

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（1）

=ポーフィリー鉱床とは=

渡 辺 寧\*

### はじめに

ポーフィリー鉱床は銅・モリブデン・錫・タンクスチーン等の重要な供給源であり、特に銅については、世界で生産される全鉱石のうちの約60%がこの型の鉱床から採掘されています。平均的なポーフィリー銅鉱床の銅の生産・埋蔵総量は約290万トンで、日本最大の銅鉱山である別子と足尾鉱山の生産量（それぞれ約70万トン）を1桁（最大級のものと比べると2桁）上回ります。ポーフィリー鉱床の鉱石の平均銅品位は1%～0.6%程度と低いものの、多くは露天掘りで採掘されるため生産コストが安く、現在でも鉱山会社の多くが最も重要な鉱床タイプと考えています。

ポーフィリー鉱床の開発は、米国ユタ州のビンガム（Bingham）鉱山を端緒としています。それまでビンガム渓谷では、約6%の銅品位の鉱脈が小規模に掘られていましたが、1904年に操業形式ががらりと変えられ、0.75%～2.5%の品位の鉱石を大規模に採掘するようになりました。ビンガムでの成功は、すぐに米国南西部の鉱床群やチリのチュキカマタの開発に引き継がれました。これらの鉱山の開発をもたらしたもう1つの原因是、銅硫化鉱物の浮遊選鉱技術の開発でした。

これらの鉱山についての研究論文は1900年初頭から報告されてきました。特に1960年代には膨大な数の論文が報告され、それらをもとに1970年代前半にはポーフィリー鉱床の様式や形成モデルがLowellやSillitoe等によりまとめられました（Lowell and Guilbert, 1970; Sillitoe, 1972, 1973）。日本でも石原舜三さんがポーフィリー銅鉱床の記載を2冊の本にまとめ（石原, 1969, 1970）、1976–78年

\* 地質調査所資源エネルギー地質部 主任研究官

には資源地質学会にポーフィリー銅鉱床研究委員会が設けられました。1979年には資源地質学会の主催で、アジアのポーフィリー鉱床に関する国際討論会が開催されています (Ishihara and Takenouchi, 1980)。ポーフィリー銅鉱床に関しては、佐藤社郎さんにより「ほなんざ」でも解説されています (佐藤, 1979)。これらのまとめや形成モデルは、20年以上経過した現在でもほとんど変更する必要もなく、鉱床探査に応用されています。このようにポーフィリー鉱床は研究し尽くされた様に見えますが、なぜ今ポーフィリー鉱床なのでしょうか？

### なぜ今ポーフィリー鉱床か？

金属鉱業事業団技術開発部は、1996年から地化学探査技術の開発（同位体地化学探査）事業の一部として、チリのエルサルバドル鉱床の研究を開始しました。鉱化作用に関連した鉱物の同位体組成を分析し、その結果を鉱床探査に役立てようと言うのです。金属鉱業事業団はエルサルバドル鉱床の持ち主であるチリ国銅供給公社 (CODELCO) と共同研究契約を結び、また同位体分析に関しては同じく共同研究契約を結んだ地質調査所で行うことになりました。

私は、同年、金属鉱業事業団の目次さん達とともにサンチャゴを訪れました。折からの銅景気に沸く首都 (写真1) では、建造中の高層ビルが目白押しで、バブル期の日本を思わせます。その原動力となっているのが銅の輸出であり、チリは世界で生産される銅の約4分の1を供給しています。そして、その鉱石のほとんどがポーフィリー鉱床から掘り出されています。ではなぜチリにはポーフィリー鉱床が多いのでしょうか。鉱床の数が多いだけではありません。世界のポーフィリー銅鉱床の生産+埋蔵量のトップテンは、チュキカマタ、エルテニエンテ、エスコンディーダ、リオブランコ、チュキノルテ等と、ほとんどチリの鉱床に占められています。

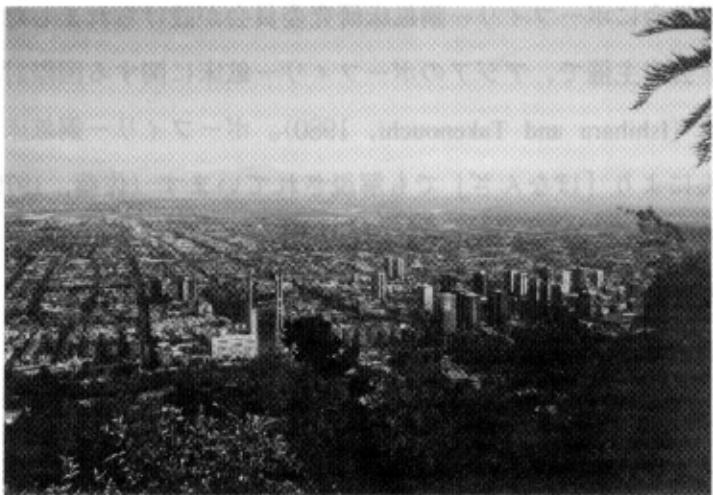
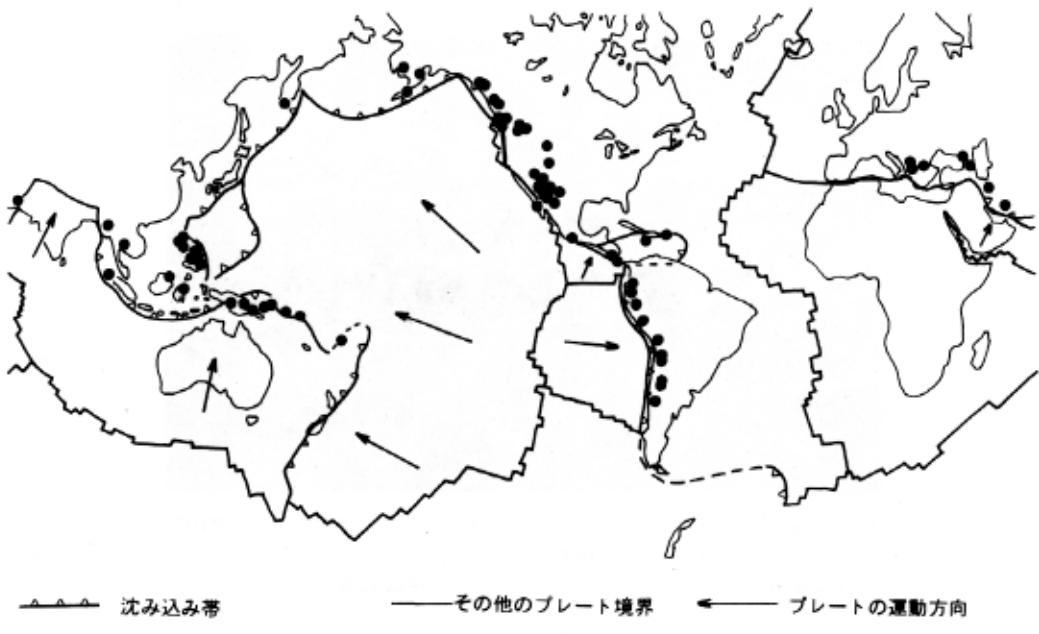


写真1 サンチアゴ市街の様子。1996年時に比べて現在ではさらに高層ビルの数が増えている。

この問題に対する明確な答えはまだ得られていません。さらに言えば、同じような火山弧である日本になぜポーフィリー銅鉱床が見つかっていないのか。存在するが見つかっていないのか、そもそも存在しないのか、等不明の点が未だ多く残されています。鉱床が発見されてからその鉱床の成因を研究していればよい”研究者”と異なり、鉱床探査家はこのような疑問に答えを用意しておかなくてはなりません。このシリーズでは、ポーフィリー鉱床の分布とプレートテクトニクスとの関係を見直し、また変質鉱物の酸素・水素同位体組成に基づいたポーフィリー鉱床の成因モデルを加味することにより、これらの問題を考えてみたいと思います。ただしシリーズを通して書かれる内容は、私の独断と偏見に満ちていることをお断りしておきます。今後は、(2)プレートテクトニクスとポーフィリー鉱床、(3)ポーフィリー鉱床と広域応力場、(4)ポーフィリー鉱床の成因論、(5)ポーフィリー鉱床の上部に火山は必要か?、(6)日本にポーフィリー鉱床は存在するか?、(7)ポーフィリー鉱床の探査指針、と進んで行く予定です。その前にポーフィリー鉱床とはどういうものか簡単におさらいをします。

### ポーフィリー鉱床とは

ポーフィリー鉱床は海洋プレートの沈み込み域である島弧や陸弧—特に環太平洋地域—に分布しています（第1図）。この鉱床は、火山弧に平行な細長い帯状の地域に集中して分布することが多く、また特定の期間（時代）に集中して形成



第1図 “若い”時代のポーフィリー鉱床の分布 (Uyeda and Nishiwaki, 1980)

されます。鉱床形成に関与した火成岩のはほとんどは、花崗岩質～閃綠岩質であり、磁鉄鉱系列のカルクアルカリ岩に属しますが、一部にはアルカリ岩に伴う鉱床も存在します。鉱床は、鉱床に含まれれる金属元素の種類によりポーフィリー銅、ポーフィリーモリブデン鉱床という風に分類されます。この中でも、特にアルカリおよびシリカに富む流紋岩～花崗岩質貫入岩に伴われるモリブデン鉱床は、クライマックス型と呼ばれています。多くのポーフィリー銅鉱床はモリブデンを副産物として含んでおり、また一部のポーフィリー銅鉱床は金に富んでいます。

個々の鉱床は、マグマが地下浅所 ( $\sim 3\text{ km}$ ) へ貫入し冷却する際に、マグマが放出した熱水により形成されます。熱水を放出した貫入岩は、一般に数100m  $\sim 2\text{ km}$  の直径を持っています。平均的な鉱床は447百万トンの鉱石（品位0.64%）を持ち (Titley and Beane, 1981)、2次富化鉱を伴います。鉱床は貫入岩の内部や周辺の母岩に形成された細脈群からなり、熱水により形成された鉱化帯や変質帯は貫入岩を中心とした累帯構造を持っています。

例えばエルサルバドル鉱床（写真2）の場合、中心部から縁辺部にかけて斑銅鉱-黄銅鉱帶、黄銅鉱-黄鐵鉱帶、黄鐵鉱帶へと鉱石鉱物の組み合わせが変化し



写真2 アタカマ砂漠中のエルサルバドル市街（手前）と鉱山全景。後方の山地の下部に鉱床が位置する。インディオが死んで横たわっているように見えることから、山地左端の頂上はインディオムエルト（死んだインディオ）と呼ばれる。

ます。変質に関しても中心部で黒雲母やアルカリ長石で特徴づけられるカリウム変質（写真3）が認められ、縁辺部ではプロピライト変質へと移り変わります。また鉱床の上部にはセリサイト変質帯が広がり、さらにその上部には明ばん石やパイロフィライトで特徴づけられるアドバンスト・アージリック（advanced argillic）変質（渡辺, 1998）と呼ばれる酸性変質帯が分布しています（第2図）。このポーフィリー鉱床上部の酸性変質帯には、日本でもおなじみの高硫化系浅熱水性金鉱床が胚胎することもあります（第2図）。

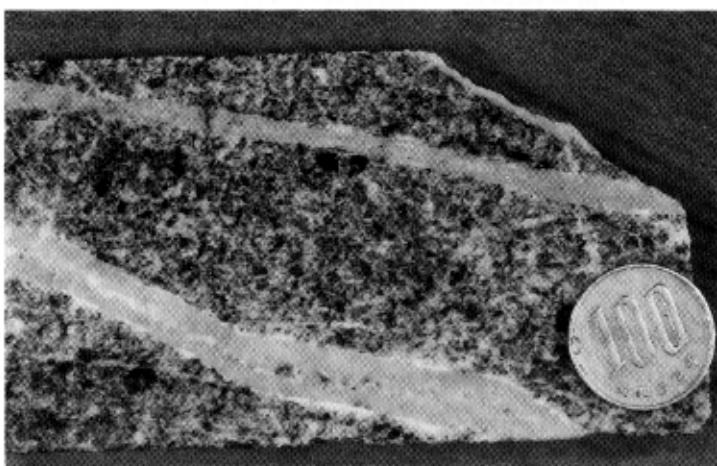
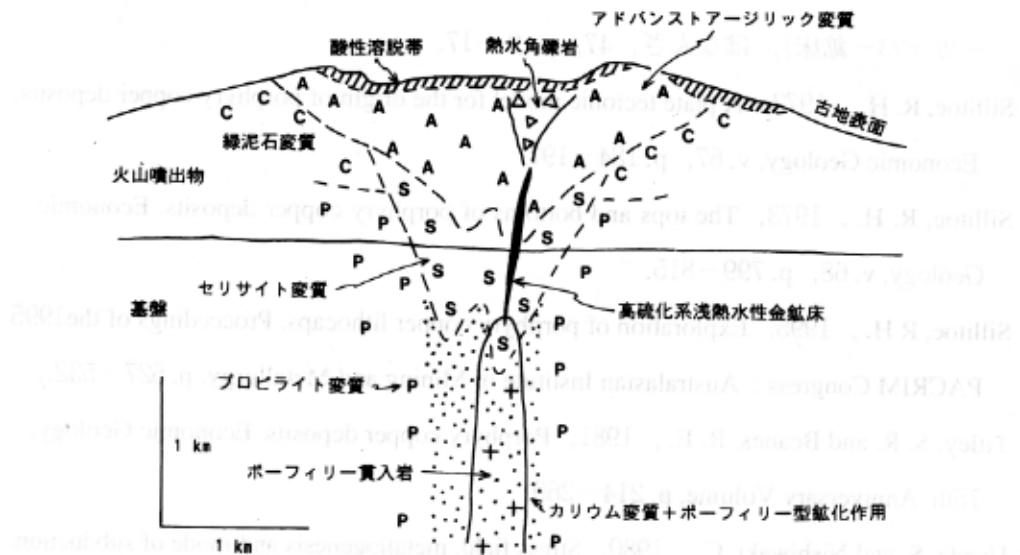


写真3 エルサルバドル鉱床の中心に位置する貫入岩（黒雲母変質を受けた花崗閃緑岩）とそれを貫く石英細脈。細脈の縁にはアルカリ長石のハローが認められる。中央の細脈の中間に硫化鉱物が含まれている。



第2図 ポーフィリー鉱床形成場の模式的全体像 (Sillitoe, 1995).

鉱化・変質作用の順序としては、比較的高温の热水 ( $600-400^{\circ}\text{C}$ ) により、最初にカリウム変質と周辺部のプロピライト変質が起こります。次に热水の温度の低下 ( $\sim 350^{\circ}\text{C}$ ) と共にセリサイト変質が起こります。銅やモリブデンといった金属元素は、カリウムまたはセリサイト変質時に硫化鉱物として細脈に沈殿します（写真3）。ポーフィリー鉱床は、しばしばダイアトリーと呼ばれる、径が数100mから1kmに及ぶ巨大な热水角砾岩を伴い、メキシコのカナネア鉱床のように热水角砾岩が鉱化しているものもあります。

#### 引用文献

- 石原舜三, 1969, ポーフィリーカッパー鉱床入門 [I]. 丸善, 260p.
- 石原舜三, 1970, ポーフィリーカッパー鉱床入門 [II]. 丸善, 252p.
- Ishihara, S. and Takenouchi, S. (eds), 1980, Granitic magmatism and related mineralization. Mining Geology Special Issue, No. 8, 247p.
- 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.
- 佐藤壮郎, 1979, 酔っぱらいのための鉱床学 (3) 銅鉱床—その1 (ポーフィリ

- ーカッパー鉱床). ほなんざ, 47, p. 9-17.
- Sillitoe, R. H., 1972, A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 67, p. 184-197.
- Sillitoe, R. H., 1973, The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 68, p. 799-815.
- Sillitoe, R. H., 1995, Exploration of porphyry copper lithocaps. Proceedings of the 1995 PACRIM Congress : Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 527-532.
- Titley, S. R. and Beanes, R. E., 1981, Porphyry copper deposits. Economic Geology, 75th Anniversary Volume, p. 214-269.
- Uyeda, S. and Nishiwaki, C., 1980, Stress field, metallogenesis and mode of subduction. Geological Association of Canada, Special Paper, 20, p. 323-339.
- 渡辺 寧, 1998, Advanced argillic alteration. 地球科学, v. 52, p. 55-56.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（2）

### —プレートテクトニクスとポーフィリー鉱床(その1)—

渡辺寧\*

#### 柳の下の2匹目のドジョウ

昨年8月、ウランバートルを訪れた際に、モンゴル人に連れられて、郊外へきのこ（シャンピニオン）採りに行きました。私にとって草地できのこ採りをするのは初めての経験で、最初は白い動物の骨ときのこを見間違ってばかりいました。そんな中、案内者のモンゴル人は次々とシャンピニオンを見つけていきます。これにはコツがありました。よく見ると、緑色の牧草の中に、アニスのような香りのするやや濃い緑色の香草が、半径数メートルのリング状に生えています。そしてシャンピニオンはこの香草に伴われているのです。

ポーフィリー鉱床も同じです。先月号にも書きましたが、ポーフィリー鉱床はある特定の地域・時期に集中して形成されます。従って1つ鉱床が発見されれば、その地域には他にもポーフィリー鉱床が眠っている可能性があります。しかし柳の下で2匹目のドジョウを探すのにもコツがいります。しだれ柳の木の下の根本に近いところが良いのか、はたまたやや離れたところがいいのでしょうか。また川向かいに生えているねこ柳ではどうでしょうか。明け方がいいのか、昼間がいいのでしょうか。これからしばらくは、こうしたコツを覚えるために、前の人ができるでドジョウをとったのか（過去に発見された鉱床がどのような場所にあったのか）を見ていきたいと思います。

#### プレートテクトニクスとポーフィリー鉱床

プレートテクトニクスの解説は巷に数多く出回っているので、ここであえて詳

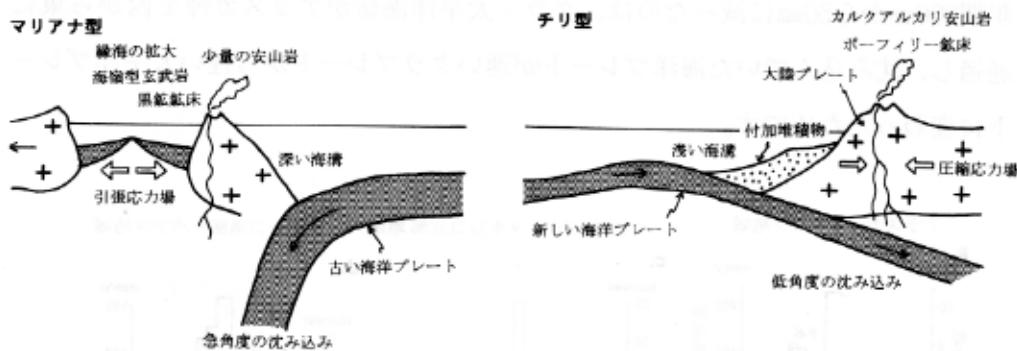
\* 地質調査所資源エネルギー地質部

しく説明する必要は無いと思いますが、簡単に説明します。地球には、いくつかの固いプレートという板状の岩石（リソスフェア）が、柔らかいマントル（アセンソスフェア）の上に浮かんで、全体を覆っています。これらの板は2種類に分類されます。1つは大陸プレートと呼ばれる花崗岩を主とするもの、もう1つは海洋プレートと呼ばれる超塩基性岩や玄武岩を主とするものです。大陸プレートは文字通りユーラシア大陸のような陸地を作っているプレートで、海洋プレートは太平洋のような海洋の底にあるプレートです。大陸プレートの方が海洋プレートよりも軽いため、両者が接しているところでは、大陸プレートの下に海洋プレートが潜り込みます（第1図）。大陸プレートの下に沈み込んだ海洋プレートは、自重のためどんどん地球の内部に入って行きます。従って海洋プレートの面積はどんどん小さくなり、しまいには無くなってしまうはずですが、地球表面から消え去った分だけ、新たに中央海嶺と呼ばれる海底山脈で海洋プレートは生産されます。こうして海洋プレートはベルトコンベアのベルトのように地球の表面を移動しています。

ポーフィリー鉱床がこのプレートテクトニクスと親密な関係があると最初に断言したのは Sillitoe (1972) です。Sillitoe はこの論文の中で、ポーフィリー鉱床は海洋プレートの沈み込み帯においてカルクアルカリ質の火成活動と共に形成されると指摘しています。同時に、このような場では、“時には陸塊（大陸プレート）同士の衝突が引き続いている”という重要な示唆もしています。しかしこの論文では、海洋プレートの沈み込んでいる（または沈み込んでいた）ところでは、どこでもポーフィリー鉱床が形成されるという考えが根底にあり、潜り込んだ銅やモリブデンに富んだ海洋プレートが、金属を上部に供給したと考えました。従って、ポーフィリー鉱床の地域による有無は、カルクアルカリ質火成活動の場が、ポーフィリー鉱床がちょうど地表に現れる程度に削剥されているか否かの違いであると説明されました。

その後、各地のポーフィリー鉱床の形成年代が数多く測定され、ポーフィリー鉱床は、海洋プレートと大陸プレートとの収束速度（沈み込み速度）が増加する時期に形成されていることがわかつてきました (Clark et al., 1982; Damon et al., 1983)。速いプレートの収束速度は、海洋プレートの沈み込みの角度を小さくすればなんざ 1998. 7

ることから、浅い海洋プレートの沈み込み（チリ型の沈み込み；第1図）が起こっているところが、ポーフィリー鉱床の形成に向いていると考えられるようになりました（Uyeda and Nishiwaki, 1980）。



第1図 チリ型とマリアナ型の沈み込み（上田, 1983）

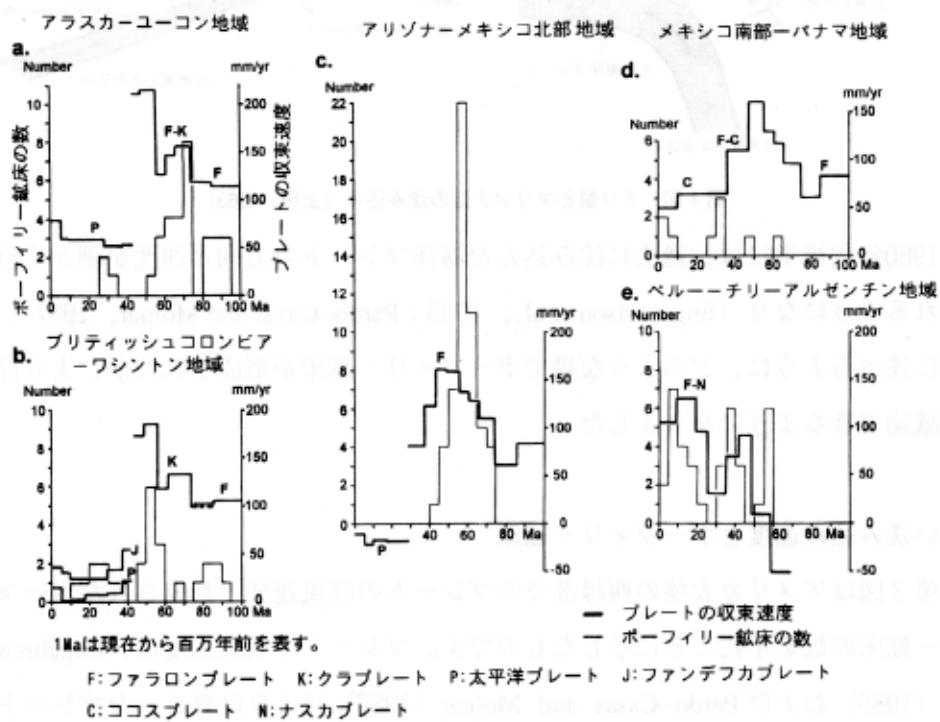
1980年代後半には、過去に沈み込んだ海洋プレートの方向と速度が細かく計算されるようになり（Engebretson et al., 1985; Pardo-Casas and Molnar, 1987）、次節に述べるように、どのような場でポーフィリー鉱床が形成されたか、より詳細に議論できるようになりました。

### 速い沈み込み速度とポーフィリー鉱床

第2図はアメリカ大陸の西縁部でのプレートの収束速度と形成されたポーフィリー鉱床の数を年代ごとに示したものです。プレートの収束速度は、Engebretson他（1985）およびPardo-Casas and Molnar（1987）により計算されたプレートの収束速度を、火成弧に対して直交する方向での速度に計算し直したもので、ポーフィリー鉱床の年代はすべての鉱床について発表されているわけではありませんが、このヒストグラムがだいたいの鉱床形成頻度を反映していると仮定します。

沈み込み帯において、プレートの収束速度が変化するのは次にあげる3つの原因のいずれかのためです。大陸プレートを固定して考えると、第1の方法は、沈み込んでいる海洋プレートの速度自身が変化することによるものです。第2の方法としては、沈み込んでいる海洋プレートの速度は変わらなくても方向が大きく変化することによるものです。第3の方法は、沈み込む海洋プレートの種類が変わることです。地球上の海洋プレートは1枚板ではなく、いくつかの板の分かれています。

その境界部は中央海嶺が占めています。この中央海嶺が大陸沿岸の沈み込み帯を通過すると、大陸の同じ場所に沈み込むプレートの種類が変わります。例えば第2図aのアラスカーユーコン地域で4,000–5,000万年前にプレートの収束速度が年間200mmから50mmに減ったのは、クラー太平洋海嶺がアラスカ沖を西から東に通過し、沈み込んでいた海洋プレートが速いクラプレートから遅い太平洋プレートに変わったためです。



第2図 時代ごとのプレートの収束速度とポーフィリー鉱床の形成頻度 (Watanabe, in prep.)

