

チリー、火成活動の国

石原 舜三 (鉱床部)
Shunso ISHIHARA

1. まえがき

チリーは私達にとって遠い国である。日本からみても地球の反対側に位置しているし、航空便で太平洋を2度とぶ感じである。ペルーやブラジルのように日系人を媒体とする交流もなく、アルゼンチンのタンゴやボリビアのフォークソングのように青春の血を湧き立たせるものも知られていず、なじみが少ない国である。しかし現在のチリーでは日本の工業製品があふれ、親日感情が増し、経済的な交流から両国の関係は急速に親密になろうとしている。

チリーは南北に4000km以上、幅は広い所で350km程度、一般には約170kmの細長い国である。国の面積は日本の約2倍で人口は約1/10である。この稀薄な人口と建国後の短い歴史のために、これまでの地質調査研究は、面よりも点でおこなわれている感が強い。また、鉱物資源の輸出が、古くはチリー硝石、新しくは銅鉱石で代表されるように、国の収入の多くを占めるが、その割には、おそらくこれまでの鉱物資源が地表に露出し、容易に見出せるタイプのものであったために、将来の資源に対する国の投資が少なく、基礎的な地表調査がおこなわれている。

南米大陸は北米大陸と同様に、アーケアンの古大陸を中心として、西方と南方に順次大陸が成長し、ゴンドワナ大陸の分裂以後、ほぼ現在の太平洋岸に沿って、断裂帯・火成活動帯が生じ、多量の安山岩質マグマを噴出し、現在に至っている。チリーはアンデスの山麓の国として、ふさわしく、大量の安山岩やその貫入相から構成されている。チリーと我が国とは、鉱業的に非常に親密であったことがある。我が国の鉄鉱石供給地が先カンブリア時代の鉄鉱層に移行する以前に、チリーの中生代火成鉄鉱床が注目を集め、鉄道が敷設され、鉄鉱石が輸入された。現在でも小規模に輸入は続けられている。また世界的に巨大な銅鉱床が多産することから、銅鉱床の探査地として関心が高まり、我が国の地質家によって活発に探査されたこともあった。現在では政府間協定による広域調査が金属鉱業事業団によって続けられている。

地質学的には、近年上田誠也・西脇親雄氏がポーフィ

リー型銅鉱床を伴う圧縮型サブダクション(チリー型)黒鉄鉱床を伴う張力型サブダクション(マリアナ型)のモデルを提唱したことによって、我が国での関心が高まっている。一方、松野久也氏は組織的な銅鉱床の空中写真調査の旅の印象から、チリーの海岸山脈は、東北日本の太平洋岸と地質学的に類似している点を指摘し、またイギリスのR. H. SILLITOE氏は西南日本内帯の火成鉱化作用はアンデス型に属するものとみなし、両地域の類似性を強調している。

アンデス造山帯はプレートテクトニクス理論の発展以後、大陸周縁部で大洋プレートが収束する場の典型例としてダイナミックに取り上げられ、その魅力的な立場を維持し続けている。近代手法による研究も先進国の研究者によって行われており、最も単純なタイプの造山帯の火成活動を理解する上で、アンデス造山帯は絶好の場を提供している。しかし、一歩内部に足を踏み入れると、その長大な造山帯に対して、いかにデータが乏しいかに気付く。

地質調査所においては昭和54年度より国際産業技術研究事業(ITIT)の一環として、チリー地質鉱物調査所(SERNAGEOMIN、以前のIIGから昭和56年に改組)とベースメタル鉱床探査法に関する共同研究事業を実施している。その発足前の資料調査で感じたことは、チリーの地質、特に鉱業的に重要な中生代-新生代の火成活動の特徴を明らかにした和文報告書が皆無に近い点であった。



写真1 チリー北部の海蝕台地にみられる風景
(アントファガスタ北方)。

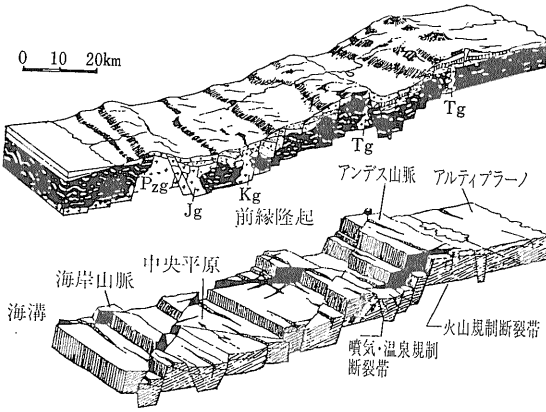


図1 チリ北部 アルティプラノを含む地域の地形の東(右)一西(左)変化。 Pzg: 古生代 Jg: ジュラ紀 Tg: 第三紀花崗岩類。 IAVCEI (1974) ガイドブックによる。

そこで筆者が見聞したものにプロジェクトの成果も加えて情報の蓄積に努めることは アンデス造山帯の理解の上に役立つものと考え この小文を起こすことにした。なお 地質一般と鉄鉱床については海外製鉄原料委員会(1978)の大作にくわしいが その出典は RUIZ ら (1965) 前後のものが中心で若干古い。本誌に掲載された松野(1967-68)にはチリーの風土 航空写真解析の手順 結果などが詳述されている。

2. チリーの地勢

アンデス造山帯の火成活動を理解する場合に 同じような火成活動が中生代初めから現在まで続いていたと考えられるから まず現在の情報を知ることが大切である。その一つに地勢がある。チリーの地形的特徴は何と言っても西側のチリー海溝と東側にそびえるアンデス山脈その上の第四紀火山にあり。この火山活動は比較的速い(8-10cm/年)沈み込み速度を持つナスカプレートの

サブダクション上に生じたものである。震源と地震波の解析によると チリー海溝における沈み込み帯の角度は浅く 大洋・大陸両プレートは 著しい圧縮場で摩擦しながら大洋プレートがもぐり込んでいるタイプで その結果として超巨大地震を伴う (UYEDA & KANAMORI, 1979)。このチリー型サブダクションに伴う火山には成層火山が多く 見事な景観を呈している(図2)。しかし火山は海溝に面するアンデス山脈の全てに存在するのではなく 何ヶ所かで欠けている。この問題にはあとで触れる。

ペルー南部からチリー北部にかけてのアンデス中央部では 海岸沿いに海岸山脈が発達しており(図1) ここには古生代堆積岩 変成岩 花崗岩あるいはより以前の岩石が露出し 海側に急斜し(写真2) 内陸側へなだらかな山腹を形成する。その内側にグラベンがあり 第四紀の陸成層が埋めており 中央平原と呼ばれる(写真3)。そして地形はアンデスに向けて徐々に高まる。この地形と地質に表われた非対称なペアは(図1) 我が国の北上山地と北上河谷 さらに奥羽山脈に続く地勢と似てい

