

豊羽鉱床とプレート・テクトニクス

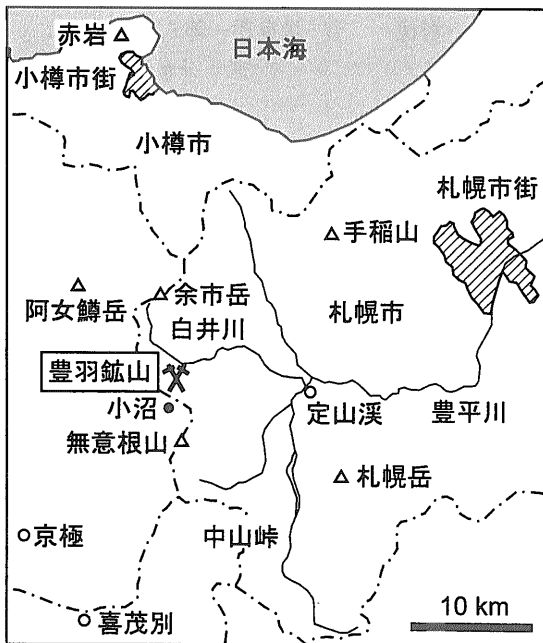
渡辺 寧¹⁾

1. はじめに

私が地質調査所に採用されたのは今から16年前の1985年のことです。当時の配属先である北海道支所鉱床課は課長1人、課員1人の最小限の人員でした。予算も年間20万円程度の経常研究費しかなかったため、北海道内といえどもおいそれとは出張できない有様でした。鉱床学について何の知識もなかった私は、配属になった6月以降、さしたる目的もなく豊平川沿いのルートマッピングを始めました。札幌市内なら日帰りで調査できるからです。朝8時半に庁舎を出て、2,000分の1のスケールでルートマップを作り、夕方5時頃に帰庁し、夜は課

長とともにススキノに出勤するという生活でした。

学生時代に堆積岩を見慣れていた私は、来る日も来る日もプロピライト変質を受けた安山岩類を見る羽目になりました。そしてついにその年の9月に豊平川支流の白井川源流部にたどり着きました(第1図)。そこでは安山岩溶岩の中に幅数cmから10cmの方鉛鉱と閃亜鉛鉱を含む石英脈が多数含まれていました。珍しいものを見つけて、喜んでスケッチし、サンプルを取り、川から上がろうとすると、巨大なコンクリートの壁が待ち構えていました。豊羽鉱山にたどり着いていたのです。それまで豊羽鉱山が白井川の上流にあることは知っていても、沢の中ばかりを歩いてきた私は、自分の見ている岩石が鉱床とどういう関係にあるか気にもしていませんでした。その時に受けた「どうしてこんな平凡な地層の中に金属元素に富む鉱脈が突然現れるのか」という印象は未だに強く残っています。私はこの最初の体験のために「なぜここに鉱床があるのか?」という問題に興味を持つようになりました。



第1図 豊羽鉱山位置図。

2. 豊羽鉱床の特徴

さて札幌市の片隅にあるこの豊羽鉱床(第1図)は、日本を代表する鉛・亜鉛鉱脈鉱床で、金属生産量(亜鉛1,800,000トン、鉛490,000トン; Ohta, 2001)ではスカルン型の神岡鉱床と日本一二を競っています。銀の生産量(3,000トン)では紛れもなく日本一です。しかしながら、この鉱床が世界的な鉱床であることを知っている人はそれほど多くはないのではないのでしょうか。この鉱床の特徴は、鉱石中にインジウムを多く含むことです。インジウムについては世界生産・埋蔵量の正確なデータベースはありませんが、埋蔵量、生産量ともに世界一である

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: 豊羽鉱床, プレートテクトニクス, 西南北海道, 応力場, マグマ-熱水系, 無意根火山

ことは間違いなく、この鉱山から生産されるインジウムのおかげで、日本は世界の中でトップクラスのインジウム生産国・消費国となっています(資源エネルギー庁, 2000)。インジウムは、かつてはメッキや合金の材料として使われてきましたが、酸化物になると透明性と導電性があるため、現在ではパソコンやテレビの液晶ディスプレイなど先端産業にも使われています。

豊羽鉱床の鉱石からインジウムが発見されたのはそう古いことではありません。豊羽鉱床はもともと典型的な方鉛鉱と閃亜鉛鉱を主体とする浅熱水性鉱脈鉱床で、銀を伴うことで知られていました。ところが鉱床の開発が南東方向に進んで行くにつれて、様々な鉱物が発見されるようになりました。豊羽の鉱石から初めて錫鉱物を発見したのは、私の課長であった矢島さんで(矢島, 1977)、「豊羽鉱」という錫を含む新鉱物($\text{Ag}_2\text{FeSn}_3\text{S}_8$)を記載しています(Yajima *et al.*, 1991)。錫の発見に続いて、インジウム鉱物の存在が太田さんにより報告されました(太田, 1980)。錫・インジウムとともに黄銅鉱の卓越する部分の発見(吉江ほか, 1986)、タングステン、コバルト、ニッケル、ビスマス、セレン、テルル、ガリウム、バナジウム鉱物の発見により、豊羽鉱床は単なる鉛・亜鉛鉱床ではなく、多金属鉱床の性格を持つことが明らかにされました(Ohta, 1991)。

また鉱化作用をもたらした熱水の温度も、流体包有物の充填温度の検討から約200-300℃と見積もられていましたが(Yajima and Ohta, 1979)、鉱床の南部では鉱石鉱物の組み合わせと化学組成より、最高で350-400℃の温度に達していたことが推定されており(Ohta, 1991)、普通の浅熱水性鉱床の枠には収まらない鉱床であることも判明しました。