第2図に示されるように、アラスカーユーコン地域では、約7,000万年前に起った収束速度の増加（年間120mmから150mm）と共に、形成されたポーフィリー鉱床の数も約2倍となっています。同様の傾向はブリティッシュコロンビアーウォッシュington地域、アリゾナーメキシコ北部地域でも認められます。メキシコ南部からパナマにかけてはプレート収束速度と鉱床の形成との間に関連は認められません。ペルーチリーアルゼンチン地域では、約6,000万年前にプレートの収束速度が–50mmから10mm程度に増加し、同時にポーフィリー鉱床の形成が始まっています。しかし、それ以降は、収束速度とポーフィリー鉱床の形成との間には関連が読みほなんざ 1998. 7

とれません。

このようにプレートの収束速度と鉱床形成との間に関連が認められるのはアラスカからメキシコ北部にかけての地域であり、年間の収束速度が150mmを越えると形成される鉱床の数は急増します。しかし約5,000万年前に、年間収束速度が200mmに達したアラスカーカユーコン地域では、沈み込む海洋プレートの角度が小さくなりすぎたため、大陸内部で火成活動が無くなってしまい、鉱床も形成されなくなりました。

さらにこの図から読みとれる重要な点は、鉱床が活発に形成されるのは、収束速度が大きい時期よりも、増加しつつある時期であるということです。またすべての地域において、プレートの収束速度の遅い時期にも鉱床が形成されていることです。これらについては次号以降で説明したいと思います。

#### 引用文献

- Clark, K. F., Foster, C. T. and Damon, P. E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. Geological Society of America Bulletin, v. 93, p. 533-544.
- Damon, P. E., Shafiqullah, M. and Clark, K. F., 1983, Geochronology of the porphyry copper deposits and related mineralization of Mexico. Canadian Journal of Earth Science, v. 20, p. 1052-1071.
- Engebretson, D., Cox, A. and Gordon, R. G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific Basin. Geological Society of America, Special Paper, 206. 59p.
- 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.
- Sillitoe, R. H., 1972, A plate tectonic model for the origin of porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 67, p. 184-197.
- 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. 鉱山地質特別号, 11, p. 37-53.
- Uyeda, S. and Nishiwaki, C., 1980, Stress field, metallogenesis and mode of subduction. Geological Association of Canada Special Paper 20, p. 323-339.
- Watanabe, in prep., Plate tectonic setting of porphyry deposits in the Western America.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（3）

### －プレートテクトニクスとポーフィリー鉱床(その2)－

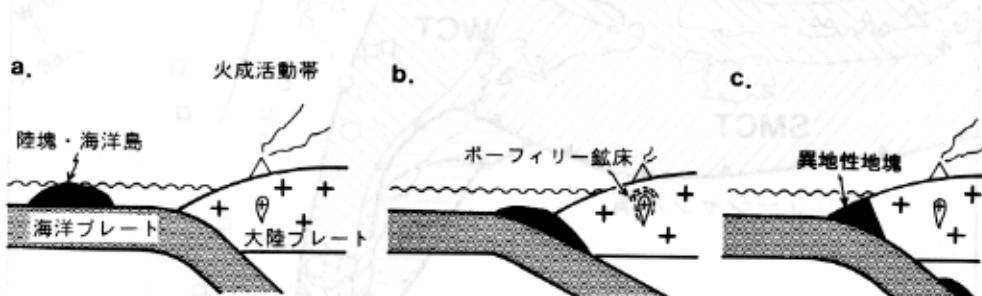
渡辺 審\*

#### 異地性地塊とは

昔、ひょっこりひょうたん島という子供向けテレビ番組がありました。この島の個性ある住民が引き起こす騒動は、私たちの楽しみでした。この物語の中で、ひょうたん島が海の上を漂流し、時に陸地に衝突するという設定は、プレートテクトニクスの異地性地塊 (allochthonous terrane) の概念を先取りしたものでした。

異地性地塊というのは、もともとその場所になかった陸塊または海洋島のようなものが (第1図a)、海洋プレートの上に乗ったまま、沈み込み帯 (海洋プレートが大陸プレートの下に潜り込んでいる所) まで移動して来て、大陸に付加したものを言います (第1図c)。陸塊や海洋島は、海洋プレートを構成している岩石と比較すると密度が小さいために、海洋プレートと一緒に沈み込むことができません。そのため海洋プレートが沈み込む際に、大陸縁辺部に取り残され、やがては大陸と一体となってしまいます (第1図c)。

日本列島は大陸縁辺部に位置してきたために、この異地性地塊が数多く認めら



第1図 異地性地塊の付加の概念図。a, b, c は時間の経過を示す。

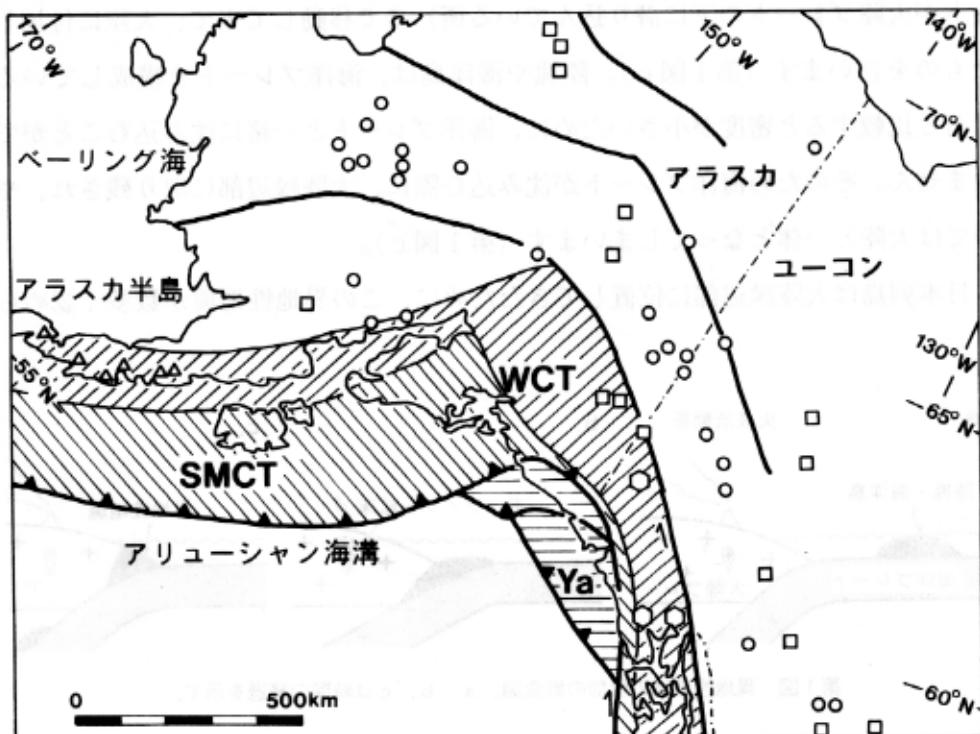
\* 地質調査所資源エネルギー地質部

れます。その代表例は秋吉台です。秋吉台を構成する石灰岩は、太平洋南方の海洋底に生成した石炭紀の玄武岩質火山の上にとりついたサンゴ礁が起源です。それが二疊紀後期に大陸付近まで海洋プレートと共に移動し、ユーラシア（パンゲア）大陸東縁に付加したと考えられています。

この異地性地塊の付加がポーフィリー鉱床の形成とどのような関係にあるのでしょうか。今月は異地性地塊が付加を繰り返したアラスカ-ユーコン地域を例に、どのようなテクトニックセッティングのもとでポーフィリー鉱床が形成されたか見ていきたいと思います。

### アラスカ-ユーコン地域のポーフィリー鉱床

アラスカ-ユーコン地域には、北米大陸に付加した古生代～新生代前期の異地性地塊が広く分布します。これらの地塊は主要な3つの東西方向の大断層に切られています。これらの断層はアラスカ-ユーコンの境界部で北北西-南南東に方向を変え、カナダ西岸を南の方へのびています（第2図）。

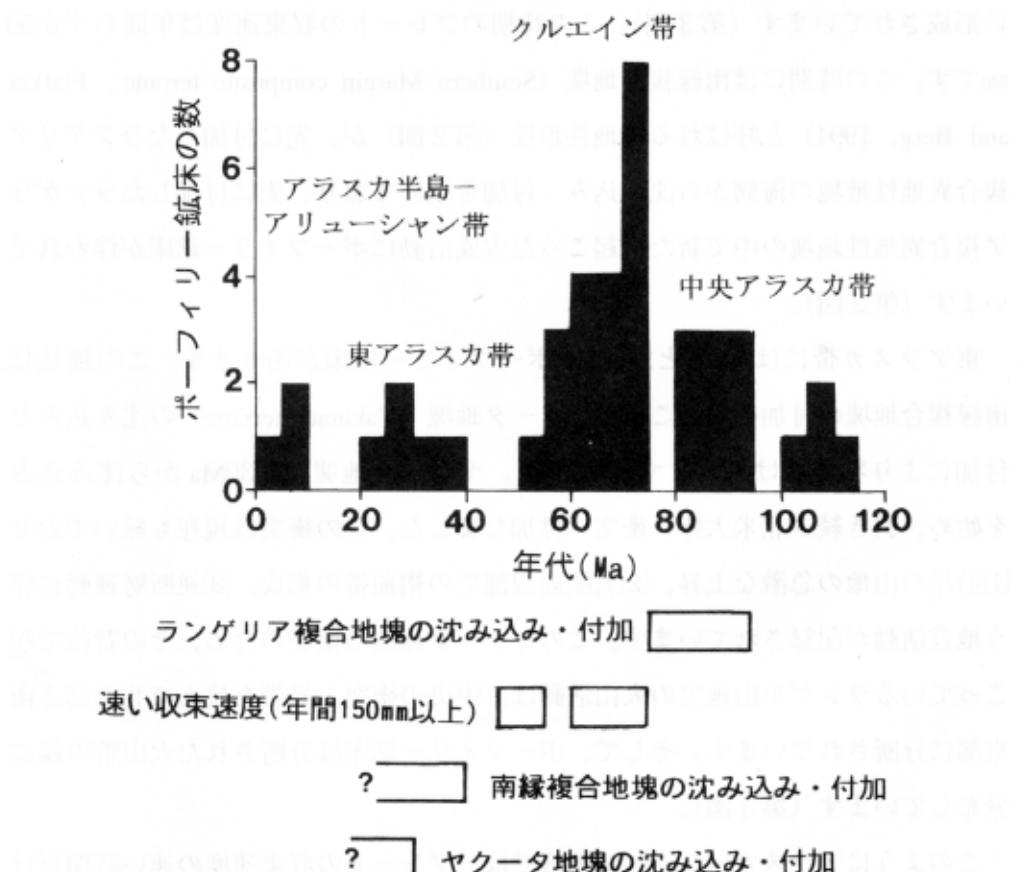


第2図 アラスカ-ユーコン地域のポーフィリー鉱床の分布と主要地質構造 (Watanabe, ip prep.)  
WCT: ランゲリア複合異地性地塊、SMCT: 南縁複合地塊、Ya: ヤクータ地塊。白四角、白丸、白三角、白六角形はそれぞれ中央アラスカ帯、クルエイン帯、アラスカ半島-アリューシャン帯、東アラスカ帯のポーフィリー鉱床の分布を示す。

ほなんざ 1998. 8

この地域にはおよそ50のボーフィリー鉱床が知られています (Nokleberg et al., 1995; Sinclair, 1995; Young et al., 1997)。これらの鉱床は、その年代と分布に基づいて、中央アラスカ帯、クルエイン (Kluane) 帯、アラスカ半島-アリューシャン帯、東アラスカ帯の4つのグループに分けられます (第2図)。

中央アラスカ帯のボーフィリー鉱床の形成年代は186Ma (1億8600万年前, 以下同じ) から81Ma までバラエティーに富みますが、94Ma から81Ma に特に集中しています (第3図)。この時期にはランゲリア複合異地性地塊 (Wrangellia composite terrane; Plafker and Berg, 1994) と呼ばれる幅約200km、長さ約2,000kmにも及ぶ異地性地塊の集合体がアラスカからカナダの太平洋側にかけて付加しています (第2図)。この複合異地性地塊が付加する直前には、複合異地性地塊の一部が海洋プレートと共に沈み込んだと考えられ、オミネカ (Omineca) 深成岩帯と呼ばれるカルクアルカリ質の深成火成活動を、アラスカ内陸部に引き起こ



第3図 アラスカ-ユーロン地域のボーフィリー鉱床の年代ヒストグラム (Watanabe, ip prep.)

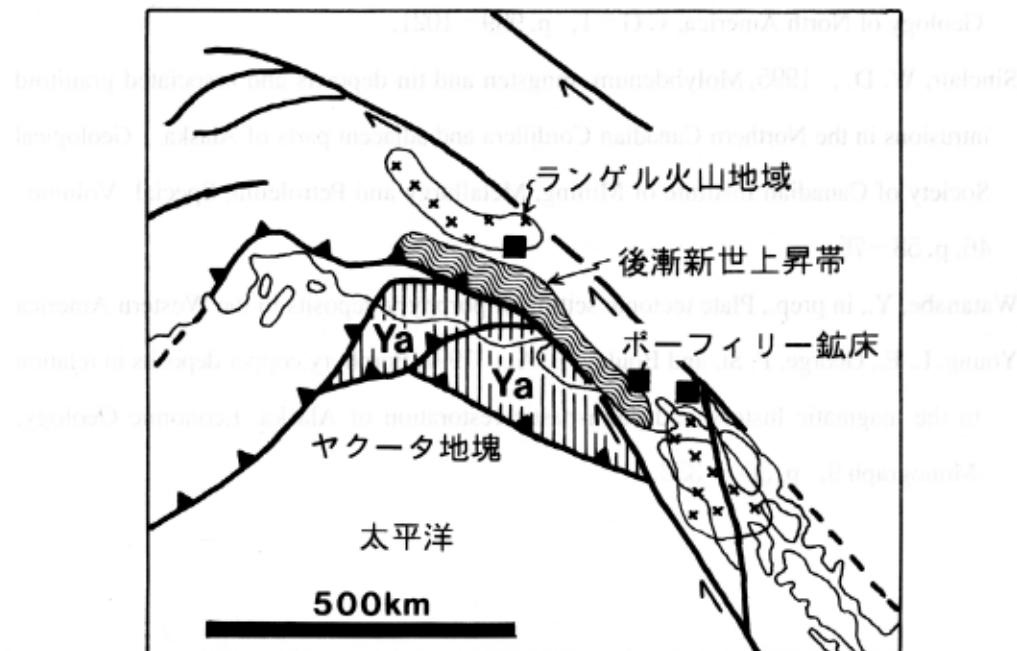
しています。この活動に伴う深成岩は全体として97Maから74Maの年代を示しますが、95Maから90Maの時期のものが特に多く見られます。74Maには複合異地性地塊の付加とともに内陸部の火成活動は終了し、新しい沈み込み帯が異地性地塊の海側に形成され、それに伴う火成活動帯がより海岸側に形成されます。ポーフィリー鉱床は異地性地塊が付加する直前のオミネカ深成岩の活動に伴われており、この火成活動の最盛期から徐々に衰退していく時期に主に形成されています。

クルエイン帯には73Maから52Maのポーフィリー鉱床が分布します。これらの鉱床の形成時期は、先月号に書いたように、クラプレートの速い沈み込みの時期に対応します（第3図）。この時期にはカルクアルカリ岩だけでなくアルカリ岩にもポーフィリー鉱床が伴われます。

アラスカ半島-アリューシャン帯のポーフィリー鉱床は35Maから4Maの間に形成されています（第3図）。この時期のプレートの収束速度は年間わずか50mmです。この時期には南縁複合地塊（Southern Margin composite terrane； Plafker and Berg, 1994）と呼ばれる異地性地塊（第2図）が、先に付加したランゲリア複合異地性地塊の海側から沈み込み・付加を始めており、先に付加したランゲリア複合異地性地塊の中で新たに起こった火成活動にポーフィリー鉱床が伴われています（第2図）。

東アラスカ帯には30Maと25Maのポーフィリー鉱床があります。この地域は、南縁複合地塊の付加後に起こったヤクータ地塊（Yakutat terrane）の沈み込みと付加により特徴づけられます（第2図）。ヤクータ地塊は約30Maから沈み込みを始め、引き続き北米大陸に衝突・付加しました。この衝突は現在も続いており、(1)沿岸の山地の急激な上昇、(2)大陸周辺部での褶曲帯の形成、(3)逆断層運動に伴う地震活動が記録されています。このヤクータ地塊の衝突のため、その背後で起こっているランゲル山地での火山活動は、中央の衝突上昇帯を挟んで北西部と南東部に分断されています。そして、ポーフィリー鉱床は分断された火山帯の端に分布しています（第4図）。

このようにアラスカ-ユーロン地域では、プレートの収束速度の速い時期だけでなく、遅い時期にもポーフィリー鉱床が形成されており、それらは異地性地塊



第4図 南東アラスカの地質構造とボーフィリー鉱床 (Plafker and Berg, 1994を改変)

の付加と時間的・空間的に関係があることがわかります。ボーフィリー鉱床の分布及び時期と異地性地塊の付加の時期を詳しく見ると、異地性地塊が付加を始めた直前に、地塊の付加が起こる場所の大陸側の火成活動に鉱床が伴われていることがわかります。さらに注意してみると、この火成活動が衰退に向かって行く時期、または地塊の衝突のために火成活動が減衰していく場所に鉱床が形成されていることがわかります。重要なのは、異地性地塊の付加そのものではなく、それに先だつ異地性地塊の沈み込みであり、その時期の火成活動なのです（第1図b）。

#### 引用文献

- Nokleberg, W. J., Bundtzen, T. K., Brew, D. A. and Plafker, G., 1995, Metallogenesis and tectonics of porphyry copper and molybdenum (gold, silver) and granitoid-hosted gold deposits of Alaska. Geological Society of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume 46, p. 103–141.

Plafker and Berg, 1994, Overview of the geology and tectonic evolution of Alaska. The

- Geology of North America, v. G-1, p. 989-1021.
- Sinclair, W. D., 1995, Molybdenum, tungsten and tin deposits and associated granitoid intrusions in the Northern Canadian Cordillera and adjacent parts of Alaska. Geological Society of Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Special Volume 46, p. 58-76.
- Watanabe, Y., in prep., Plate tectonic setting of porphyry deposits in the Western America.
- Young, L. E., George, P. St. and Bouley, B. A., 1997, Porphyry copper deposits in relation to the magmatic history and palinspastic restoration of Alaska. Economic Geology, Monograph 9, p. 306-333.