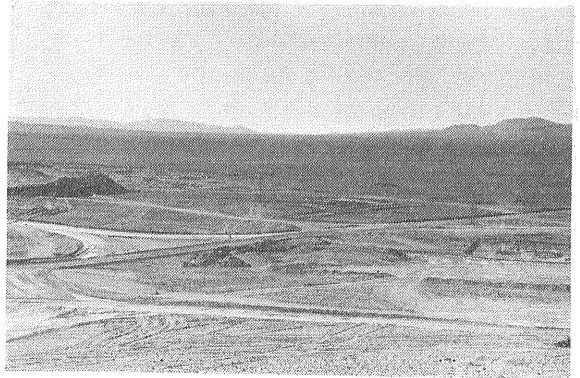


写真3 チリー北部 中央平原の風景。

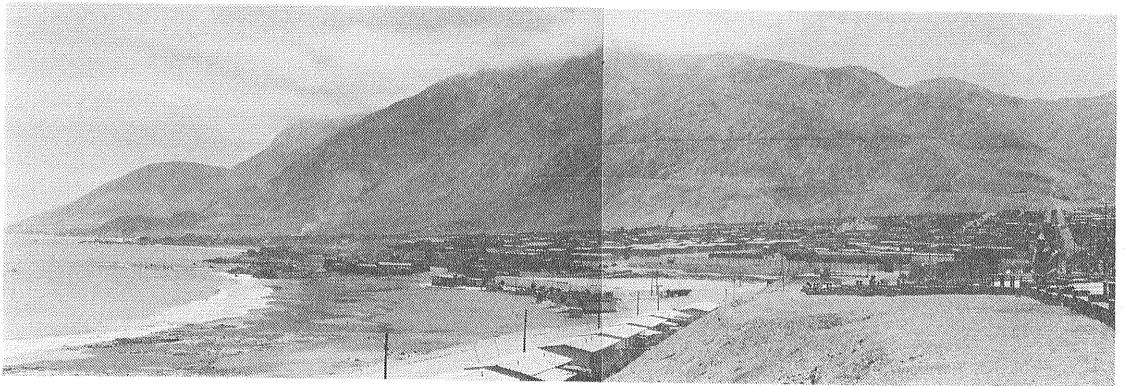


写真2 チリー北部 太平洋岸に迫る海岸山脈とトコピジャの街。

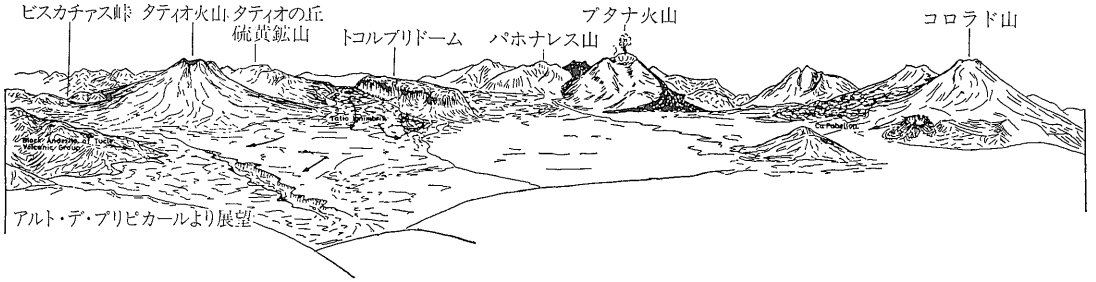


図2 アルティプラーノにそびえるチリーの火山。 IAVCEI (1974) ガイドブックによる。

る(松野 1968 a; KATSUI, 1972)。

中央平原の東方にアンデス火山群がそびえ 中央部では 5,000-7,000m の山脈を形成する。 アンデス山脈はチリー中北部では東西の2列に分けられる。 西部アンデスは新第三紀流紋岩質火砕岩に覆われる隆起した新-中生界に 第四紀火山が配列するものである。 アルゼンチン側の東部アンデスは褶曲古生層に中新世パソリスが貫入した隆起帯で その西縁に若干の火山が分布するにすぎない。 この火山前線の背後に隆起した基盤岩類が露出する点は東北日本と著しく異なる点である。

アンデスの地勢は東西に変化し それが南北方向にはよく連続してみられるものの 南北方向にも若干は変化する。 その著しい例はペルー-ボリビアからチリー北部の屈曲部の内陸に発達するアルティプラーノ(プナ)と呼ばれる海拔4,000m 前後の台地である(図2)。 これは広い所で幅200km に及び 白亜紀後期-第三紀の砕屑物で埋められたグラーベンがその後隆起し 新生代の火山-貫入活動をうけたものである。 大陸地殻の厚さはこの付近で最も厚く(約75km) 南方へ薄くなる。 第四紀火山はここでも群立する(写真4)。 また中央平原が

欠けている所があり そのアンデス山脈には火山が存在しない。 以上のチリー北部にみられる地形的特徴は南部では消滅し また南部ではオフィオライトが現われるなど 現在の地形的変化は地質時代の地質的变化とも何らかの関係を有している。

東西方向にみられるチリーの地勢的特徴は 南北方向の断層に沿う上下運動により 隆起と陥没が地質時代を

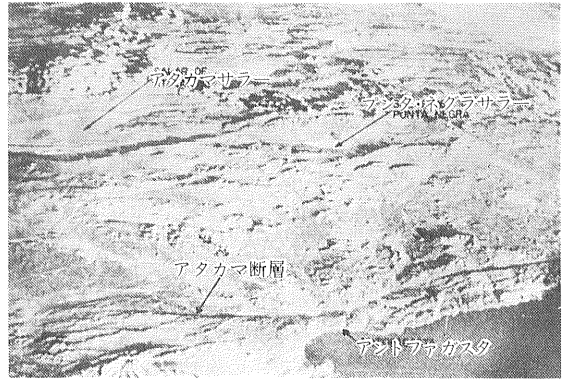


写真5 チリー北部 アタカマ断層の衛星写真。



写真4 アルティプラーノの湖と第四紀火山。 手前は現世のエバポライト。 左端にフラミンゴが23羽。

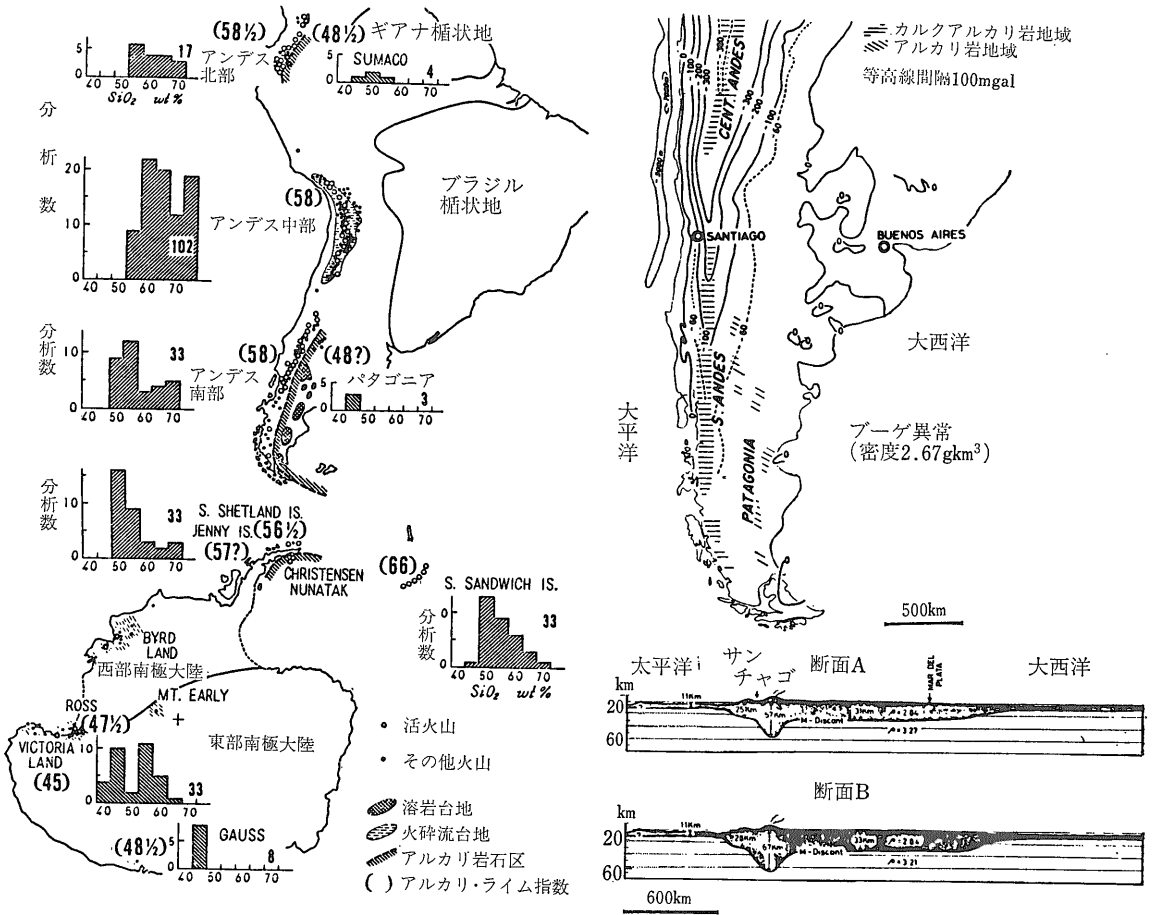


図3 チリーにおける第四紀火山の分布 シリカ含有量と地殻の厚さ(プーゲ異常). KATSUI (1972) 原図.

通じて生じ 陥没帯には周囲の隆起帯から碎屑物が流入して形成された。南北系の断層の著しいものにアタカマ断層(写真5)があり 北米大陸のサン・アンドレアス断層との類推から横ずれ断層ではなかろうかと アメリカの地質家によって調べられたことがある。しかし大きな横ずれはなさそうで 上下運動が主体である。東側のアンデス山脈は隆起量が卓越したために生じ 第四紀火山の真の標高は一般に2,000m以下である。この現在みられる地形は第三紀後期に完成したものと 層位的に推察されている。

3. アンデスの火山

チリーアンデスと聞くと私達は第一に雪に覆われた火山を想うかべるが 第四紀火山の分布は何処処かで切れている。チリー海溝からの沈み込みは連続的に生じているであろうから この事実には奇異な感じをうける。チリー海溝からのサブダクションゾーンは 一般には25

-30°の角度を持つと考えられているが 火山と中央平原を持たないことで著名な南緯2-15°S, 27-33°S付近ではその角度が10°前後と浅い。したがってここでは大洋プレートと大陸プレートが密着し そのためマグマの巢の一つと考えられるくさび状マントルが生じておらず マグマが発生しないとする解釈は魅力的である。

南アメリカ大陸の新生代後期の火山群は 大局的には北部(コロンビア エクアドール) 中部(ペルー チリー北部) 南部(チリー中南部 アルゼンチン) に分けられる(図3)。KATSUI (1972) によれば 北部アンデスには約40(うち数個は活火山)の成層火山があつて カルクアルカリ岩系の安山岩 デイサイト 流紋岩からなり 大陸側にはアルカリ岩をほとんど伴わない。中部アンデスでは厚さ1kmにも達する流紋岩質イグニンプライト(中新世-更新世)が15×10⁴km²にわたり中生代の諸岩石を覆い(写真6) 既述のアルティプラーノを構成している。これはこの時代のものとしては 世界最大の規模を持つ。

イグニンプライト上には260もの火山体があり 30はその高さ6,000mをこえるが 火山の比高は2,000m以下である。この地域はカルクアルカリ岩系の安山岩一流紋岩が多く 玄武岩は産出しない(図3 SiO₂%参照)。

