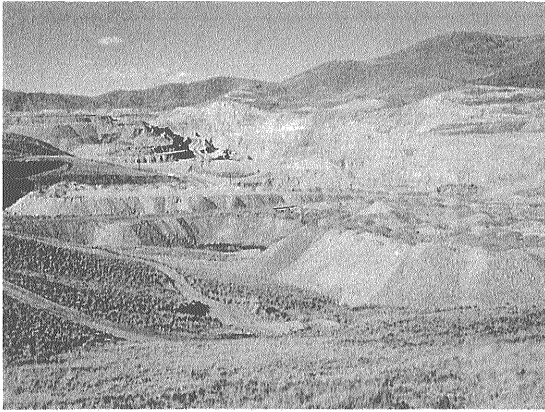


写真18 ティンタヤ鉱山のずり場。なお捨場に余裕がある。

ばす。閃緑岩は安山岩およびデイサイト岩脈に切られる。火成岩類は全て磁鉄鉱系に属するものと思われる。見学時の帯磁率測定は閃緑岩-モンゾニ岩が $26 \sim 50 \times 10^{-3}$ SI, 安山岩, デイサイト岩脈が $10 \sim 18 \times 10^{-3}$ SIを示した。

鉱化は下位の珪質砂岩, 泥岩にも一部で見られるが, フェロバンバ石灰岩で最も著しい。鉱床タイプとしては石灰岩中の層準規制柘榴石-輝石スカルン鉱体が最も重要であり, 次いでフェロバンバ石灰岩と閃緑岩-モンゾニ岩プラグの接触域に沿う柘榴石-輝石鉱体, 断層沿いの磁鉄鉱スカルン鉱体などである。貫入プラグから周辺へスカルン鉱物のゾーニングが認められる。すなわち緑簾石化閃緑岩→柘榴石帯→輝石帯である。鉱体の上部は風化作用を受け, 酸化帯をそしてその下位に二次富化輝銅鉱帯が存在するが, 極めて小規模である。