もう一つの大きな特徴は鉱化作用が鮮新世～更新世という地質学的に若い時期に、しかも250万年という長期間にわたって起こっていることです(Sawai *et al.*, 1989)。坑内に入られた方は身をもって経験されたと思いますが、鉱床の南東部では未だに岩盤温度が200℃に達しようかという熱さです。この長期間にわたる鉱化作用のおかげで、豊羽鉱床は非常に複雑な形成史をもつに至り、プレート・テクトニクスのダイナミズムを肌で感じるのできる鉱床となったわけです。

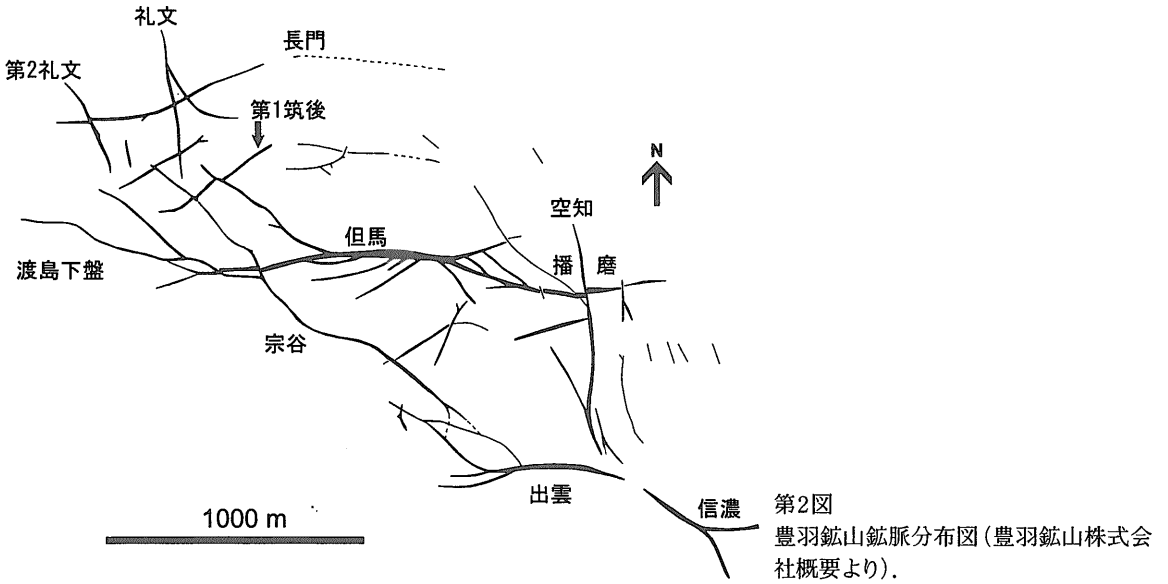
3. 豊羽鉱床の裂かの形成機構

豊羽鉱床の鉱脈は東西、北西-南東、南北等の走向を示す断層中に胚胎しています(第2図)。鉱脈の形成時期は前期と後期の2期に分けられ、後期の鉱脈が前期の鉱脈を切って変位させています(阿古目・原口, 1967)。この断層系がどのようにして形成したかについては、次の3つの考えが提案されていました。

- ①右横ずれ断層モデル：北西-南東方向の鉱脈群が東西方向に雁行配列することから、これらの裂かは東西方向の右横ずれ断層運動により形成された(阿古目・原口, 1967)。
- ②マグマ貫入モデル：豊羽鉱床を含むこの地域の鉱床は、定山溪に分布する石英斑岩を中心とし、貫入岩の近傍に銅・鉛・亜鉛鉱床が、その外側に金・銀鉱床が分布する。豊羽鉱床の鉱脈はこの石英斑岩が貫入した際にできた割れ目に胚胎した(岡部・番場, 1976)。
- ③地域的陥没モデル：豊羽鉱床近傍に分布する中新世の流紋岩や安山岩が貫入・噴出した際に、鉱床地域の隆起や陥没運動が繰り返され、その時にできた正断層に、後に熱水が流れ鉱脈となった(宮島ほか, 1971; 桑原ほか, 1983)。

私はこれらのモデルを再検討し、豊羽鉱床の鉱脈群は右横ずれ断層がステップオーバーする一種のプル・アパート堆積盆(写真1)に形成されたと考えました。この説では、断層に沿っての右横ずれ変位と正断層変位が同時に説明できます。そして、この右横ずれ運動は、太平洋プレートが千島弧に対して斜めに沈み込んだために生じ、鮮新世にその断層運動が東北日本弧の延長である西南北海道にまで及んだためと考えました(Watanabe, 1990a)。豊羽鉱床が日本で最大の鉛・亜鉛鉱脈鉱床になったのは、まさにこの断層帯に位置したためです。しかしこのアイデアでは、なぜ鉱化作用が前期と後期の2時期に分けられ、それぞれ異なる性質の鉱脈を形成したかを説明しません。

その頃、札幌市内の主要な沢を調査し終えた私は、やはり日帰りで札幌近郊の山の調査をしていました。一日のうちに神威岳と空沼岳の2つの山に登り、山頂に露出する安山岩の採取をしたこともあり