## 技術情報

### 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）—

日本地質調査所資源エネルギー部地質部主査の小林大輔による講義

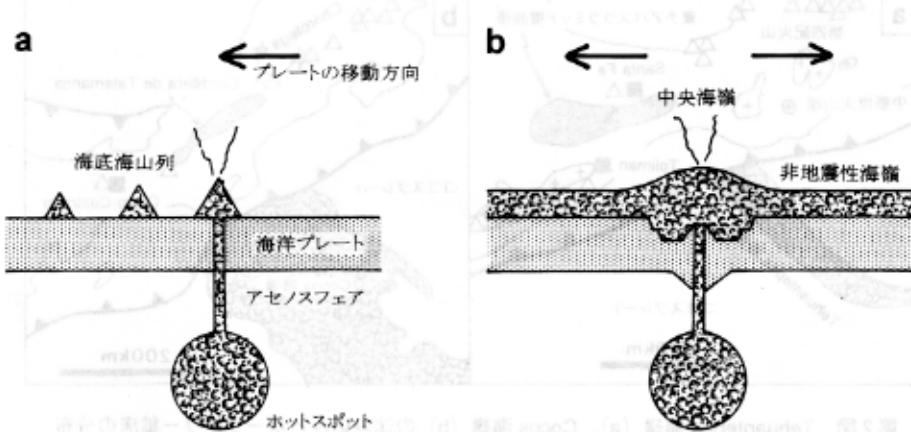
渡辺 勝寧\*

東京工業大学助教

#### 海底のマグマ間欠泉—ホットスポット

少し上等な地球儀には海底の地形が描かれているものもあります。それを見てお気づきになった方もおられるかもしれません、太平洋の真ん中のハワイから北西に向かい直線上に海底火山が並んでおり、ある所で北に折れ曲がって、アリューシャン海溝まで続いています。これは、海洋プレートの下に間欠的にマグマを海底にまで供給する「ホットスポット」と呼ばれる場所が存在するためです。

ホットスポットの位置はほぼ固定されており、そこから供給されたマグマは海洋プレートの上に火山を作ります（第1図a）。海洋プレートは大陸に向かい年間数10mmの速度で移動しているので、新しくホットスポットの上に到着した海洋プレートに火山が次々と形成され、結果として直線上の海底火山列が出来上がります（第1図a）。この海底火山列の火山の年代や並びの方向から、逆に過去のプレートの移動方向や移動速度が計算されます。



第1図 海底海山列(a)と非地震性海嶺(b)の形成モデル

\* 地質調査所資源エネルギー部地質部主任研究官

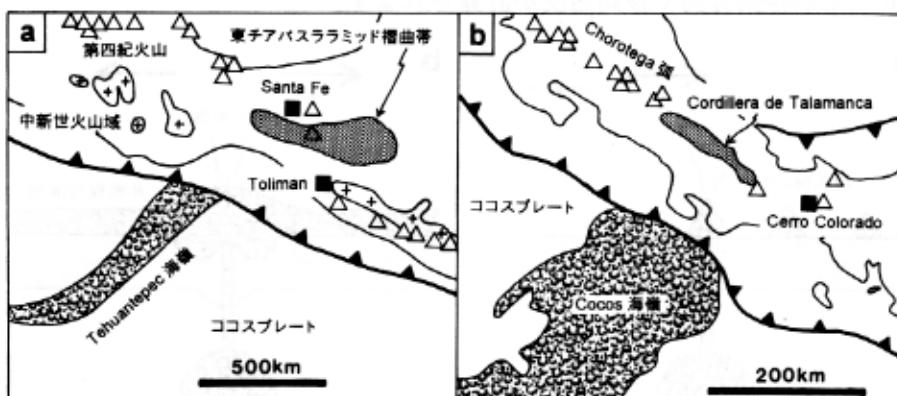
このホットスポットの上に中央海嶺と呼ばれる海洋プレートの拡大軸が位置する場合には、ホットスポットからのマグマの供給は連続的になり、非地震性海嶺 (aseismic ridge) と呼ばれる海底山脈が、異なる方向に離れていく海洋プレートの両側に形成されます（第1図 b）。

今回は海底火山列や非地震性海嶺の沈み込みとポーフィリー鉱床との関係をお話します。

### 海嶺沈み込みとポーフィリー鉱床

北米大陸南部から南米大陸にかけては、いくつかの海底海山列や非地震性海嶺が海溝に沈み込んでいます。そのうちポーフィリー鉱床との関連が知られているのは、メキシコ南部の Tehuantepec 海嶺、パナマとコスタリカの間の Cocos 海嶺、ペルーの Nazca 海嶺、チリ中部の Juan Fernandez 海嶺です。

メキシコのチアパス州では、Tehuantepec 海嶺の沈み込みが約800万年前から始まると考えられています（第2図 a）。ここでは中新世から第四紀にかけての火山帯が途切れており、この火山の途切れた部分には、逆断層と褶曲が発達している東チアパスララミッド褶曲帯と呼ばれる変動帯が位置します。この地域には Santa Fe と Toliman の2つのポーフィリー銅鉱床が分布しています。Santa Fe は約200万年前に、Toliman は約600万年前にこの地域に貫入した火成岩に伴い形成されています。

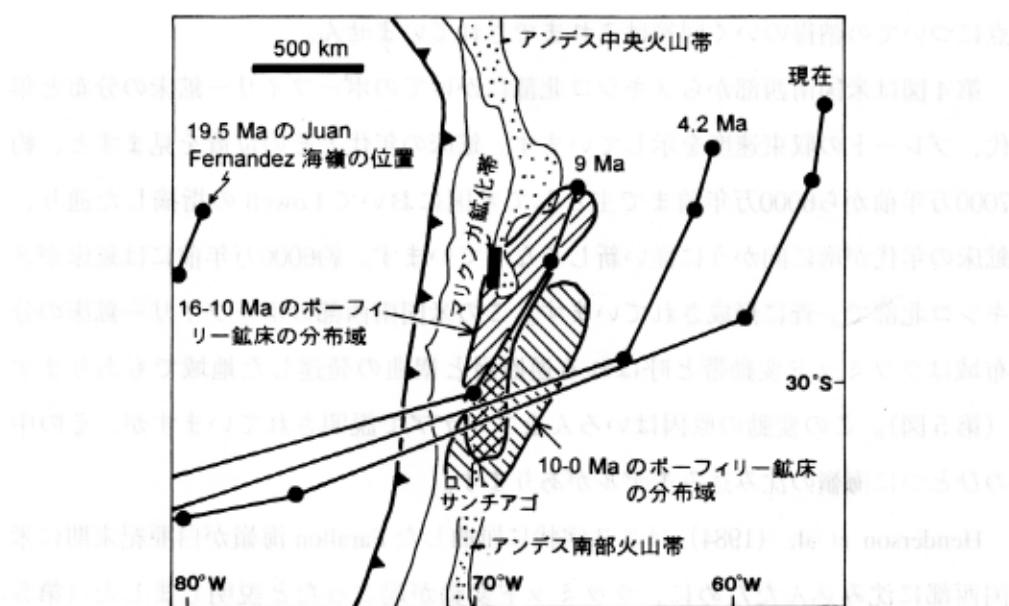


第2図 Tehuantepec 海嶺 (a)、Cocos 海嶺 (b) の沈み込みとポーフィリー鉱床の分布

ココス海嶺はコスタリカーパナマの境界付近に約500万年前から沈み込みを始めました（第2図 b）。このため、太平洋沿岸につながっていた Chorotega 弧とほなんざ 1998. 9

呼ばれる火山帯はこのココス海嶺の沈み込んでいる部分で途切れています。ここでも Cordillera de Talamanca と呼ばれる逆断層や褶曲によって隆起した山脈が形成されています。ポーフィリー鉱床はとみますと、途切れた火山弧の北端に約400万年前に形成された Cerro Colorado 銅鉱床が位置しています。

チリ中部に沈み込む Juan Fernandez 海嶺の場合はもう少し複雑です。この海嶺の先端は L 字状に曲がっていたと考えられています（第3図）。そのためこの海嶺は、中新世前期にチリ北部で沈み込みを始め、沈み込みの場所が徐々に南下し、約900万年前以降は現在と同じサンチアゴ付近で沈み込みを続けてきたと考えられています。ここでもメキシコやコスタリカと同じく、大陸西岸の火山弧は北のアンデス中央火山帯と南のアンデス南部火山帯に分断されています。チリからアルゼンチンにかけての中新世～鮮新世のポーフィリー鉱床の分布はこの海嶺沈み込みの場と見事に一致します。チリ北部のマリクンガ鉱化帯では約1300万年前に Marte や Lobo といったポーフィリー金鉱床が、チリ中部では約500万年前に El Teniente や Andina などのポーフィリー銅鉱床が形成されており、時代の新しい鉱床ほどより南部で形成されています。このことは海嶺の沈み込みの場の移動と一致しており、ポーフィリー鉱床の形成に海嶺の沈み込みが関係していたことを裏付けます。



第3図 Juan Fernandez 海嶺の沈み込み (Cross and Pilger, 1982) とポーフィリー鉱床の分布

このような海嶺はいったん沈み込んでしまうと地球の表面から消えてしまうので、古い時代のポーフィリー鉱床が海嶺の沈み込みに関係していたかどうかを判別するのは至難の業です。次に恐らく海嶺の沈み込みが関係していたであろうと推定される例を示します。

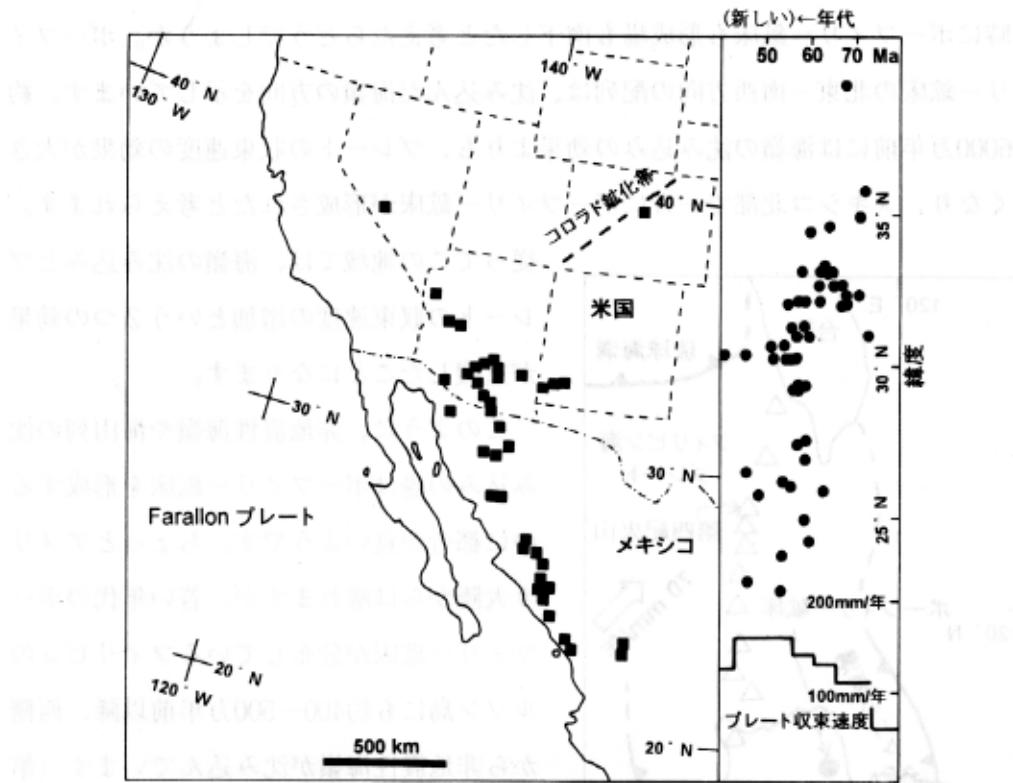
#### 米国南西部からメキシコ北部のポーフィリー鉱床

Lowell と Sillitoe はこの地域のポーフィリー鉱床の形成について1970年代前半に激しい論争を行いました。Lowell (1974) は米国南西部のポーフィリー鉱床が、①火山弧に平行な北西—南東方向とコロラド鉱化帯と呼ばれる北東—南西方向の2方向に並ぶこと、②ポーフィリー鉱床の形成年代が北から南に若くなっていくことを見い出しました。このような鉱床の配列や、年代の変化は海洋プレートの沈み込みでは期待できません。従って Lowell は、少なくともこの地域のポーフィリー鉱床はプレートの沈み込みに関係していないと結論しました。

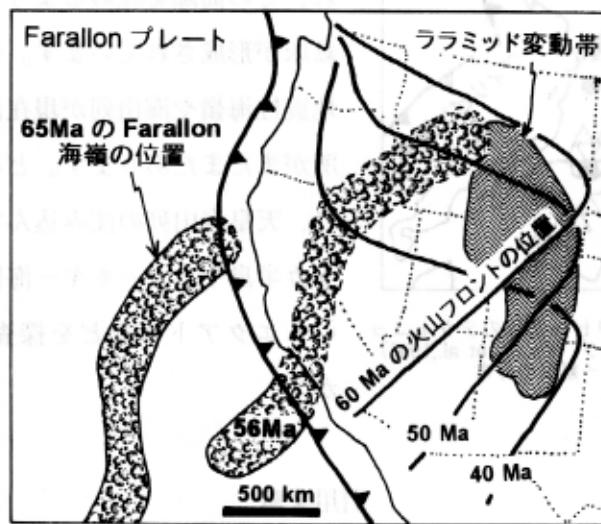
これに対して Sillitoe (1975) は、この地域にもプレートテクトニクスは成り立っていることを説明し、火山弧に直交する鉱床の配列は沈み込んだ海洋プレートの断裂の方向を示し、鉱床の年代の変化は地殻の上昇年代の差を示す可能性があると反論しました。この論争の後、ポーフィリー鉱床はプレートの沈み込みに関係しないという主張はほとんど無くなりました。しかし、Lowell の指摘した点についての納得のいく回答はこれまでされていません。

第4図は米国南西部からメキシコ北部にかけてのポーフィリー鉱床の分布と年代、プレートの収束速度を示しています。鉱床の年代とその位置を見ますと、約7000万年前から6000万年前まで主として米国において Lowell の指摘した通り、鉱床の年代が南に向かうに従い新しくなっています。約6000万年前には鉱床がメキシコ北部で一斉に形成されています。この米国南西部のポーフィリー鉱床の分布域はララミッド変動帯と呼ばれる逆断層と褶曲の発達した地域でもあります(第5図)。この変動の原因はいろんなアイデアで説明されていますが、その中のひとつに海嶺の沈み込みモデルがあります。

Henderson et al. (1984) はエス字状に屈曲した Farallon 海嶺が白亜紀末期に米国西部に沈み込んだために、ララミッド変動が起こったと説明しました(第5図)。海嶺が屈曲しているために、海嶺の沈み込む位置は時代とともに南下し、



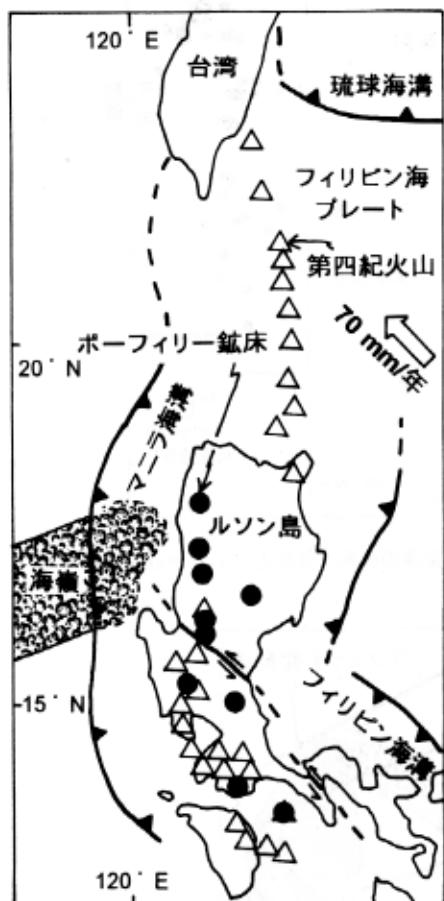
第4図 米国南西部—メキシコ北部のボーフィリー鉱床の分布・年代とプレート収束速度



第5図 Farallon 海嶺の沈み込み (Henderson et al., 1984) と  
ララミッド変動帯、火山フロントの位置の変化

ララミッド変動帯も南に広がったと説明されています。海嶺の沈み込みをうけた火山弧では、火山フロントが大きく大陸側に湾曲しています。これらの変化と同

時にポーフィリー鉱床も形成場も南下したと考えたらどうでしょうか。ポーフィリー鉱床の北東—南西方向の配列は、沈み込んだ海嶺の方向を示しています。約6000万年前には海嶺の沈み込みの効果よりも、プレートの収束速度の効果が大きくなり、メキシコ北部で一斉にポーフィリー鉱床が形成されたと考えられます。



第6図 現在のフィリピン北部のテクトニックセッティング (Young et al., 1996) とポーフィリー鉱床の分布

従ってこの地域では、海嶺の沈み込みとプレートの収束速度の増加という2つの効果が重複したことになります。

このように、非地震性海嶺や海山列の沈み込みの場合はポーフィリー鉱床を形成するのに都合が良いようです。ちょっとアメリカ大陸からは離れますか、若い年代のポーフィリー鉱床が分布しているフィリピンのルソン島にも約400—500万年前以降、西側から非地震性海嶺が沈み込んでいます（第6図）。ここでも第四紀火山の分布は途切れ、その間隙を埋めるようにポーフィリー鉱床が形成されています。世界各地には非地震性海嶺や海山列が現在沈み込んでいる所がまだまだあります。どなたか私と一緒に、天皇海山列の沈み込んでいるカムチャツカ半島や、カーネギー海嶺の沈み込んでいるエクアドルなどを探査してみませんか？

#### 引用文献

- Cross, T. A., and Pilger, R. H. Jr., 1982, Control of subduction geometry, location of magmatic arc, and tectonics of arc and back-arc regions. Geological Society of American Bulletin, v. 93, p. 545—562.

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.

Lowell, D. J., 1974, Regional characteristics of porphyry copper deposits of the Southwest. *Economic Geology*, v. 69, p. 601–617.

Sillitoe, R. H., 1975, Subduction and porphyry copper deposits in southwestern north America—A reply to recent objections. *Economic Geology*, v. 70, p. 1475–1483.

Young, T. F., Lee, T., Chen, C., Cheng, S., Knittel, U., Punongbayan, R. S. and Rasdas, A. R., 1996, A double island arc between Taiwan and Luzon : consequence of ridge subduction. *Tectonophysics*, v. 258, p. 85–101.

## 技術情報

(鉱床探査) 聖火

(鉱床探査) 聖火 面

# 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（5）

## —テクトニック応力とポーフィリー鉱化作用（その1）—

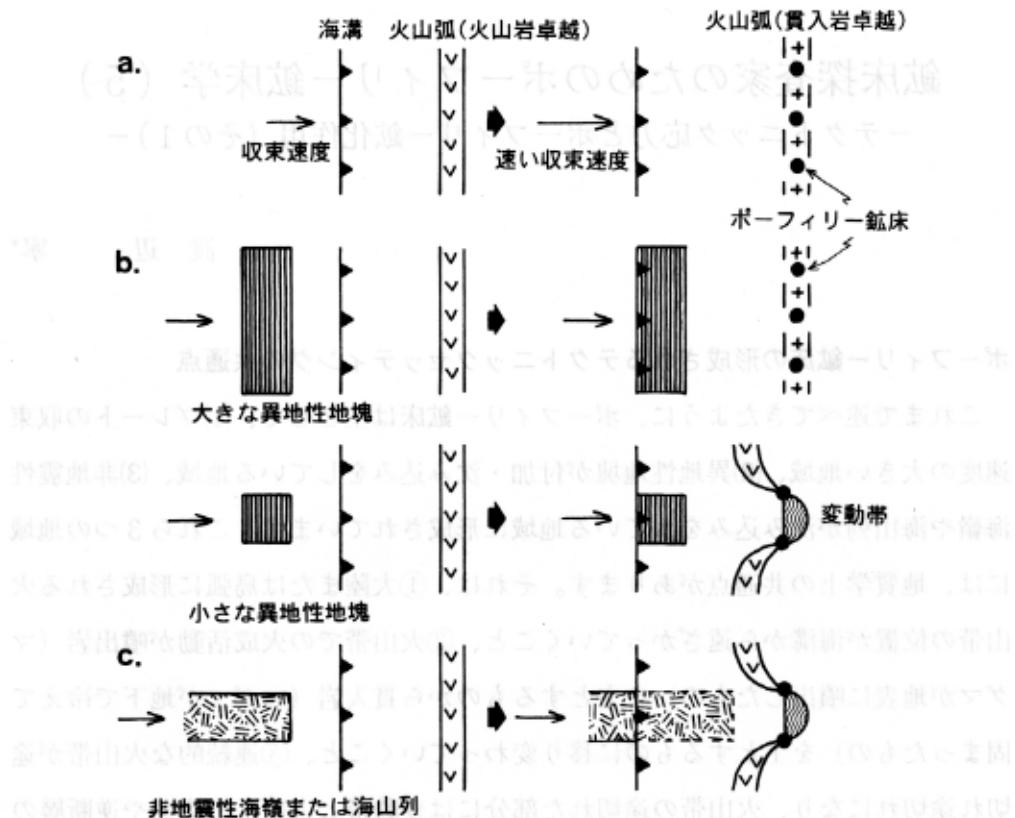
渡辺 寧\*

### ポーフィリー鉱床の形成されるテクトニックセッティングの共通点

これまで述べてきたように、ポーフィリー鉱床は主として、(1)プレートの収束速度の大きい地域、(2)異地性地塊が付加・沈み込みをしている地域、(3)非地震性海嶺や海山列が沈み込みをしている地域に形成されています。これら3つの地域には、地質学上の共通点があります。それは、①大陸または島弧に形成される火山帯の位置が海溝から遠ざかっていくこと、②火山帯での火成活動が噴出岩（マグマが地表に噴出したもの）を主とするものから貫入岩（マグマが地下で冷えて固まったもの）を主とするものに移り変わっていくこと、③連続的な火山帯が途切れ途切れになり、火山帯の途切れた部分には変動帶とよばれる褶曲や逆断層の発達する地殻の上昇域が形成されることです（第1図）。