鉱石鉱物はほとんど黄銅鉱, 斑銅鉱であり, 黄鉄鉱は非常に少ない。従って風化作用で発生する酸性水が少ないために二次富化帯が発達しなかったものと考えられる。

9. アンデスに巨大銅鉱床がある理由

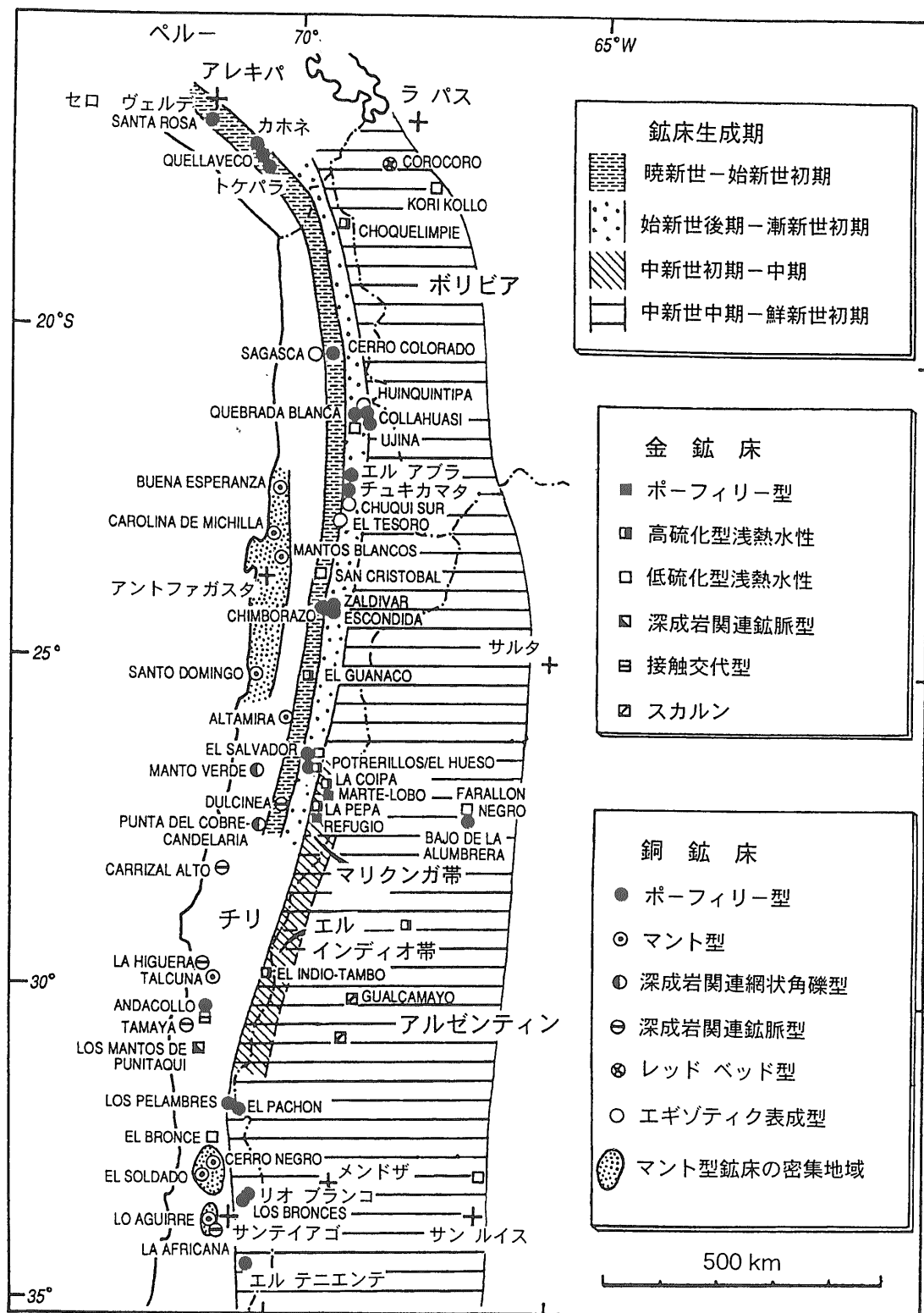
記述のようにペルー南部には沢山の銅がポーフィリー型鉱床として沈殿している。銅鉱床は南方のチリー中北部を含めて南緯 $10 \sim 35$ 度間に分布し, 世界の銅資源量の約40%を保有するほどに巨大である。従ってペルーとチリーの銅鉱床は一括して考察する必要がある。

この地域の主要鉱床は第12図に示すように, 新生代の3生成区と3地帯に分れて分布する。晩新世-始新世初期の鉱床帯はセロ ヴェルデ, カホネ, トケパラなどを含み, ペルー南部からチリー北部にかけて150kmに亘り連続する。その東側には始新世後期-漸新世初期のポーフィリー銅鉱床帯が125kmに亘って南-北系のドメイコ断層群の規制を受けて分布する。主要鉱床はチュキカマタ, エルアブラなど6鉱床である。その東方には延長130kmの中新世鉱床帯があり, エル テニエンテ, リオブランコ, ロス プロンセスなどの大鉱床を伴う。これらのうち最大は銅量5,000万トンクラスのチュキカマタとエル テニエンテ鉱山である。

これらの鉱床帯は南米コルディレラで地殻が最も厚い所に分布するが, 鉱化関係火成岩には大陸地殻物質の影響は少ししか認められていない。例えばSr初生値は概して低く(石原, 1981), Pb同位体は変化幅が小さいマントル値を示す(Oyarzuin, 2000)。

各鉱床帯の中で巨大鉱床は点で示されるものである。アンデスには海溝に直交する不連続面が古くから知られており, このような弱線沿いに熱や揮発生成成分が上昇してマントル対流が起こり(第13図), その上部のアセノスフィアが部分溶融してマグマが発生し, 上昇して例えばエル・サルバドール-ファラヨン・ネグロ地域のような巨大鉱化域が生成した可能性がある(Sasso & Clark, 1998)。黄鉄鉱・黄銅鉱に含まれる微量のオスニウム $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初生値はチュキカマタとエル テニエンテで1以下でマントル値(-0.15)に近く深部起源を示唆し, 小さい鉱床は1~5と高く地殻起源を示している(Mathur *et al.*, 2000)。この研究も大量のCu, Sが深所からもたらされた所が巨大鉱床の生成場であることを暗示する。