ます。それらの試料の年代測定をしたところ、面白いことがわかりました。札幌周辺地域では鮮新世から第四紀に安山岩質火山が北西-南東方向に火山列を形成しており、年代によって微妙にその角度が変わることです。この火山列や岩脈の年代による方向の変化はハワイ海山列の方向のゆらぎ (Jackson *et al.*, 1975) とほぼ一致します (第3図; 渡辺, 1993a, b)。このことは、太平洋プレートの移動方向の変化に対応して、西南北海道では水平面内の圧縮応力軸の方位が変化し、マグマを地表に供給した岩脈の方向が変化したことを示唆しま

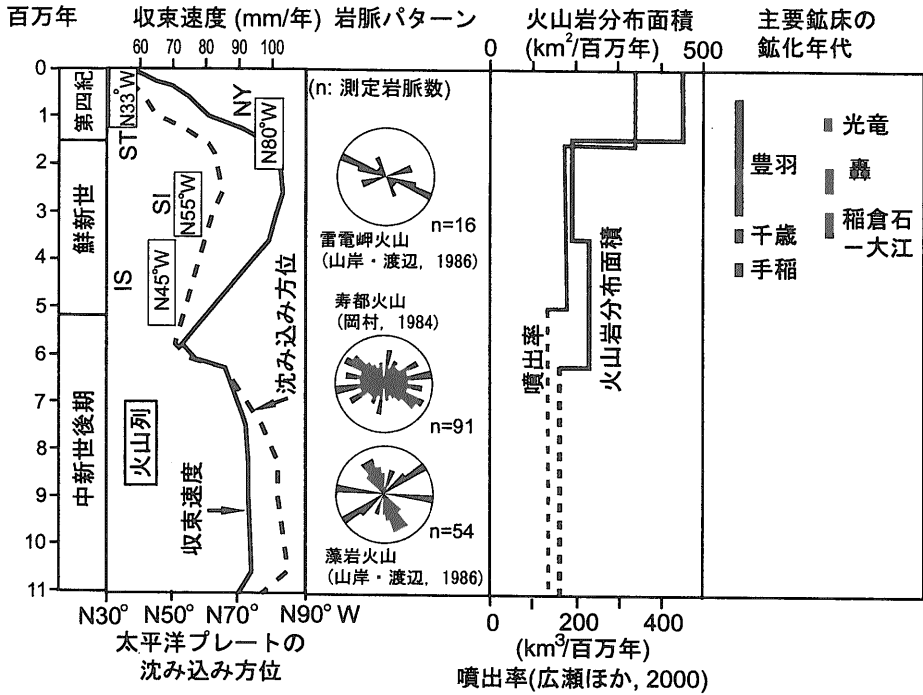
す。これによると約3~1.5MaにはN60~80° W方向の水平圧縮主応力が約1.2MaにはN30° W方向に変化していたこととなります。

豊羽鉾床の代表的前期脈である但馬・播磨ひが2.9-1.6Maに、代表的後期脈の出雲ひが1.8-0.5Maに形成されていること (Sawai *et al.*, 1989) と、それぞれの鉾脈に認められる横ずれ変位のセンスから、豊羽鉾床の前期脈・後期脈を胚胎する裂かひは、それぞれの形成時期の広域応力場に対応するN60° W, N30° Wの水平方向の最大圧縮主応力場で形成されたと考えられます (第4図; Watanabe and Ohta, 1995)。

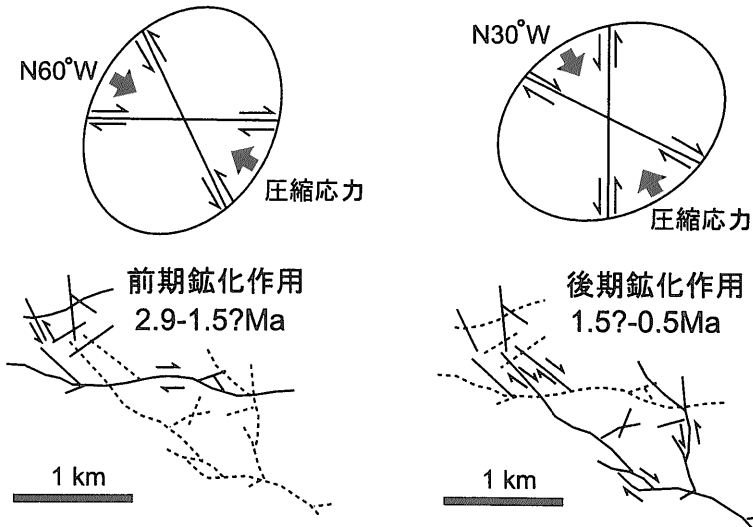
この結果は鉾脈鉾床の形成に関して重要な示唆を含んでいます。豊羽鉾床の後期の鉾液は、過去(前期)に形成された岩盤の割れ目にはほとんど流れておらず、鉾液が上昇する際に活動的な断層のみを通路として利用するという事です。このことは断層の活動(地震)に伴って地下深部から鉾液が供給されるとするSibson (1987)の意見を支持します。こうして豊羽鉾床の鉾脈裂かひの成因はひとまず解決したように見えます。しかしながら、なぜ豊羽鉾床の前期と後期の鉾化作用で鉾液から沈澱する金属元素の種類が変わったのか、なぜ世界最大級のインジウム鉾床になり得たのか、という難問が残っています。



