

チリの新世代テクトニクスと斑岩銅鉱化作用— チリはなぜ世界最大の銅産出国なのか？

渡辺 寧¹⁾

1. はじめに

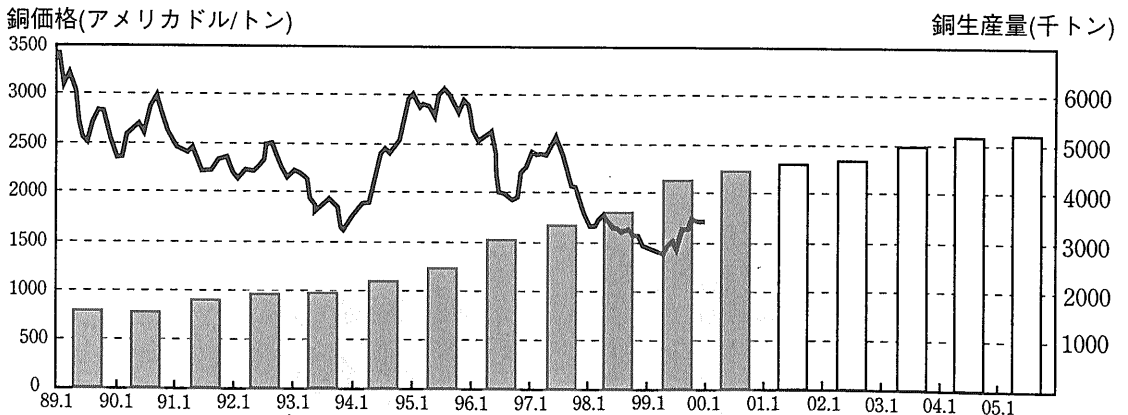
1990年代後半の世界の経済停滞による金属消費量の落ち込みは、金属鉱物資源の探査に暗い影を投げかけている。銅価格は経済停滞の影響を反映し、1999年に最安値を記録した(第1図)。この影響でカナダ屈指の銅鉱床であるハイランド・バレー(第2図)やザンビアの銅鉱山は採算割れを起こし、閉山に追い込まれている。こうした中、ラテンアメリカは着実に鉱業開発のための資金を集めており、2000年には世界の資源探査資金の34%(地域面積の占める割合は16%)がラテンアメリカに投資されている(White *et al.*, 2001)。

銅生産に関してはチリが世界の中で群を抜いており、世界の約30%の鉱石を生産してきた(第1表)。この比率は2000年には37%に上昇している。現在行われている既存・新規鉱山への設備投資により、今後、同国の銅生産量は4,437千トン(2001年)から5,261千トン(2005年)と着実に増加する予

定である(第1図)。銅価格の低迷という厳しい状況のもとで、むしろそれを逆手にとって発展するチリの銅鉱業を支える第一の要因は、同国の世界最大規模の銅埋蔵量である(第1表)。

チリには地質層準規制(マント)型をはじめ鉱脈型、スカルン型等のさまざまな種類の銅鉱床が存在するが、何と云っても規模が大きいのはチュキカマタ(第2図)を代表とする斑岩銅鉱床である。斑岩銅鉱床の存在がチリを世界最大の銅生産国にし、チリ経済を支えていると言っても過言ではない。斑岩銅鉱床は、一般にプレート収束域でのカルクアルカリ質、磁鉄鉱系列の火成活動に伴われ、日本など一部の火山弧を除く環太平洋地域の火山帯に広く分布する(第2図)。それなのになぜチリだけに突出して大規模な斑岩銅鉱床が集中して形成されているのであろうか？

私は1996年から99年にかけて金属鉱業事業団の技術開発プロジェクトの一環として、チリ北部のエル・サルバドル鉱床の成因について共同研究を



第1図 銅の価格の変動(折れ線グラフ)とチリの年間銅生産量(棒グラフ)推移(通商産業調査会, 2000と金属鉱業事業団資源情報センター資料に基づく)。2001年から2005年の生産量は予測。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: チリ, 斑岩銅鉱床, チリ型沈み込み, 非地震性海嶺, 海膨

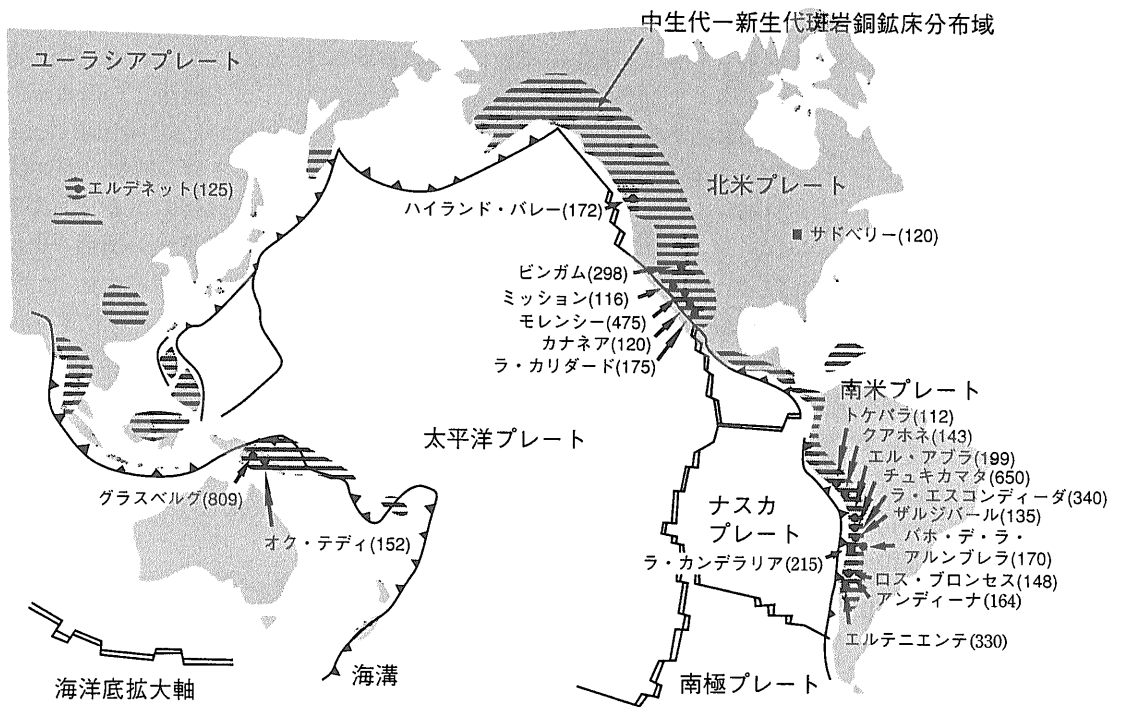
第1表 世界の国別の銅埋蔵量および生産量.

埋蔵量(含有金属量千トン)				鉱石生産量(含有金属量千トン)			
順位	国名	1998年	比率(%)	順位	国名	1998年	比率(%)
1	チリ	160,000	25	1	チリ	3,687	30
2	アメリカ	90,000	14	2	アメリカ	1,887	15
3	ペルー	40,000	6	3	インドネシア	809	7
4	中国	37,000	6	4	カナダ	705	6
5	ポーランド	36,000	6	5	オーストラリア	607	5
6	ザンビア	34,000	5	6	ロシア	500	4
7	ロシア	30,000	5	7	中国	487	4
8	メキシコ	27,000	4	8	ペルー	483	4
9	インドネシア	25,000	4	9	ポーランド	436	4
10	オーストラリア	23,000	4	10	メキシコ	385	3
11	カナダ	23,000	4	11	カザフスタン	338	3
12	カザフスタン	20,000	3	12	ザンビア	315	3
	その他	105,000	16		その他	1,564	13
	合計	650,000	100		合計	12,203	100

通商産業調査会 (2000)

行った。この経緯から、2001年の資源地質学会のシンポジウムでチリの斑岩銅鉱床についての表題の講演を行った。その時の講演依頼内容は「なぜ

チリに大規模斑岩銅鉱床が集中して形成したか説明せよ」という難問だった。ここではこの課題についての私見を述べる。



第2図 環太平洋地域における中生代～新生代の斑岩銅鉱床の分布域(上田, 1983を改変)と主要銅鉱床(銅生産高100千トン/年以上)の分布および1998年銅生産量(通商産業調査会, 2000). 主要銅鉱床のうち斑岩銅型を●, その他の型の鉱床を■で表す。()内の数字は1998年銅生産量(通商産業調査会, 2000, 単位は千トン).