現在のペルーとチリー沖では, 海洋地殻が $15 \sim 30$ 度の浅い角度で沈み込んでおり, 第三紀に遡っても同様な状態が想定される(Jasillard *et al.*, 2000)。浅い角度では海洋側大陸地殻中の圧縮応力場が拡がり, 火山帯の近くまで達するため, 火山帯下では圧縮/引張りの中間的応力場が発達する。渡辺(1998)はこの点がポーフィリー銅鉱床の形成に重要で, これによって鉱液を含むカルク・アルカリ岩マグマが火山底でその容積を増大させ, かつ



第12図 時代と地帯別に累帯配列を示すペルーチリーのポーフィリー銅鉱化帯 (Sillitoe, 1992).

地表に噴出せず、内部爆発をして網状組織や角礫パイプ構造を形成し、銅鉱物をせしめたと指摘する。

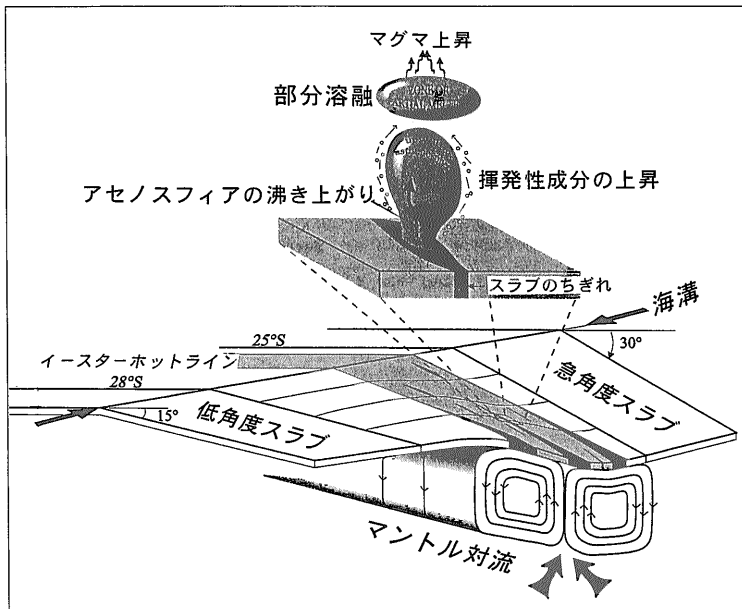
ポーフイリー銅鉱床の関係火成岩は一般に、カルク・アルカリ岩系の花崗閃緑岩-デイサイトであり、内陸の一部で垂アルカリ岩ないしアルカリ岩的である。これら岩石の銅や硫黄含有量は鉱化に無関係の岩石と比べて若干高いものの特に大きな値は示さない(Ishihara *et al.*, 1984)。その理由は両元素とも珪酸塩メルトから分離した揮発性成分として鉱床へ移動・濃集したことによる。移動・濃集の最大の原因はマグマの酸素フガシティが高かったためであろう。

アンデスのポーフイリー銅鉱床は硬石膏や初生石膏などの硫酸塩鉱物に富んでおり、環太平洋地域で最も酸化的雰囲気では鉱床が形成されている。酸素フガシティが高いと硫黄は珪酸塩メルトに溶け込まず流体相に濃集し(Ishihara *et al.*, 1988)、貫入岩の周りに巨大な硫黄鉱床をつくる。ポーフイリー銅鉱床の場合、鉱床中のS/Cu比は一般に10程度に大きいから銅量500万トンの鉱床では5,000万トンの硫黄が濃集していたことになる。因みに日本最