写真1 右横ずれ断層に伴うプル・アパートの例(米国サンアンドレアス断層系)。プル・アパート部では主断層の右横ずれ変位に伴い空隙が形成され、中心部が陥没している。



第3図 推定される太平洋プレートの沈み込みの方向および島弧直交方向での収束速度、札幌周辺地域での火山列の方位、火山噴出物の量、複成火山の岩脈方位分布、主要鉱床の形成時期(Watanabe, 投稿中)。火山列の名称はIS:石倉山-島松山, SI:積丹岳-漁岳, NY:ニセコ-羊蹄, ST:札幌岳-樽前山(渡辺, 1993b)。火山岩の噴出率の見積もりは西北海道全体について求められたもので(広瀬ほか, 2000), 鮮新世を一括している。火山岩分布面積は札幌-岩内地域について計算したもので(Watanabe, 投稿中)で両者の拳動はほぼ一致している。中新世後期の火山岩については、鮮新世, 第四紀の火山岩に広く覆われているため、いずれの計算においても実際の噴出率よりもかなり小さく見積もられている。



第4図

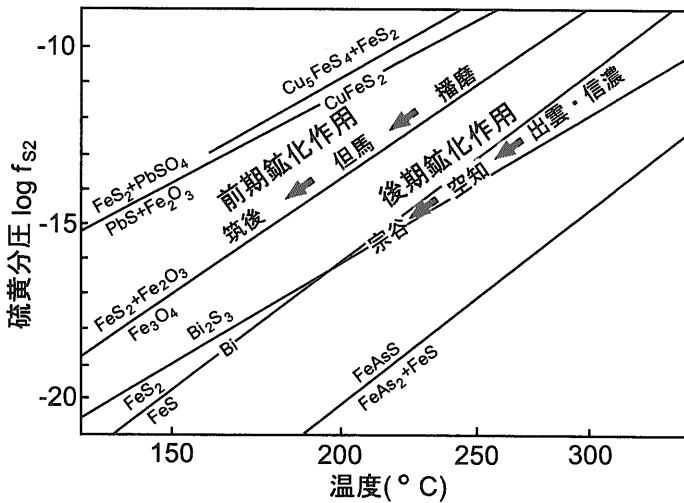
N60°W, N30°W方向の圧縮応力の下で形成される横ずれ断層(上)と豊羽鉱床での前期・後期鉱化作用の生じた鉱脈系(太線)と横ずれのセンス(下)。Watanabe and Ohta (1995) 原図。

4. 豊羽鉱床の前期・後期鉱化作用

豊羽鉱床の鉱化作用が前期と後期に分けられることは、鉱脈同士の切断関係からわかっていましたが(阿古目・原口, 1967)、鉱化作用の性質も大きく異なることを明らかにしたのは矢島・太田両氏の一連の研究です(Yajima and Ohta, 1979; 太田, 1980; Ohta, 1991)。前期に形成された鉱石鉱物は閃亜鉛鉱・方鉛鉱・黄鉄鉱・赤鉄鉱・菱マンガン鉱ですが、後期にはこれらに加えて、磁硫鉄鉱・黄銅鉱・硫砒鉄鉱・錫石・黄錫鉱・コバルト鉱物・ビ

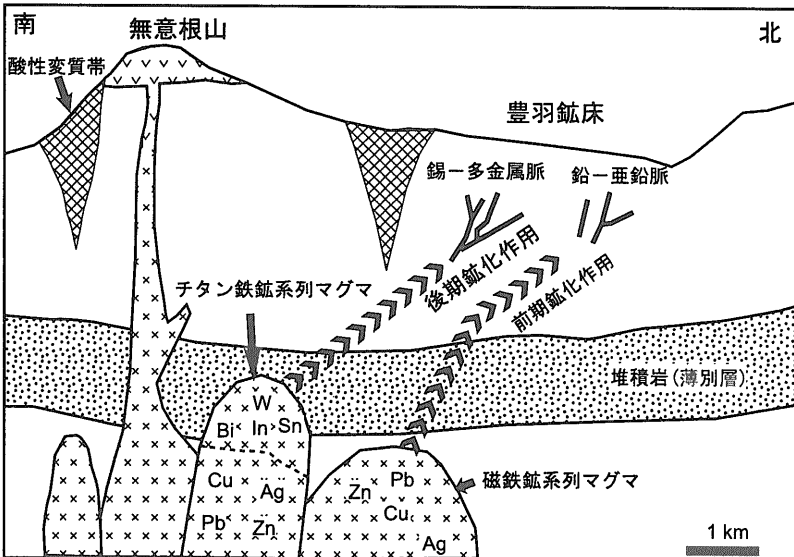
スマス鉱物・砒四面銅鉱・四面銅鉱・銀硫塩物等が認められます(Ohta, 1991)。インジウム鉱物や稀土類鉱物も後期の鉱石に含まれます。

鉱石鉱物の共生関係から、前期の鉱液は後期に比べてより硫黄分圧が高く、磁鉄鉱系列の花崗岩類、後期の鉱液はチタン鉄鉱系列の花崗岩類を起源とする鉱液の組成変化に対応することが明らかにされました(第5図; Ohta, 1991)。このことは、前期はより酸化的、後期はより還元的な熱水から鉱石鉱物が沈澱したことを意味します。Ohta (1991)によると、磁鉄鉱系列の花崗岩質マグマが



第5図 温度-硫黄分圧相関図(Ohta, 1991原図).