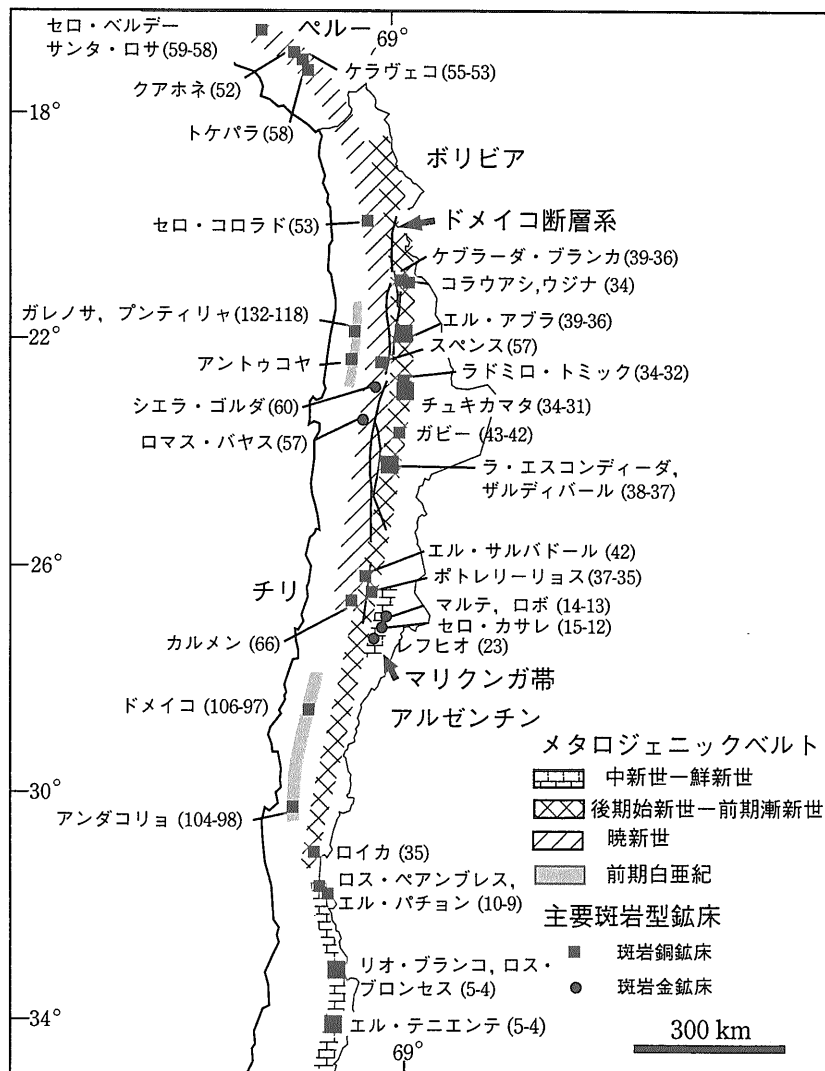
2. チリの斑岩銅鉛床形成場の特徴

2-1. 全般の特徴

チリの斑岩銅鉛床はペルー南部からチリ中部にかけて南北帯状に分布し、前期白亜紀、暁新世、後期始新世-前期漸新世、中期中新世-鮮新世の4つのグループに分類される。これらの斑岩銅鉛床群の分布域(メタロジェニックベルト)は、火成活動域の移動と同じくして、時代とともにより東(背弧)側に移動する。ほとんどが斑岩銅鉛床からなるが、暁新世および中新世の鉛床には含銅斑岩金鉛床も含まれている(第3図)。これら4つのグループの中でも、経済的に重要な鉛床は、後期始新世-前期

漸新世と中期中新世-鮮新世のグループに含まれているので、ここではこれら2つの鉛床グループについて話を進める。

これらの2時期の鉛床はいずれも圧縮テクトニクスの時期に形成されており、その原因は「チリ型」沈み込みに起因すると考えられている。斑岩銅鉛床を伴う深成-貫入岩は、花崗閃緑岩からトータル岩、モンゾナイト、石英モンゾナイトの組成を持ち、前鉛化作用期の中性のマグマから鉛化作用期のよりSiO₂とK₂Oに富んだ珪長質のマグマへの明瞭な進化が認められる。岩石化学的には、これらの岩石はカルクアルカリ質、メタルミナ岩、高~中K₂O量で、酸化的である(Fe₂O₃/FeO比が高い)。



第3図
チリの斑岩銅(金)鉛床の分布。
()内の数字は形成年代(Ma)。
Camus and Dilles (2001) 原図。

第2表 チリの斑岩銅鉛床の特徴.

	後期始新世-前期漸新世	中新世-鮮新世
鉛化年代	42-31Ma	23-4Ma
地域	1,200km×30km	900km×(400km)
鉛化作用の場所	東に移動(3km/百万年)	南に移動(120km/百万年)
金属種	Cu, Mo	Cu, Mo, Au
火成活動様式	貫入岩	貫入岩+噴出岩
マグマの起源	(地殻起源物質の増大)	地殻起源物質の増大
鉛液の起源	マグマ水	マグマ水
応力場	火山弧直交方向応力増大	?
テクトニックセッティング	海膨沈み込み?	ファン・フェルナンデス海嶺の沈み込み
代表例	チュキカマタ, ラ・エスコンディーダ	エル・テニエンテ, リオ・ブランコ・ロース・プロセス

すべてがIタイプで磁鉄鉛系列である。これらのマグマのレアアース元素パターンは高いLa/Yb値を持ち、分化の程度が大きく、厚い大陸地殻(>45km)の存在を示唆する(Camus and Dilles, 2001)。

2-2. 斑岩銅鉛床の分布および鉛化時期

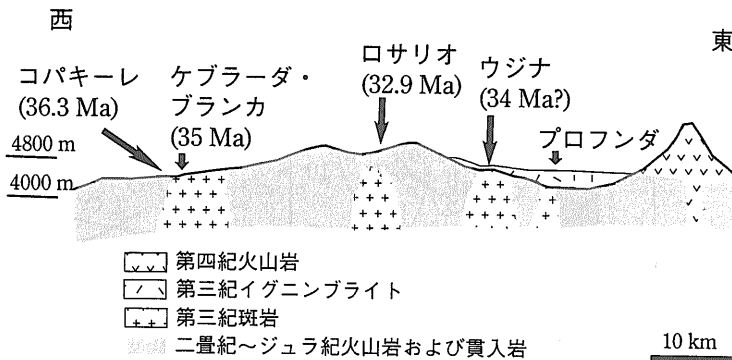
チリの後期始新世-前期漸新世と中新世-鮮新世の斑岩銅(-金)鉛床の特徴を第2表に示す。始新世-漸新世の鉛床は42Maから31Maの約1,100万年の間に形成されており、その分布は横ずれ断層であるドメイコ断層系に平行に南北約1,200kmにも及ぶ(第3図)。それに対して東西幅は約30kmと極めて狭い範囲に収まる。斑岩銅鉛床の鉛化年代を詳しく見ると、40Maよりも古い鉛床はこの断層系よりも西側に分布し、40Maよりも新しいものは断層上、または断層よりも東側に位置する。東西方向に鉛床が並んでいるロサリオ地域では、西から東へと斑岩銅鉛床の鉛化年代が新しくなる傾向

が認められるが(第4図)、鉛化作用の場の移動速度は3km/100万年と極めて小さい。南北方向では顕著な鉛化年代の違いは認められない。

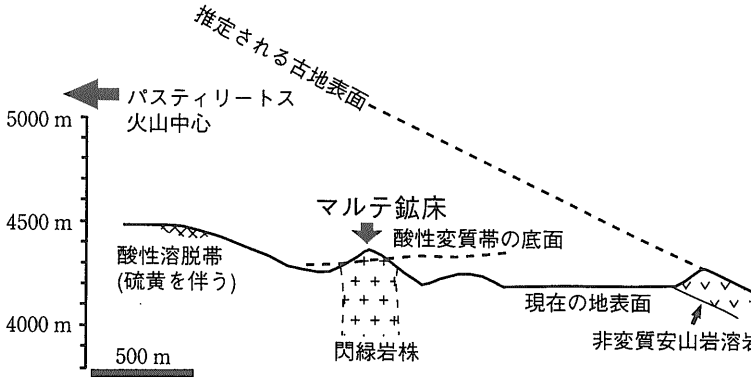
一方、中新世-鮮新世の鉛床は、チリ国内では分布範囲が2箇所に分かれている。中新世前期～中期のものはチリ北部のマリクング帯に、中新世後期～鮮新世のものはチリ中部に分布する(第3図)。アルゼンチンの斑岩銅鉛床も加味すると、この時期の鉛床は南北約900km、東西400kmの広大な地域に鉛床が分布する(第15図)。チリ国内では鉛化年代は北から南へと新しくなる傾向があり(鉛化作用の場の移動速度は120km/100万年)、アルゼンチンの鉛床を含めると、鉛化年代は南東方向に新しくなっていく。

2-3. 関連火成活動の様式

鉛化形成期の火成活動の様式にも違いが認められる。チリ北部では後期始新世-前期漸新世の時



第4図 ロサリオ鉛床地域の地質断面図と斑岩銅鉛床の年代 (Dick et al., 1994原図)。小数点第1桁までの年代値はClark et al. (1998)による⁴⁰Ar-³⁹Ar年代。それ以外はK-Ar年代。



第5図

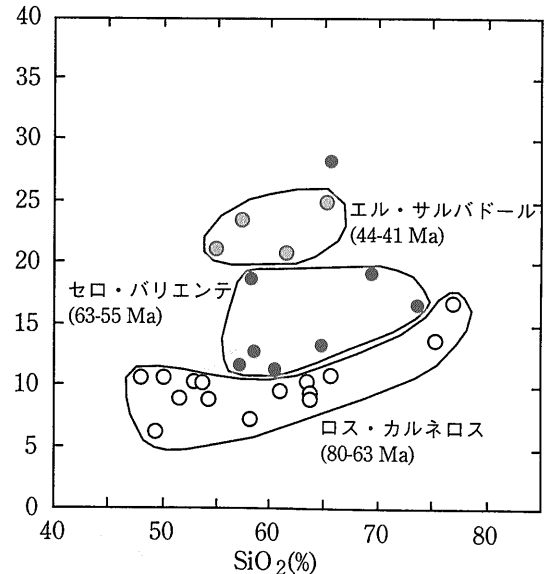
マルテ鉱床地域の地質断面復元図 (Vila et al., 1991原図)。マルテ鉱床はバステリートス火山体の内部に形成され、火山噴出物に覆われていたと考えられている。