大の第四紀硫黄鉱床、岩手県の松尾鉱山の歴代生産量は570万トンである。銅はS、Clなどと結合して流体と共に挙動したであろう。

硫黄が大量に鉱床に集まる原因の第2点として、マグマ発生場所の原岩の硫黄濃度が高いか、あるいは流体として発生マグマに流入する機構を伴っていた可能性が考えられる。第1点と第2点の両者が機能すると大規模鉱床が形成されるであろう。硫黄の巨大なリザーバーは海水である。海水の硫酸塩硫黄を取り込んだ変質海洋地殻が沈み込み、マグマ発生プロセスを経て再生される可能性は検証される価値がある。硫黄同位体研究によると、チリーの深成岩類の岩石硫黄は $\delta^{34}\text{S} = +4 \sim +6$ パーミルで重く、海水硫黄添加の可能性を示している(Sasaki *et al.*, 1984)。銅も海底熱水変質作用で一次濃集したものがマグマ発生場でマグマに取り込まれ、硫黄と共に上部地殻に上昇してきたものであろう。今後は銅など金属の同位体比などを用いて、その起源を直接に調べる必要がある。

アンデスのポーフイリー銅鉱床にはペルーやエルテネンテ(松久, 1981)で代表されるように電気石角礫パイプが一般的である。ポロンは錫鉱床やSタ



第13図 エルサルバドル-ファラオン ネグロ断面におけるマグマ発生モデル(Sasso & Clark, 1998)。イースターホットラインの延長部は傾斜の違いによってナスカプレートがちぎれた部分であり、ここではマンテール対流により熱と揮発性成分が得られ、その上位のアセノスフィアにおける部分溶融を活発化させる。発生したマグマが上昇して鉱床を形成した。

イブ花崗岩に多産し、大陸地殻に含まれていた堆積性ボロンがマグマ活動に再生されたものと一般に考えられている。ペルーとチリの鉱床帯における深所起源マグマとボロンとの関係は極めて興味深い。ボロンも硫黄と同様に気相移動で鉱化マグマに濃集した可能性も考えられ、今後のボロン同位体研究などがポーフィリー鉱化地帯で行われることに期待したい。

謝辞：今回の調査に際して、ペルーに関する文献および現地情報で大変お世話になった金属鉱業事業団の塩川 智さんに厚く御礼申し上げます。

文 献

Benavides, A. and Vidal, C.E. (1999) : Exploration and mineral discoveries in Peru. Proc. PACRIM '99, 187-195.
 Bidgood, T. (1999) : Geologia del yacimiento Cerro Negro. In Primer Volumen de Monografias de Yacimientos Minerales Peruanos: Historia, Exploracion y Geologia (Volumen Luis Hochschild Plaut), 227-230.
 Cobbing, E. J., Pitcher, W.S., Wilson, J. J., Baldock, J. W., Taylor, W. P., McCourt, W. and Snelling, N. J. (1981) : The geology of the Western Cordillera of northern Peru. Inst. Geol. Sci., Overseas Mem., 5, 143 p.
 Cuajone Geol. Dept. (2000) : Geological aspects of the Cuajone porphyry copper deposit. Souther Peru Copper Corp. 7 p.
 INGEMMET (1995) : Geologia del Peru. Inst. Geol. Minero Metalurgico, 177 p.
 INGEMMET (2000) : Copper mines in southern Peru: Mina Tintaya (Cuzco), Mina Cerro Verde (Arequipa), Mina Cuajone (Mowuegua) y Mina Toquepala (Tacna). Inst. Geol. Minero Metalurgico, Derec. Prospec. Minera, 48 p.
 石原舜三 (1981) : チリ、火成活動の国。地質ニュース, no. 326, 6-20.
 Ishihara, S., Sasaki, A. and Terashima, S. (1988) : Sulfur in granitoids and its role for mineralization. Proc. 7th (1986) Quad. IAGOD Sym., 573-581., E. Schweizerbart' sche Verlagsbuchhandlung.
 Ishihara, S., Hashimoto, M. and Machida, M. (2000) : Magnetite/ilmenite-series classification and magnetic susceptibility of the Mesozoic-Cenozoic batholiths in Peru. Resource Geol., 50, 123-129.
 Ishihara, S., Ulriksen, C.E., Sato, K., Terashima, S., Sato, T. and Endo, Y. (1984) : Plutonic rocks of north-central Chile. Bull. Geol. Surv. Japan, 35, 503-536.
 Jaillard, E., Herail, G., Monfret, T., Diaz-Martines, E., Baby, P., Lavenu, A. and Dumon, J. F. (2000) : Tectonic evolution of the Andes of Ecuador, Peru, Bolivia and northernmost Chile. In Cordani U.G. *et al.* edited (2000) Tectonic Evolution of South America, 481-560.
 Le Bel, L. M. (1985) : Mineralization in the Arequipa segment: The porphyry-Cu deposit of Cerro Verde/Santa Rosa. In Pitcher