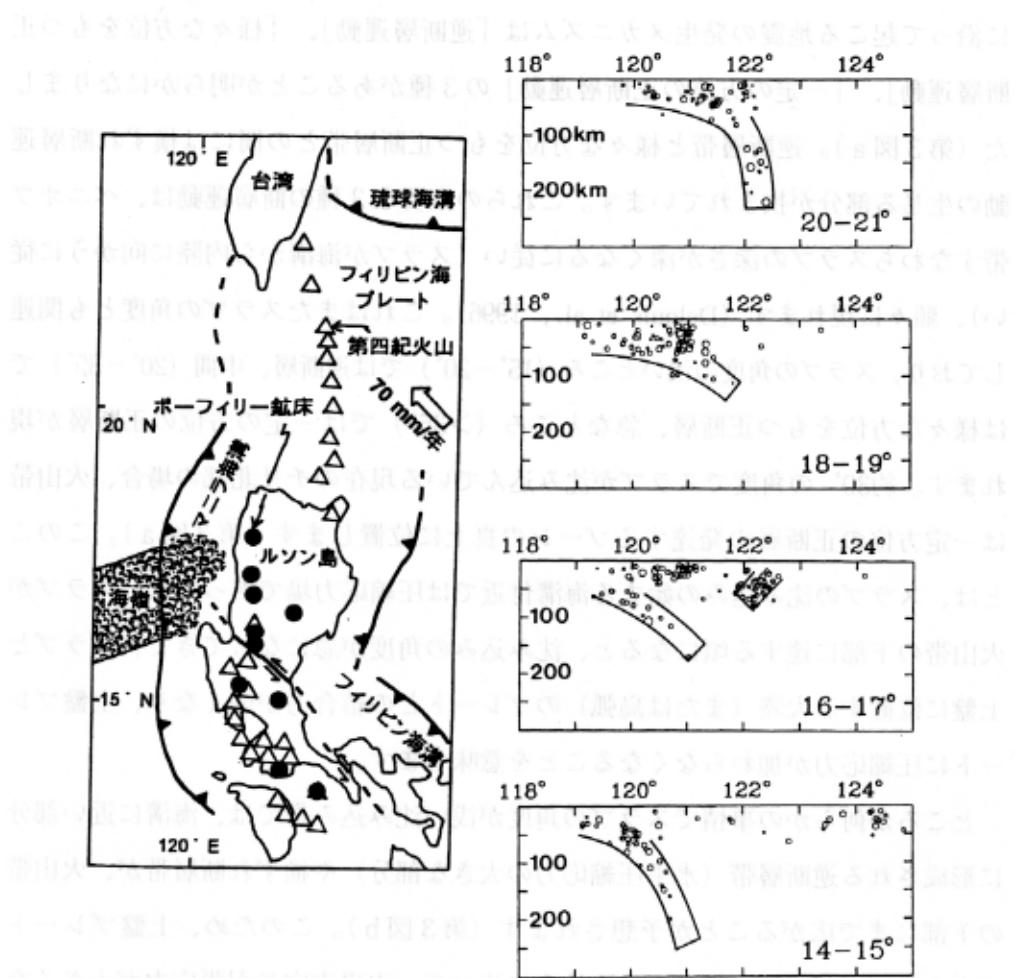
これらの地域の特徴は沈み込むスラブの角度が浅くなることで説明されます。沈み込むスラブの角度は一定ではなく、一部の地域を除くと、海溝付近では小さく、大陸または島弧の内側に入って行くほど増加します。ここでは話を簡単にするために、ある地域における海溝から火山弧までの間のスラブの平均角度をその地域の沈み込みの角度とします。過去のスラブの角度を推定するのは至難の業です。比較的新しい時期（500万年前以降）に形成されたポーフィリー鉱床の分布する地域の現在の角度について見てみると、メキシコ南部の Tehuantepec 海嶺の沈み込んでいる地域や中央チリでは、深発地震の解析結果から、約20°かそれ以下と見積もられています（Dean and Drake, 1978; Fuenzalida et al., 1992）。また大きく精度は落ちますが、Clark et al. (1982) は火山岩の化学組成から、約60Ma

\* 地質調査所資源エネルギー地質部主任研究官



第1図 ポーフィリー鉱床形成のためのテクトニックセッティング。a:速い収束速度、b:異地性地塊の沈み込み、c:非地震性海嶺または海山列の沈み込み。

から30Maのメキシコ北部ではプレートの沈み込みの角度が $20^{\circ}$ 以下であったと推定しています。逆に新しい時代のポーフィリー鉱床の発見されていないメキシコ南部（但し Tehuantepec 海嶺の沈み込んでいる部分を除く）、やニカラグア～コスタリカ北部、チリ北部では現在のスラブの沈み込み角度は $30^{\circ}$ を越えています。前回お話ししたフィリピンでのスラブの角度を見ても、若い時代のポーフィリー鉱床の発見されている北緯 $19^{\circ} \sim 16^{\circ}$ にかけては、現在のスラブの角度が浅くなっているのがわかっています（第2図）。このことはポーフィリー鉱床の形成がスラブの沈み込みの角度に本質的に関係していることを示唆します。大胆に言えば、沈み込みの角度が約 $30^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 以下になればポーフィリー鉱床が形成される可能性があることになります。



第2図 ルソン島周辺でのスラブの沈み込み角度の緯度による変化 (Yang et al., 1996原図)。

### 深いスラブの沈み込みの効果

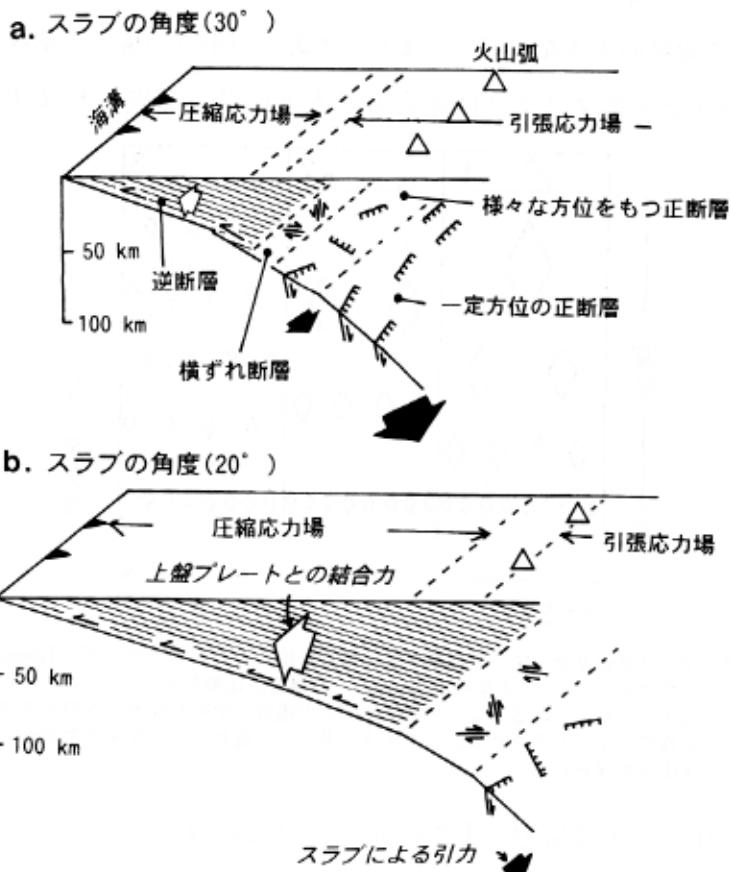
ではなぜスラブの深い角度の沈み込みがポーフィリー鉱床に好まれるのでしょうか。その前にスラブの沈み込みの角度の変化がどういう効果をもたらすかについて説明します。Uyeda and Kanamori (1979) は海洋プレートが急角度で沈み込むものをマリアナ型、低角度で沈み込むものをチリ型と名付け、マリアナ型では大陸（または島弧）が引張応力場に、チリ型では圧縮応力場になると考えました（ほなんざ7月号参照）。その後、Nakamura and Uyeda (1980) は大陸（または島弧）の応力場はこのように単純ではなく、海溝側から背弧にかけて、圧縮応力場から中間応力場、そして引張応力場に変化することを指摘しました。

最近の精密な地震波の測定によると、ベニオフ帯（スラブの上面に相当する）

に沿って起こる地震の発生メカニズムは「逆断層運動」、「様々な方位をもつ正断層運動」、「一定の方位の正断層運動」の3種があることが明らかになりました（第3図a）。逆断層帯と様々な方位をもつ正断層帯との間には横ずれ断層運動の生じる部分が挟まれています。これらの主要な3種の断層運動は、ベニオフ帯すなわちスラブの深さが深くなるに従い（スラブが海溝から内陸に向かうに従い）、順々に現れます（Delouis et al., 1996）。これはまたスラブの角度とも関連しており、スラブの角度の浅いところ（ $15^{\circ} - 20^{\circ}$ ）では逆断層、中間（ $20^{\circ} - 35^{\circ}$ ）では様々な方位をもつ正断層、急なところ（ $>35^{\circ}$ ）では一定の方位の正断層が現れます。約 $30^{\circ}$ の角度でスラブが沈み込んでいる現在のチリ北部の場合、火山帯は一定方位の正断層の発達するゾーンの真上に位置します（第3図a）。このことは、スラブの沈み込みの始まる海溝付近では圧縮応力場であっても、スラブが火山帯の下部に達する頃になると、沈み込みの角度が急になってきて、スラブと上盤に位置する大陸（または島弧）のプレートとの結合力が弱くなり、上盤プレートに圧縮応力が加わらなくなることを意味します。

ところが何らかの事情でスラブの角度が浅い沈み込み帶では、海溝に近い部分に形成される逆断層帯（水平圧縮応力の大きな部分）や横ずれ断層帯が、火山帯の下部にまで広がることが予想されます（第3図b）。このため、上盤プレートの火山帯の下部では、通常の沈み込みに比べて、水平方向の引張応力が小さくなり、中間応力の状態に近くなります。以前に述べたことを考え合わせると、ポーフィリー鉱床は通常の火山弧の場合よりも、引張応力の小さな（すなわちより圧縮的な）応力場の地域に形成されることになります。このことはポーフィリー鉱床のある地域には変動帶が伴われることが多いことからも裏付けられます。

ではなぜポーフィリー鉱化作用がより引張応力の小さな場所を好むのでしょうか。さまざまなテクトニクスの要因で加わる応力をテクトニック応力と呼びます。私はテクトニック応力には主に3つの働きがあると考えています。一つは熱水やそれに含まれる金属の源となるマグマつまりの大きさを決める働き、一つはマグマを地表に噴出しない貫入岩を形成する働き、もう一つは貫入岩の頂部でポーフ



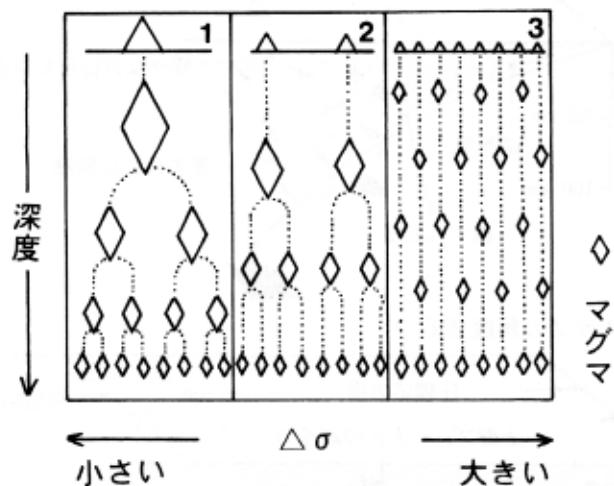
第3図 深発地震から推定された沈み込みスラブ上の断層の様式と応力場の模式的関係  
(Delouis et al., 1996を改変)。a:沈み込みスラブの角度が30°の場合。b:沈み込みスラブの角度が20°の場合。

イリーブ化作用の間、静岩圧を維持する働きです。

平均的なポーフィリー鉱床を形成するためには少なくとも100km<sup>3</sup>程度の根源マグマが必要だと考えられています(Cline and Bodnar, 1991)。従って、地殻浅部に貫入したポーフィリーのみ(体積は約数km<sup>3</sup>)ではポーフィリー鉱床を形成するための十分な量の熱水を分別することはできません。ポーフィリー鉱化作用に関係した貫入岩は地下の大きなマグマだまりから揮発成分に富んだ部分がその低密度のために上昇してきたと考えられています。従って、マグマを地殻浅部に供給する源のマグマだまりの大きさが大きいほど、りっぱなポーフィリー鉱床を作る可能性があると言えます。

火山やマグマだまりの大きさは、もしマグマの供給量が一定であると仮定する

と、水平方向の差応力の大きさに依存します (Takada, 1994)。すなわち、複成火山や比較的規模の大きなマグマだまりは差応力の小さい場で、単成火山や比較的規模の小さなマグマだまりは差応力の大きい場で形成されます (第4図)。



第4図 マグマ供給量が一定下での割れ目の相互作用によるマグマの上昇 (Takada, 1994を改変)。1: 小さな差応力 ( $\Delta\sigma$ ) の場合。比較的大きなマグマだまりと複成火山が形成される。2: 中間的な差応力の場合。中間的な大きさのマグマだまりと複成火山が形成される。3: 大きな差応力の場合。小さなマグマだまりと単成火山が形成される。

Takada, 1994)。この差応力の小さい場は、火山弧においてはより引張応力の小さな場—すなわちより中間的な応力場—を意味します。このように、先に述べたスラブの低角度沈み込みによるより圧縮的な応力場は、ポーフィリー鉱床を形成するための第一条件を満足します。

#### 引用文献

- Clark, K. F., Foster, C. T. and Damon, P.E., 1982, Cenozoic mineral deposits and subduction-related magmatic arcs in Mexico. Geological Society of America Bulletin, v. 93, p. 533–544.
- Cline, J. S. and Bodnar, R. J., 1991, Can economic porphyry copper mineralization be generated by a typical calc-alkaline melt? Journal of Geophysical Research. v. 96, p. 8113–8126.
- Dean, B. W. and Drake, C. L., 1978, Focal mechanism solutions and tectonics of the ほなんざ 1998. 10

Middle America Arc. Journal of Geology, v. 86, p. 111–128.

Delouis, B., Cisternas, A., Dorbath, L., Rivera, L. and Kausel, E., 1996, The Andean subduction zone between 22 and 25° S (northern Chile): precise geometry and state of stress. Tectonophysics, v. 259, p. 81–100..

Fuenzalida, A., Pardo, M., Cisternas, A., Dorbath, L., Dorbath, C., Comete, D. and Kausel, E., 1992, On the geometry of the Nazca Plate subducted under Central Chile (32–34.5° S) as inferred from micro seismic data. Tectonophysics, v. 205, p. 1–11.

Nakamura, K. and Uyeda, S., 1980, Stress gradient in arc-back arc regions and plate subduction. Journal of Geophysical Research, v. 85, p. 6419–6428.

Takada, 1994, The influence of regional stress and magmatic input on styles of monogenetic and polygenetic volcanism. Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 13563–13573.

Uyeda, S. and Kanamori, H., 1979, Back-arc opening and the mode of subduction. Joournal of Geophysical Research, v. 84, p. 1049–1061.

Young, T. F., Lee, T., Chen, C., Cheng, S., Knittel, U., Punongbayan, R. S. and Rasdas, A. R., 1996, A double island arc between Taiwan and Luzon: consequence of ridge subduction. Tectonophysics, v. 258, p. 85–101.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（6）

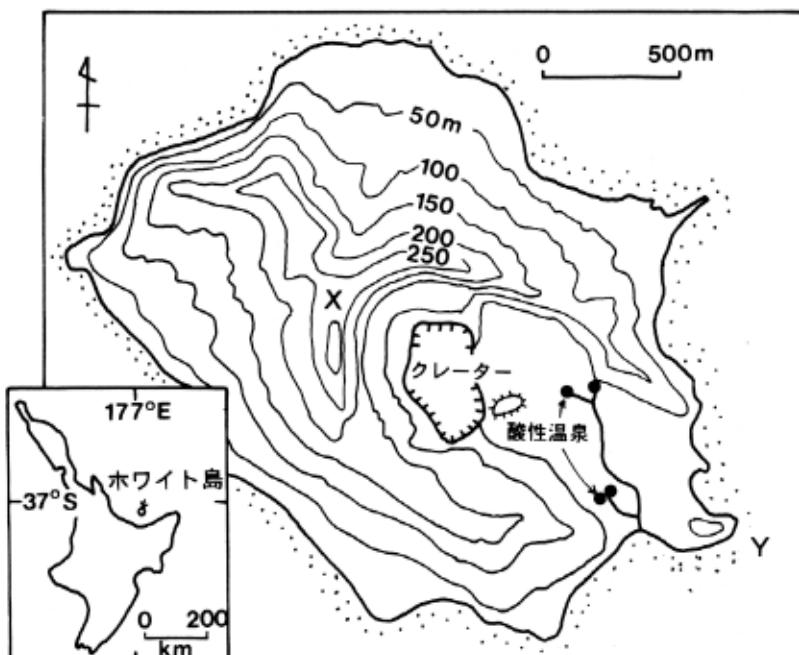
### —テクトニック応力とポーフィリー鉱化作用（2）—

渡辺寧\*

#### ホワイト島の火山ガス

前回お話ししましたポーフィリー鉱化作用に対するテクトニック応力の働きの2番目は、マグマを地表に噴出しない貫入岩を形成する働きです。その前にホワイト島の火山ガスの話をしたいと思います。

ホワイト島はニュージーランド北島の観光地、ロトルアの北東約105kmの太平洋中に位置しています（第1図）。この島は安山岩およびディサイトからなる活火山で、タウポ火山帯の北端と考えられています。この火山は、島の西側に位



第1図 ホワイト島の地形図 (Pacrim '95 Congress, 1995)。

\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

置する古い山体と、それに重複する中央部の新しい山体からなります。中央クレーターは新しい山体に伴われ、その南東側の火口壁が崩壊しています（第1図）。この島ではかつて硫黄が採掘されていました。1914年に南西部の火口壁が崩れ噴気口を塞いだために、泥流が発生し、11人の鉱夫が亡くなつたとされています。記録に残る噴火の中で、最も長く規模の大きなものは、1976年から1982年までの間に起こり、およそ1000万立方メートルの火山灰を噴出しました（Houghton et al., 1983）。

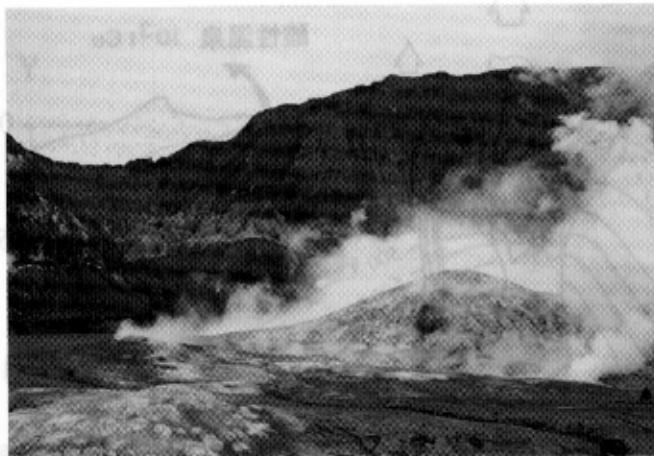
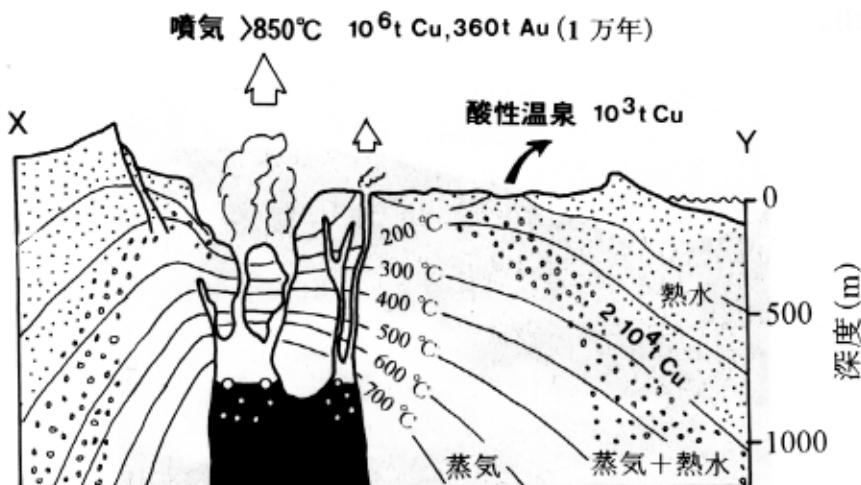


写真1 ホワイト島の中央クレーター中の噴気活動。背景に見える岩壁はクレーター内壁。手前に見える小山（第1図に位置を示す）には硫黄が析出している。

中央クレーターは幾つかの小さなクレーターの集合からなり、噴気活動はこの中央クレーターの地域に集中しています（写真1）。噴気の温度は100~800°Cの間で変化し、温度に対応して噴気中の  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $HCl$  の割合も変化しています（Giggenbach, 1987）。酸性の塩濃度の高い温泉水は中央クレーター東部の泉から周期的にわき出しています（第1図）。ホワイト島は海に囲まれていますが、熱水には海水の成分は含まれておらず、マグマ水と天水との混合水が火口付近に留まっています。これは海水と反応した热水が硬石膏や方解石を沈殿し、これらの鉱物が岩石の空隙を埋めて海水の進入を防いでいるのです。

ホワイト島の噴気活動に伴われる高温（850°C以上）の噴気中のアエロゾルには1,000年あたりで10万トンの銅と36トンの金が含まれていると見積もられています（Hedenquist et al., 1993）。銅の沈殿は、热水の温度が300°C以下に低下する

島の縁辺部で現在も続いていると推定されています (Hedenquist et al., 1993)。この热水活動は少なくとも1万年間続いたと考えられていますから (Giggenbach and Glasby, 1977)、合計で少なくとも100万トンの銅と360トンの金が放出された計算になります (第2図)。この銅量は別子や足尾鉱山の生産量を上回り、金量としては、菱刈鉱山の埋蔵量を上回ります。それが空中に散布されてきたのですから何とももったいない話です。



第2図 ホワイト島の火山热水系の模式的断面図 (Pacrim'95 Congress, 1995)。断面の位置X, Yは第1図に示す。

さて、ホワイト島の火山フラックスには鉱床を作るのに十分な銅や金が含まれていることがわかりましたが、ホワイト島の下部に銅や金の鉱床があるかというと、これは別問題です。温泉水により運搬され沈澱した銅量は1万年当たり2万トンと見積もられています (Hedenquist et al., 1993)。これは火山フラックスとして放出される銅量と比べると桁違いに少ない量です。

ホワイト島では高温の金属元素に富む蒸気が直接空中に放出されていますが、鉱床を作るためには、この蒸気が地下を循環している天水に吸収され、塩濃度の低い (< 5 wt% NaCl) 鉱化溶液を作る必要があると考えられています (Hedenquist and Lowenstern, 1994)。従って鉱床形成のためには、マグマから分離した高温の火山ガスが簡単に空中に達しない環境が必要です。

## テクトニック応力と貫入岩の形成

ポーフィリー鉱床は火山の下部に形成されることが多いと考えられていますが、鉱床を形成したマグマそのものは地表には噴出せず、火山の下に留まると考えられています (Sillitoe, 1973)。マグマが地表に噴出すると、金属元素を含む熱水や蒸気も同時に空中に吐き出されてしまい、鉱床が形成されないからです。

マグマは、地下のマグマ溜まりの圧力が、周囲の岩石の静岩圧よりも岩石の引張強度の分だけ大きくなれば、マグマ上部の岩石を破壊して噴出します。マグマ溜まりのマグマの圧力は、テクトニック応力、マグマの供給量と噴出量に関係しています (Fujii, 1983)。マグマの供給量や噴出量が同じ条件では、テクトニック応力の大きい所の方がマグマは噴出しにくくなります。そしてマグマが地表に噴出せずに地殻の浅いところに留まると、マグマが冷えるときに、マグマから熱水が地中に分離・放出されます。ホワイト島では、マグマそのものは現在は噴出していませんが、マグマが極めて地表近くまで上がってきているために、高温の火山ガスが天水と混合する間もなく空中に放出されているのです。すなわち火山ガスの放出に関してみると、マグマが噴出する場合とほとんど同じようなことが起こっていると言えます。

一方、テクトニック応力がうまく作用して、マグマが地殻浅部 (2~3 km) に都合良く留まり、地中に放出された熱水は、ポーフィリー、スカルン、鉱脈、交代型等の様々な様式の鉱床および変質帯を作ります。次回はいよいよ、どのような条件下でポーフィリー鉱床が形成されるかについてお話しします。

## 引用文献

Fujii, N., 1983, A model of eruption sequence and magma supply rate for polygenetic volcanoes, in Shimozuru, D. and Yokoyama, I. eds., Arc Volcanism : Physics and Tectonics, Terra Scientific Pub. Co., Tokyo, p. 3-12.