南部アンデスには60の成層火山(うち活火山は20) 小規模な台地溶岩が発達する。この地域の火山の著しい特徴はカルクアルカリ岩系安山岩を伴う 高アルミナ玄武岩が多量である点にある。流紋岩は少ない。安山岩の鉱物組合せや REE パターンもチリー北部とは異なっている。この南北変化は 大洋プレートの沈み込み角度の変化に起因するものと考えられている (LOPEZ-ESCOBARら1977)。台地状溶岩は内陸のアルゼンチン パタゴニア地方に発達し 主としてかんらん石アルカリ玄武岩である。図3のシリカ頻度分布図からわかるように 玄武岩・安山岩は南部に多く 苦鉄質火山岩が多い点は 更に南方の南サンドウィッチ諸島や南極大陸にも認められる。南サンドウィッチ諸島はアルカリ総量が最も低く とくにカリウムに乏しいソレライト岩系からなる(図4)。低アルカリソレライトは 千島-東日本-マリアナ弧 トングなど 大洋間でプレートの沈み込みが活発な島弧に知られており 南サンドウィッチ諸島も例外ではない。北部-中部アンデスではプレートの活動は活発であるが ブーグ異常から大陸地殻が厚いと予想されており(図3) そこでは火山岩が高アルミナ玄武岩系の領域にプロットされる(図4)。しかし玄武岩は実際には知られておらず また既述のように この地域には流紋岩質火砕流堆積物が多量に分布する。これらの事実は大陸地殻物質がマグマの発生に何らかの影響 たとえば下からの熱や水の影響を受けて溶融し 多量のカルクアルカリ岩系の珪長



写真6 アルティプラーノにおけるイグニンプライト流の平坦面とインデオ(チリーでは非常に少数)の集落。

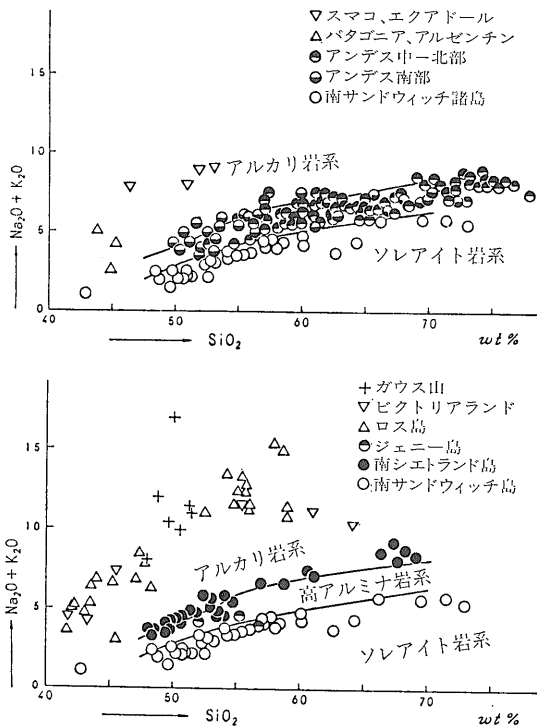


図4 南米大陸 第四紀火山岩のアルカリ-シリカ図。KATSUI (1972) 原図。

質または安山岩質マグマを生ぜしめた可能性を暗示する。事実この考え方は1972年頃までの大勢を占めていた (PICHLER & ZEIL, 1969)。

JAMES ら (1976) はペルー南部の安山岩-流紋岩について Sr 同位体比の研究を実施した。中新世と思われるデイサイト質イグニンプライト (64-71% SiO₂) は 0.706-0.707 の Sr 初生値を示し より新しい (更新世) 流紋岩質イグニンプライト (71-73% SiO₂) は 0.7085 前後であった。その後の噴出物である主として安山岩質のアレキパ (56-61% SiO₂) およびパロソ (56-64% SiO₂) 火山岩はそれぞれ 0.7067-0.7079 0.7054-0.7068 の ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr を示した。これらの値は海洋地域の安山岩類の値(0.704) よりもいずれも若干高く かつ高シリカ岩石で同比が高い傾向を示す。

主成分が未分化で Sr 同位体比が低いマグマは Rb/Sr 比が低い若い地質時代の苦鉄質岩から発生し 比較的急速に上昇固結したものと考えられる。Rb/Sr 比が高い岩石や 低くても時代を経た岩石では ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比に高い値が期待できる。JAMES らは Sr 初生値のパラッキを説明するモデルとして かつて沈み込んだ大洋性リソスフェアと新しいプレートの接触面付近かあるいは新しいプレートと同位体平衡に達した大陸リソスフェアの

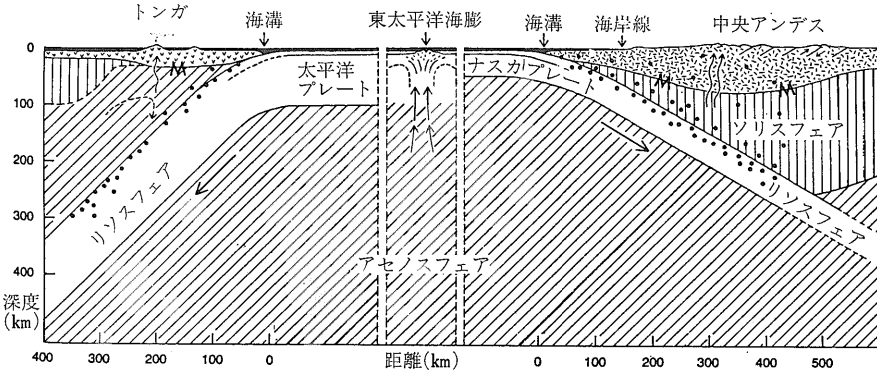


図5 中央アンデスとトンガにおけるサブダクションの推定。震源(黒点)はトンガでは大洋プレートの上に集中し、アンデスではばらつく点に注意。アンデスでは沈み込んだプレートに古いプレート(今は大陸性リソスフェア)がアバットしていると考えられる(JAMESら 1976)。

下底部付近におけるマグマの発生を考え、その様な特殊性は、深発地震面にあらわれている(図5)ものとみなした。この様に時代的に(および化学的にも)異なった苦鉄質物質にまたがってマグマが発生すれば、上述程度のSr初生値のパラッキは説明できるであろう。

HAWKESWORTHら(1979)は第四紀-更新世火山岩のネオジウム-ストロンチウム同位体比研究を、カルクアルカリ岩について2地域、すなわちチリー北部のかんらん石含有玄武岩質安山岩、輝岩、角閃石安山岩(57-66% SiO₂, 1.9-3.2% K₂O, 0.7057-0.7072 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)、エクアドールのかんらん石含有安山岩(56-58% SiO₂, 1.1-1.8% K₂O, 0.7038-0.7044 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)およびパタゴニアの台地状

玄武岩についておこなった。その一部を図6に示す。

希土類元素の一つであるNd(ネオジウム)は7個の同位体を持ち、そのうちの一つである¹⁴⁸Ndは¹⁴⁷Sm(サマリウム)のα崩壊で生じる放射性同位体である。Smは苦鉄質物質に多く含まれ、珪長質岩石で少ないから¹⁴⁸Nd/¹⁴⁴Ndと⁸⁷Sr/⁸⁶Srの間には一般に逆の関係が成り立つ。そして珪長質度の増加と共にNdが増加する割合はRbがふえるよりは小さい(周藤 1980)。図6の黒記号で示されるように、マンタル起源と考えられる玄武岩類は中央海嶺玄武岩(MORB)から右下へ見事な負の相関性を示す。このことは、また海洋とその周辺地域の玄武岩(とその出発物質)には¹⁴⁸Nd/¹⁴⁴Nd、⁸⁷Sr/⁸⁶Srにおいてかなりの不均質性があることを示している。

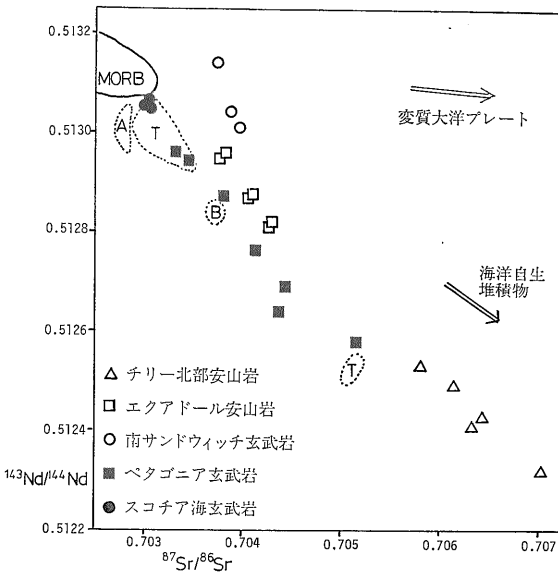


図6 火山岩類のネオジウム-ストロンチウム同位体比。MORB 中央海嶺玄武岩 A アセンション島 I アイランド B プーベ T トリスタン・ダ・クーニャ HAWKESWORTHら(1979) 原図。