期の火山岩はほとんど分布せず、貫入岩のみが知られている。ポトレリリョス地域では少なくとも11の独立した貫入岩のうち、わずか1つにしか噴出岩が伴われていない (Marsh et al., 1997)。この理由として、①これらの貫入岩は噴出岩を伴っていたが削剥されてなくなった、②そもそも噴出岩は伴われていなかった、とする2説が主張されている (渡辺, 1999)。

一方中新世から鮮新世にかけては斑岩銅(金)鉱床形成時期に複成火山が形成されている (口絵2-1)。例えばマリクンガ地域のマルテ斑岩金鉱床を伴う閃緑岩株 (口絵2-2, 2-3) はバステリートス安山岩質複成火山の火山噴出物に覆われていたと考えられている (第5図; Vila et al., 1991)。この安山岩のK-Ar年代は 13.6 ± 0.4 Maで、鉱化作用に伴う熱水変質年代 (13.3 ± 0.4 Ma) とほぼ一致する (Sillitoe et al., 1991)。同様にアルゼンチンのファラロン・ネグロ地域でも斑岩銅鉱化作用を伴う貫入岩は同時期の成層火山体の内部に形成されたと考えられた (Sillitoe, 1973)。しかしながら最近の ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代の結果をみると、ファラロン・ネグロ地域では安山岩~デイサイト質火山活動は12.6Maから7.5Maに限定され、斑岩の貫入とそれに伴う鉱化・変質作用は7.1-6.8Maと火山岩の噴出時期よりも後であることが明らかにされている (Sasso and Clark, 1998)。

サニディンと輝石の斑晶を含むが石英や黒雲母に乏しく普通角閃石をほとんど含まない高カリウム・カルクアルカリ質の岩石であり、比較的水に乏しいマグマから形成されたと推定される。一方斑岩銅鉱床形成期の始新世の岩石は中~高カリウム量のカルクアルカリ岩で、斑晶には普通角閃石や黒雲母を普遍的に含むが、アルカリ長石はほとんど含まない。このようなマグマはより水に富んでいる。これら2種類のマグマの化学組成上のもう一つの違いは、暁新世のものがより広い範囲のシリカ含有量 (53-78% SiO_2) を持つのに対し、始新世のものはシリカ含有量の範囲 (57-75% SiO_2) がやや限られている (Cornejo et al., 1997)。岩石中の微量成

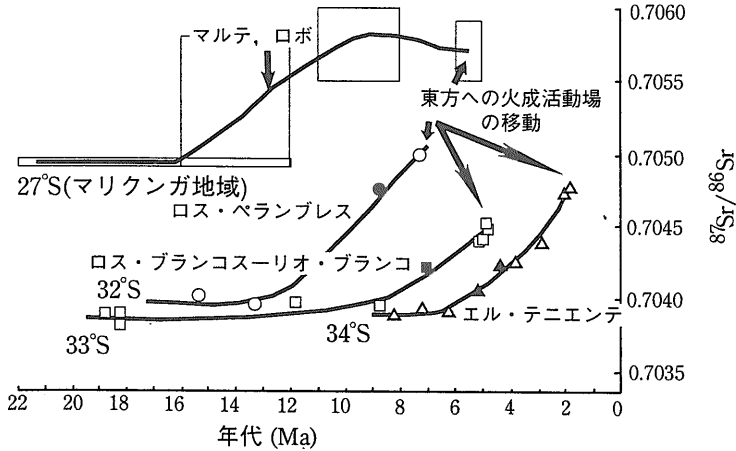
La/Yb



第6図 エル・サルバドル地域の火成岩の時代別組成変化 (Cornejo et al., 1997)。

2-4. 関連火成活動の化学組成

斑岩銅鉱床が形成される時期の貫入岩は、それ以前の鉱床が形成されなかった時期の火成岩と比べて化学組成の点で違いが認められる。チリ北部のエル・サルバドル地域では、暁新世の火成岩は

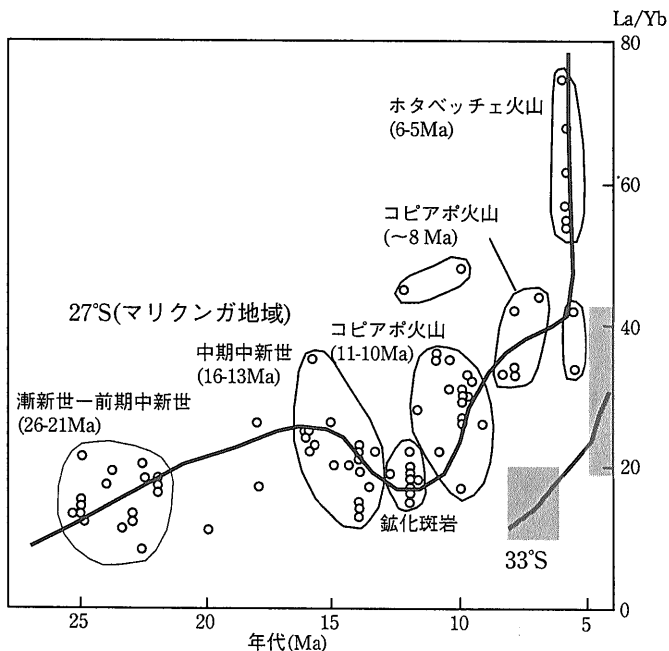


第7図
チリ北部(南緯27°: Mpodozis *et al.*, 1995) および中部(南緯32-34°: Stern and Skewes, 1995)での火山フロント付近での火成岩のストロンチウム同位体組成の年代による変化. 斑岩銅鉱床を伴う貫入岩の値は黒印, それ以外は白抜印で示してある. チリ北部(マリクンガ帯)のデータは大きな四角形中にプロットされる.

分にも違いが認められる. La/Yb値は白亜紀後期から始新世にかけて増加する(Cornejo *et al.*, 1997; 第6図).

中新世-鮮新世のチリ北部のマリクンガ地域およびチリ中部では, 漸新世後期~中新世中期にかけて安山岩が卓越し, 中新世後期以降デイサイト~流紋岩が卓越する. これらの火成岩のストロンチウム, ネオジウム同位体組成の変化は緯度により異なった挙動を示す. これらの地域では, 年代が若くなるに従い, ネオジウム同位体組成の減少とスト

ロンチウム同位体組成の増加が認められる. このストロンチウム同位体組成の増加が始まる時期は緯度によって異なり, より南部の地域ほど遅い(第7図). またこの変化はそれぞれの地域で斑岩銅鉱化作用が始まる直前に起こっている. ストロンチウム同位体組成の値は相対的にチリ北部(マリクンガ地域)で高く, チリ中部で低い. いずれの地域でもLa/Yb値は時代とともに増加するが, この値もチリ北部と中部とを比べると北部の方が相対的に高い(第8図).



第8図 チリ北部(南緯27°: Mpodozis *et al.*, 1995) および中部(南緯33°: Stern and Skewes, 1995)での火成岩のLa/Yb値の年代変化. チリ中部のデータは灰色部にプロットされる.

低いLa/Yb値 (<20)は輝石の産出で特徴づけられる残留鉱物と平衡に達していたマグマを示し、高いLa/Yb値 (>20)は、高压下で安定な柘榴石や角閃石を残留鉱物に含んでいるためと説明される (Kay and Kay, 1989). このようなストロンチウム同位体組成の変化やLa/Yb値の変化を引き起こす要因として①マントルウェッジへの堆積物や地殻構成岩石の沈み込み量の増加、および②地殻の厚化が挙げられる (Kay and Abbruzzi, 1996). 特に中新世から鮮新世にかけてのストロンチウム同位体組成の変化は急速な地殻の厚化とマグマと地殻物質との混合によるものと考えられている (Kay and Abbruzzi, 1996; Skewes and Stern, 1994). チリ北部の岩石のストロンチウム同位体組成とLa/Yb値が中新世の時点ですでに高いのは、始新世に起こった「インカ造山運動」および始新世-漸新世の斑岩銅鉱化作用の時期にすでに厚くなっていた地殻がさらに厚くなったためと考えられる。これらの結果は、特定の化学組成のマグマが斑岩銅鉱化作用に関連しているというよりも、マグマの化学組成に変化が起こることが斑岩銅鉱化作用にとって重要であることを示唆する。

2-5. 鉱化作用の様式

斑岩銅鉱床の鉱化作用や変質作用の様式については、チリのもので世界の他地域のもので大差はない。さまざまな教科書や論文 (例えばLowell and Guilbert, 1970; 石原, 1969, 1970) に良くまとめられているのでここでは詳しく述べない。エル・サルバドル鉱床 (口絵1) の例を第9図に示す。