無意根山下部に貫入し、前期鉱化作用を引き起こしましたが、後期に貫入した花崗岩質マグマは、貫入深度がより浅く、豊羽地域に広く分布する砂岩・泥岩層(薄別層)を取り込んだため還元され、部分的にチタン鉄鉱系列の組成を持つようになったと推定しています。後期鉱化作用を特徴づける錫は、還元されたマグマに濃集することから、局所的に形成されたチタン鉄鉱系列のマグマから分別した熱水に錫やインジウムが濃集し、この熱水が天水と混合する場で、鉱石を沈澱したと推定されています(第6図)。



第6図 無意根-豊羽火山熱水系断面図 (Ohta, 1995を改変)。

5. マグマ-熱水系の中の豊羽鉱床

その後、私はつくばに転勤し、札幌市内を日帰り調査する事もなくなったため、しばらく豊羽鉱床の研究から遠ざかっていました。ところが、1995年に金属鉱業事業団の依頼で倶知安町近くの熱水変質帯の調査をしていた時のことです。夕方宿に帰って食事していると、テレビのローカルニュースで、京極町のある沼にイワナが大量に生息しているとの報道していました。この放送では釣り人が殺してしまうのを避けるために詳しい場所は知らされませんでした。早速手持ちの地形図で位置を調べました。そしてこの沼に相当する場所は恐らく無意根山(写真2；第1図)西方の小沼に違いないと見当をつけました。

それからしばらくこの沼が気になっていました。というのは豊羽鉱床の鉱化開始の時期が無意根山溶岩の噴出年代とほぼ一致することから、無意根山を形成した安山岩マグマ活動が豊羽鉱床の鉱化作用をもたらしたと論文で書いていたからです(Watanabe, 1990b)。無意根山の火山体やそれに伴う熱水系を正確に復元できれば、これまで単体として扱われてきた豊羽鉱床の鉱化作用をより大きな火山の活動史(マグマ-熱水系)の中で位置付けられます。ひょっとすると前期と後期の鉱化作用がなぜ起こったのか、もっとうまく説明できるかもしれません。

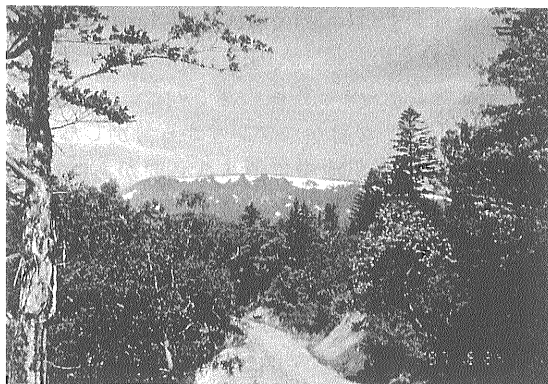


写真2 札幌市最高峰(標高1,461m)無意根山(東方から望む)。火山体は後の山体崩壊により、成層火山の形態を示さない。

その年の秋にこの小沼を訪ねてみました。この沼は無意根山溶岩の西端にあり、円形に近い形態をしていました(写真3)。魚影は既にありませんでしたが、湖の周辺には火山岩片からなる湖成堆積物が分布していました。これを見て私は胸を躍らせました。これは火山の爆裂孔に違いなく、小さなカルデラ湖があった証拠になるからです。注意深く沼の縁を調査したところ、安山岩溶岩が熱水変質を蒙り白色化した部分があり、明礬石やクリストバライト、カオリナイトからなる変質岩に黄鉄鉱・辰砂が鉱染しているのが見つかりました。まぎれもなく蒸気が上昇した通路です。そして地形図に調査地点の場所を書きこんで改めて驚きました。この小沼は札幌市から見ると無意根山の反対側にあり、ここに到達するには中山峠を越え、車で2-3時間もかかるのですが、豊羽鉱床の南端から水平距離で2-3kmしか離れていないからです。地質調査所に帰り、早速このことを報告し、翌年からは大掛かりな調査隊が組織されました。資源エネルギー庁鉱業課、金属鉱業事業団の賛同もあり、鉱床探査プロジェクト選定調査の一部「北海道南部地域無意根山地区」として立ち上がることとなったのです(通商産業省, 1997, 1998)。

その後の調査で、小沼と同様の酸性変質帯は無意根山の西側だけでなく、東側、北側にも発見され(写真4；第7図a)、またその外側には地すべりを伴うスメクタイト変質帯が広がっていることが確認されました(通商産業省, 1998)。岩石、変質岩の鉱物組成・化学組成、流体包有物、安定同位

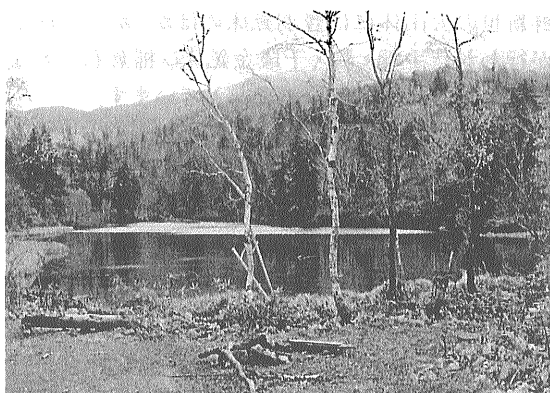


写真3 小沼：無意根火山西側に形成された熱水爆裂口。



写真4 無意根山の東側に広がる酸性変質帯。クリストバライト・ディッカイトからなる。

体、年代のデータも蓄積されてきました。これらをもとに、太田さんや私は豊羽鉱床南東側の地熱地帯～無意根山の下部にマグマの貫入があり、そこから蒸気は直上に上昇して酸性変質帯を作り、鉱液は北方に流れ鉱化作用を起こしたというモデルを現在考えています(第6図)。

6. 火山活動・広域応力場と鉱化作用

西南北海道の札幌から岩内にかけての地域には、数多くの安山岩からなる火山が分布し、熱水性鉱床が火山体の近傍に伴われています(渡辺, 2000)。しかし、その中でも経済的に採掘された鉱床は一握りしかありません。特に中新世後期には多くの火山が形成されているにもかかわらず、それらの火山には経済的に採掘できる規模と品位を持った鉱床は全くと言っていいほどありません。一方、鮮新世の火山体には豊羽鉱床のほか、かつて採掘が行われた手稲・轟・千歳金鉱床、稻倉石・大江マンガン-鉛-亜鉛鉱床が伴われています。