一方、アンデス造山帯の火山岩類は玄武岩領域から右側、すなわち⁸⁷Sr/⁸⁶Srが高い方に若干ずれる。⁸⁷Sr/⁸⁶Srを高める可能性としては、(i)海水と平衡に達した変質岩や海底堆積物の影響、(ii)大陸地殻物質の混入などが考えられるが、HAWKESWORTHらは大陸周縁部の安山岩と海洋地域のソレアイト(南サンドウィッチ諸島)との間の一致性を重要視し、両環境下で共通のマグマ発生条件が存在したと考える。すなわち、海洋底における変質作用により⁸⁷Sr/⁸⁶Srが高められた大洋プレートが沈み込み、深部における脱水作用によりK, Rb, Srなどが選択的に上位のリソスフェアにとり込まれて、そこでマグマが発生したために上記の⁸⁷Sr/⁸⁶Srシフトが生じたものと考えた。

Ndは変質脱水作用で大きくは移動しない。エクアドールとチリー北部の火山岩にみられる¹⁴⁸Nd/¹⁴⁴Ndの相違は、沈み込みにより形成されたリソスフェアの不均一性と考えられる。なお、チリー北部の安山岩の⁸⁷Sr/⁸⁶Srはかなり高いのであるが、HAWKESWORTHらは、キム巴拉イト中のマンタル起源捕獲岩の新鮮な透輝

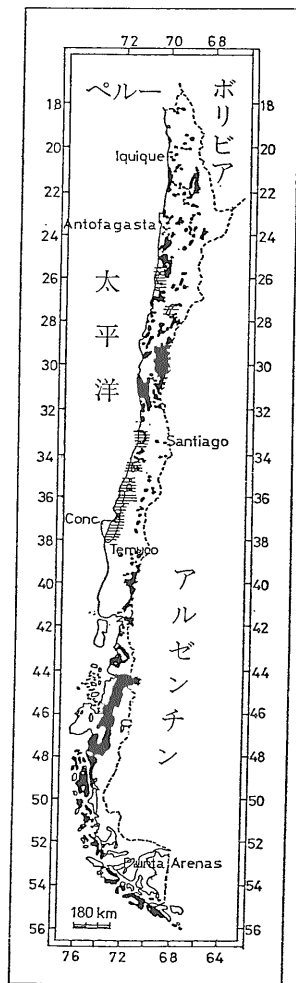


図7 チリーの花崗岩類の分布. チタン鉄鉱系はすべて古生代花崗岩類 黒は中生代-新生代花崗岩類.

花崗岩の分布
 ● 磁鉄鉱系 (ジュラ紀-新生代)
 ■ 主にチタン鉄鉱系 (古生代)



写真7 長い浸食期間の後 古生代花崗岩 (右側) を不整合に覆うジュラ紀堆積岩類 (コピアボ南方).

4. 中生代-第三紀の火成活動

アンデス地向斜は 恐らくブラジル-ギアナ楕状地(図3)をとりまく若い先カンブリア界の上に 古生代の堆積物が堆積し それが楕状地から西側に順次オルドビス-シルル紀(410-440 Ma) 石炭-ペルム紀(300-320 Ma) 太平洋岸地域では 320-230 Ma) の造山運動をうけた後 現在の太平洋岸沿いに発達した。

チリーでは先カンブリア時代と思われる変成岩類や花崗岩は 太平洋岸沿いの隆起部分(海岸山脈)に知られているが 年代測定で同定されたものはまだ報告されていない。サンチャゴ西方の古生代花崗岩類は 片状構造を持ちカタゾーンの可能性がある。古生代の変成岩 堆積岩類も断片的にしか分布しない。 其中では石炭-二疊系が広く分布する。

古生代末には流紋岩質火山作用や花崗岩活動があつて古生代花崗岩類と記載されているものは主にこの時期のものと思われる。この花崗岩類は サンチャゴからコンセプションにかけての海岸山脈に広く分布し 内陸にも断片的に露出する(図7)。チリーの地質解説書には古生代花崗岩類は優白色の花崗岩組成と書かれているが既存のモード分析値や筆者の観察によると 花崗閃緑岩質な部分が とくに内陸部にかなり産出する。花崗岩組成の岩石は次の比率で存在し 花崗岩は44%である。しかし中生代以降の花崗岩類よりも珪長質であることは事実である。

岩 質	古 生 代	中生代-新生代
モンゾ花崗岩より カリ長石に富む岩石	44%	29%
花崗閃緑岩より 斜長石に富む岩石	56%	71%

石の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比 0.704-0.713を重視し 上部マントル起源でも0.71までは有りうるとし チリー北部の同比が大陸地殻物質の同化(PICHLER & ZEIL, 1969)によって生じた可能性を否定している。

アンデス山脈の若い火山岩類の起源としては 以上のように (i)沈み込む大洋プレート. (ii)サブダクションゾーンから水やアルカリ元素の供給をうけた より上位の“マントル”物質などの可能性が論議されている。大陸地殻物質起源論や海洋底堆積物の影響などは 近年ではあまり評価されていない。深所における苦鉄質物質起源論が優勢な背景には プレート理論の存在のほかアンデスの火山岩類がその名の如く安山岩質で比較的苦鉄質であることなども推察される。安山岩が優勢な火山活動は ジュラ紀までさかのぼることができる。

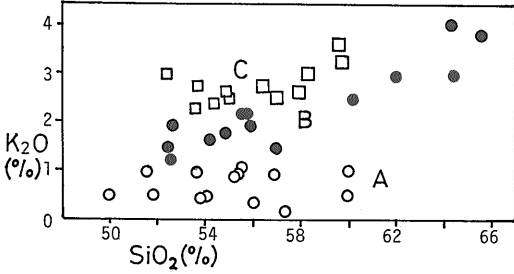


図8 チリー北部ジュラ紀火山岩類のアルカリ—シリカ図. PARACIOS (1978) 原図.

古生代花崗岩類の多くは非広域変成岩類に貫入し片状構造を示さない。黒雲母(-角閃石)の組合せを有しまれに白雲母を含む。一般に磁鉄鉱を欠きまれに少量の磁鉄鉱を含み主としてチタン鉄鉱系に属する。この点は磁鉄鉱系に属するジュラ紀以降の花崗岩類ときわだった相違点でありその間に広域構造場の大きな転換が予想される(ISHIHARA & ULRIKSEN, 1980)。その時期はゴンドワナ大陸の分裂開始と時期を同じくしている。

アンデス地向斜は アルゼンチンを含めると広く発達した古生代地向斜と対照的に幅100-200km南北4,000kmの狭小なゾーンにジュラ紀中期に海進が生じ(写真7)西側で“優地向斜的”東側で“劣地向斜的”な場に安山岩に富む火成活動が生じて始まったものである。初期においては主に海成層が部分的に陸成層が堆積し白亜紀後期から第三紀前期にかけては主に陸成層が内陸側で卓越する(松野 1968 a の付図参照)。火成活動は全時期を通じて認められるが第三紀中頃には火成活動は地向斜域をこえて現在の火山帯より200kmもアルゼンチン側に及びまたチリー中北部には多量の流紋岩質イグニブレイトが噴出するなどその構造運動に変化が推定される。

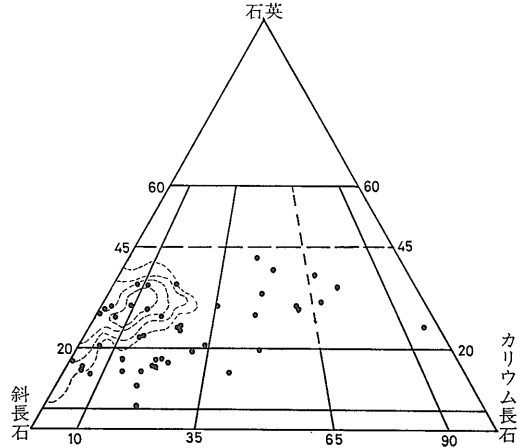


図9 チリー中生代-新生代花崗岩類のモード分析値. 破線は北上山地花崗岩類(石英-カリウム長石系)の1-2-4-6%線.