Giggenbach, W. F., 1987, Redox processes governing the chemistry of fumarolic gas discharges from White Island, New Zealand. Applied Geochemistry, v. 2, p. 143-161.

- Giggenbach, W. F. and Glasby, G. P., 1977, The influence of thermal activity on the trace metal distribution in marine sediments around White Island. New Zealand DSIR Bull., v. 218, p. 121-126.
- Hedenquist, J. W. and Lowenstern, J. B., 1994, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. Nature, v. 370, p. 519-527.
- Hedenquist, J. W., Simmons, S. F., Giggenbach, W. F. and Eldridge, C. S., 1993, White Island, New Zealand, volcanic-hydrothermal system represents the geochemical environment of high-sulfidation Cu and Au ore deposition. Geology, v. 21, p. 731-734.
- Houghton, B. F., Scott, B. J., Nairn, I. A. and Wood, C. P., 1983, Cyclic variation in eruption products, White Island volcano, 1976-1979. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, v. 26, p. 213-216.
- Pacrim '95 Congress, 1995, A field guide to the hydrothermal systems of the North Island, New Zealand : Active and extinct epithermal environments. 105pp.
- Sillitoe, R. H., 1973, The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 68, p. 799-815.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（7）

—テクトニック応力とポーフィリー鉱化作用（3）—

著者：渡辺 勉

渡 辺 勉\*

著者の名前を記入する場合は、必ず「渡辺 勉」で記入して下さい。

### 浸透性（permeability）と熱水性鉱床

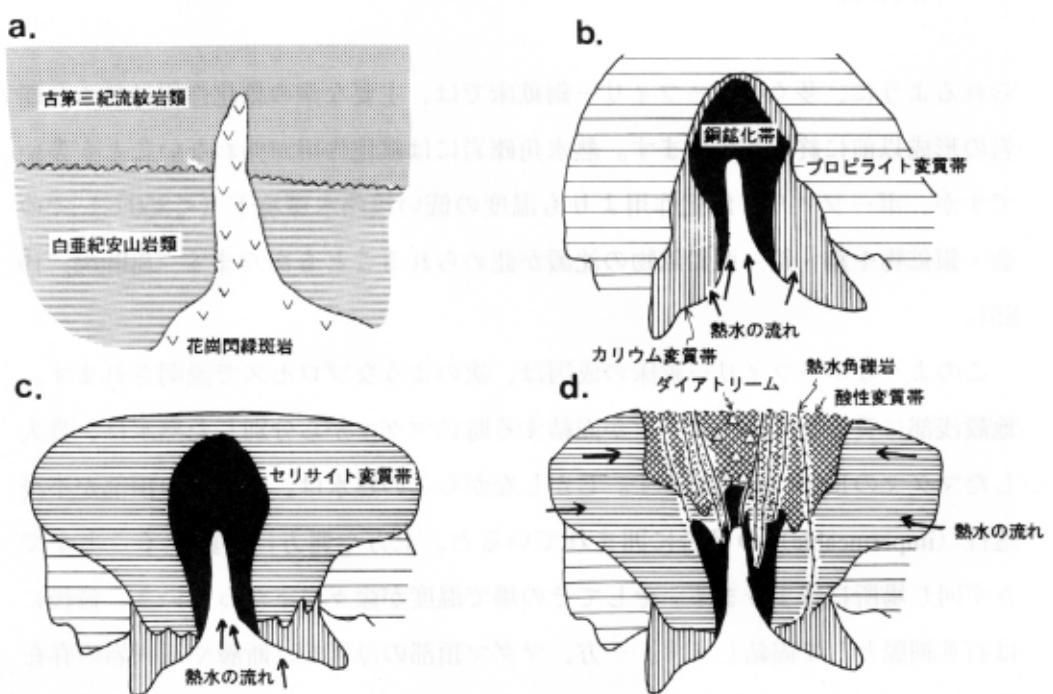
私はかつてホンジュラス共和国で金鉱床の探査をする機会がありました。私の参加したプロジェクトでは、鉱床の専門家は私一人だったので、ターゲットとする鉱床の選定、鉱床周辺の地質調査から、ボーリング地点の選定、ボーリングコアの鑑定まで全部をこなすことになりました。喜び勇んでこの仕事をした訳ですが、結果は失敗に終わりました。探査ターゲットとした鉱脈地では、地表で1トンあたり数g～30g程度の金が石英細脈に含まれていました。その下方延長部をボーリングで狙ったのですが、金を含んだ細脈は地表付近の砂岩層中にしかなく、その下部の泥岩層に入ると石英脈はおろか変質鉱物さえ消えてしまいました。この時に初めて浸透性（permeability）という言葉を学んだのです。

Permeability というのは物質中の水の通りやすさの程度をあらわす言葉です。金属元素を含んだ热水は地下で水の浸透し易いところを流れます。地層中の断層や割れ目、泥岩に比べて比較的構成物質の粒度の粗い砂岩・礫岩や火山噴出物、热水と反応しやすい石灰岩などが、水の浸透し易い（permeability の高い）部分と言えます。热水性鉱床の探査というのは、過去に热水が流れ鉱石鉱物を沈殿した部分を探すことですから、まさに permeability の高かった部分を探していることになります。ホンジュラスの金鉱床の場合も、鉱液は permeability の高い砂岩層の中を流れていたことに後になって気づきました。ところが热水性鉱床の中には、高い permeability が存在すると鉱床の形成が妨げられる天の邪鬼がいます。それがポーフィリー鉱床です。

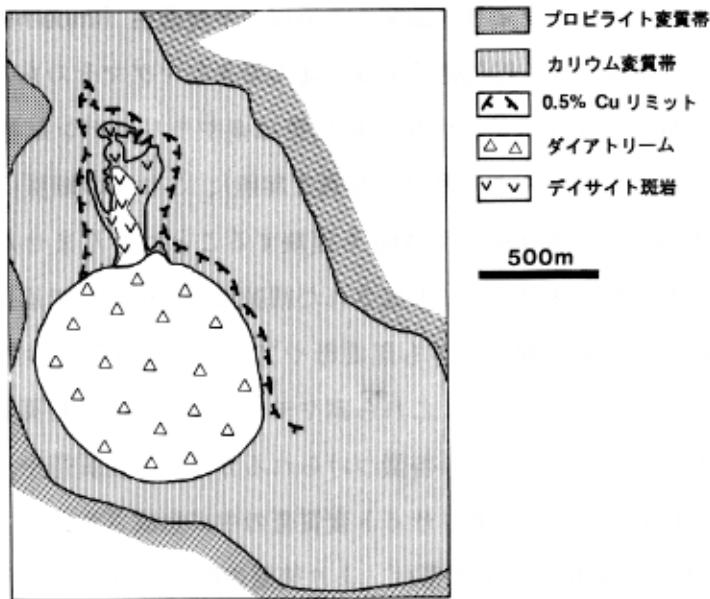
\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

## ポーフィリー鉱床のポーフィリー鉱床たる所以—不浸透性 (impermeability)

ポーフィリー鉱床では、鉱化帯は鉱液を運んできたマグマそのものの内部または周辺部に形成されます（第1図 b）。鉱化帯は銅やモリブデン鉱物を含む石英の細脈群からなり（ほなんざ6月号の写真3参照）、これらの細脈は鉱脈鉱床を形成する鉱脈のように数10m～数100mも連続することはありません。さらに鉱化作用の中でも早期（高温時）に形成された細脈は、非直線状で延長距離は特に短く（数cm～数10cm）、脈の境界も黒雲母やアルカリ長石などの熱水性鉱物の沈澱によってはっきりしません。これら銅やモリブデンを含む石英細脈群は、黒雲母やアルカリ長石の产出により特徴づけられるカリウム変質帯や、絹雲母や黄鉄鉱の产出で特徴づけられるセリサイト変質帯の中に形成されます（第1図 b, c、第2図）。これらの鉱化帯や変質帯は、より後期の酸性変質を伴った熱水角礫岩に貫かれています（写真1；第1図 d）。エルテニエンテやエルサルバドルに見



第1図 エルサルバドル鉱床の形成モデル。a から d は時間の経過を示す。Gustafson and Hunt (1975) を改変。a. マグマの貫入。b. カリウム変質帯および銅鉱化帯の形成。c. セリサイト変質帯の形成。a-c は静水圧状態。d. ダイアトライム、热水角礫岩および酸性変質帯の形成。静水圧状態への変化。



第2図 エルテニエンテ鉱床、標高2300m レベルの地質・変質・鉱化概略図 (Camus, 1975)。ポーフィリーの貫入に伴い鉱化を受けた部分は、直径800mに及ぶダイアトリーにより一部吹き飛ばされている。

られるように、多くのポーフィリー銅鉱床では、主要な銅の鉱化作用は熱水角礫岩の形成以前に終了しています。熱水角礫岩には鉱化作用が伴わないことが多いですが、ポーフィリー鉱化作用よりも温度の低い浅热水環境下 ( $<350^{\circ}\text{C}$ ) での金・銀鉱物や銅・鉛・亜鉛鉱物の沈澱が認められることもあります (Sillitoe, 1985)。

このようなポーフィリー鉱床の成因は、次のようなプロセスで説明されます。地殻浅部に貫入してきたマグマが固結する時にマグマから分別した热水は、貫入したマグマの頂部に濃集します。しかしながらこの热水は、マグマの頂部が不浸透性 (impermeable) の母岩に囲まれていると、上方や側方に移動することができず同じ場所に留まります。そしてその場で温度が徐々に下がっていき、最後には石英細脈として固結します。一方、マグマ頂部の母岩が、断層や石灰岩の存在等により permeable な状態であれば、分別した热水は直ちにその場から移動し、断層に沿って热水鉱物を沈澱し鉱脈鉱床を形成したり、石灰岩を交代しスカルン鉱床を形成したりします。6月号でお話したように、ポーフィリー鉱床の特徴は、鉱石の品位は低いけれども、その鉱量が桁違いに大きいことです。この特徴は、

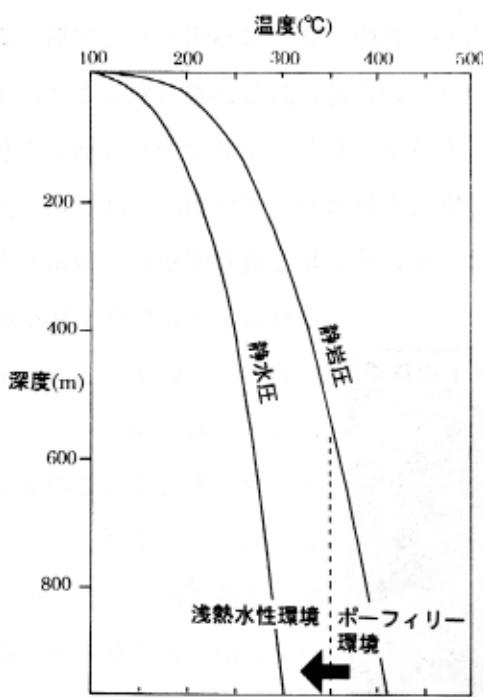
マグマから分別した熱水が、鉱脈のように極限られた空間に集中することもないかわりに、一網打尽にマグマの頂部に封じ込められることによりもたらされます。最近の研究に基づいて、もう少し詳しくマグマから分別した熱水の挙動を説明しましょう。マグマから分別した熱水がマグマ頂部に向かい上昇する時に、熱水は沸騰し、塩濃度のきわめて低い蒸気相と塩濃度が高く金属元素に富む熱水相に分

かれることが化学実験や流体包有物の研究から知られています (Hedenquist and Lowenstein, 1994)。ボーフィリー鉱床に見られるカリウム変質帶はこの塩濃度の高い熱水相により形成されます。一方蒸気相もマグマの頂部に蓄積され、マグマ頂部での蒸気-熱水相の圧力が大きくなると、最後には大爆発を起こし、熱水を封じ込める働きをしていた母岩を吹き飛ばし、ダイアトリーと呼ばれる熱水角礫岩を形成します (第2図)。エルサルバドル鉱床で見られるような幅の細い熱水角礫岩 (写真1) はこのダイアトリーの末端をあらわしていると考えられます (第1図d)。



写真1 エルサルバドル鉱床の地表セリサイト変質帶中の熱水角礫岩

一度ダイアトリーのような角礫岩が形成されると、マグマ頂部での permeability は極めて高くなり、熱水と天水（地表水）が自由に行き来できるようになります (第1図d)。すなわち、マグマ上部の熱水にかかる圧力は、静岩圧 (lithostatic) から静水圧 (hydrostatic) へと変化します。同じ地表からの深度でも、この圧力状態の変化 (熱水にかかる圧力が小さくなる) により、熱水はより低い温度で沸騰する様になります (第3図)。このことは同じ地表からの深度であっても、角礫岩形成以前に比べ、角礫岩形成後には熱水の温度が低くなることを意味します。従って、一度大規模な熱水爆発を起こすと、比較的高温 (350°C ~ 550°C) でのボーフィリー鉱化作用は起こらなくなり、浅熱水性鉱床が低温 (<350°C) で形成されることになります。



第3図 静水圧・静岩圧状態での水の沸騰曲線。

### テクトニック応力とポーフィリー鉱化作用

以上に述べたように、ポーフィリー鉱化作用は静岩圧が維持され、permeability の極めて低い条件下にマグマが貫入することにより生じます。マグマが貫入してからポーフィリー鉱化作用が終了するまでの時間は長くても 20~60 万年と見積もられています (Arribas et al., 1995; Marsh et al., 1997)。この間、増加する蒸気-熱水相の圧力に母岩が耐えることが要求されます。

この蒸気-熱水相の圧力に耐えられないと、ポーフィリー鉱化作用は起こらず、11月号で紹介したホワイト島の例のように、金属元素はアエロゾルとして空中に放出されるか、マグマ頂部からやや離れた所で浅熱水性鉱床が形成されることになります。北海道札幌市の定山渓付近には中新世後期の流紋岩～デイサイト質の石英斑岩がいくつか露出していますが、いずれの貫入岩にもカリウム変質や石英細脈群は認められず、部分的なセリサイト変質とともに浅熱水性環境下での軽微な銅・鉛・亜鉛鉱化作用が伴われています。これらの石英斑岩では、マグマの貫入と同時に热水爆発が起こり、カリウム変質を引き起こす高塩濃度の热水の分別は起こらず、大部分は蒸気相と一緒に空中に放出されたと考えています (Watanabe はなんざ 1998, 12

and Ohta, in prep.)。

地殻浅部（2 – 3 km）において、マグマ貫入後数10万年の間、静岩圧が維持される条件が満たされたためには、正断層が発達する引張場より、中間的または弱圧縮の応力場の方がより都合が良いことがお分かり頂けるでしょう。ほんざ10月号に書いたように、通常（沈み込みの角度が30°以上）の島弧または陸弧の火山帯付近は引張応力場であり、ポーフィリー鉱床の形成に向かないのに対し、浅い沈み込みの場ではテクトニック応力が大きくなり、火山帯での応力場がより圧縮的になります。このような場では静岩圧の維持に適した環境を作ることができます。ただしあまり圧縮応力が大きくなると、今度はマグマの地殻浅部への上昇が妨げられるので、微妙な応力状態が要求されます。

米国西部のように、しばしばポーフィリー鉱床とスカルン鉱床が近接して分布したり、両方の鉱化作用が共存したりするのは、ポーフィリー鉱化作用に都合の良い応力場が石灰岩を母岩として含む地域に実現されたためと説明されます。

## 引用文献

- Arribas, A. Jr., Hedenquist, J. W., Itaya, T., Okada, T., Concepción, 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.
- Camus, F., 1975, Geology of the El Teniente orebody with emphasis on wall-rock alteration. *Economic Geology*, v. 70, p. 1341–1372.
- Hedenquist, J. W. and Lowenstern, J. B., 1994, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits. *Nature*, v. 370, p. 519–527.
- Gustafson, L. B., and Hunt, J. P., 1975, The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Economic Geology*, v. 70, p. 857–912.
- 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.
- Sillitoe, R. H., 1985, Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology*, v. 80, p. 1467–1514.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（8）

### 酸素・水素同位体比から見たポーフィリー鉱化作用

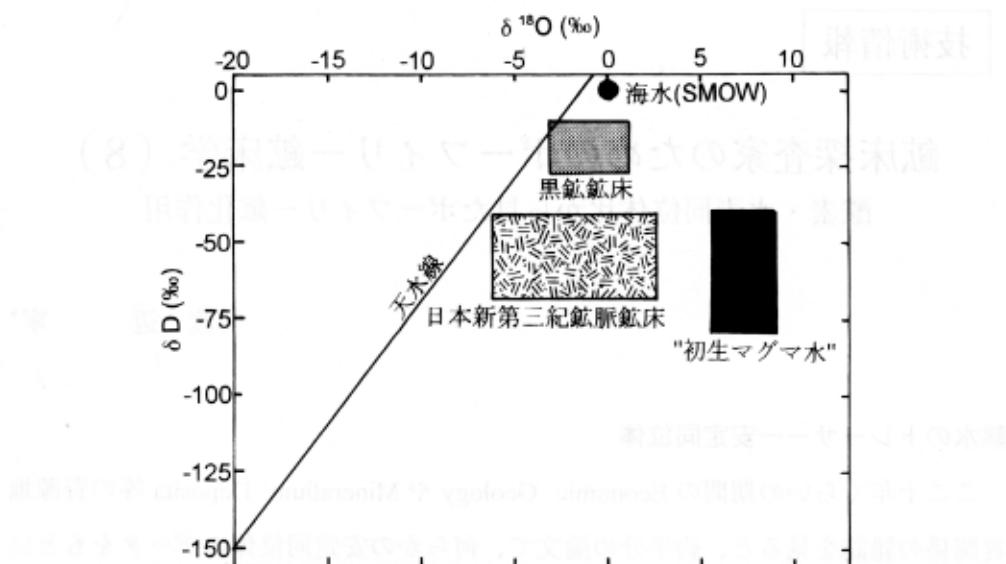
渡辺寧\*

#### 熱水のトレーサー—安定同位体

ここ十年くらいの期間の Economic Geology や Mineralium Deposita 等の資源地質関係の雑誌を見ると、約半分の論文で、何らかの安定同位体のデータをもとに鉱床成因の議論をしています。ちなみにこれまで出版された98年の資源地質では27編のうち7編が安定同位体を扱っています。このように安定同位体は鉱床成因の研究にとって現在では欠かすことのできないデータとなっています。安定同位体地球化学の詳しい説明は専門書（酒井・松久, 1996）を見ていただくことにして、ここではポーフィリー鉱床の成因が同位体比からどのように考えられるかについて説明します。

火成活動に伴って地殻を循環する水は天水、海水、マグマ水に大別され、それらはそれぞれ固有の酸素・水素同位体比を持っています。但し、天水の同位体比には地域性があり、緯度や高度等により大きく変動するため、天水線と呼ばれる直線で表されます（第1図）。鉱床をもたらした热水は多くの場合、これら3種の水の混合物であり、热水の酸素・水素同位体比を測定することによりその混合比を推定することができます。鉱床を形成した热水の組成は、流体包有物として鉱物の中に封じ込められている流体の同位体比を直接測定したり、热水と同位体平衡にあった鉱物の同位体比から計算したりします。

\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

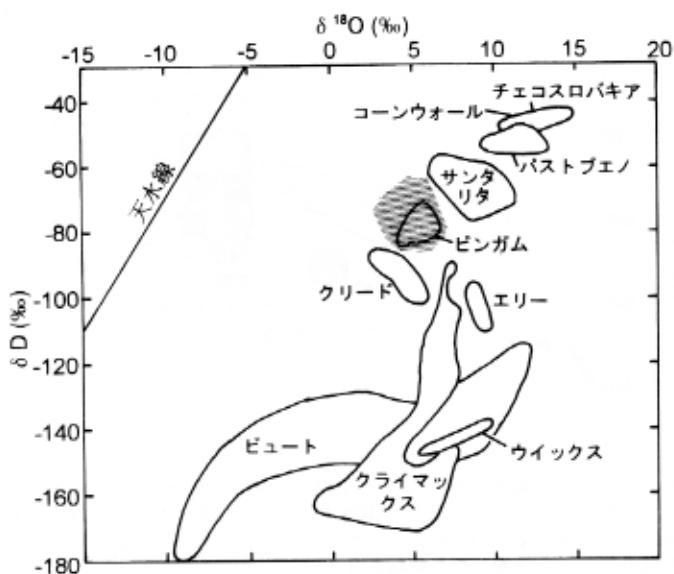


第1図 天水・海水・”初生マグマ水”及び黒鉱鉱床・日本新第三紀鉱脈鉱床を形成した熱水の酸素・水素同位体比（酒井・松久, 1996）。黒鉱鉱床は海水と天水の混合水、鉱脈鉱床は天水が岩石と反応し酸素同位体が重くなった熱水により形成されたと考えられている（酒井・松久, 1996）。

### 酸素・水素同位体比からみたポーフィリー熱水系

ポーフィリー鉱床を形成した熱水がどのような性質（天水とマグマ水の割合：ポーフィリー鉱床は陸で形成されるので海水は関与しない）を持つのかということは古くからの興味の対象でした。シェバードやティラーは、天水の地域による同位体比の変化の影響を考慮するため、北米大陸各地にあるポーフィリー鉱床の熱水鉱物の酸素・水素同位体比を検討しました。その結果、熱水起源の黒雲母は地域性を持たず、マグマから直接晶出した黒雲母と類似した同位体比を持つことがわかりました（第2図）。これらのポーフィリー鉱床では、銅やモリブデンは主としてカリウム変質に関連して沈殿していることから、金属元素の起源はマグマであることが同位体比からも明らかにされました。一方、セリサイトの酸素・水素同位体比は地域により大きく変動し、セリサイト変質を形成した熱水は天水起源であると結論されました（第2図；Sheppard et al., 1969, 1971；Taylor, 1974）。