この違いは何に起因するのでしょうか？一つの鍵は火山活動と鉱化作用の時間的關係にあるように思えます。豊羽鉱床のように経済的な鉱床を含むマグマ-熱水系では、火山活動と鉱化作用の時期にずれが見られます(第7図b)。阿女嶺岳火山に伴われる轟鉱床や天狗岳火山に伴われる稻倉石-大江鉱床は、いずれも火山岩噴出後50万年～100万年後にまで鉱化作用が続いています。手稲火山では、奥手稲火山と手稲火山での溶岩の噴出の合間に手稲鉱床の鉱化作用が起こっています。

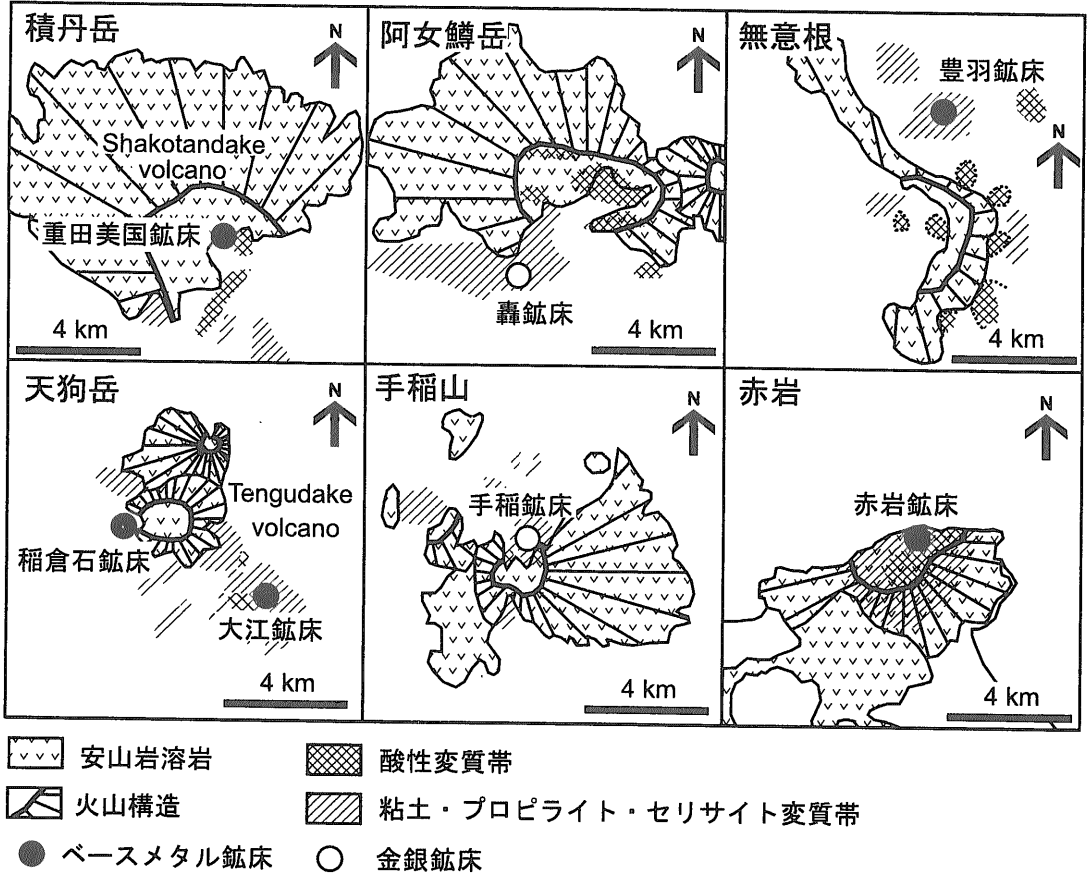
そして、無意根火山では、溶岩噴出後250万年の長期にわたり豊羽での鉱化熱水作用が続いています(第7図b)。一方、小樽にある赤岩火山(第1図)や積丹半島突端の積丹岳火山では、溶岩の噴出と鉱化-熱水活動がほぼ同時期に生じていますが、これらの火山に伴う鉱徴地は採掘するに足る鉱石の量・品位がありません。

Jeff Hedenquist氏によるニュージーランドの安山岩質活火山、ホワイト島の研究は、非経済的なマグマ-熱水系がどうして形成するのかの手がかりを与えてくれます。ホワイト島の中央火口から放出される高温(>850℃)の噴気に含まれるアエルゾルには、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ことが明らかになっています(Hedenquist *et al.*, 1993; 第8図)。この噴気活動は少なくとも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36トンの金が空中に放出された計算になります。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。一方、ホワイト島で温泉水により運搬され沈澱した銅量は1万年あたり2万トンと見積もられています(Hedenquist *et al.*, 1993)。これはこの火山から空中に放出された銅量と比べると桁違いに少ない量です。