ジュラ紀火山活動は NNW-SSE 方向の沈み込み帯に關係して ほぼ 185 Ma 頃に始まったものと考えられている。この代表的なものはその黒色の外観からラ・ネグロ層とよばれ海岸山脈においてそれが白色の“古生代花崗岩”上に堆積貫入する様子は壯観であるが(写真8) PALACIOS(1978)はその火山岩は一般にシリカ52-60%の玄武岩質安山岩からなり(図8) A, B, C の3岩系に分けられることを鉱物組合せおよび化学組成上示した。A岩系は K₂O に乏しく SiO₂ の増加に従って K₂O の増加を伴わず ソレライト系列に相当するものであり B岩系は K₂O に若干富み 中部アンデスの第四紀火山に類似し カルクアルカリ岩系のトレンドに相当する。C岩系は アルカリ岩系列に類似する(図8)。個々の岩系が特定地域や特定の時代に集中してあらわれたり帯状配列を示すことなどはこれまでの所知られていない。

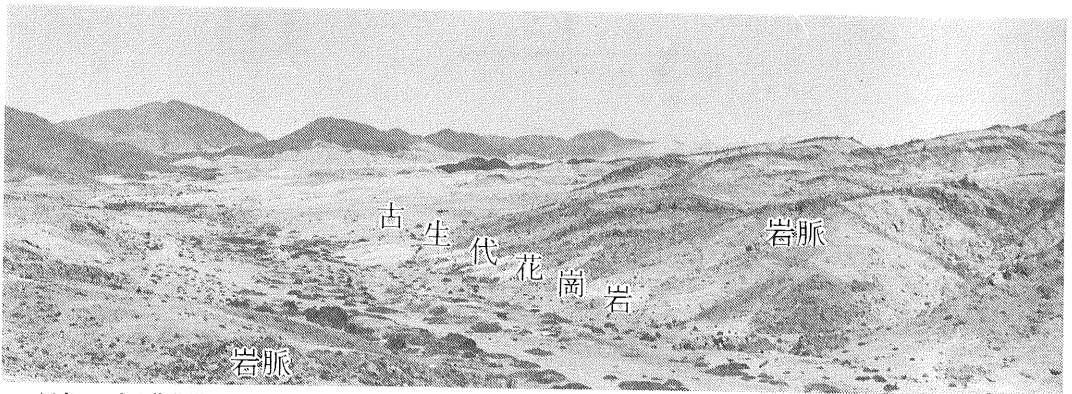


写真8 古生代花崗岩(白色部)に貫入する安山岩岩脈(黒色 尾根の部分)と同質火山岩(遠方 黒色部)アントファガスタ南方.

一方 同時代の深成岩類は海岸山脈に分布し 内陸に向けて諸性質が規則的に変化する。 海岸部のジュラ紀花崗岩類には中粒なものもあるが 中生代花崗岩類は一般に細粒で 火山岩を伴い エピゾーンの的である。 モード分析によると これらは石英閃緑岩 トナール岩 石英モンゾ閃緑岩-花崗閃緑岩 花崗岩からなる(図9)。 石英閃緑岩などの苦鉄質岩石は海岸地域に多くみられ 北アメリカ大陸におけると同様に “石英閃緑岩線”が海岸沿いにうすく引ける。 図9にはチリーと同様にほとんどすべて磁鉄鉱系からなる北上山地のモード組成を示したが チリーの岩石は北上山地よりも一般に石英に乏しい 若干アルカリ岩石的傾向を示すことが明らかである。

カナダのクイーンズ大学の研究者は1960年代末より南緯26°-29°地域の火成岩を詳細に調べているが ジュラ紀以降の花崗岩類が東に若くなる見事な帯状配列を見出した(図10, 11)。 すなわち花崗岩類は西から東へ次の7時期に分けられた。

- (i) ジュラ紀初期 (191—176 Ma)
- (ii) ジュラ紀後期 (156—137 Ma)
- (iii) 白亜紀初期(128—117 Ma)
- (iv) 白亜紀中-後期(107—87 Ma)
- (v) 晩新世(67—59 Ma)
- (vi) 始新世初期-漸新世初期(44—34 Ma)
- (vii) 漸新世-中新世 (23—22 Ma)

それぞれのグループは海岸線にほぼ平行に分布し 東西幅が40km以下である。 これら花崗岩類は同様な組成の岩脈群や火山岩類を伴っている。 火成活動の移動を年率に換算すると中生代について 0.6mm/年 新生代前半について 1.1 mm/年が得られる。 その後 250kmも内陸に及ぶ火成活動があつて(図11) 主にアルカリ岩

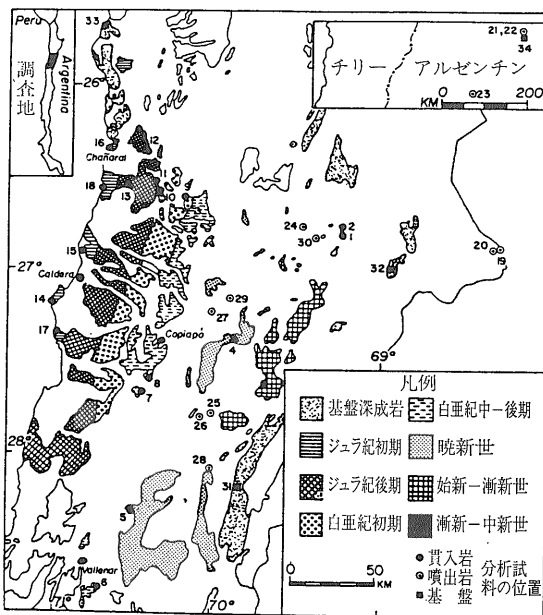


図10 チリー北部 (26°-29°S) における花崗岩類の分布と時代別変化。 McNUTTら (1975) 原図。

が内陸にあらわれ 第四紀の火山活動は再びチリー/アルゼンチン国境付近に戻る。

このような時代変化を示す火成岩類は 岩石化学的に島孤型と大陸周縁陸孤型に2分しうる。 前者は海岸部に産出するジュラ紀-始新世の火成岩類で K, Rb, Sr, Ba, Zr に乏しく K/Na, La/Yb が低い。 後者は内陸部に産出し 上記成分が逆の分布を示す。 火成岩類のカリウム指数 ($K_2O \times 1000 / SiO_2 - 45$) は海岸部で100前後であり 内陸アルゼンチンのファラジョン・ネグロ成層火山地帯では 300に上昇し ショショナイト系があらわれ

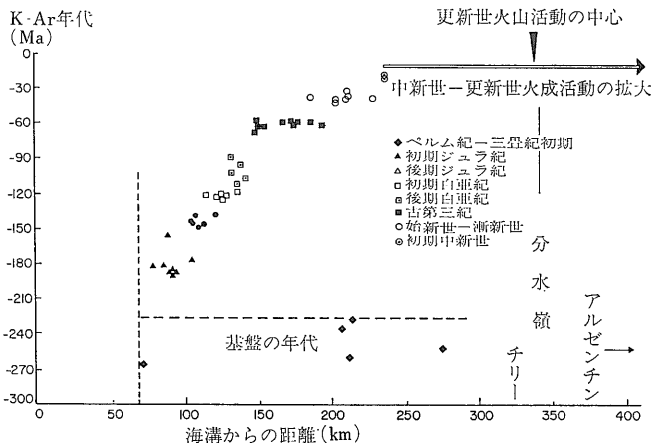


図11 チリー北部 (26°-29°S) における花崗岩類の K-Ar 鉱物年代の東西変化。 CLARKら (1976) 原図。

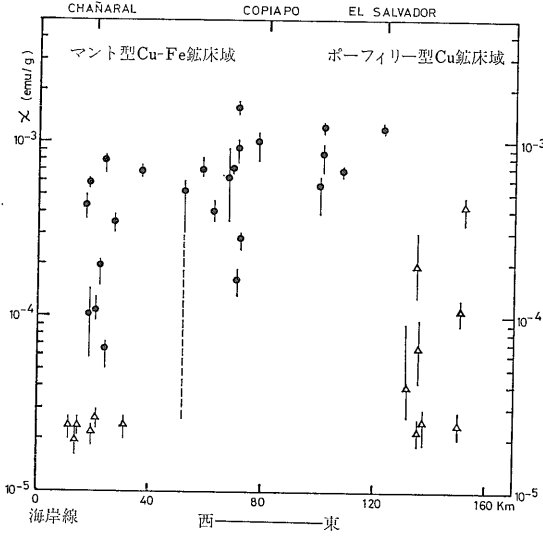


図12 チリ北部 (26°-28°S) における帯磁率の東西変化. ISHIHARA & ULRIKSEN (1980) 原図.

る。この大規模な非対称変化の原因としては 内陸ほどマグマ発生の方が深く 発生量も少なかったことが考えられている (DOSTALら 1977)。

島孤型に属するチリーの主要花崗岩帯では非対称変化は 時代を除き明瞭ではなかった。ISHIHARA & ULRIKSEN (1979) は花崗岩類の帯磁率が海岸部で低く 内陸で高い傾向を見出し これが海岸部のマント型や内陸部のポーフイリ-型銅鉱床の探査に使える可能性を指摘した。コピアポ横断面では (図12) 海岸付近の石英閃緑岩には チタン鉄鉱系に属する $\chi < 100 \times 10^{-6}$ emu/g の岩石が現われるなど帯磁率が一般に低く 内陸では 1000×10^{-6} emu/g をこえる。この図は岩質を考慮していないが もし一定シリカ量で表現すれば 東に増加する傾向はさらに明らかとなるであろう。

東西変化は $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初生値にも認められる。図13は Sr 初生値を それぞれ年代に対してプロットしたものであるが 年代は東側に若くなるので この図は Sr 初生値の東西変化を示していると考えてよい。プロットは2群に分けられる。一つは西側に分布する 195-128 Ma で Sr 初生値が比較的高い火成岩類 (0.7043-0.7059) であり これは年代との相関性を示さない。他の一つは 128-0 Ma の年代を有し Sr 初生値は海洋性ソレライトに対応する非常に低い値から 0.707 に上昇するものである。

時代と共に Sr 初生値が上昇する事実は シェラ・ネバダバソリス 南カリフォルニア バソリスその他 主にアメリカ大陸側では広く知られており その成因に関しては多くの可能性が指摘されている。Sr 初生値を高め

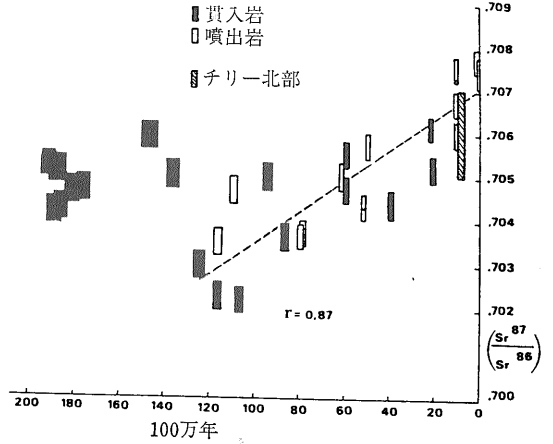


図13 チリー北部 (26°-29°S) における火成岩類の Sr 初生値と年代との関係. 鮮新-更新世火山岩を除く. McNUTT ら (1975) 原図.