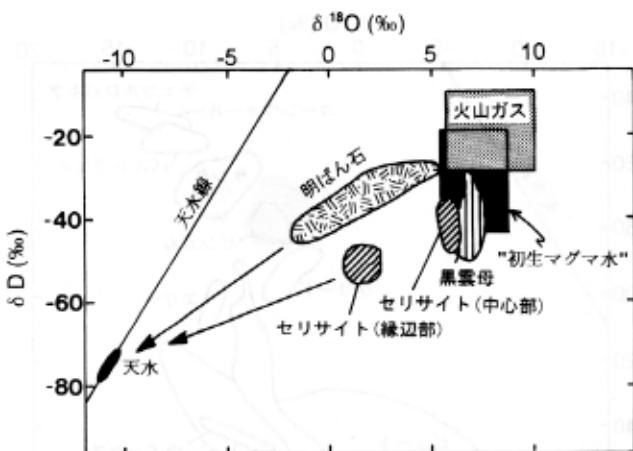
この結果をもとに、シェバードやティラーは、次のようなモデルを考えました。貫入してきたマグマの上部内側で、静岩圧の下でマグマ水が分別すると同時に、貫入岩の外側では、静水圧の下で、天水起源の熱水が循環していました。このようにマグマの内部と外部の熱水系は貫入の初期には同時に存在しましたが、内部の熱水の高い圧力と静岩圧のため、外側の熱水は貫入岩の内部に侵入することは



第2図 北米大陸およびその他の地域のポーフィリー鉱床の黒雲母・セリサイトの酸素・水素同位体比 (Taylor, 1997を改変)。横線領域はこれらの鉱床の黒雲母の同位体比の領域をしめす。セリサイトの領域は各鉱床により異なるが、黒雲母はほとんど同じ領域に入る。

できませんでした。しかし、貫入岩の温度の低下とともに、外部の低温の热水系は貫入岩の内部にも侵入するようになり、初期のカリウム変質にセリサイト変質の重複が起こりました。このモデルはそれ以降多くの人々から支持されてきました。

ところが、チリにあるエル・テニエンテおよびリオ・ブランコ鉱床では、黒雲母のみならず、セリサイトの同位体比もマグマ起源の热水を示すことが明らかにされました (Kusakabe et al., 1990)。ヘンクイスト等によるフィリピンのファー・サウスイースト鉱床の研究では、热水系の中心のセリサイトは珪長質マグマ水の組成、热水系の縁辺のセリサイトはこのマグマ水に20–30%の割合で天水が混合したものであることがわかりました (第3図; Hedenquist et al., 1998)。また鉱床上部に形成された酸性変質帶中の明礬石は、火山ガスと天水が様々な割合で混合した热水から沈澱したことが明らかになりました (第3図)。これらの事実から、彼らはポーフィリー鉱床では、初期の高温期に分別したマグマ水が気相と高塩濃度の液相に分離し、気相は鉱床上部で酸性変質帶 (明礬石)、液相は貫入岩周辺でカリウム変質帶 (黒雲母) を形成したと考えました。貫入岩の温度が徐々に低下すると、そこから分別したマグマ水はすべて液相になり、この後期の热水が鉱化作用を伴ったセリサイト変質帶を形成したとするモデルを提案し



第3図 ファー・サウスイースト鉱床に産する熱水鉱物を沈澱した热水の酸素・水素同位体比 (Hedenquist et al., 1998)。左下の天水は鉱化作用時の天水の同位体比を示す。明ばん石は火山ガスと天水の混合热水から、黒雲母と中心部のセリサイトはマグマ水から、縁辺部のセリサイトはマグマ水と天水の混合热水から沈澱したと解釈される。

ています (Shinohara and Hedenquist, 1997; Hedenquist et al., 1998)。

シェバードやティラーの研究した北米大陸のポーフィリー鉱床と南米やフィリピンの鉱床では成因が違うのか、いずれかの結論が間違っているのかを検証するのはこれから課題ですが、エル・サルバドル鉱床を研究している私はもちろん南米派です。

### 動くブラックボックスマグマ水

さて、賢明な読者はお気づきになられたと思いますが、第1図と第3図ではマグマ水の位置が大きくずれています。マグマ水のボックス（酸素・水素同位体比の範囲）に入るからマグマ水起源、そうでないから他の起源という議論をしている時に、標準となるマグマ水のボックスが人により異なると話になりません。

マグマ水というのは、マグマに含まれている水のことですが、未だ誰もこの水を直接分析したことがないので、間接的な証拠からこの水の組成を推定しています。またこの水がどこから来たかということについても、様々な起源が想定されます。従って、多くの論文では起源についてはふれず、マグマと十分な期間反応しマグマと化学的、同位体的平衡にある水と定義されています。Taylor (1974) では火成岩中の含水鉱物の組成をマグマ水と考えその範囲を δD (水素同位体比) = -40 ~ -80 ‰, δ¹⁸O (酸素同位体比) = +6 ~ +9 ‰ としました。このボ

ックスは現在でも多くの人に引用されています。一方で高温の火山ガスはマグマ水の同位体比を概算する良い材料ですが、それらは一般にマグマ水のボックスよりも20~40%も高い $\delta D$ 値を示します。この違いはどうして生じるのでしょうか？

マグマ水は様々な過程で、様々な程度に同位体分別を起こしており、その最終過程がマグマからマグマ水が分離するときです (Matsuhisa, 1992)。この分離の場が開放系か閉鎖系かで異なりますが、もともと $\delta D$ が-60‰のマグマ水が0~40%の範囲で分離すれば、マグマから分離した水は-20~-40‰の重い値をとります (酒井・松久, 1996)。反対にメルトの中に残された水は軽くなり、黒雲母等の含水鉱物に取り込まれます。ポーフィリー環境ではさらにこの分離したマグマ水が液相と気相に分別するときに同位体分別が起こり、気相はさらに重く、液層はさらに軽くなります (Hedenquist et al., 1998)。

Hedenquist et al. (1998) は閉鎖系 (ポーフィリー環境) での珪長質マグマ水の値を-20~-45‰と計算し、大陸地殻に貫入したマグマは恐らくこの範囲で最も軽い値を持ち、島弧では逆に重い値を持つと推定しています。マグマ水がメルトから分離する過程での同位体分別を考えれば、貫入岩の斑晶鉱物の示す水素同位体比は「残留マグマ水」の同位体比と呼ぶべきもので、その値と热水鉱物から推定された热水の同位体比を比較するのは適当ではありません (Matsuhisa, 1992; Taylor, 1992; Hedenquist et al., 1998)。

このマグマ水ボックスの位置の変遷の影響を最も受けたのがエル・サルバドル鉱床の研究です。Sheppard and Gustafson (1976) は Taylor (1974) のボックスを用い、セリサイトを沈殿した热水がそのボックスより上方にはずれることから天水の影響が大きかったと考えました。Kusakabe et al. (1990) は Sheppard and Gustafson (1976) の分析値を新しい分別係数と温度を用いて再計算し、セリサイトを沈殿した热水の同位体比がマグマ水のボックスからさほど離れていない領域にプロットされることを見出しました。Taylor (1974) のボックスの位置とこれらのデータとの $\delta D$ の値の違いは、上記のマグマ水のメルトからの分離過程での同位体分別のためであり、天水の影響ではないと結論されます。

## 天水の侵入とポーフィリー鉱化作用の終焉

先月号でポーフィリー鉱化作用は中間的～弱圧縮応力場で静岩圧のもとで起こり、その後の大規模熱水爆発により、圧力条件が静水圧に変化することを述べました。この地質の観察は上記の酸素・水素同位体比の変化と調和的です。静岩圧状態では、天水は貫入岩周辺を循環せず、マグマから分離した熱水は天水で薄められることなく、カリウムーセリサイト変質帯を作ります。熱水爆発の後は、天水は高い permeability のために貫入岩頂部まで循環するようになり、マグマ水と天水の混合との混合が起こり酸性変質帯が形成されます。エル・サルバドル鉱床では、セリサイト変質を受けた岩石を破壊して熱水角礫岩が形成され（12月号写真1）、その角礫岩中に明ばん石やダイアスボアを主とする酸性変質鉱物が認められます。このことは明ばん石が火山ガスと天水との混合熱水から形成されているとするファー・サウスイースト鉱床での結論と調和的です。

### 引用文献

- Hedenquist, J. W., Arribas, A. Jr., and Reynolds, T. J., 1998, Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system : Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, v. 93, p. 373–404.
- 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  $Mg^{2+}/Fe^{2+}/Fe^{3+}$  ratios of hydrothermal biotite. *The University of Western Australia, Publication No. 23.*
- Matsuhisa, Y., 1992, Origin of magmatic waters in subduction zones : stable isotopic constraints. *Report of the Geological Survey of Japan*, no. 279, p. 104–109.
- 酒井 均・松久幸敬, 1996, 安定同位体化学. 東京大学出版会. 403p.
- 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.
- Sheppard, S. M. F., Nielsen, R. L., and Taylor, H. P. Jr., 1969, Oxygen and hydrogen isotope ratios of clay minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 64, p. 755–777.

- Sheppard, S. M. F., Nielsen, R. L., and Taylor, H. P. Jr., 1971, Hydrogen and Oxygen isotope ratios in minerals from porphyry copper deposits. *Economic Geology*, v. 66, p. 515–542.
- Shinohara, H. and Hedenquist, J. W., 1997, Constraints on magma degassing beneath the Far Southeast Porphyry Cu–Au deposit, Philippines. *Journal of Petrology*, v. 38, p. 1741–1752.
- Taylor, B. E., 1992, Degassing of  $H_2O$  from rhyolite magma during eruption and shallow intrusion, and the isotopic composition of magmatic water in hydrothermal systems. *Report of the Geological Survey of Japan*, no. 279, p. 190–194.
- Taylor, H. P. Jr., 1974, The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Economic Geology*, v. 69, p. 843–883.
- Taylor, H. P. Jr., 1997, Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. in *Geochemistry of Ore Deposits* (third edition), Barnes, H. L., ed., p. 229–302. John Wiley & Sons, Inc., New York.

## 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？—

渡辺 寧\*

#### ジョン・ハントの拍手

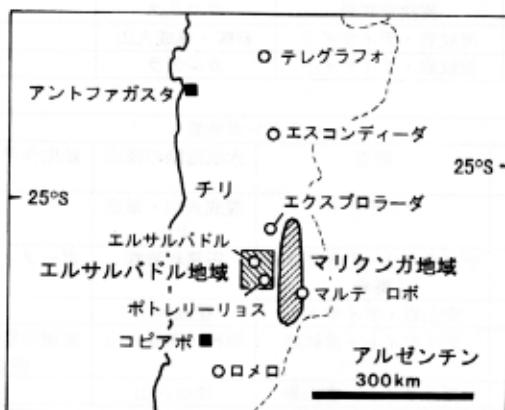
「ポーフィリー鉱床の上に成層火山を乗せる必要はない。」とスタンフォード大学教授のマルコ・アイナウディが1997年、ソルトレイクシティで開かれた米国地質学会の年会で講演したとき、200人あまりの聴衆の中で、ただ1人の男が立ち上がって拍手をしました。それがジョン・ハントでした。ジョン・ハントは、かつてアナコンダがチリのエルサルバドル鉱山を操業していたときの探査部門のチーフでした。1975年に *Economic Geology* 誌に発表された有名なエルサルバドル鉱床の論文の共著者でもあります。

ポーフィリー鉱床が成層火山の下に形成されるか否かについては永らく論争が行われてきました。リチャード・シリトーは、アルゼンチンのファラロン・ネグロやチリのマリクンガ地域において、ポーフィリー鉱床がほぼ同時期に形成された成層火山の下部に位置することから、ポーフィリー鉱床の上部には成層火山が存在すると考えました (Sillitoe, 1973, 1980)。一方、アメリカ南西部やチリの北部の鉱床では火山の証拠が見つからないものが多く、これらの地域の鉱床を研究してきたアイナウディやハントは、冒頭の意見を持つに至ったわけです。これに対しシリトーは、これらの地域で成層火山が認められないのは、鉱化作用の起きた時代が古く、上部の成層火山は既に削剥されてしまったと説明しています (Sillitoe and Bonham, 1984)。しかしながらこれらの地域では、鉱床周辺のみでなく、広域にわたって火山活動の証拠が見つかっていません。

今回は火山を伴うものと伴わないポーフィリー鉱床がどのような応力場の過程

\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

を経て形成されているかを北部チリのエルサルバドル地域とマリクンガ地域を例に説明したいと思います。



第1図 チリ北部エルサルバドル地域とマリクンガ地域の位置図。白丸はポーフィリー鉱床、黒四角は都市名、破線はチリとアルゼンチンの国境線を示す。

### 火山を伴わないポーフィリー鉱床の例—エルサルバドル地域

エルサルバドル地域には始新世に形成されたエルサルバドル鉱床とポトレリーリヨス鉱床が分布しています（第1図）。いずれもポーフィリー銅・モリブデン鉱床です。

エルサルバドル地域では、約63–61Maにエルサルバドル・カルデラと呼ばれるカルデラが形成され、そこから多量の流紋岩質の火碎流堆積物が噴出しました。この活動は61–58Maの流紋岩またはデイサイトからなる単成火山群の形成に引き継がれました。その後1400万年の間、この地域には火成活動が認められなくなります。そして44–43Maに流紋岩質の、さらに43–41Maに花崗閃緑岩質のマグマが貫入しますが、これらの火成活動には火山活動は伴われていません。この貫入活動の最末期に、インディオムエルト地区に貫入した花崗閃緑岩質マグマにエルサルバドル鉱床が伴われています（Cornejo et al., 1997；第1表）。

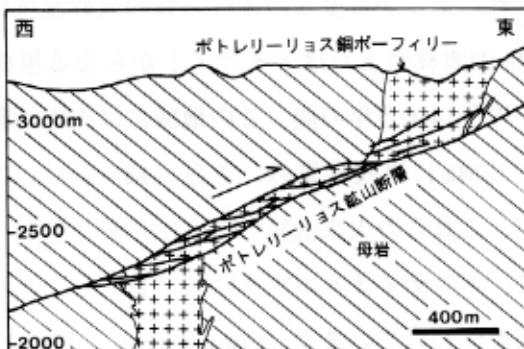
エルサルバドル鉱床形成後は、火成活動の場はインディオムエルト地区から約30km南東のポトレリーリヨス地区に移動します。ポトレリーリヨス地区では約40Maから33Maにわたり、マグマの貫入活動があり、少なくとも11の独立した貫入岩が分布しています。それらのうちのわずか1つにしか噴出岩が伴われません（Marsh et al., 1997）。このことはこの地区の火成活動は、主としてマグマが

| エルサルバドル地域  |           |         |                   |
|------------|-----------|---------|-------------------|
| 年代<br>(Ma) | 岩石        | 火成活動の様式 | 鉱化作用の様式           |
| 43-41      | 花崗閃緑岩斑岩   | 円筒状岩株   | ボーフィリー<br>銅・モリブデン |
| 44-43      | 流紋岩斑岩     | ラコリス    |                   |
| 61-58      | 流紋岩・ディサイト | 岩株・単成火山 |                   |
| 63-61      | 流紋岩・ディサイト | カルデラ    |                   |

| マリクンガ地域    |                   |               |               |
|------------|-------------------|---------------|---------------|
| 年代<br>(Ma) | 岩石                | 火成活動の様式       | 鉱化作用の様式       |
| 11-7       | ディサイト             | 複成火山・単成<br>火山 |               |
| 13-12      | ディサイト・花崗閃緑岩<br>斑岩 | 円筒状岩株         | ボーフィリー金       |
| 16-13      | 安山岩・ディサイト         | 複成火山          |               |
| 24-21      | ディサイト・流紋岩         | 岩株・単成火山       | 高硫化型浅熱水<br>性金 |
| 25-23      | ディサイト・安山岩         | 複成火山          |               |

第1表 エルサルバドル地域、マリクンガ地域の火成活動および鉱化作用の様式。エルサルバドル地域は Cornejo et al. (1997)、マリクンガ地域は Mpodozis et al. (1995) に基づく。

地表に噴出しない貫入岩のスタイルであったことを示唆します。ここでは主要なボーフィリー銅鉱化作用は39–35 Ma に起こり、また40 Ma には高硫化系の浅熱水性金鉱化作用が認められます (Marsh et al., 1997)。ボーフィリー鉱床形成後、この地域には逆断層運動が起こり、鉱化作用を受けた貫入岩が断層により切られています (Tomlinson, 1994; 第2図)。



第2図 ボトレイリヨス鉱床での地質断面図 (Tomlinson, 1994原図)。鉱化を受けた貫入岩はボトレイリヨス鉱山断層により 1 km あまり変移している。

### 火山を伴うボーフィリー鉱床の例—マリクンガ地域

一方エルサルバドル地域の東に位置するマリクンガ地域には、マルテやロボといったボーフィリー金鉱床や、ラ・コイバに代表される高硫化系浅熱水性金鉱床はなんざ 1999, 2

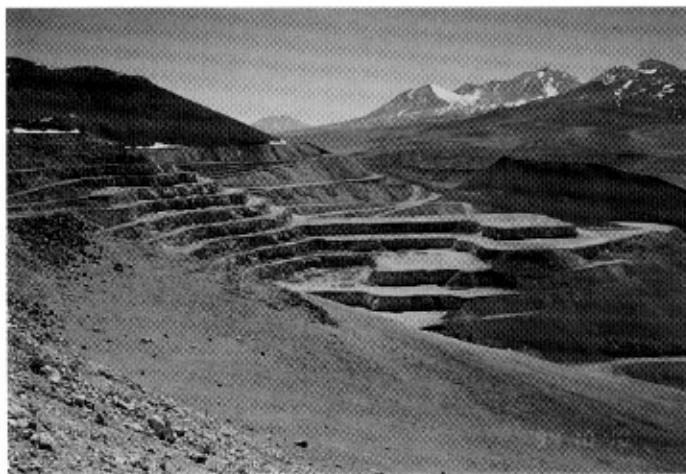


写真1 マルテボーフィリー金鉱床の露天採掘場

が分布しています（第1図；写真1）。

この地域の火成活動は25Maから7Maまで続き、5つのステージに区分されています（Mpodozis et al., 1995；第1表）。25Maから23Maにかけてデイサイトまたは安山岩質の複成火山活動が起こりますが、この活動の途中（24Ma）から21Maにかけて徐々にデイサイト～流紋岩質マグマの貫入活動に移り変わっていきます。高硫化系浅热水性金鉱化作用は、主にこの貫入活動に伴われています。その後火成活動は一時弱まりますが、16Maから13Maにかけて再び安山岩～デイサイト質の複成火山活動が起こります。マルテ鉱床やロボ鉱床は、これらの火山活動に伴う溶岩に覆われています（Vila and Sillitoe, 1991）。13Maから12Maにかけて、この地域にはデイサイト又は花崗閃緑岩質の貫入岩が併入し、ボーフィリー金鉱床が形成されます。これらの鉱床の形成以降（11-7 Ma）、この地域の火成活動は弱まりつつも、デイサイト質の複成および単成火山群が形成されます。このようにマリクンガ地域ではボーフィリー鉱床は複成（成層）火山活動（写真2）の合間に形成されており、鉱床の上部は直前に噴出した安山岩に覆われています。

#### 広域応力場の変化に伴う火成活動・鉱化作用の様式の変遷

では複成（成層）火山を伴うマリクンガ地域と伴わないエルサルバドル地域の違いはどうして生じるのでしょうか。昨年の12月号でお話ししましたが、ボーフ

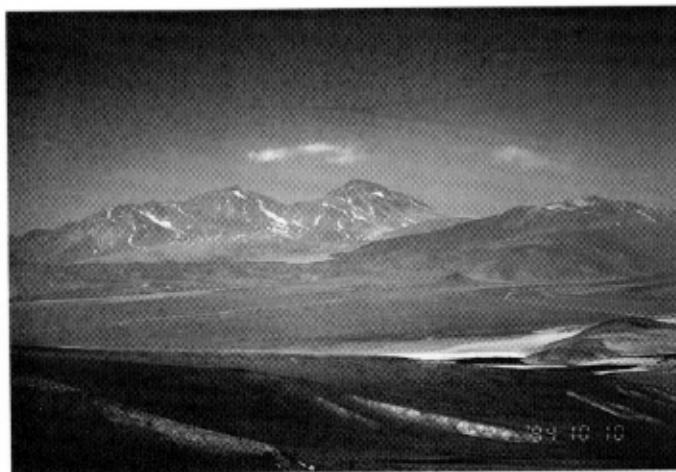


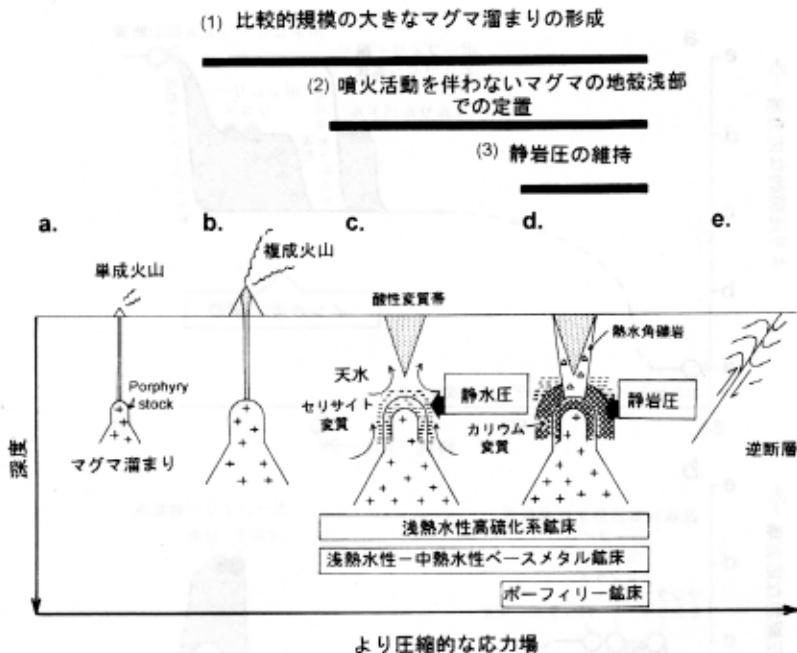
写真2 マリクンガ地域の複成（成層）火山

イリー鉱化作用は伸張応力場よりも中間的または弱圧縮応力場において形成されます。

昨年の9月号で書きましたが、マリクンガ地域の場合、この「より圧縮的な」応力場は Juan Fernandez 海嶺の沈み込みによりもたらされます。しかしながらこの海嶺の沈み込みの場所は、時代とともに北部チリから中部チリに移動していくために、マリクンガ地域では13–12Ma のわずか百万年の間だけ圧縮的な応力場が実現されました。そして、その期間にだけポーフィリー型鉱床が形成されたわけです。