エル・サルバドル鉱床では白亜紀の安山岩類、暁新世の流紋岩類を貫いて44-43Maの流紋岩斑岩、43-42Maの花崗閃緑岩が分布する。この花崗閃緑岩は3期に分けられ、古いほうからX, K, L斑岩と呼ばれている。銅鉱化作用をもたらしたのはXおよびK斑岩であり、鉱化作用の途中でL斑岩 (写真1) が中央に貫入したと考えられている (Gustafson and Hunt, 1975). 鉱床は主として銅硫化物を含む石英細脈群により構成され (写真2), 中心部から黄銅鉱-斑銅鉱, 黄銅鉱-黄鉄鉱, 黄鉄鉱帯の累帯構造をもつ (第9図). 累帯構造の中心部に位置するL斑岩は、銅鉱化作用直後の貫入のために銅鉱物をほとんど伴っていない。銅鉱化

作用期には中心部で黒雲母やアルカリ長石からなるカリウム変質が伴われ、周辺部では緑泥石や緑廉石からなるプロピライト変質へと漸移する。L斑岩の貫入とともに鉱化作用はモリブデン、黄鉄鉱が

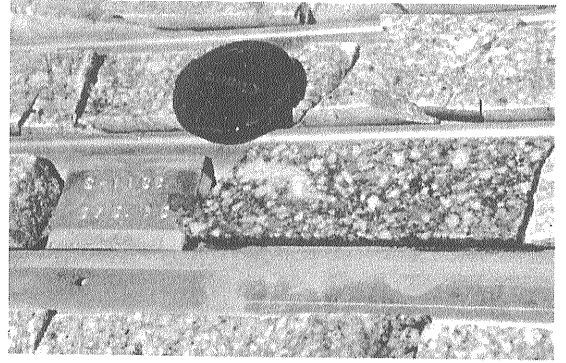


写真1 インディオ・ムエルト中心部に分布するL花崗閃緑斑岩。

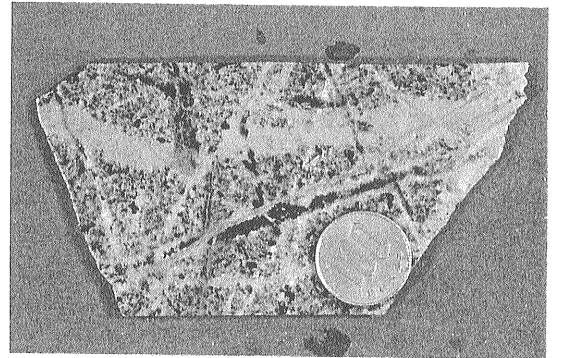
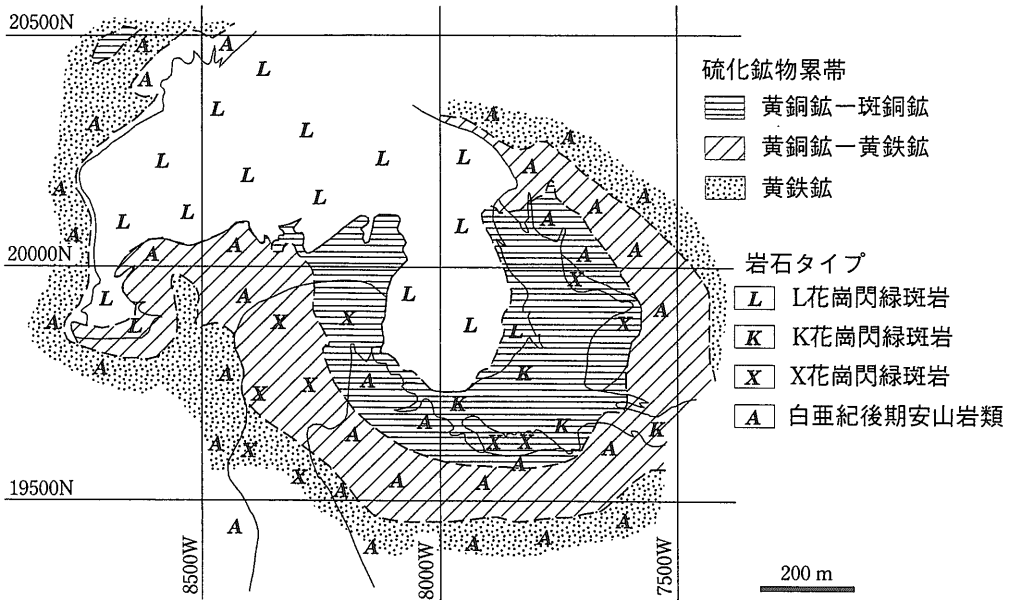


写真2 X斑岩を貫く石英細脈群。いくつかのステージに分けられる。



写真3 エル・サルバドル鉱床上部の変質帯。崖左側の暗色の部分は紅柱石帯、右側の部分は白雲母帯、白雲母帯上部の色の濃い部分は白雲母とともにパイロフィライトが形成されている部分。

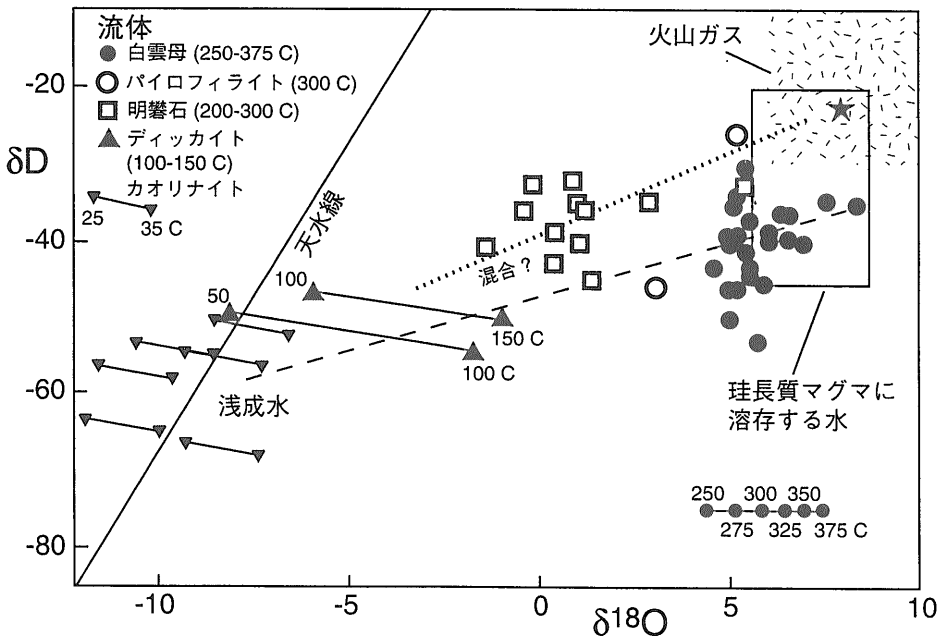


第9図 エル・サルバドル鉱床2,600mレベルの地質概略および硫化鉱物累帯 (Gustafson and Hunt, 1975)。

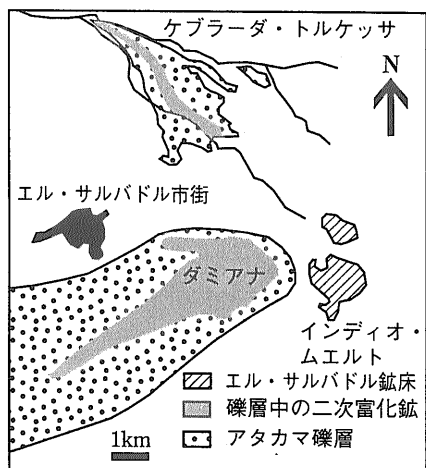
中心となり、紅柱石や絹雲母変質帯が鉱体上部に形成される(写真3)。最後にL斑岩を中心とし放射状に分布する熱水角礫岩が形成され、明礬石やディッカイトからなる酸性変質帯が熱水角礫岩中や

絹雲母変質帯の上部に形成される。

これまで、斑岩を形成したマグマから分別した「マグマ水」が銅鉱化作用とカリウム変質を起こし、温度の低下とともに、天水が斑岩の頂部を循環し



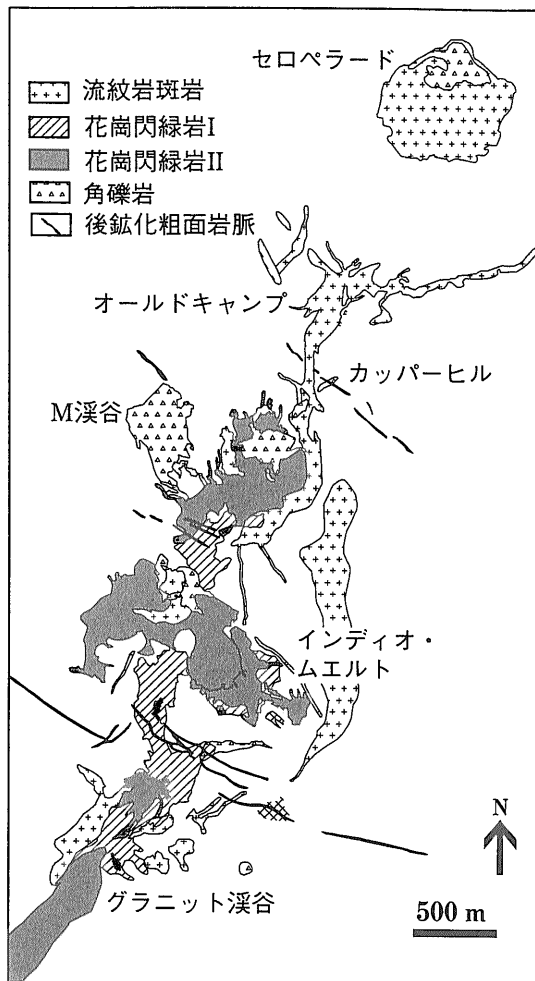
第10図 エル・サルバドル鉱床の変質鉱物から計算された熱水の酸素・水素同位体組成。白雲母を形成した熱水は珪長質マグマ水の組成と類似し、明礬石は火山ガスと天水との混合した組成、浅成カオリナイトは天水の組成を示す (Watanabe and Hedenquist, 2001)。



第11図 インディオ・ムエルトに位置するエル・サルバドル鉱床(初成)と二次酸化鉱(ダミアナ, ケブラーダ・トルケッサ)の位置関係 (Mote et al., 2001). 二次酸化鉱は河川礫層中に胚胎する.