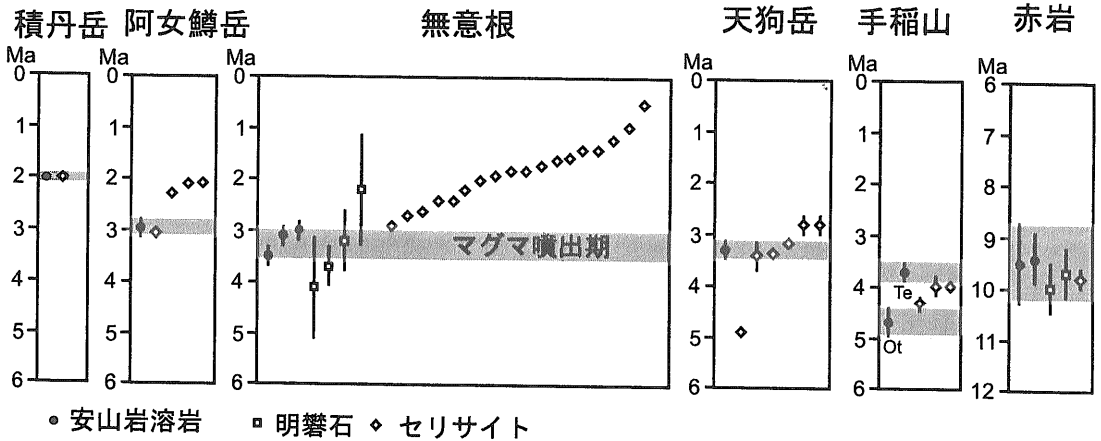
ホワイト島では、マグマが地表から1kmよりも浅い深度にまで上がってきているために、高温の金属元素に富む蒸気が直接空中に放出されています(第8図)、鉱床を作るためには、この蒸気が地下を循環している天水に吸収され、鉱化溶液を作る必要があります(Hedenquist and Lowenstern, 1994)。そのためには、火山体下部に上昇してきたマグマは地表からある程度の深さのところ(2-3km以深)で留まり、なおかつマグマから分別した金属元素を含む熱水が地中に留まる必要があります。マグマが地表に噴出するような環境では、鉱床の形成を望むべくもありません。このため溶岩の噴出時期とほぼ同時に形成された鉱化-熱水系に経済的な鉱床が伴わないと思われる。それではどういう条件の時にマグマは適切な深度に貫入してくれるのでしょうか？

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

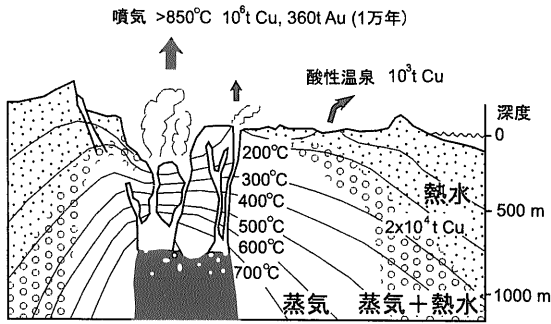
a.



b.



第7図 札幌-岩内地域の安山岩質火山と熱水鉱床。a. 安山岩火山と熱水鉱床・変質帯の位置関係図(渡辺, 2000 原図)。無意根山周辺の点線の囲みは熱水爆裂口の位置を示す。b. 溶岩と鉱化作用に伴う熱水変質鉱物の年代(Watanabe, 投稿中)。Ot: 奥手稲火山。Te: 手稲火山。



第8図 ホワイト島の火山熱水系の模式断面図(渡辺, 1998).

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。

札幌周辺地域では、このテクトニック応力の大きさは太平洋プレートと東北日本弧とのプレートの収束速度に関係していると考えています。中新世後期にはこの収束速度は90-100mm/年であったのが、鮮新世には100mm/年よりも大きくなっています(第3図)。中新世後期には安山岩複成火山に伴われる岩脈はほぼ放射状に分布するのに対し、鮮新世のものは西北西-東南東方向に卓越しています。このことは島弧直交方向の水平応力が鮮新世に相対的に強まったことを示します。またプレート収束速度の最も大きくなった時期(3.6-1.5Ma)には火山噴出物の量(ここでは火山岩分布面積で代用します)が低下する傾向が見られます。これらのことはプレート収束速度のわずかな増加に伴い、鮮新世に応力場がより圧縮的になったことを示唆します。それに伴い、地殻浅部に上昇してきたマグマが噴出することなく貫入岩となり、熱水を周囲の岩石の割れ目に沿って放出する機会が増えたと考えられます。

一方、島弧横断方向と島弧に平行な方向での応力の差が大きくなることにより、鉱脈形成の場となる横ずれ断層が中新世後期に比べ形成しやすくなったと考えられます。鮮新世に経済的な鉱脈鉱床が集中して形成されたことは(第3図)、この応力場の変化に良く対応しており、その中でも豊羽鉱床は最も成功したものであると言えます。鮮新世の末

期から島弧直交方向のプレート収束速度は急激に減少しており、このことが豊羽鉱床での前期と後期の鉱化作用をもたらしたマグマの貫入深度に影響を与え、結果として鉱化作用の性質を大きく変えることになったのかもしれません。

7. おわりに

これまで私を含めて多くの人が広大な熱水変質帯を見て、優勢な鉱床発見の期待に胸を躍らせ、結果的には苦渋を味わってきました。しかし、あたり前のことですが、すべてのマグマ-熱水系に鉱床が伴われる訳ではありません。一つの金属鉱床の形成も深くプレートテクトニクスに関連しており、沈み込むプレートの微妙な角度や収束速度の変化により、経済的な鉱床が形成されたり、されなかったりします。火山帯でのテクトニクスをきちんと理解すれば、どのマグマ-熱水系に経済的な鉱床が伴われるのか前もって予想をたてるのが可能となり、鉱床探査の効率を向上させることが出来ることでしょう。