一方、エルサルバドル地域を含むチリ北部では、始新世から漸新世にかけて広域的に長期間にわたり圧縮的な応力場が維持されます。残念ながらその原因は未だ明らかにされていませんが、①この時期に限ってプレートの収束速度が特に大きくなった訳ではない、②異地性地塊の付加がチリ北部には認められない、ことから、私は大きな海嶺が同じ場所に長期間にわたり沈み込んだのではないかと想像しています。いずれにせよ、この時期にペルー南部からチリ北部にかけて「インカ造山運動」をもたらした圧縮的応力場が維持されたために、この地域には火山活動はほとんど認められなくなり、地下深部から上昇してきたマグマは、地殻浅部に噴出岩を伴わない貫入岩を形成しました。

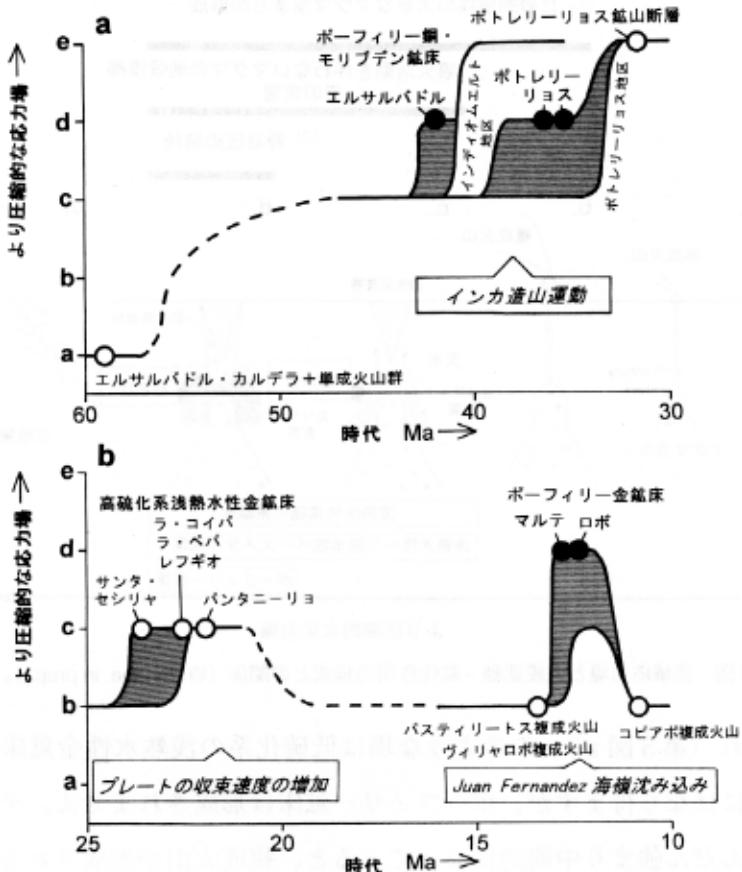
昨年の10月号から12月号にかけて述べてきた応力場と火成活動および鉱化作用のスタイルとの関係を整理して見ましょう（第3図）。引張応力場では単成火山はなんざ 1999. 2



第3図 広域応力場と火成活動・鉱化作用の様式との関係 (Watanabe, in prep.)。

群が形成され（第3図a）、このような場は低硫化系の浅热水性金鉱床や黒鉱鉱床の形成場にはなり得ますが、ポーフィリー鉱床は形成されません。テクトニック応力がだんだん強まり中間的になってくると、複成火山が形成されるようになります（第3図b）。しかしこのセッティングでは、金属元素はマグマとともに空中に吐き出されるため鉱床の形成は期待できません。さらに応力場が圧縮的になると、上昇してきたマグマは地表に噴出せず、貫入岩となります。この状態では、マグマから分別した熱水はその上部に大きな酸性変質帯を形成します。しかしテクトニック応力が十分大きくないとマグマ近傍で静岩圧が維持されず（静水圧状態）、熱水は循環する天水と混合し、マグマから離れたところに移動します。この場合うまくするとスカルン鉱床や鉱脈鉱床、ポーフィリー鉱床を伴わない高硫化系鉱床が形成されます（第3図c）。恐らく北海道の無意根山に形成されている酸性変質帯と豊羽鉱床のペアはこの状態に相当すると思われます。さらに応力場が圧縮的になると、ようやくポーフィリー鉱床を形成できる状態となります（第3図d）。しかしながら、あまりに圧縮応力が強すぎるとマグマは地殻浅部に上昇せず、逆断層が形成されます（第3図e）。

このように便宜的に応力場の状態を5段階に分けましたが、ある1つの地域に



第4図 エルサルバドル地域(a)とマリクンガ地域(b)での時間と広域応力場・鉱化作用との関係図(Watanabe, in prep)。縦軸のa-eは第3図のa-eに相当する。

おいても、応力場の状態は時間とともに変化します。エルサルバドル地域とマリクンガ地域での応力場の変化の状態を表したのが第4図です。

エルサルバドル地域では約60Maのエルサルバドル・カルデラ形成以降、応力場は強まり、エルサルバドル鉱床形成に至ります。この鉱床の形成の後、インディオムエルト地区の応力場は圧縮的になりすぎたために、マグマの貫入が終了したと思われます。そしてマグマの貫入はより内陸側のポトレリーリヨス地区に移ります。ポトレリーリヨス地区でも、ポーフィリー鉱床形成後、強い圧縮応力場となりマグマの貫入は終了し、逆断層が発達します(第2図)。

一方マリクンガ地域では、約24-21Maに応力場がやや圧縮的になり高硫化系鉱床が形成されましたが、ポーフィリー鉱床を形成するまでには至らなかったようです。この時期の圧縮的な応力場はプレートの収束速度の増加した時期  
はなんざ 1999. 2

(Pardo-Casas and Molnar, 1987) に対応します。その後は複成火山を形成する応力場が続きますが、Juan Fernandez 海嶺の通過した時期にのみ、ポーフィリー鉱床の形成される圧縮的な応力場が実現されたと考えられます。

このようにポーフィリー鉱床は、火山活動を伴わないマグマの貫入活動よりもたらされます。しかしながらポーフィリー鉱床の形成を可能にする微妙な応力場が長期間維持されることは稀です。その稀な例が始新世のチリ北部であり、このことがチリを世界に冠たるポーフィリー銅鉱床国にしたのでしょう。多くの場合は、ある1つの地域におけるマグマの貫入・噴出史に比べて、応力場がより短時間のうちに変化します。そしてその結果、成層火山（複成火山）の下部にポーフィリー鉱床が位置することになったり、鉱床形成後に噴出した火山岩に覆われたりするのでしょうか。

#### 引用文献

- Cornejo, P., Tosdal, R. N., Mpodozis, C., Tomlinson, A. J., and Rivera, O., 1997, El Salvador, Chile porphyry copper deposit revisited : Geologic and geochronologic framework. International Geology Review, v. 39, p. 22-54.
- 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.
- Mpodozis, C., Cornejo, P., Kay, S. M., and Tittler, T., 1995, La Franja de Maricunga : Síntesis de la evolución del Frente de volcánico oligoceno-meoceno de la zona sur de los Andes centrales. Revista Geologica de Chile, v. 22, p. 273-313.
- Padro-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.
- Sillitoe, R. H., 1973, The tops and bottoms of porphyry copper deposits. Economic Geology, v. 68, p. 799-815.
- Sillitoe, R. H., 1980, Are porphyry copper and kuroko-type massive sulfide deposits incompatible ? Geology, v. 8, p. 11-14.

- Sillitoe, R. H. and Bonham, F. Jr., 1984, Volcanic landforms and ore deposits. Economic Geology, v. 79, p. 1286–1298.
- Tomlinson, A. J., 1994, Relaciones entre el porfido cuprifero y la falla inversa de la mina de Potrerillos: Un caso de intrusión sintectónica. 7º Congreso Geológico Chileno, Actas volumen II, 1629–1633.
- Vila, T., and Sillitoe, R. H., 1991, Gold-rich porphyry systems in the Maricunga belt, northern Chile. Economic Geology, v. 86, p. 1238–1260.

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

（註）著者らは、この論文を「火成岩と地殻変動の関係」の題で、第7回チリ地質学連合会議（チリ地質学会）で発表した。

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（その10）

### — ポーフィリー鉱床は日本に存在するか？ —

渡辺寧\*

#### 「ポーフィリー鉱床は日本に存在するか？」

このテーマは、黒鉱鉱床の成因論争が一段落した1970年代に、日本でも議論されるようになりました。ポーフィリー鉱床はプレートの沈み込み帯に数多く形成されるので、典型的島弧である日本列島に存在しないのはおかしいという訳です。

1979年に鉱山地質学会（現資源地質学会）の主催でポーフィリー銅鉱床に関するシンポジウムが東京で開かれました。その席上でリチャード・シリトー氏は「ポーフィリー鉱床を形成する火成活動は、安山岩質の成層火山を形成し、特に硫黄や硫化鉄の鉱床を伴うことが多い」という発表を行いました。その後の会話がほんざに紹介されています（佐藤、1979）。

佐藤壮郎氏「硫黄や硫化鉄を伴う安山岩の成層火山なら、日本の若い時代の火山にいっぱいあるよ。」

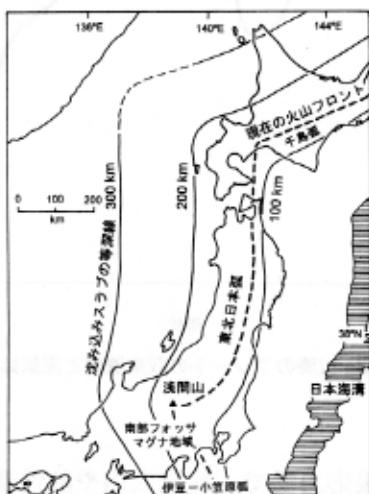
シリトー氏「それは大いに可能性があるけど、鉱床があっても3～4kmの深さだよ。どうやって採掘する？」

このように存在してもおかしくないはずのポーフィリー鉱床がなぜ日本では今まで見つかっていないのでしょうか。日本列島では安山岩質の成層火山が中新世後期以降、火山フロントに沿って数多く形成されています。従って第四紀の火山の削剥レベルが小さいことはあっても、中新世のものは鉱床が露出するぐらいの削剥を受けていても良いはずです。実際、中新世や鮮新世の貫入岩や深成岩は東北日本弧に沿って多数露出しています。これらの貫入岩や深成岩に銅の鉱化作用が伴うことはあっても典型的なポーフィリー鉱床とはやや異なっています。

\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

その違いは、①カリウム変質に乏しいこと、②石英細脈群の発達が悪いこと、③角礫パイプ（ダイアトリー）が認められないこと、④銅の鉱量が何桁も少ないことです（Ishihara, 1980; Watanabe and Ohta, in prep.）。この答えとして私は、成層火山の存在はポーフィリー鉱床生成に関して必要条件ではないことを2月号で説明しました。従って、いくら安山岩の成層火山があっても、ポーフィリー鉱床の存在とは別の問題なのです。

それでは日本にポーフィリー鉱床は本当に存在しないのでしょうか？日本列島の中でも、最も良く研究されていてデータの豊富な東北日本弧（第1図）について見てみましょう。



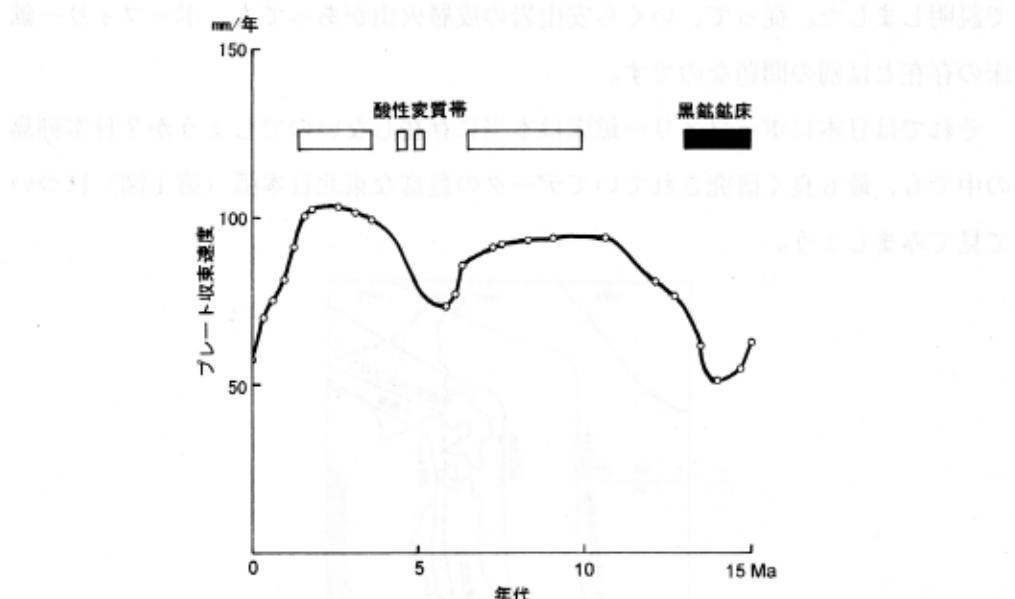
第1図 日本列島北東部の火山フロントの位置と沈み込みスラブの等深線。

### 東北日本弧の中新世以降のテクトニックセッティング

日本列島は、中新世前期から中期にかけての間に、ユーラシア大陸から分裂し、島弧を形成しました。この際、東北日本弧は半時計回りに大きく回転したと考えられています（Otofuji et al., 1985）。この回転以前の東北日本弧のテクトニックセッティングあまりはっきりしませが、この移動の後は、東北日本弧はあまり大きな変動は受けていません。従って、ここでは東北日本弧が大陸から分離した後の時代のテクトニックセッティングについて見てみることにします。

中新世中期以降の太平洋プレートと東北日本弧との収束速度を Jackson et al. (1975) によるプレートの沈み込みの方位データと Engebretson et al. (1985)

の収束速度を用いて計算したのが第2図です。この図のようにプレートの沈み込み方位の変化により、50–100mm/年の間で収束速度は変動します。そして収束速度の小さいときに黒鉱鉱床が、大きいときにリソキップ (Sillitoe, 1995) と呼ぶべき酸性変質帯が形成されています（第2図）。2月号で述べたように単



第2図 東北日本弧での15Ma以降のプレートの収束速度と黒鉱鉱床・酸性変質帯の形成時期

成火山群や黒鉱鉱床が伸張応力場で、複成火山や酸性変質帯がより中間的な応力場で形成されやすいということを考えれば、東北日本弧の中新世以降の応力場は、プレートの収束速度に影響を受けてきたことを意味します。

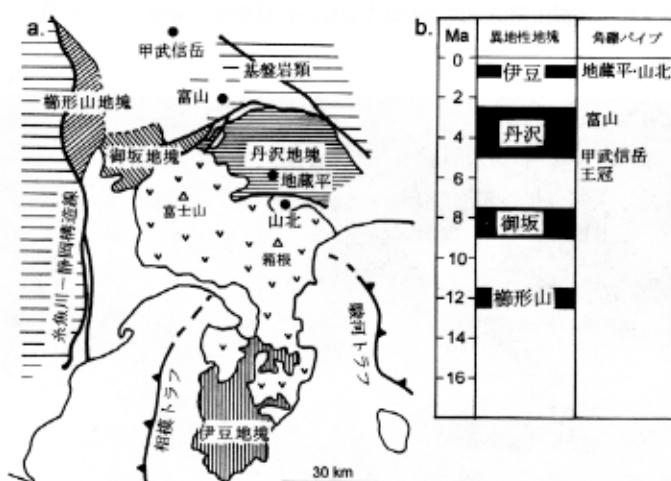
昨年の10月号でまとめたように、ポーフィリー鉱床は①プレートの収束速度の大きい地域、②異地性地塊が付加・沈み込みをしている地域、③非地震性海嶺や海山列が沈み込みをしている地域に形成されます。東北日本弧ではプレートの収束速度の大きな時期でも100mm/年であり、アラスカやカナダ西部、アリゾナで大量にポーフィリー鉱床が形成された150mm/年という収束速度には及びません。非地震性海嶺や海山列の沈み込みも見あたりません。東北日本弧の現在のプレート沈み込み角度は25–30°であり (Hasegawa et al., 1994)、ポーフィリー鉱床が数多く形成される20°という角度と比べるとわずかに力が及ばないよう見受けられます。前章であげた東北日本弧の中新世貫入岩に伴う鉱化作用の特

徵がポーフィリー型の鉱化作用と異なるのは、テクトニック応力があまり大きくないために、鉱化作用が十分な静岩圧のもとで起こっていないためと考えられます。

ところが太平洋プレートのスラブの等深度線（第1図）をよく見てみると、1カ所だけ内陸側に大きく折れ曲がっており、火山フロントも凹状にへこんでいるところがあります。そうです。伊豆-小笠原弧が衝突している浅間山を中心とする南部フォッサマグナ地域です。

日本における最有希望地域はここだ！

南部フォッサマグナ地域では、伊豆-小笠原弧の多重衝突が中新世から継続して起こっており、約12Ma以降、4つの地塊が本州に付加したと考えられています（第3図；Amano, 1991）。その最も新しい地塊が伊豆半島です。従ってこの地域はポーフィリー鉱床を形成するテクトニックセッティングのうちの「異地性地塊が付加・沈み込みをしている地域」に当てはまります。この地域は、地塊の衝突のために地域の上昇・削剥速度も速く、中新世～鮮新世の深成岩や貫入岩が地表に露出しています（第4図；Sato, 1991）。また私の知る限り日本で唯一ダイアトリーと呼ぶべき中新世後期～更新世の角礫パイプの報告されている所でもあります（第3図；Ishida, 1991）。



第3図 南部フォッサマグナ地域における異地性地塊・角礫パイプの分布と年代。a：異地性地塊と角礫パイプの分布、b：異地性地塊の付加年代と角礫パイプの形成時期。異地性地塊および角礫パイプの分布と年代はそれぞれ Amano (1991), Ishida (1991) にもとづく。

この南部フォッサマグナ地域には貫入岩の頂部に形成された酸性変質帯が認められ、それらの一部はろう石鉱床として採掘されています（第4図）。これらのろう石鉱床は、カオリンやパイロフィライトのほかダイアスボア、ズニアイト、紅柱石、コランダムなどの高温鉱物が多く産出するという特徴があります（須藤、1995）。別な見方をすれば、この地域はシリトー氏の言う「リソキヤップ」の集中地域です。ここでは須藤ほか（1985）により詳しく研究された余地鉱山（写真1）の紹介をしましょう。

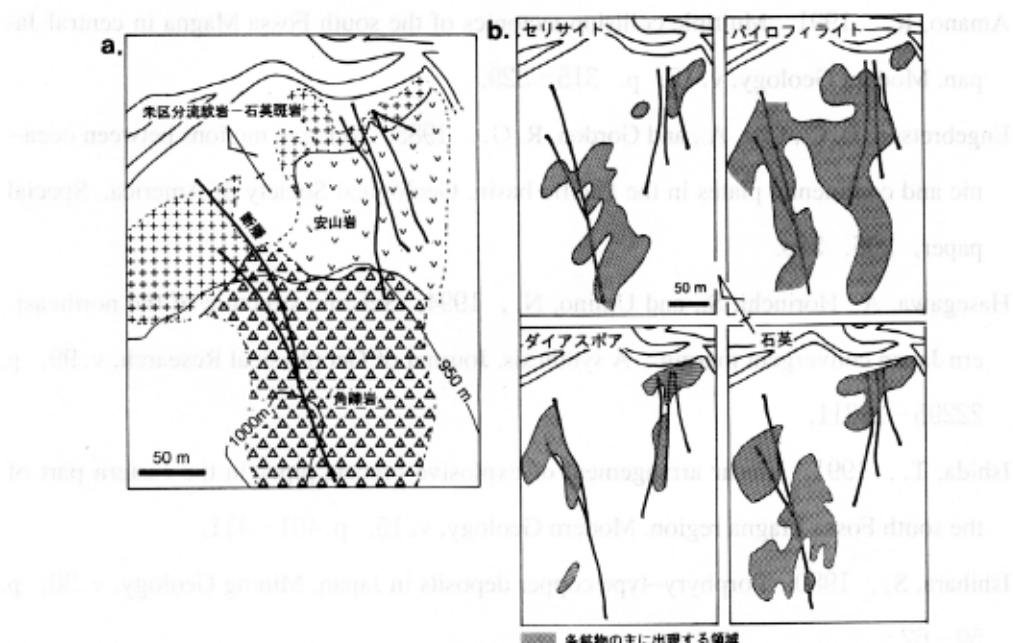


第4図 浅間山周辺地域でのロウ石鉱床の分布図（須藤、1995原図）。



写真1 余地鉱山のロウ石採掘場

余地鉱山は長野県南佐久郡佐久町に位置します（第4図）。地表での鉱床の母岩は古生層からなる基盤岩を覆う、または基盤岩を貫く流紋岩～石英斑岩、安山岩、角礫岩からなり（第5図a）、試錐調査の結果によると、地下では角礫岩が主として鉱床母岩となっています。また試錐により石英閃緑岩の存在が確認されています。熱水変質は主として南北系の断層に沿って認められ、パイロフィライトはセリサイト、ダイアスボア、石英と共存します（第5図b）。これらの共存関係から変質をもたらした热水の温度は300℃前後と推定されます。この余地鉱山は1-3mm大に達するズニアイトの自形結晶を産することでも有名です。



第5図 余地鉱山の地質および変質（須藤ほか, 1985）。a: 地質概略。b: 各変質鉱物の分布

この余地鉱山から200mほど北側には黄銅鉱と硫砒銅鉱を産する本郷鉱山が位置しています。これらの硫化物に伴われる石英中には高塩濃度の流体包有物が含まれ、その充填温度は400-550℃にも達しています（由井・松枝, 1995）。余地鉱山に認められる酸性変質帯はポーフィリー鉱床上部に発達するものと全く同一であり、硫砒銅鉱はポーフィリー鉱化作用の最末期に頻繁に認められます。大規模な角礫岩が存在すること（恐らく热水性と思われる）、試錐の最下底でセリサイトの卓越する部分が認められること（セリサイト変質帯の最上部か？）、

銅の鉱化作用とともに高塩濃度を示す流体包有物が存在することから考えると、ポーフィリー銅鉱床が余地鉱山の下部数100mに存在しても全くおかしくはありません。

このように、私自身は南部フォッサマグナ地域を詳しく調査したことはありませんが、この地域が日本において最もポーフィリー鉱床の形成に適していると考えています。

#### 引用文献

- Amano, K., 1991, Multiple collision tectonics of the south Fossa Magna in central Japan. *Modern Geology*, v. 15, p. 315–329.
- Engebretson, D. C., Cox, A., and Gordon, R. G., 1985, Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin. *Geological Society of America, Special paper*, 206. 59p.
- Hasegawa, A., Horiuchi, S., and Umino, N., 1994, Seismic structure of the northeastern Japan convergent margin : A synthesis. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, p. 22295–22311.
- Ishida, T., 1991, Linear arrangement of explosive breccia pipes in the eastern part of the south Fossa Magna region. *Modern Geology*, v. 15, p. 401–411.
- Ishihara, S., 1980, Porphyry-type copper deposits in Japan. *Mining Geology*, v. 30, p. 59–62.
- Jackson, E. D., Shaw, H. R., Barger, K. E., 1975, Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 26, p. 145–155.
- Otofuji, Y., Matsuda, T., and Nohda, S., 1985, Paleomagnetic evidence for the Miocene counter-clockwise rotation of Northeast Japan–rifting process of the Japan arc. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 75, p. 265–277.
- Sato, K., 1991, Miocene granitoid magmatism at the island–arc junction, central Japan. *Modern Geology*, v. 15, p. 367–399.
- 佐藤壮郎, 1979, 酔っぱらいのための鉱床学（3）銅鉱床—その1（ポーフィリ）  
ほなんざ 1999. 3

Sillitoe, R. H., 1995, Exploration of porphyry copper lithocaps. Proceedings of the 1995 PACRIM Congress. Australasian Institute of Mining and Metallurgy, p. 527-532.