始め, 絹雲母変質が生じたと考えられてきた (Gustafson and Hunt, 1975; Sheppard and Gustafson, 1976). しかしながら, 私達のプロジェクトの結果は, 絹雲母変質もマグマ起源の熱水から形成され, ほとんど天水の寄与の無かったことを示している. 絹雲母変質がマグマ水によりもたらされたことは鮮新世のエル・テニエンテ鉱床でも明らかにされている (Kusakabe et al., 1990). 天水の寄与は最末期の酸性変質帯の形成期にようやく認められる (Watanabe and Hedenquist, 2001; 第10図). このような特徴は, 鉱化作用期に天水の大きな寄与の認められる鉱脈型鉱床とは対照的である.

エル・サルバドル鉱床が形成したのは約42Maであり, 初生鉱体は当時の地表面から約3kmの深度に形成されたと推定される (Watanabe and Hedenquist, 2001). それから35Maまでにこの地域は地表水の循環する深度にまで隆起剝削を受け, 浅成 (supergene) 変質・二次富化作用が始まった (Mote et al., 2001). 銅の酸化物からなる二次富化帯はエル・サルバドル鉱床上部のみでなく, 初生鉱体の下流側に位置するダミアナおよびケブラーダ・トルケッサにも形成された (第11図). この時期に形成されたと推定されるカオリナイトの同位体組成は天水のものと類似する (第10図).



第12図 エル・サルバドル地域の始新世貫入岩分布図 (Gustafson et al., 2001を簡略化).

2-6. 鉱床形成期の応力場

斑岩銅鉱床が形成されている場合には多くの貫入岩が分布する. そのうちの限られた岩体にのみ優良な鉱化作用が伴われ, それ以外の岩体には弱い鉱化作用が伴われるのみか, 全く鉱化作用が認められないことが多い. このような違いはなぜ生じるのであろうか?

エル・サルバドル地域には大小さまざまな斑岩が貫入しており, 始新世には北北東-南南西方向に並ぶセロペラード, オールドキャンプ, M溪谷-カッパーヒル, インディオ・ムエルト, グラニット溪谷の5つの大きな貫入中心が存在する (Gustafson et al., 2001; 第12図). この地域が第三紀に約20°時計回りに回転していることを考慮すると (Taylor, 2000),

貫入中心の配列する方向は当時の海溝の方向とほぼ平行である。

これらの貫入岩は流紋岩斑岩、花崗閃緑岩、粗面安山岩からなる。花崗閃緑岩は細粒相（花崗閃緑岩I、X斑岩を含む）と粗粒相（花崗閃緑岩II、K・L斑岩を含む）に大別される。これらのうち流紋岩斑岩および花崗閃緑岩には程度に違いこそあれ、鉱化・変質作用が伴われている。それぞれの貫入中心に伴われる変質帯、鉱化帯は、セロペラードから南南西側のインディオ・ムエルトへと大きくなり、インディオ・ムエルトでは経済的に採掘できるエル・サルバドル鉱床が伴われる。最南端のグラニット渓谷の貫入中心は変質・鉱化作用とも極めて微弱である（Gustafson *et al.*, 2001）。

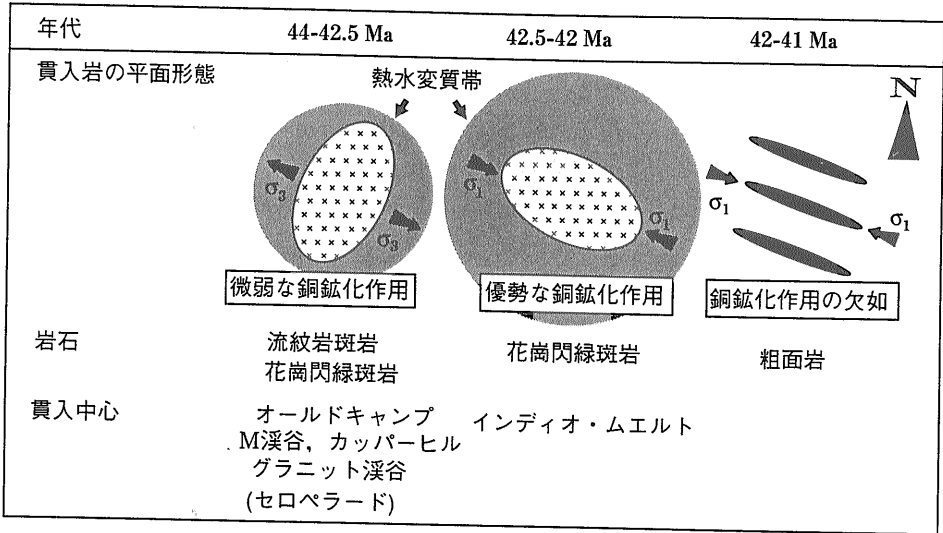
これまで、これらの斑岩の貫入年代を決めるために、Rb-Sr年代やK-Ar年代、U-Pb年代（Gustafson and Hunt, 1975; Cornejo *et al.*, 1997）が報告されてきたが、熱水変質のために良い分析精度が得られなかった。最近報告された⁴⁰Ar-³⁹Arアイソクロン年代（Gustafson *et al.*, 2001）の結果にもとづくと、セロペラードでの熱水変質セリサイトは 43.94 ± 1.50 Ma（測定誤差は 2σ 、以下同じ）、オールドキャンプの黒雲母が 43.83 ± 0.38 Ma、熱水変質セリサイトから 42.60 ± 1.74 Maと 41.56 ± 0.64 Ma、M渓谷の石英斑岩の黒雲母が 42.63 ± 0.28 Maと 41.84 ± 1.00 Ma、熱水変質セリサイトが 43.04 ± 1.74 Maを示す。またインディオ・ムエルトでは、熱水変質セリサイトの⁴⁰Ar-³⁹Ar年代が 41.36 ± 1.20 Maと 40.92 ± 1.02 Maの年代を示す。熱水変質をほとんど受けていないグラニット渓谷の花崗閃緑岩の黒雲母は 42.86 ± 0.28 Ma、インディオ・ムエルトの後鉱化作用の粗面安山岩の黒雲母が 41.16 ± 0.48 Maを示す。一方インディオ・ムエルトでのモリブデナイトのRe-Os年代は 42.2 ± 0.2 Maと 42.0 ± 0.2 Maであり、鉱化年代を示すと考えられる（Watanabe *et al.*, 1999）。

最近の斑岩銅鉱床の年代学的研究では、マグマの貫入から斑岩銅鉱化作用の終了までの期間は数十万年以内（Arribas *et al.*, 1995; Marsh *et al.*, 1997）と見積もられている。従って、上記の変質年代はマグマの貫入年代とほぼ同時とみなすことができる。ただ各貫入中心でのマグマの貫入は複数回あるので、後から貫入したマグマの熱的影響を

受け、年代が若返っている可能性がある。一方、モリブデナイトのRe-Os年代はAr-Ar年代よりも後の熱的影響による若返りを受けにくいことが知られている（Watanabe and Stein, 2000）。これらのことから、インディオ・ムエルトに関してはRe-Os年代を貫入-鉱化年代と考えると、微弱な銅鉱化作用を伴うオールドキャンプ、M渓谷-カッパーヒル、グラニット渓谷、セロペラードでの斑岩の貫入活動は主として44Ma~42.5Maの間に始まり、優勢な鉱化作用を伴ったインディオ・ムエルトでの貫入活動は42.5-42Maとやや遅れて始まり、粗面岩の貫入時（42-41Ma）には鉱化作用が終わっていたことになる（第13図）。

これらの貫入岩の形態と年代には相関が認められる。44~42.5Maの貫入岩は流紋岩斑岩、花崗閃緑岩ともに、平面的には北北東-南南西に伸長した形態を示す（第12、13図）。北方のセロペラードでの円形の貫入岩やオールドキャンプにおいて認められる環状岩脈は貫入岩の浅部相と考えられている。一方42.5-42Maのインディオ・ムエルトの花崗閃緑岩は西北西-東南東に伸張している。鉱化作用末期の黄鉄鉱-絹雲母脈や後鉱化作用の粗面岩脈もこの岩体と同様に、西北西-東南東方向のものが卓越する。このように鉱化作用の前後で貫入岩の伸長方向が変化するのは、この地域の火成弧に直交する方向の応力が、最小圧縮主応力（ σ_3 ）から最大圧縮主応力（ σ_1 ）に変化したことを示唆する。インディオ・ムエルトでの貫入活動を最後にエル・サルバドル地域ではマグマの貫入活動は終了し、この地域では逆断層運動が活発化し（Cornejo *et al.*, 1997）、隆起・削剥の場へと移り変わる。そしてより背弧側に位置するポトレリョス地域で新たにマグマの貫入活動が活発化する（Marsh *et al.*, 1997）。このような応力場の変化や断層運動、火成活動域の背弧側への移動は、斑岩銅鉱化期前後に火成弧直交方向の応力が強まることにより、この地域が圧縮応力場に転換し、斑岩銅鉱化作用がマグマ貫入活動の末期に生じたことを示している。

エルサルバドル地域と同様の岩体の貫入方向の変化はラ・エスコンディーダ地域でも認められる（Padilla-Garza *et al.*, 2001）。一方、チュキカマタのように断層に沿ってマグマが貫入して形成され



第13図 エル・サルバドル地域の貫入岩の形態と年代, 鉱化・変質作用の模式図.