謝辞: 産総研須藤定久博士には日本の鉱床の金属生産量について教えていただき、清水日奈子さんには一部の図面を作成して頂きました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 阿古目邦夫・原口正敏(1967): 豊羽鉱山における裂かたと鉱化作用の特長について。鉱山地質, v. 17, p. 93-100.
- 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. 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 Eldrige, 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.
- 広瀬 且・岩崎深雪・中川光弘(2000): 北海道中央部～西部の新第三紀火成活動の変遷: K-Ar年代, 火山活動様式および全岩化学組成から見た東北日本弧北端の島弧火成活動の変遷。地質

- 学雑誌, v. 106, p. 120-135.
- Jackson, E. D., Shaw, H. R. and Barger, K. E. (1975) : Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 26, p. 145-155.
- 桑原利夫・宮崎敏男・谷藤吉郎・飯田幸平 (1983) : 豊羽鉛山本山鉛床地域の地質構造と品位・金属量分布から見た鉛化作用の特性. *鉛山地質*, v. 33, p. 115-129.
- 宮島建久・秤 信男・喜多正弘 (1971) : 豊羽鉛山の地質構造と裂か生成機構に関する最近の考え方. *鉛山地質*, v. 21, p. 22-35.
- 岡部賢二・番場猛夫 (1976) : 豊羽鉛山のプロピライトとその鉛化変質. *鉛山地質*, v. 26, p. 239-251.
- 太田英順 (1980) : 豊羽鉛山出雲ひと空知ひの鉛化作用. *地質調査所月報*, v. 31, p. 585-597.
- Ohta, E. (1991) : Polymetallic mineralization at the Toyoha Mine, Hokkaido, Japan. *Mining Geol.*, v. 41, p. 279-295.
- Ohta, E. (1995) : Common features of genesis of tin-polymetallic veins. *Resource Geol., Spec. Issue*, no. 18, p. 187-195.
- Ohta, E. (2001) : Geological environment and mechanism of the high-grade ore deposition at the Toyoha mine, Hokkaido, Japan. *Mineralium Deposita* (in press).
- 岡村 聡 (1984) : 西南北海道寿都半島における新第三系と火山活動. *地質学雑誌*, v. 90, p. 383-391.
- Sawai, O., Okada, T. and Itaya, T. (1989) : K-Ar ages of sericite in hydrothermally altered rocks around the Toyoha deposits, Hokkaido, Japan. *Mining Geol.*, v. 39, p. 191-204.
- 資源エネルギー庁 (2000) : 鉛業便覧平成12年度版. 通商産業調査会出版部.
- 通商産業省 (1997) : 平成8年度広域地質構造調査報告書 鉛床探査プロジェクト選定調査. 155p.
- 通商産業省 (1998) : 平成9年度広域地質構造調査報告書 鉛床探査プロジェクト選定調査. 108p.
- Sibson, R. H. (1987) : Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. *Geology*, v. 15, p. 701-704.
- Watanabe, Y. (1990a) : Pull-apart vein system of the Toyoha deposit, the most productive Ag-Pb-Zn vein-type deposit in Japan. *Mining Geol.*, v. 40, p. 269-278.
- Watanabe, Y. (1990b) : Pliocene to Pleistocene volcanism and related vein-type mineralization in Sapporo-Iwanai district, southwest Hokkaido, Japan. *Mining Geol.*, v. 40, p. 289-298.
- 渡辺 寧 (1993a) : 岩脈・火口配列に基づく西南北海道北部の新生代後期の応力場. *地質学雑誌*, v. 99, p. 105-116.
- 渡辺 寧 (1993b) : 西南北海道北部の火山列—ニセコ—羊蹄火山列はなぜ曲がったのか?—. 石井次郎教授追悼論文集, p. 147-154.
- 渡辺 寧 (1998) : 鉛床探査家のためのポーフィリー鉛床学 (6). *ぼなんぞ*, 276号, p. 28-32.
- 渡辺 寧 (2000) : 札幌—岩内地域のマグマ—鉛化熱水系分布図. 特殊地質図38. 地質調査所.
- Watanabe, Y. (投稿中) : Late Cenozoic metallogeny in southwest Hokkaido, Japan: Successful polymetallic vein-type mineralization during intensified, highly-differential regional stress event. *Resource Geology*.
- Watanabe, Y. and Ohta, E. (1995) : The relation of two-stage mineralization at the Ag-Pb-Zn Toyoha deposit, southwest Hokkaido, to subduction of the Pacific plate. *Resource Geol., Spec. Issue*, no. 18, p. 197-202.
- 矢島淳吉 (1977) : 豊羽鉛山出雲樋における錫鉛物の産状—豊羽鉛山産鉛石鉛物の研究 (その1)—. *鉛山地質*, v. 27, p. 23-30.
- Yajima, J. and Ohta, E. (1979) : Two-stage mineralization and formation process of the Toyoha deposits, Hokkaido, Japan. *Mining Geol.*, v. 29, p. 291-306.
- Yajima, J., Ohta, E. and Kanazawa, Y. (1991) : Toyohaite, $Ag_2FeSn_3S_8$, a new mineral. *Mineral. Jour.*, v. 15, p. 222-232.
- 山岸宏光・渡辺 寧 (1986) : 西南北海道における新生代後期の応力場の変遷—地質断層, 岩脈, 鉛脈および活断層の検討—. *地団研専報*, no. 31, p. 321-331.
- 吉江 隆・成井英一・加藤金良 (1986) : 豊羽鉛床の生成過程と微量有価成分の分布. *鉛山地質*, v. 36, p. 179-193.

WATANABE Yasushi (2001) : The Toyoha deposit and plate tectonics.

< 受付 : 2001年6月8日 >