る原因としては 既述のように大陸地殻物質の関与のほか 海水と同位体平衡に達した海底堆積物や変質玄武岩の影響などが考えられるが McNUTT ら (1975) はジュラ紀の Sr 初生値が若干高い火成岩類は 沈み込む大洋プレートや大陸地殻下底部で部分熔融が生じたものであり 白亜紀以降の年代と相関する Sr 初生値の変化は まず低い値の岩石が脱水した大洋プレートの部分熔融で 高い値の岩石は引続いて第3層のかんらん岩が溶けたためだと考えている。かんらん岩の部分熔融で高い Sr 初生値が得られることの根拠に関しては 大西洋中央海嶺かんらん岩で発見された実測値 (0.711) を強調している。

チリーのアンデス地向斜帯の火成岩類は主として苦鉄質な磁鉄鉱系からなり Sr 初生値は概して低く 大陸地殻は厚いにもかかわらず その影響を余りうけていない。

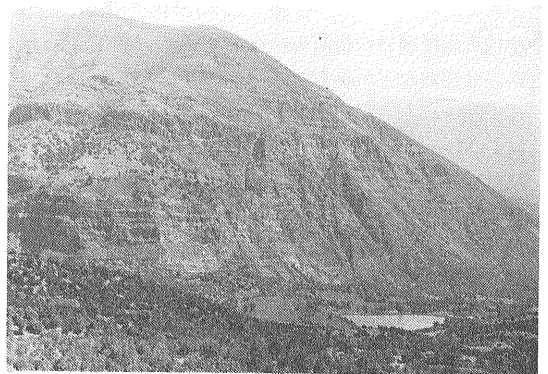


写真9 アンデス山脈の前縁部における第三紀安山岩類. ほとんど褶曲していない点に注意(サンチャゴ東方).

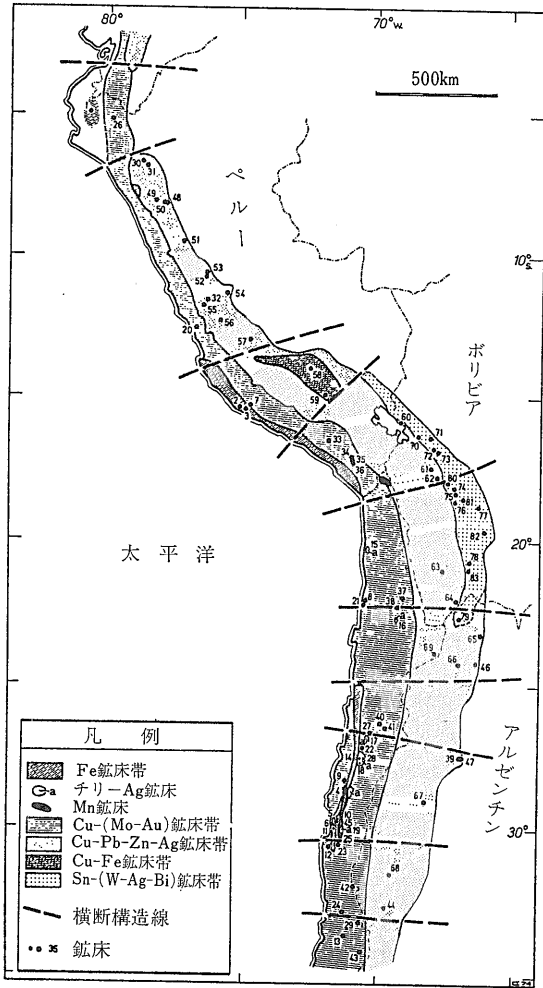


図14 アンデス中部における鉱床生成区
SILLITOE (1976) 原因。

大陸地殻の中上部では張力場であって 南北にのびる細長い“火道帯”のような所をマグマは繰返し上昇した可能性が考えられる。この推測は上下方向の断層帯の発達中生代火山堆積岩の褶曲がゆるやかで(写真9) 著しい押かぶせ褶曲などがみられない事実とも一致する。

5. 金属鉱床の概要

中部アンデスの金属鉱化作用には 太平洋岸から内陸に向けて 定性的に Fe→Cu→Cu-Pb-Zn-Ag→Sn の帯状配列が存在する(図14) と言う提案がある(SILLITOE, 1976)。一方 CLARK ら(1976) は南緯26°-29°地域で生産量と鉱山数に基づく定量的な鉱床の考察をおこないチリーおよびチリー海溝から約 500 km 離れたアルゼンチンにおいて 2つの鉱化作用の中心があり 鉱種別の

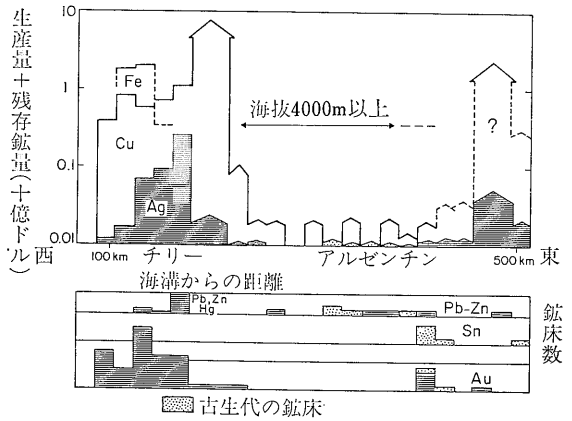


図15 チリー北部(26°-29°S)における鉱床産金属成分の東西変化。CLARK ら(1976) 原因。

非対称変化は不鮮明であることを示した(図15)。中部アンデスにおいてはボリビアの Sn 帯を除き火成活動は磁鉄鉱系に属するものと予想されるが 鉱床生成区にみられる非対称変化は 磁鉄鉱系とチタン鉄鉱系火成岩類が並列する地域(たとえば西南日本)で認められるから中部アンデスの主要部では 鉱化作用にみられる非対称性は不明確であることが予想される。

チリー北部は SILLITOE(1976)の Cu 生成区に含まれるが 銅鉱床をタイプ別に分類すればマント型鉱床は海岸部に多く 著名な巨大ポーフィリー型鉱床は東側のアンデス山麓に限られ 著しい非対称分布を示す。その原因の一つに磁鉄鉱系火成活動の範疇におけるマグマの fO₂ の相異が考えられる (ISHIHARA & ULRIKSEN, 1980)。また鉱化作用は南北方向にも変化して産出し たとえば Fe Mn 鉱床は南緯 25°-31° 地域に多産する。この南北変化は 東西系の構造に規制されているものと考えられる(図14)。

鉄 鉱 床

チリーの鉄鉱床には3つのタイプがある。南部に産する鉱床は 先カンブリア紀鉄鉱層ではないかと論議されている堆積性の鉄床である。第2は ここにのべる中生代の接触交代性鉄床であり 第3は新生代後期のエル・ラコ火山から噴出した 鉄石マグマとして著名な火山性鉄床である。これまでに大規模に開発されたものはすべて第2のタイプである。この採掘鉄石はほとんど日本に輸出され たとえば1974年の生産量は約1,000万トンであり そのうち860万トンが日本に輸出された。

接触交代性鉄床(約40)は北部チリーの南緯25°-31°に南北に分布し ルーフペンダント状の下部白亜系の変質安山岩中か 白亜紀花崗岩類との接触部に産出する。



写真10
セロ・イマン鉄鉱床における露天掘り。ピットはかなり急傾斜である。
(コピアボ北西方 1979年11月)。

塊状磁鉄鉱は鏡鉄鉱 磷灰石を伴いレンズ状 不規則(脈状)形態を呈し 変質脈石鉱物はアクチノ閃石 柱石 緑泥石 黒雲母 石英 黄鉄鉱などである。その産状から近傍の花崗岩類の接触交代鉄鉱床と考えられるが部分的には エル・ラコと同様に磁鉄鉱マグマが噴流した堆積性鉄鉱床である可能性がある(たとえばバンダリアス)。

銅-金-銀鉄脈

このタイプの鉄鉱床も西側の海岸山脈のジュラ紀-白亜紀花崗岩地帯に分布する。黄銅鉄-アクチノ閃石-磁鉄鉄脈は少量の U, Co, Mo を伴い 南緯22°-30°に約900 km にわたって産出し これは上記鉄鉄鉱床と成因的關係があるのではないかと考えられている。黄銅鉄-黄鉄鉄-鏡鉄鉄鉄脈はAuを目的として採掘されたこともあり