た鉱床では, このような変化は認められない (Ossandon *et al.*, 2001).

3. 斑岩銅鉱床を形成するテクトニックセッティング

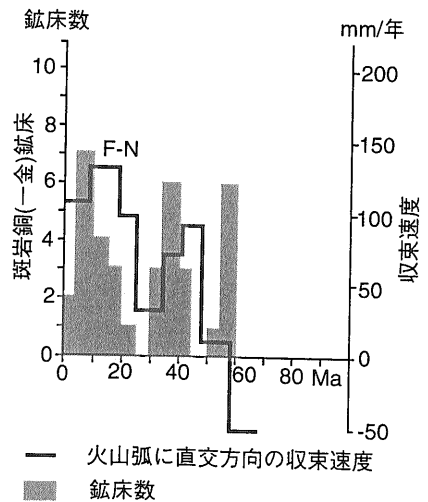
3-1. 「チリ型」沈み込みを引き起こす

テクトニックセッティング

2章に述べた火成弧の背弧側への移動とそれに伴う斑岩銅鉱化域は, 沈み込みスラブの低角化(「チリ型」沈み込み)で説明される. スラブの低角沈み込みに伴うスラブと上盤プレートとのカップリングの強化は火成弧直交方向の圧縮応力を増大させ, 噴出岩より貫入岩の卓越する火成活動様式, 地殻の厚化および地殻物質のマグマへの混合作用を促進し, また貫入の貫入方向にも影響を及ぼした. より圧縮的になった応力場は天水が地殻浅部で循環することを妨げ, 斑岩上部で分別したマグマ水がその場に封じ込められることにより斑岩銅鉱床が形成されたと考えられる. 応力場や地質構造の解析結果は, 斑岩銅鉱化作用がより圧縮的な広域応力場になる過程で起こったことを示すが, 逆断層の発達するような完全な圧縮応力場ではマグマの大規模な貫入も, それに伴う斑岩銅鉱化作用も起こっていない. ここで問題となるのはどうして「チリ型」の沈み込みがチリで実現されたかということである.

一般に, 沈み込むスラブの角度は, ①沈み込む

海洋プレートと上盤プレート間の相対的な収束速度, ②沈み込むプレートの年代, ③堆積物の海溝での付加, ④非地震性海嶺 (aseismic ridge) や海底火山列, 海膨 (oceanic plateau) の沈み込みに関係している (Cross and Pilger, 1982). プレート収束速度が大きいほど, また沈み込むプレートの年代が若いほど沈み込むスラブの傾角は小さくなり, また沈み込むプレートに比べ密度の小さな堆積物



第14図 ペルー南部, チリ, アルゼンチンの新生代斑岩銅鉱床の年代別形成数とナスカーファラロンプレートと南米プレートとの収束速度との関係図. プレートの収束速度はPardo-Casas and Molnar (1987)による.

や玄武岩からなる海嶺，火山，海膨が沈み込むと傾角は小さくなる。

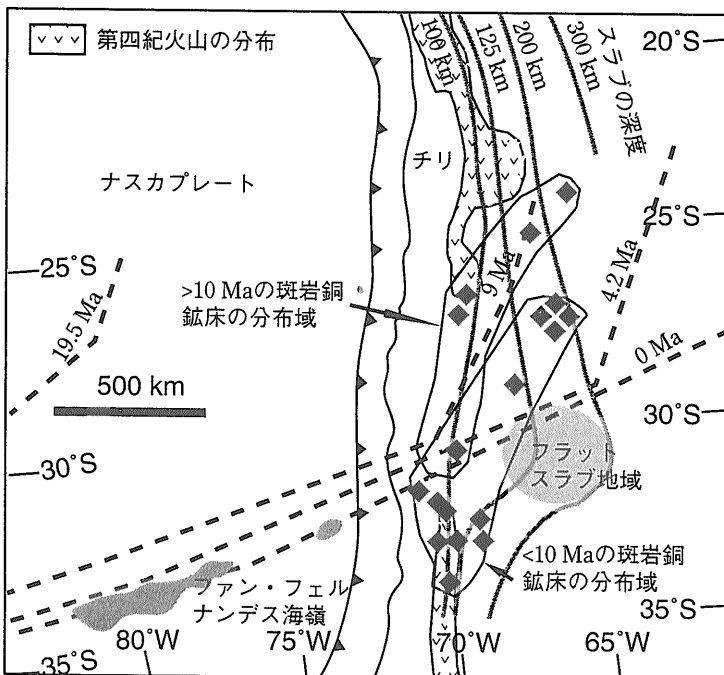
ペルー南部からチリ・アルゼンチンにかけての斑岩銅鉱床の年代別形成数と火成弧に対して直交方向のナスカプレートと南米プレート間の収束速度との関係を見ると，プレート間の収束速度が正になった約60Ma以降に斑岩銅鉱床の形成数が増大したことが分かる(第14図)．約40Maと20-10Maの2時期に収束速度が大きくなっており，これらはチリ中部-北部での造山運動の時期にほぼ一致する(Pardo-Casas and Molnar, 1987)．しかしながら，斑岩銅鉱床の形成数とプレート間の収束速度には必ずしも相関関係があるわけではなく，最大規模のチュキカマタ鉱床は50mm/年以下の遅い収束速度の時期に形成している．従ってプレートの収束速度の変化は，間接的には斑岩銅鉱床の生成と関連があるが，直接，スラブのチリ型沈み込みをもたらしたとは考えにくい。

始新世以降に南米プレート下に沈み込んだファロン-ナスカプレートの年代は，衝突型の造山運動を起こすとされる200万年(Cloos, 1993)よりも古い(Pardo-Casas and Molnar, 1987)．またチリ北部から中部にかけて海溝と基盤岩との間の付加堆積物の水平分布域の幅は20km以下と極めて限

られており(von Huene *et al.*, 1997)，大規模な堆積物の付加が海溝で生じた証拠もない．最後に残された可能性が，上記④の非地震性海嶺や海底火山列，海膨の沈み込みである．

3-2. 中新世-鮮新世のテクトニックセッティングと斑岩銅鉱化作用

現在チリ中部にはファン・フェルナンデス海嶺が沈み込んでおり，この海嶺の沈み込み領域から北側に沈み込みスラブの角度が極めて浅くなる「フラットスラブ」地域が形成されている(Pilger, 1981; 第15図)．この海嶺はナスカプレート中のホットスポットにより形成された火山が，ナスカプレートの東への移動のために東西方向に配列したものである．南米プレート下への沈み込みのために，この海嶺の東延長部がどのようになっていたかは不明である．もしこの海嶺が，現在ペルーに沈み込んでいるナスカ海嶺と同時期に形成され，ナスカ海嶺と同様の形態をもつと仮定すると，海嶺の沈み込んだ東側の部分は北東-南西に折れ曲がっており，その先端は中新世前期～中期に沈み込みを開始したことになる(Pilger, 1981; 第15図)．北西-南東方向の海嶺折れ曲がりにはサンチアゴ沖での音波探査や磁気異常の研究でも明らかにされつつある(von



第15図

チリ中部におけるファン・フェルナンデス海嶺の沈み込み位置とチリ-アルゼンチンの中新世-鮮新世斑岩銅鉱床の分布．ファン・フェルナンデス海嶺の年代別位置はCross and Pilger (1982)，第四紀火山の分布域はDavidson and Mpodozis (1991)，現在のスラブの深度はCahill and Isacks (1992)による．

Huene *et al.*, 1997). ファン・フェルナンデス海嶺の沈み込んでいくフラットスラブ地域(第15図)は、第四紀の火山活動の見られない無火山活動帯(Pilger, 1981)やアルゼンチン側での新生代後期の褶曲や逆断層による短縮テクトニクス(Ramos *et al.*, 1996)で特徴づけられる。

Pilger (1981)の推定したファン・フェルナンデス海嶺の折れ曲がり部分が存在したとすると、この海嶺は中新世前～中期にかけてチリ北部で沈み込みを開始し、時代の経過とともに海嶺の沈み込み位置は現在のサンチャゴ付近に南下することになる。この海嶺の沈み込み位置の南下は、チリ北部～中部の火山岩の組成変化や斑岩銅鉱床の形成時期が南ほど新しくなることと一致する。すなわち、海嶺の沈み込みがスラブの傾角を小さくすることにより上盤プレートの応力場をより圧縮的にし、地殻の短縮厚化、マグマと地殻物質との混合促進、およびマグマの地表への噴出の抑制をもたらす、斑岩銅鉱床形成に適したテクトニックセッティング(弱圧縮応力場)を作り出したと考えられる。