W.S. *et al.* ed.: Magmatism in a Plate Edge: The Peruvian Andes. Blackie & Son, Ltd., 250-260.
 Manrique C., J. and Palzozles V., A. (1975) : Geologia de Cuajone. Bol. Soc. Geol. Peru, 46, 137-150.
 Mathur, R., Ruiz, J. and Munizaga, F. (2000) : Relationship between copper tonnage of Chilean base-metal porphyry deposits and Os isotope ratios. Geology, 28, 555-558.
 松久幸敬 (1981) : 銅の国, チリ。地質ニュース, no. 328, 6-22.
 Mattos, R. y Valle, J. (1999) : Exploracion, geologia y desarrollo del yacimiento Toquepala. In Primer Volumen de Monografias de Yacimientos Minerales Peruanos: Historia, Exploracion y Geologia (Volumen Luis Hochschild Plaut), 73-92.
 Oyarzuin, J. (2000) : Andean metallogenesis: A synoptical review and interpretation. In Cordani U.G. *et al.* edited (2000) Tectonic Evolution of South America, 725-754.
 Petersen, U., Vadal, C.E. and Noble, D.C. (1990) : A special issue devoted to the mineral deposits of Peru. Econ. Geol., 85, 1287-1295.
 Phelps, R. W. (1995) : Tintaya-A major skarn district? Betting on the come, with much to come-like Peru today. E & Mj, August, 38-43.
 Phelps Dodge, Geol. Dept. (2000) : Geologia de los porfidos de cobre, Cerro Verde y Santa Rosa, 21 p.
 Pitcher, W. S. and Cobbing, E.J. (1985) : Phanerozoic plutonism in the Peruvian Andes. In Pitcher W.S. *et al.* ed.: Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes. Blackie & Son, Ltd. 328 p.
 Sasaki, A., Ulriksen, C. E., Sato, K. and Ishihara, S. (1984) Sulfur isotope reconnaissance of porphyry copper and manto-type deposits in Chile and the Philippines. Bull. Geol. Surv. Japan, 35, 615-622.
 Richard, K. and Courtright, J. H. (1959) : Geology of Toquepala, Peru. Mining Eng. In INGEMMET (2000).
 Sasso, A. M. and Clark, A. H. (1998) : The Farallon Negro group, northwest Argentina: Magmatic, hydrothermal and tectonic evolution and implications for Cu-Au metallogeny in the Andean back-arc. SEG News Let., no.34, 1-18.
 Sillitoe, R. H. (1992) : Gold and copper metallogeny of the central Andes-Past, present and future exploration objectives. Econ. Geol. 87, 2205-2216.
 塩川 智 (2000) : 世界の鉱業の趨勢：ペルー。海外鉱業情報, v. 30, no.1, 233-242.
 Toquepala Geol. Dept. (2000) : Geological aspects of the Toquepala porphyry copper deposit. Southern Peru Copper Corp. 6 p.
 Vidal, C.E. (1985) : Metallogenesis associated with the Coastal Batholith of Peru: a review. In Pitcher W.S. *et al.* ed.: Magmatism in a Plate Edge: The Peruvian Andes. Blackie & Son, Ltd., 243-249.
 渡辺 寧 (1998) : 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学 (5) - テクニック応力とポーフィリー鉱化作用 (その1) - ぼなんぎ10月号, 11-17.

ISHIHARA Shunso (2001) : Porphyry copper deposits of southern Peru.

< 受付：2001年1月5日 >