写真11 チリー北部 海岸山脈の山腹にあるブエナ・エスペランザ鉄山(マント型)。

他に微量の Pb, Zn, Co, Mo を伴う。

銀鉄脈も同じ花崗岩地帯に産出するが(図14) 母岩は花崗岩類よりも近くの石灰質岩であることが多い。一部の銀鉄脈は内陸側の電気石角礫パイプやポーフィリー型銅鉄床に産出する。ここでは脈石としての重晶石 Ag サルフォソルツの産出が特徴と言える。銀鉄脈は Cu 生成区の中に散在して分布する。

マント型銅鉄床

このタイプの鉄鉱床は チリーではポーフィリー型に次いで重要な銅鉄床である。主としてアンデス地向斜の西側に分布し 南緯 22°-25° 30' 32°30'-33°S に集中する。主にジュラ紀 白亜紀(一部第三紀初期)の安山岩や 挾在する火山性砕屑物を母岩として 層状~不規則

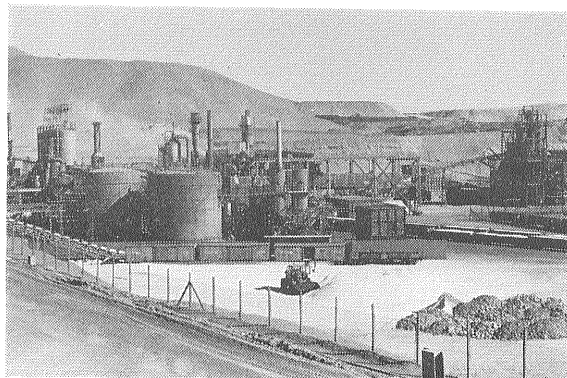


写真12 マントス・ブランコ鉄床の銅溶脱装置。採掘鉄石は現在でも酸化鉄のため化学的に銅を抽出する。

形態で胚胎し 輝銅鉱 斑銅鉱 黄銅鉱 がしばしば多量の銀鉱物を伴って鉱染する。母岩は“プロピライト化”しており 赤鉄鉱化 緑簾石化などが広域的な鉱床指示変質となることもある。この鉱床は1960年代の前半までは後生的な熱水鉱床と考えられたが 後半から1970年代にかけて同生説が提案されはじめた。

筆者の観察した鉱床では 鉱化の中心に岩脈状貫入岩体や角礫パイプがあって鉱化を規制し (プエナ・エスペランザ 図14の21 マントス・ブランコ) サンチャゴ北西方のエル・サラド (図14の24) では 鉱床のすぐ下位に石英閃緑岩質ストックが貫入しており 貫入岩との成因的な関係を暗示する。事実 マントス・ブランコは 人によっては白亜紀のポーフィリー型に分類されている。一方 鉱床中のアミグダル安山岩溶岩のアミグデュールには銅鉱物が含まれ この部分は溶岩と同生的と考えられ また一部の小鉱床では安山岩碎屑物からなる砂岩粒を輝銅鉱が埋めており 明らかに堆積性のものがある。マント型鉱床には同生的と後生的に濃集した Cu が含まれているものと考えられ この考察は 流体包有物の均質化温度が鉱床ごとに高温 (400°) から低温 (100°C) にばらつく結果 (NISTERENKO ら 1973) とも調和的である。

層状マンガン鉱床

このタイプの鉱床は上述の鉄鉱床の南東部に小規模に分布し 火山碎屑性砂岩中に酸化物が産出する。母岩と同生的に浅海の火山活動により Mn は供給され沈殿したもので 局部的に産出する鉄石英帯や銅鉱物はこの考え方を支持する。

角礫パイプ銅鉱床

重要なポーフィリー型銅鉱床に密接に関連して その西側に分布する。第三紀初期と思われる花崗閃緑岩に



写真13 チュキカマタ鉱山における露天掘り。写真左側を著名なウエストフィッシャーが走る (1979年11月)。

伴われる。外形は亜円形 ほぼ垂直なパイプで 石英電気石 黄鉄鉱 黄銅鉱が変質母岩角礫を埋める。Au は副産物として重要で 灰重石 鉄マンガン重石 輝水鉛鉱も所によっては多く含まれる。一般にパイプは密集してあらわれ 一つの地域で100個に達することもある。熱水による陥没機構の発達はその成因に重要な役割りを果していると考えられる。

ポーフィリー型銅モリブデン鉱床

チリーの金属鉱床で資源的に重要なものは 何と言ってもポーフィリー型である。一鉱床について10億トン以上の巨大鉱床が多く産出する上に 品位が高い。著名なチュキカマタ (写真13) エル・サルバドール エル・テニエンテ鉱床などでは1.5%Cu カットオフ1%Cu で現在でも採掘しており アメリカ合州国における0.6% 0.2%とくらべて チリーの鉱床がいかに高品位であるかがわかる。また副産物として回収される Mo 品位も一般に高い。

ポーフィリー型銅鉱床は アンデス西麓 既述の Cu 生成区の東部に分布する。したがってその生成時代は若い (40-10 Ma)。独立小貫入岩体かストックの一部に伴われて産出する。貫入岩の Sr 初生値は極めて低い (0.704±)。アメリカ合衆国南西部と比較すると 鉱床の周辺に Pb-Zn-Ag ハロを伴わず また脈石鉱物に硬石膏 石膏が普遍的に産出するなどの特徴がある。ポーフィリー型銅鉱床は アンデス山脈をこえて東方に Cu-Pb-Zn-Ag 生成区中にも産出する。ポーフィリー型銅鉱床と成層火山との関係から 鉱床の上限が画き出されたことで著名なファラジョン・ネグロは 27°30' 付近のアルゼンチン側に位置する (図14の39)。

ポーフィリー型モリブデン鉱床は 近年チリーで精力的に探査されているが 大きい鉱床はまだ発見されていない。火成岩の性質からみて顕著な鉱床は アルゼンチン側に存在する可能性が大きいのではないかと筆者は考えている。

銅-鉛-亜鉛-銀鉱脈-接触交代鉱床

この鉱床や赤色砂岩に伴われる銅鉱床は内陸部を代表するものであり したがってチリーには産出せず ペルー アルゼンチンに分布する。このタイプの鉱床は一般に第三紀後期の独立した小貫入岩体である閃緑岩 (安山岩)-モンゾ花崗岩 (流紋-デイサイト) に伴われる。母岩は 鉱床が多産するペルーでは 石灰岩を挟在するジュラ紀-白亜紀海成層であり その西側では第三紀火山岩類を多く含む碎屑岩類であるが 南方のポリビア アルゼンチンでは母岩が変化に富み かつ時代が古い (古

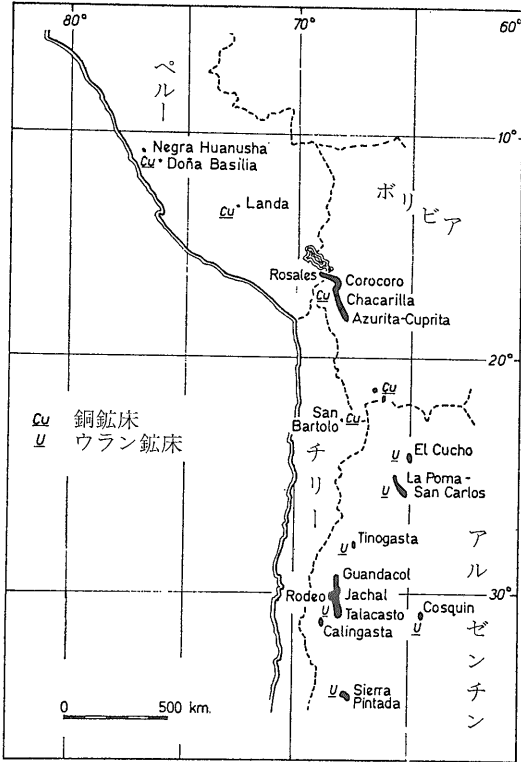


図16 第三紀赤色砂岩に含まれる銅 ウラン鉱床の分布。SILLITOE (1976) 原図。

生層)。

鉱床は Pb, Zn, Cu, Ag を主として多金属的であり 一部には酸化物も多量に産する。回収されている微量成分としては Sn (セロ・ド・パスコ) Cd, I, Se, Fe, Hg, Bi, Ge などがある。また As, Sb も若干多い。W, Mo などはペルー北東部に若干産出する。

この多金属帯の鉱床には 実はいろんな産状と成因のものが含まれている。鉱床は一般に石灰岩を母岩とする場合に接触交代型で 火山岩が主体の場合に鉱脈型であるが ポーフイリー型に近いものも存在する。接触交代型の場合も明確な貫入岩体を伴わず スカルン鉱体を伴わない場合には 種々の成因が考察されており たとえば 日本でよく知られているペルーのワンサラ Pb-Zn 鉱床では 鉱脈型 堆積型など種々の議論がおこなわれていたが 最近では高温交代 (スカルン化) 作用と引続く熱水交代変質作用の産物であると結論づけられている (深堀ら 1980)。一方 アルゼンチンのアギラ Pb-Zn 鉱床は一般にはスカルン型とみなされているが 鉱石の S 同位体比により 古生代の堆積性 Pb-Zn 鉱床が 白亜紀貫入岩活動によって単に変成をうけただけだと考える提案もある。