この海嶺の沈み込みはチリ北部では一過性のもので、同じ地域で継続して沈み込んだものではない。従って、斑岩銅鉱床の形成時期もそれぞれの地域で限定されたものとなり、その前後には通常の海洋プレートの沈み込みによる火山活動が生じていたと考えられる。マリクンガ帯やアルゼンチンに見られる斑岩銅鉱化作用と成層火山活動との時空分布の一致は、この一過性のテクトニックセッティングと通常のテクトニックセッティングとの重複を見ているのかもしれない(渡辺, 1999)。このように、Pilger (1981)により推定されたファン・フェルナンデス海嶺の先端部分の沈み込みは、地質現象を極めて良く説明する。

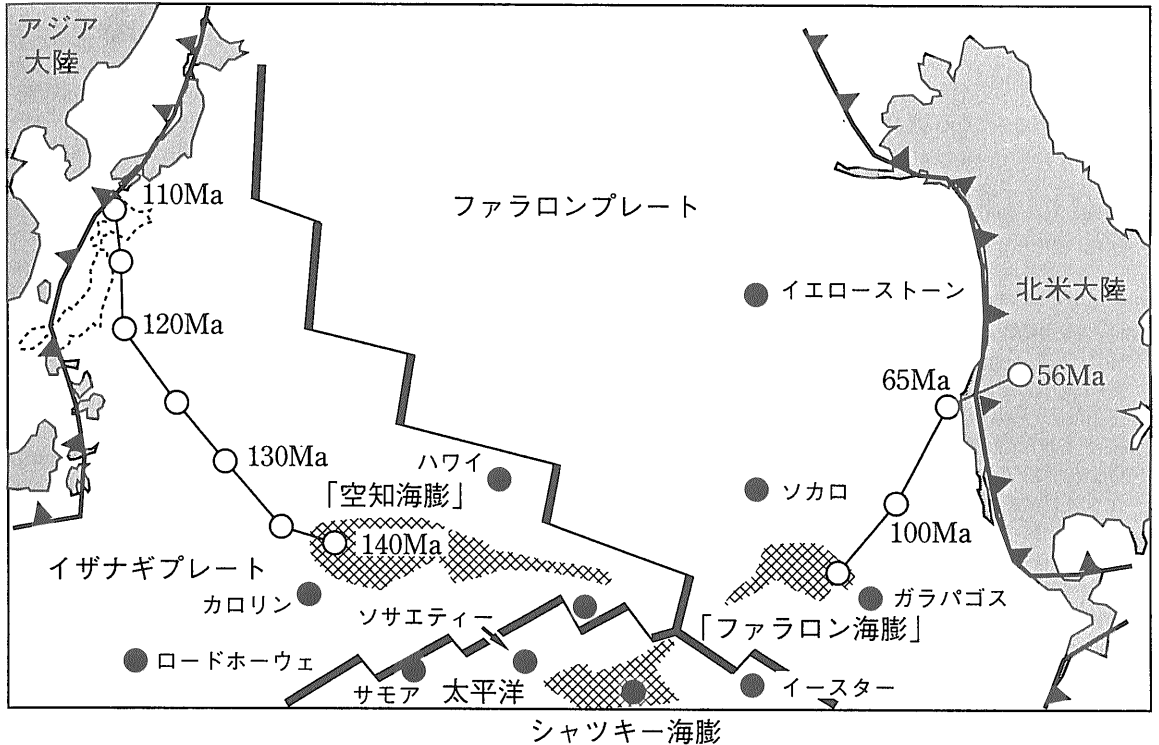
3-3. 始新世-漸新世のテクトニックセッティングと斑岩銅鉱化作用

これまで多くの人々が始新世-漸新世にチリ北部の斑岩銅鉱化作用をもたらした圧縮テクトニクスの原因を議論してきたにもかかわらず、今日まで多くの人を納得させる説明は提案されていない(Clark, 1993)。この時期のチリ型沈み込みの原因として残された可能性は、中新世-鮮新世のテクトニックセッティングと同様に、非地震性海嶺や海底

火山列、海膨の沈み込みである。ただ中新世-鮮新世の斑岩銅鉱化作用とは異なり、始新世-漸新世の鉱化作用は、南北1,200kmの広い地域に、ほぼ同時期に、また1,000万年にわたって鉱化作用が起こっていることである。このような広い領域に「チリ型」沈み込みをもたらすためには、範囲の限られる非地震性海嶺や海底火山列の沈み込みでは困難であり、海膨の沈み込みが候補として残る。

海膨は中央海嶺や中央海嶺の3重会合点にマントルプルームが上昇して形成されるが、海膨の多くは白亜紀前期に南太平洋で集中的に形成されている(Larson, 1991)。現在北太平洋に位置するシャツキー海膨はイザナギ、ファラロン、太平洋プレートの3重会合点にホットスポットが位置することにより形成されている(Nakanishi *et al.*, 1992)。また、太平洋プレートの形成される以前に存在したイザナギ、ファラロン、フェニックスプレートの3重会合点では、同じくホットスポットの活動によりマゼラン海膨が形成されたと推定されている(Nakanishi *et al.*, 1992)。このような海膨の沈み込みが斑岩銅鉱床の形成に関連した例としては、アメリカ南西部に沈み込んだと推定されている「ファラロン海膨」が挙げられる。

「ファラロン海膨」はシャツキーホットスポットから生まれたであろうファラロンプレート上の海膨で、太平洋プレート上のシャツキー海膨、イザナギプレート上に存在したと推定される「空知海膨」と兄弟関係にある(Kimura *et al.*, 1994; 第16図)。Henderson *et al.* (1984)の復元によると、ファラロン海膨は約65Maにアメリカ南西部に沈み込みを始め、約50Maに沈み込みを終えている。この時期はアメリカ南西部でララミッド造山運動が起こった時期に相当し、Henderson *et al.* (1984)はララミッド造山運動の原因をこの海膨の沈み込みに求めている。この海膨の沈み込みとプレート収束速度の上昇(～150mm/年)の2つの要因により、この時期にはアメリカ南西部からメキシコ北部にかけて多くの斑岩銅鉱床が形成したと考えられている(第2図; 渡辺, 1998)。近年、中国南部でも白亜紀の斑岩銅鉱床が発見されている。福建省の紫金山斑岩銅-高硫化系金鉱床の形成年代は101Ma(渡辺, 未公表データ)であり、イザナギプレート上の「空知海膨」のアジア大陸への沈み込みと関係があるのかも知



第16図 ファラロン、イザナギ、太平洋プレート上の「ファラロン海膨」、「空知海膨」、シャツキー海膨の位置およびホットスポットの分布 (Kimura et al., 1994 を改変)。「ファラロン海膨」および「空知海膨」はそれぞれ北米大陸およびアジア大陸に沈み込んだと推定される。「ファラロン海膨」の年代別位置はHenderson et al. (1984) に基づく。

れない。

これまでのところ始新世から漸新世にかけてチリ北部で海膨が沈み込んだ証拠は得られていない。しかし、同時期に広い範囲で斑岩銅鉱化作用を引き起こすフラットスラブ地域を形成するには海膨の沈み込みが最も効率的であろう。イザナギ、ファラロン、フェニックスプレートの3重会合点で形成されたと考えられるファラロンプレート上の海膨はいつどこに沈み込んだのであろうか？ アジアでの「空知海膨」沈み込みが、付加体(日本列島)の研究から明らかにされたように、チリ北部でも現在の海溝と古生界が分布する海岸線との間の付加体の研究が待たれるところである。

4. おわりに

チリが世界最大の銅産出国になった要因の一つは中新世から現在にまで続いている非地震性海嶺

の沈み込みであり、もう一つの要因は始新世-漸新世にチリ北部で起こったインカ造山運動である。この造山運動の原因として海膨の沈み込みが候補に残っている。

日本列島ではこれまで綿密な鉱床探査が行われてきたが、斑岩銅鉱床は発見されていない。そもそも存在しないのか、存在するが発見されていないのか、長年、議論が行われてきた。斑岩銅鉱床を形成するテクトニックセッティングは「チリ型」沈み込みであり、若い海洋地殻の沈み込みや、速いプレート間の収束速度(～150mm/年)が期待されない東北日本弧では、伊豆弧が衝突・沈み込んでいるフォッサマグナ地域が唯一可能性のある場所であろう。ただ将来展望は開けている。2,000万年後には東北日本弧や千島弧南西端にシャツキー海膨が沈み込む。その時日本は世界に冠たる銅生産国になるのであろうか。

謝辞：チリの将来銅生産予測量は金属鉱業事業団資源情報センターのホームページに掲載されているデータを参照した。石原舜三産総研特別顧問にはこの問題を考える機会を与えていただいた。服部恵子さん、中野孝教さん、古野正憲さんには有益なコメントを頂いた。以上の方々に感謝の意を表します。