須藤定久, 1995, 長野県東部のロウ石鉱床を訪ねる—信陽鉱山および余地鉱山—. 1995年三鉱学会巡検案内書, p. 18-31.

須藤定久・渡辺和明・宮崎純一, 1985, 長野県国土余地鉱山のロウ石鉱床. 陶磁器原料資源調査報告書(昭和59年度), p. 49-67.

由井俊三・松枝大治, 1995, 余地地区の鉱化作用. 1995年三鉱学会巡検案内書, p. 32-35.

須藤定久, 1995, 長野県余地鉱山の鉱化作用. 1995年三鉱学会巡検案内書, p. 36-39.

須藤定久, 1995, 長野県余地鉱山の鉱化作用. 1995年三鉱学会巡検案内書, p. 40-43.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学（その11） —マグマタイプと金属種—

渡辺寧\*

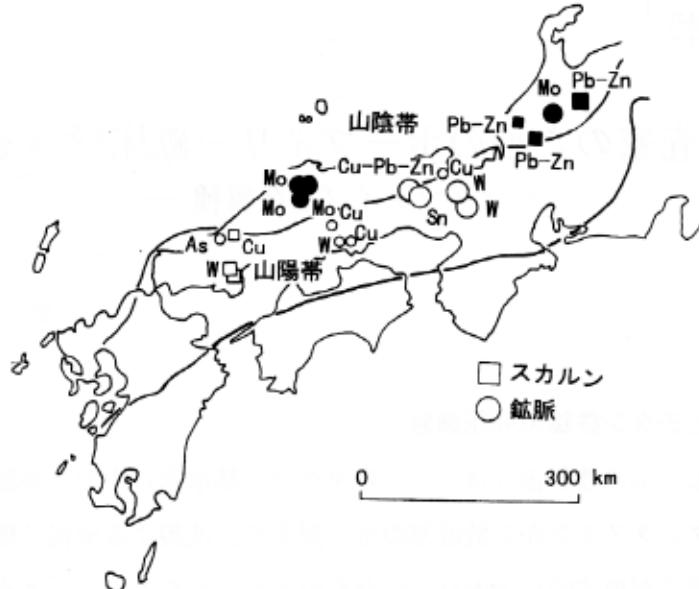
### 磁鉄鉱系列とチタン鉄鉱系列花崗岩

かつての鉱床学の教科書では、一つのマグマ-熱水系の中で、高温部の銅やモリブデン・タンクス滕から低温部の金・銀まで、沈澱する金属の種類が移り変わっていく様子が模式的に書かれていたものです。もちろんこのような「教科書的」な例もありますが、多くの鉱床では、ある特定の種類の金属が卓越し、他の金属元素がほとんど見られないことが普通です。そして同種の金属を産する鉱床が集まって鉱床生成区を形成します。このことに早くから気がつき花崗岩の成因論にまで結びつけたのが石原舜三さんです。

石原さんは山陰帶のモリブデン鉱床にはタンクス滕鉱物を伴わない特徴のあることを見いだしました。逆に山陽帶では錫-タンクス滕鉱床が卓越します（第1図）。これらの鉱床の多くが花崗岩に胚胎することから、両帶の花崗岩の性質に違いがあると考えた石原さんは、両帶に分布する花崗岩の研究の中で、不透明鉱物量と  $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$  比に大きな差があることを発見しました（Ishihara, 1971）。これらの違いを基に、花崗岩類は山陰帶の磁鉄鉱系列と、山陽帶のチタン鉄鉱系列に区分されました（Ishihara, 1977）。

これらの花崗岩類系列の成因については、マグマ発生時に原岩の性質により  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  比が高いもの（磁鉄鉱系列）と低いもの（チタン鉄鉱系列）とがあつて、それぞれが貫入時に壁岩や地表水により局所的に若干の集積を受けて固結するためと説明されています（石原, 1988）。これらのマグマの成因は沈み込み帯の応力場に関係しており、磁鉄鉱系列のマグマは、伸張応力場のもとで、酸化的

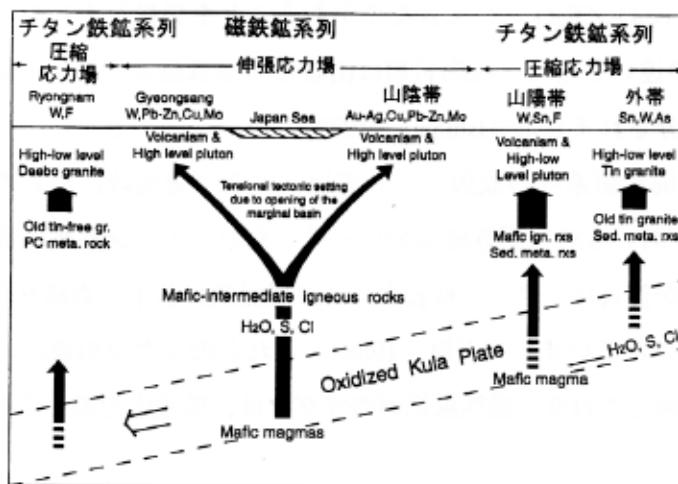
\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官



第1図 白亜紀～古代三紀の山陰帯・山陽帯の主要鉱床分布 (Ishihara, 1971原図)。

な海洋プレートから水、硫黄、塩素がマントルウェッジに供給されることにより形成され、チタン鉄鉱系列のマグマは、圧縮応力場のもとで、還元的な炭素や硫黄を含む地殻物質を溶かし込むことにより形成されると説明されています (第2図, Ishihara, 1998)。

一方で、Takagi and Tsukimura (1997) は  $\text{SO}_2$  の量がマグマの酸化還元状態を決める重要な要素であると考えています。 $\text{SO}_2$  はマグマ中に結晶した輝石等の鉱物

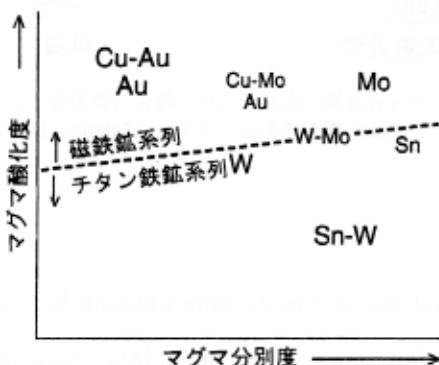


第2図 磁鐵鉱系列・チタン鉄鉱系列花崗岩の形成モデル (Ishihara, 1998)。

と反応して磁鉄鉱を作ることによりマグマを酸化します。従ってマグマに含まれていた  $\text{SO}_2$  の量が岩石中の磁鉄鉱の量を決め、結果として磁鉄鉱系列（酸化型）またはチタン鉄鉱系列（還元型）の花崗岩を作ると考えられます。マグマ中の  $\text{SO}_2$  量はマグマの起源物質と大きく係わっていると考えられています。

### マグマの酸化度と金属種

石原モデル、高木・月村モデルのいずれにせよマグマの酸化度を最終的に決めるのはマグマの起源物質が大きな役割を果たしています。このマグマの酸化度は、西南日本の例に見られるように、伴われる鉱床の金属種と大きく関係しています (Sillitoe, 1996)。第3図はマグマの酸化度と分別度を尺度に鉱床の金属種をプロットしたものです。

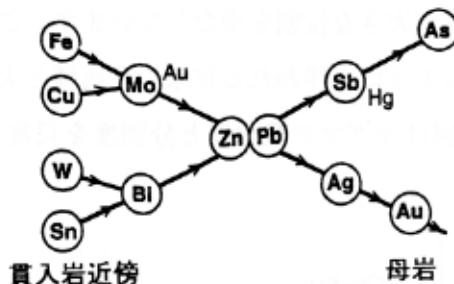


第3図 マグマ酸化度—マグマ分別度と深成一貫入岩に伴われる鉱床の金属種との関係 (Sillitoe, 1996)。

あまり分別していない磁鉄鉱系列の石英閃緑岩や石英モンゾナイトは多くの主要な銅、モリブデン、金鉱床を生み出しています。銅／モリブデン比は分別の度合いが下がるにつれ、大きくなります。極端に分化した例は、高シリカ流紋岩ポーフィリーに伴われる、銅をほとんど含まないクライマックス型のポーフィリー モリブデン鉱床で、タンゲステン、錫、タンタル、ニオブ、フッ素が濃集しています。金は酸化的なマグマに濃集することが多いようです。一方、分化した比較的還元的なチタン鉄鉱系列の花崗岩は錫（タンゲステン）鉱床を伴います。このようにマグマの酸化、還元状態により伴われる鉱床の金属種は変化します。金属元素の起源についてはまだまだわかっていないことが多く確定的なことは言えま

せんが、マグマと同様、マグマの起源物質の違いが大きく影響していると考えられています。

マグマから分別した热水は、热水の温度の低下や母岩との反応、天水との反応により鉱石鉱物を沈澱します。この際にはマグマの近傍から母岩にかけて第4図で模式的に示されるような金属種の変化が認められます。このようにマグマに関係した鉱床の金属元素は①マグマの性質、②マグマからの距離（沈殿する温度）の2つの要素により変化すると言えるでしょう。



第4図 貫入岩近傍（高温部）から母岩（低温部）にかけての金属元素の沈澱シーケンス (Sillitoe, 1996)。

## 引用文献

- Ishihara, S., 1971, Modal and chemical composition of the granitic rocks related to the major molybdenum and tungsten deposits in the Inner Zone of Southwest Japan. Jour. Geol. Soc. Japan, v. 77, p. 441–452.
- Ishihara, S., 1977, The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining Geol., v. 27, 293–305.
- Ishihara, S., 1988, Granitoid series and mineralization in the Circum-Pacific Phanerozoic Granitic Belt. Resource Geol., v. 48, p. 219–224.
- 石原舜三, 1988, 花崗岩系列が成立するまで. 地質学雑誌, v. 94, p. 1005–1011.
- Sillitoe, R. H., 1996, Granites and metal deposits. Episode, v. 19, p. 126–133.
- Takagi, T. and Tsukimura, K., 1997, Genesis of oxidized-and reduced-type granites. Econ. Geol., v. 92, p. 81–86.

## 鉱床探査家のためのポーフィリー鉱床学(完・その12) — ポーフィリー鉱床の探査指針 —

渡 辺 寧\*

### これまでの探査指針

1994年にチリのコンセプションで開かれた第7回チリ地質学会の折に、Society of Economic Geologists の主催でアンデスの銅鉱床に関するシンポジウムが行われました。最初の講演に立ったリチャード・シリトー氏は冒頭で次のように言いました。「鉱床探査家は下手な鉱床成因モデルなど持たない方が良い。鉱床を確実に見つけるには目的とする元素の地化学探査を行い、異常域にボーリングを打てば良いのだ」。この言葉に聴衆は爆笑しました。なぜならこのシンポジウムは銅鉱床の成因を討論するために設けられ、彼もアンデスの銅鉱床の成因モデルについての講演を行う予定だったからです。

このシリトー氏の言葉はある意味では真理を表しています。完全な潜頭性鉱床として発見された例は、石原舜三さんがほなんざ3月号に書いているように、日本では1960年代の北鹿地域での黒鉱鉱床、世界ではオーストラリアのオリンピックダム鉱床がありますが、ほとんどの場合、鉱床は地表に露出した鉱化帯から発見されているからです。

しかし現実に鉱床探査をしている方は実感されていると思いますが、世界中どこへ行っても鉱脈のあるところは鉱区がかけられており、そこを買い取るとなると莫大な費用がかかります。貧乏な探査家にとって鉱脈のない完全潜頭性の鉱床を見つける他ありませんし（それが醍醐味でもあります）、鉱脈地を買い取る場合にも「まがいもの」に注意する必要があります。ここではポーフィリー鉱床を探査する場合、これまでの地道な地化学探査に加えて注意すべき点を書きた

\* 地質調査所 資源エネルギー地質部主任研究官

いと思います。

### 地域の絞り込み

ポーフィリー鉱床に関しては、海洋プレートの沈み込みを伴う火山弧の存在が必要条件でしたが、それに加えて①プレートの収束速度の大きい地域、②異地性地塊が付加・沈み込みをしている地域、③非地震性海嶺や海山列が沈み込みをしている地域をピックアップする必要があります。現在のテクトニックセッティングをみればプレートが150mm／年以上の速度で沈み込んでいる所は見あたりません。海嶺沈み込みで見れば、テフアンテック、ココス、ナスカ、ファンフェルナンデス海嶺の沈み込んでいるアメリカ南米大陸西岸やフィリピンのルソン島では、既に若い時代のポーフィリー鉱床が発見されています。天皇海山列の沈み込んでいるカムチャッカやカーネギー海嶺の沈み込んでいるエクアドルは有力な探査地域です。マグマギャップを形成するまでには至っていませんが、伊豆弧の沈み込んでいる南部フォッサマグナも要探査地域でしょう。

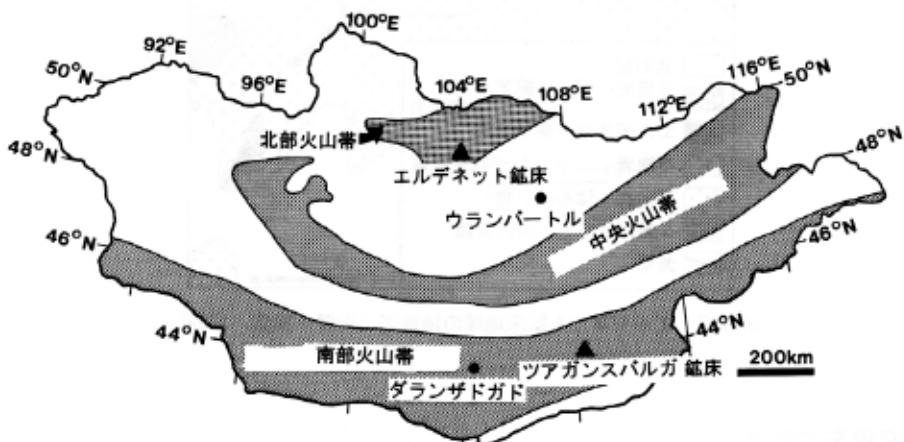
異地性地塊が付加・沈み込みをしている地域としては、現在のセッティングではアラスカ半島からアリューシャン弧、オミネカ地塊が衝突・沈み込んでいるカスケード北端部等が候補です。このほかユーラシア大陸は地質時代に数々の異地性地塊の衝突・付加により形成されていますので、ポーフィリー鉱床の有望地が数多く含まれています。

このようにポーフィリー鉱床が有望な地域は数限りなく見つかります。これらの中でも火山弧が途切れている部分周辺（ほなんざ273,274号参照）や、長年続いた火成活動の最末期の活動は注目に値します。

私が一昨年訪れたモンゴルのエルデネット鉱山を例に地域の絞り込みをしてみましょう。まずテクトニックセッティングからユーラシア大陸中のシベリア地塊とモンゴル・北中国地塊との二疊紀後期～三疊紀前期にかけて起こった衝突に注目します（第1図）。この衝突以前にはモンゴル北部・中部・南部に火山弧が形成されていますが（第2図）、これらのうち最も衝突域に近い北部を選びます。この火山弧の火成活動の深部相を代表するものとしてセレンゲ複合岩体（290–240Ma）があります。この火成活動の最末期にはエルデネット複合岩体とよばれほなんざ 1999. 5



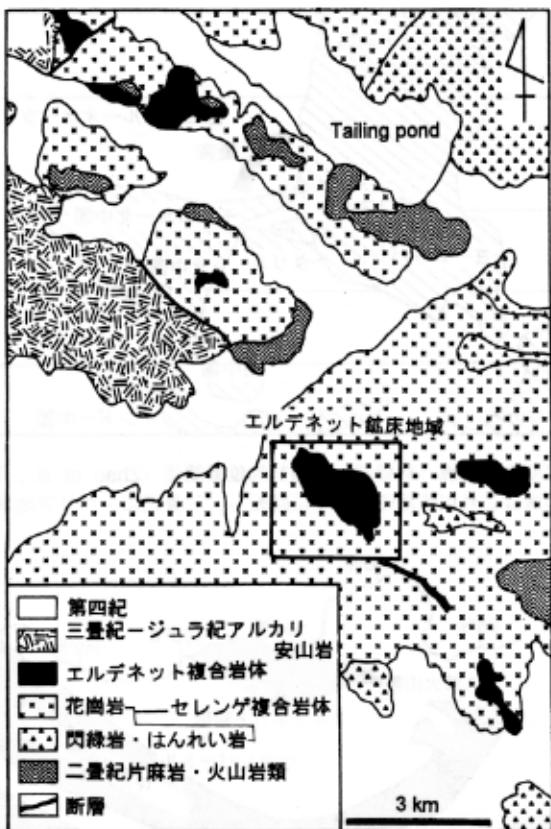
第1図 二疊紀後期の各地塊（斜線部）の相対的位置関係（Zhao et al., 1990）。モンゴル－北中国地塊はこれ以降反時計回りに回転し、三疊紀にシベリア地塊と合体する。



第2図 モンゴルにおける古生代末期から中生代前期の火山帯と主要ボーフィリー銅・モリブデン鉱床の分布。

る花崗閃緑岩質ボーフィリーが240Maに貫入しています。これ以降この地域ではしばらく火成活動が休止し、かなり後になって（180Ma）、アルカリ岩の貫入・火山活動が起こっています（第3図）。この火成活動史から、上記の衝突は240 Ma直後に起こったと読みとり（後のアルカリ岩は、衝突後の大陸の内部での活動と解釈する）、エルデネット複合岩体を調査するわけです。

このようにして北東アジア最大のボーフィリー銅鉱床の発見に至る訳ですが、潜頭性の場合なかなかこのようにうまくいきません。というのはエルデネット複合岩体に注目しても、これに属する貫入岩が数多くあり（第3図）、このうちのどれを選んで良いか迷うからです。



第3図 エルデネット鉱床地域の地質図（内藤・須藤、1999）

### 熱水変質帯の評価

貫入岩が潜頭性の場合、その上部には advanced argillic 変質帯が形成されます。削剥があまり進んでいなければ、珪化岩や明ばん石を主体とする変質帯が露出しますが、期待される鉱体まで深度的に距離があるため、ポーフィリー鉱床の探査対象にはならないでしょう。むしろ、高硫化系浅热水性金鉱床の探査ターゲットとなります。ポーフィリー鉱床の探査ターゲットとなるのは下部数100mに鉱体の存在が期待されるセリサイト-パイロフィライト（土ダイアスポア・紅柱石）からなる変質帯です。地表部に露出した変質岩を調査すれば、変質帯の累帯構造がわかり、変質の中心を明らかにすることができます。問題はその下に鉱床があるかどうかです（写真1）。私の調査していたエルサルバドル鉱床の場合は中心部の削剥が進んでおり、そこでは銅の鉱染がわずかに認められたため鉱床の発見につながりました。しかし、一般にセリサイト-パイロフィライト変質帯には銅はなんざ 1999. 5



写真1 チリ中部オヴェヘリア・デ・コデグア地区のセリサイトーバイロフィライトーダイスボア変質帯。この地域にはこのような変質帯が10余り発見されている。CODELCO の地質技師から、下部での鉱化作用の可能性を聞かれ返答に窮しているところ。

の兆候は全く認められません。現時点では、これらの変質帯を見て下に鉱体があるかないかを決めるには、ボーリングを掘って確かめる以外には方法はないでしょう。

この鉱床の有無に関して新たな指標になる可能性があるのがセリサイトの酸素・水素同位体組成です。Hedenquist et al. (1998) はポーフィリー鉱床上部の変質帯中のセリサイトは大部分がマグマ水起源であることを明らかにしました。これまで述べてきたポーフィリー鉱床の成因を考えれば、天水が大規模に循環する所ではポーフィリー鉱床は形成されません。従って、変質帯中のセリサイトが天水起源かマグマ水起源のものであるかを酸素・水素同位体により判定することによって、ポーフィリー鉱化作用を伴うか、伴わないかを判別する手がかりにすることができるはずです。残念ながら現時点では鉱化作用を伴わない変質帯のセリサイトのデータが現在十分揃っていません。地質調査所では現在この研究を始めようとしており、近い将来皆様に新たな指標を提供できるかもしれません。

### おわりに

このシリーズで書いたことの骨子はまだ研究途上で論文として公表していないアイデアを多く含んでいます。それらは善意に解釈すれば研究現場での最先端の

考えということになりますが、十分に実証されていないそら話とも言えます。これまでの鉱床学の研究では、既に開発された鉱床の成因研究が中心で、その成果が学会で認められ、次の探査に役立てられるまではかなりの時間を要してきました。この時間を縮めるべくあえて研究途上のアイデアをここに書かせて頂きました。1年間にわたりご愛読ありがとうございました。

### 引用文献

- Hedenquist, J.W., Arribas, A.Jr., and Reynolds, T.J., 1998, Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system : Far Southeast-Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, v. 93, p. 373-404.
- 内藤一樹・須藤定久, 1999, モンゴル・エルデネット鉱山を訪ねて. *地質ニュース*, 534号, p. 19-30.
- Zhao, X., Coe, R.S., Zhou, Y., Wo, H., and Wang, J., 1990, New paleomagnetic results from northern China: collision and suturing with Siberia and Kazakhstan. *Tectonophysics*, v. 181, p. 43-81.