ペルーのセロ・ド・パスコ (図14の52) はモンゾ花崗岩斑岩中の熱水性角礫パイプと 脈状-不規則形態の Cu-Pb-Zn-Ag 鉱床からなるが ポーフイリー型鉱床との類似性を有している。他にもポーフイリー型とみなしうる Ag-Pb-Zn 鉱床 および角礫充填鉱床も存在する。

赤色砂岩銅-ウラン鉱床 (コロコロ型)

このタイプの主要鉱床は第三紀の赤色砂岩 礫岩中の層状 レンズ状鉱床で モラッセ堆積層に胚胎されるために その分布はアルティプラノ付近のアンデス東麓に限られている (図16)。しかし ペルーの西部やアルゼンチン西部のものは 石炭-二疊紀から第三紀初期のものである。

鉱床は砂岩 礫岩中の層状 レンズ状鉱体からなる。銅鉱床の場合には輝銅鉱かあるいは自然銅が少量の Pb, Ag を伴って産出し ウラン鉱床は ピッチブレンドか他の酸化物からなる。V が多量に伴われることもある。

貫入岩は鉱床の近くにはみられず かつて考えられた火成源鉱床成因論は現在では支持されていない。鉱液の起源は 母岩中に混在する火山岩碎屑物や挟在する溶岩 火砕岩にあるものと考えられる。この母岩の赤色岩層には 石膏層や岩塩層が多量に含まれており これを循環して生じた硫酸根含有塩水が 火砕岩類から Cu や U を溶かし 炭質物や硫酸根のバクテリア還元による還元作用で鉱床が形成されたものと考えられている。

アンデス造山帯には 以上のほか更に内陸部のボリビアに 多金属性の Sn-W, Sn-Ag 鉱脈生成区があってポーフイリー型 Sn 鉱床も産出するが ここでは省略する。また 第四紀火山には 硫黄鉱床 (と硫黄色) が各所でみられ 特に大陸地殻が厚いアルティプラノで多いらしく 現在でも何ヶ所かで採掘されている。この地域は陸成層が厚く エバポライトが多産する所であり この硫黄は基盤から再生された可能性も考えられ また 東北日本の硫黄鉱床との比較の上でも非常に興味深いのであるが 硫黄鉱床の研究はほとんど行われておらず ここに紹介できないことは残念である。

6. むすび

チリーにおいては中生代前半に最大の構造場の転換があり 何らかの原因で現在の海岸線にほぼ沿った形に断裂火成帯が発達した。その細長いベルトを通して間断なく磁鉄鉱系の安山岩-花崗閃緑岩質マグマが上昇し 第三紀中頃若干の修正をうけて現在に達している。その間 大量の Fe, Cu, S の濃集を鉱床にもたらした。

現在のチリーでは 沈み込むプレートの上面では圧縮

応力場であり 多分そのために大陸地殻の中-上部では張力場にあるらしく 地質時代においても同様であった可能性が考えられる。その結果としてアンデス地向斜におけるマグマ活動は 大陸地殻が厚いにかかわらず地殻物質の関与を余り受けていない磁鉄鉱系に属するのではなかろうか。張力場に磁鉄鉱系マグマが上昇した点では 時間的長さは異なるものの 日本のグリーン・タフ活動以降の火成活動と似ている。その他にもいくつかの類似点はあるが もちろん相違点も多く 全ての地域でそうであるように チリーの地質も独自の地質的背景とその発展史とを持っている。

チリーの金属鉱物資源は 鉄と銅につけると言ってもよい。鉄鉱床は先カンブリア時代の鉄鉱層にくらべると資源的価値は小さいが 火成鉄床としては規模が大きかつエル・ラコ火山の鉄鉱床のような原形をとどめた例があって 鉄の濃集過程を研究するには絶好の場を提供している。この様な鉄の異常な濃集には 液相不混和説が最も考え易いが これまで様々な説が出されている。

銅鉄床は チリー中北部では至る所にみられる感じであった。その集約されたものとして アンデス山麓の巨大なポーフィリー型鉄床が存在するのであろう。筆者は現地調査中にチリーでは鉄床 火成岩のみならず 土壌 植物 動物などあらゆる自然体が銅に富んでいるのではないかと思ったものである。チリーに銅鉄床が多い原因として 東太平洋海盆で大洋底に生成した層状銅鉄床が沈み込んで溶融し 安山岩質マグマに溶け込んで上昇 再生されたとする説がある (SILLITOE, 1972)。一方 チリーの銅量を生産するには 400 ppmCuを含む海洋底の玄武岩で充分であり その銅を濃集するプロセスさえあればよいとする反論もなされている (BURNHAM, 1979)。

太平洋周縁部のプレート収束の場では 大洋プレートは何ヶ所かで沈み込んでいる。何故にチリーやフィリピンでは銅鉄床が卓越するのであろうか。この鉱物資源の偏在性の課題は資源予測の立場から 解決されるべき最も重要な命題である。ポーフィリー型やマント型の個々の鉄床の成因論については 次回以降に紹介を予定している。

文 献

引用文献のうち ここに掲載していないものは ISHIIHARA & ULRIKSEN (1980) を参照されたい。
 BURNHAM, C. W. (1979) Magmas and hydrothermal fluids, in H. L. BARNES ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 2nd edit., John & Wiley & Sons, N. Y., p. 71-136.
 CLARK, A. H., FARRAR, E., CAELLES, J. C., HAYNES, S. J.,

LORTIE, R. B., MCBRIDE, S. L., QUIRT, G. S., ROBERTSON, R. C. R. and ZENTILLI, M. (1976) Longitudinal variations in the metallogenetic evolution of the central Andes: A progress report. *Geol. Assoc. Canada, Spec. Paper*, no. 14, p. 23-58.
 DOSTAL, J., ZENTILLI, M., CAELLES, J. C. and CLARK, A. H. (1977): *Geochemistry and origin of volcanic rocks of the Andes (26°-28°)*. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 63, p. 113-128.
 深堀康昌・相川潔・川崎正士(1980)フンサラ鉱山の地質と鉄床——その鉱物学的研究——。鉄山地質 vol. 30, p. 103-118.
 HAWKESWORTH, C. J., NORRY, M. J., RODDICK, J. C., BAKER, P. E. (1979) ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd, ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, and incompatible element variations in calc-alkaline andesites and plateau lavas from South America. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 42, p. 45-57.
 IAVCEI (1974) Antofagasta-Tatio-Laco volcano. *Intern. Sym. Volcanology, Guide-book, Exc. A-2*, 59 p.
 ISHIIHARA, S. and ULRIKSEN, C. E. (1980) The magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Chile. *Mining Geol.*, vol. 30, p. 183-190.
 JAMES, D. E., BROOKS, C. and CUYUBAMBA, A. (1976) Andean strontium volcanism: Magma genesis in the light of strontium isotopic composition and trace-element geochemistry. *Geol. Soc. America, Bull.*, vol. 87, p. 592-600.
 海外製鉄原料委員会 (1978) 南米西部の鉄鉱資源——チリー国の地質および鉄鉱床——229 p.
 KATSUI, Y. (1972) Late Cenozoic volcanism and petrographic provinces in the Andes and Antarctica. *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.*, Ser. 4, vol. 15, p. 27-40.
 LOPEZ-ESCOBAR, L., FREY, F. A. and VERGARA, M. (1977): Andesites and high-alumina basalts from the central-south Chile High Andes: Geochemical evidence bearing on their petrogenesis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, vol. 63, p. 199-228.
 松野久也 (1967-68) アンデス銅資源地帯空中予察調査①-⑤ 地質ニュース no. 160, p. 38-47; no. 161, p. 41-51; no. 162, p. 39-49; no. 163, p. 47-57; no. 164, p. 55-63.
 NISTERENKO, G. V., LOSERT, J., CHAVEZ, L. and NAUMOV, V. B. (1973) Temperaturas y presiones de formation de algunos y acimientos cupriferos de Chile. *Revista Geol. Chile*, no. 1, p. 74-80.
 PALACIOS-M., C. (1978) The Jurassic paleovolcanism in northern Chile. *D. Sc. Dissertation, Univ. Tübingen*, 98 p.
 PICHLER, H. and ZEIL, W. (1969) Die quartäre "Andesit" —Formation in der Hochkordillere Nord-Chiles. *Geol. Rundschau*, vol. 58, p. 866-903.
 周藤賢治 (1980) 火成岩の同位体比からみたマグマの起源物質 地球科学 vol. 34, p. 283-294.
 SILLITOE, R. H. (1972) A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. *Econ. Geol.*, v. 76, p. 184-197.
 SILLITOE, R. H. (1976) Andean mineralization: A model for the metallogeny of convergent plate margins. *Geol. Assoc. Canada, Spec. Paper*, no. 14, p. 59-100.
 UYEDA, S. and KANAMORI, H. (1979) Back-arc opening and the mode of subduction. *J. Geophys. Res.*, vol. 84, p. 1049-1061.
 UYEDA, S. and NISHIWAKI, C. (1980) Stress field, metallogenesis and mode of subduction. *Geol. Assoc. Canada, Spec. Paper*, no. 20, p. 323-339.