文 献

- Arribas, A.Jr., Hedenquist, J.W., Itaya, T., Okada, T., Concepcion, R.A. and Garcia, J.S.Jr. (1995) : Contemporaneous formation of adjacent porphyry and epithermal Cu-Au deposits over 300 ka in northern Luzon, Philippines. *Geology*, v. 23, p. 337-340.
- Cahill, T. and Isacks, B. (1992) : Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research*, v. 97, p. 17503-17529.
- Camus, F. and Dilles, J.H. (2001) : A special issue devoted to porphyry copper deposits of northern Chile. *Economic Geology*, v. 96, p. 233-237.
- Clark, A.H. (1993) : Are outsize porphyry copper deposits either anatomically or environmentally distinctive? *Society of Economic Geologists Special Publication No. 2*, p. 213-283.
- Clark, A.C., Archibald, D.A., Lee, A.W., Farrar, E. and Hodgson, C.J. (1998) : Laser probe $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of early- and late-stage alteration assemblages, Rosario porphyry copper-molybdenum deposit, Collahuasi district, I region, Chile. *Economic Geology*, v. 93, p. 326-337.
- Cloos, M. (1993) : Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis: subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts. *Geological Society of America Bulletin*, v. 105, p. 715-737.
- Cornejo, P., Tosdal, R.M., Mpodozis, C., Tomlinson, A.J., Rivera, O. and Fanning, C.M. (1997) : El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited: geological and geochronological framework. *International Geology Review*, v. 39, p. 22-54.
- Cross, T.A. and Pilger, R.H. (1982) : Controls of subduction geometry, location of magmatic arcs, and tectonics of arc and back-arc regions. *Geological Society of America Bulletin*, v. 93, p. 545-562.
- Davidson, J. and Mpodozis, C. (1991) : Regional geologic setting of epithermal gold deposits, Chile. *Economic Geology*, v. 86, p. 1174-1186.
- Dick, L.A., Chavez, W.X. Jr., Gonzales, A. and Bisso, C. (1994) : Geologic setting and mineralogy of the Cu-Ag-(As) Rosario vein system, Collahuasi district, Chile. *SEG Newsletter*, Number 19, p. 1, 6-11.
- Gustafson, L.B. and Hunt, J.P. (1975) : The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, v. 70, p. 857-912.
- Gustafson, L.B., Orquera, W., McWilliams, M., Castro, M., Olivares, O., Rojas, G., Maluenda, J. and Mendez, M. (2001) : Multiple center of mineralization in the Indio Muerto district, El Salvador, Chile. *Economic Geology*, v. 96, p. 325-350.
- Henderson, L.J., Gordon, R.G. and Engebretson, D.C. (1984) : Mesozoic aseismic ridges on the Farallon plate and southward migration of shallow subduction during the Laramide orogeny. *Tectonics*, v. 3, p. 121-132.
- 石原舜三 (1969, 1970) : ポーフイリーカップパー鉱床入門 [I, II]. 丸善, 260p., 252p.
- Kay, S.M. and Abbruzzi, J.M. (1996) : Magmatic evidence for Neogene lithospheric evolution of the central Andean "flat-slab" between 30° S and 32° S. *Tectonophysics*, v. 259, p. 15-28.
- Kay, R.W. and Kay, S.M. (1989) : Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, v. 219, p. 177-189.
- Kimura, G., Sakakibara, M. and Okamura, M. (1994) : Plumes in central Panthalassa? Deductions from accreted oceanic fragments in Japan. *Tectonics*, v. 13, p. 905-916.
- Kusakabe, M., Hori, M. and Matsuhisa, Y. (1990) : Primary mineralization-alteration of the El Teniente and Rio Blanco porphyry copper deposits, Chile. Stable isotopes, fluid inclusions and $\text{Mg}^{2+}/\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ratios of hydrothermal biotite. in Herbert, H.K. and Ho, S.E. eds., *Stable Isotopes and Fluid Processes in Mineralization*, The University of Western Australia, Publication No. 23.
- Larson, R.L. (1991) : Latest pulse of Earth: Evidence for a mid-Cretaceous superplume. *Geology*, v. 19, p. 547-550.
- Lowell, J.D. and Guilbert, J.M. (1970) : Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, v. 65, p. 373-408.
- Marsh, T.M., Einaudi, M.T. and McWilliams, M. (1997) : $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Cu-Au and Au-Ag mineralization in the Potrerillos district, Chile. *Economic Geology*, v. 92, p. 784-806.
- Mote, T.I., Becker, T.A., Renne, P. and Brimhall, G.H. (2001) : Chronology of exotic mineralization at El Salvador, Chile, by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of copper wad and supergene alunite. *Economic Geology*, v. 96, p. 351-366.
- Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S.M. and Tittler, A. (1995) : La franja de Maricunga: sintesis de la evolucion del frente volcanico Oligoceno-Mioceno de la zona sur de los Andes Centrales. *Revista Geologica de Chile*, v. 21, p. 273-313.
- Nakanishi, M., Tamaki, K. and Kobayashi, K. (1992) : A new Mesozoic isochron chart of the northwestern Pacific Ocean: Paleomagnetic and tectonic implications. *Geophysical Research Letters*, v. 19, p. 693-696.
- Ossandon, C.G., Freraut, C.R., Gustafson, L.B., Lindsay, D.D. and Zentilli, M. (2001) : Geology of the Chuquicamata Mine: A progress report. *Economic Geology*, v. 96, p. 249-270.
- Padilla-Garza, R.A., Titley, S.R. and Francisco-Pimentel, B. (2001) : Geology of the Escondida porphyry copper deposit, Antofagasta region, Chile. *Economic Geology*, v. 96, p. 307-324.
- Pardo-Casas, F. and Molnar, P. (1987) : Relative motion of the Nazca (Farallon) and south American plates since late Cretaceous time. *Tectonics*, v. 6, p. 233-248.
- Pilger, R.H. (1981) : Plate reconstructions, aseismic ridges, and low-angle subduction beneath the Andes. *Geological Society of America Bulletin*, v. 92, p. 448-456.
- Ramos, V.A., Cegarra, M. and Cristallini, E. (1996) : Cenozoic tectonics of the High Andes of west-central Argentina (30-36° S latitude). *Tectonophysics*, v. 259, p. 185-200.
- Sasso, A.M. and Clark, A.H. (1998) : Magmatic, hydrothermal and tectonic evolution and implications for Cu-Au metallogeny in the Andean back-arc. *SEG Newsletter*, Number 34, p. 1, 8-18.
- Sheppard, S.M.F. and Gustafson, L.B. (1976) : Oxygen and Hydrogen

- isotopes in the porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, v. 71, p. 1549-1559.
- Sillitoe, R.H. (1973) : The tops and bottoms of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 68, p. 799-815.
- Sillitoe, R.H., McKee, E.H. and Vila, T. (1991) : Reconnaissance K-Ar geochronology of the Maricunga gold-silver belt, northern Chile. *Economic Geology*, v. 86, p. 1261-1270.
- Skewes, M.A. and Stern, C.R. (1994) : Tectonic trigger for the formation of late Miocene Cu-rich breccia pipes in the Andes of central Chile. *Geology*, v. 22, p. 551-554.
- Stern, C. and Skewes, M.A. (1995) : Miocene to present magmatic evolution at the northern end of the Andean Southern Volcanic Zone, Central Chile. *Revista Geologica de Chile*, v. 22, p. 261-272.
- Taylor, G.K. (2000) : Paleomagnetism applied to magnetic anomaly interpretation: a new twist to the search for mineralization in northern Chile. *Mineralium Deposita*, v. 35, p. 377-384.
- 通商産業調査会 (2000) : 鉱業便覧平成12年度版. 436p.
- 上田誠也 (1983) : 海底の熱水循環・マリアナトラフ・黒鉱および沈み込みの様式. 鉱山地質特別第11号, 37-53.
- Vila, T., Sillitoe, R.H., Betzhold, J. and Viteri, E. (1991) : The porphyry gold deposit at Marte, Northern Chile. *Economic Geology*, v. 86, p. 1271-1286.
- von Huene, R., Corvalan, J., Flueh, E.R., Hinz, K., Korstgard, J., Ranero, C.R., Weinrebe, W. and the Condor scientists (1997) : Tectonic control of the subducting Juan Fernández ridge on the Andean margin near Valparaiso, Chile. *Tectonics*, v. 16, p. 474-488.
- 渡辺 寧 (1998) : 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学 (4) - プレートテクトニクスとポーフィリー鉱床 (その3) -. *ぼなんご*, 274号, p. 11-17.
- 渡辺 寧 (1999) : 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学 (その9) - ポーフィリー鉱床に火山は必要か? -. *ぼなんご*, 279号, p. 30-38.
- Watanabe, Y. and Hedenquist, J.W. (2001) : Mineralogic and stable isotopic zonation at surface over El Salvador porphyry copper deposit, Chile. *Economic Geology*, v. 96 (in press).
- Watanabe, Y. and Stein, H.J. (2000) : Re-Os ages for the Erdenet and Tsagaan Suvarga porphyry Cu-Mo deposits, Mongolia, and tectonic implications. *Economic Geology*, v. 95, p. 1537-1542.
- Watanabe, Y., Stenin, H.J., Morgan, J.W. and Markey, R.J. (1999) : Re-Os geochronology brackets timing and duration of mineralization for the El Salvador porphyry Cu-Mo deposit, Chile. *Geological Society of America Annual Meeting, Denver, Colorado, 24-28 October, 1999, Abstract with Program*, v. 30, p. A30.
- White, N., Hedenquist, J.W. and Kirkham, R. (2001) : Asia: The Walking Giant. *Mining in Asia*, March 2001, 12p.
-
- WATANABE Yasushi (2001) : Cenozoic tectonics and porphyry Cu mineralization in Chile: Why is Chile the best Cu producer in the world?
-

<受付: 2001年8月28日>