

## マ グ マ 性 鉱 床 の 造 構 造 と 特 徴

堀 越 勲\*

## Tectonics and Characteristics of Magmatic Ore Deposits

EI HORIKOSHI

## Abstract

The formation of volcanic ore deposits is related to tectonic stress change of the crust. Ridge-type deposits are formed mainly in spreading centers either at oceanic ridges or on marginal basins. The timing of their formation appears to coincide with the time when the spreading center is going to subduct or its activity is turning to decline. In both cases the porosity of the oceanic crust would decrease to expell metalliferous brines. Front-type deposits are genetically related to volcanism at continental margins not associated with marginal basins. There appears to be no significant mineralization belonging to this type except for native sulfur-pyrite deposits in Japan. Marginal sea-type deposits including Kuroko-type deposits are suggested to be formed at the time when extensional tectonics resulting in the opening of marginal sea is replaced by compressional tectonics, under which the front-type volcanism is active. The metallogenic process is similar to that of ridge-type deposits.

So-called granitic magma responsible for the formation of plutonic-type ore deposits starts to ascend through the hydrostatic crust as a result of decrease in the plate subduction rate. The metallogenic epoch of these deposits may depend on magmatic processes rather than tectonic stress change. These deposits differ from the volcanic-type deposits in such features as their distribution, zonal arrangement of ore provinces parallel to the trench, long-lasting mineralization, and lateral zoning of ore minerals within a certain area.

Shock-type magmatism refers to those magmatic activities triggered by meteorite impact. The deposits related to it might have predominated in the age of pre-plate tectonics, probably before 2,000 m.y. ago.

## 要 旨

火山性鉱床の生成には地殻の造構造の転換が大きく作用している。海嶺型鉱床は大洋・縁海の拡大中心付近で生成する。中央海嶺の伸張場にたくわえられた熱水が、海嶺の海溝への沈み込み、活動の停滞などに起因する圧縮場の影響を受けて追い出されることが原因となる。このような造構造の転換はマグマの分化を促進するらしい。別子型鉱床は海嶺型であろう。黒鉱型を含む縁海型鉱床の生成には、プレートの沈み込みに伴う圧縮場での前線型火山活動、縁海を拡大する伸張場での海嶺型火山活動、両方の存在が不可欠である。生成の造構造は海嶺型と類似し、圧縮場による伸張場にたくわえられた熱水

の追い出しである。したがって鉱床は両応力場の境界付近に生成する。縁海の拡大と関係なく生成する前線型鉱床の例は少ない。

深成型マグマはプレートの押しが衰え、圧縮場が弱まってから上昇・活動する。この型の鉱床の生成は、マグマの分化・固結などによって影響される。したがって鉱床は、海溝に平行な帯状分布、長期にわたる鉱化作用など、ほかの型の鉱床にない特徴を示す。

プレート・テクトニクスが有効でなかった時代には、隕石落下による衝撃がマグマ活動を誘発し、鉱床を生成した可能性がある。

## 1. はじめに

鉱床の分類については、今までにも多くの案が出され

\* 東京大学理学部

た。提案された分類は、それぞれに特徴を持っている。一般的な傾向として、あまり複雑な分類は研究者に広く受け入れられていない。最良の分類とは、各鉱床の特徴・成因を簡潔に区分したものであろう。

1970年代に入って、今までの分類とはやや違ったものが発表されるようになった (たとえば: GUILD, 1971; PEREIRA and DIXON, 1971; SAWKINS, 1972; MITCHELL and BELL, 1973)。それは1960年代の初めに唱えられたプレート・テクトニクスが (DIETZ, 1961; Hess, 1962), 60年代も末になってようやく広く理解されるようになり、この観点から鉱床を見直してみようとする気運が高まったことによる。鉱床の分類としては、鉱床生成の地質環境を重んじたドイツ学流の流れをくむと見なすことが出来るかも知れない。しかし地向斜概念の時代と比べると、現代ではマグマの成因についての研究が飛躍的に進歩しているため、プレート・テクトニクスもマグマ発生の造構造 (tectonics) を大幅に組み入れている。ある意味では、地向斜概念が堆積相を重要視したのに対して、プレート・テクトニクスは火成活動を通しての地球の歴史である。

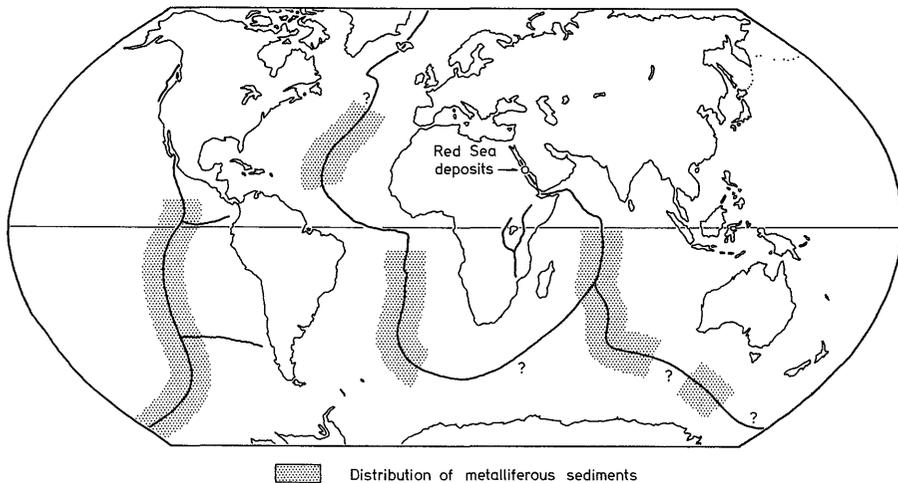
プレート・テクトニクスの基本的な骨組みは、大洋地殻に覆われているプレートは大洋中央海嶺でたえず生産され、その増加分だけ海溝で消費される、という概念である。このようなプレートの水平移動に伴って火成活動が起こり、造山運動と呼ばれる地球上の多くの変動が生じる (DEWEY and BIRD, 1970)。多くのマグマ性鉱床もこ

のような造山運動の産物である。以下の各章では、鉱床生成に関連するマグマ発生の造構造に基づいて鉱床を分類し、それぞれの鉱床の特徴、とくに鉱床生成の造構造を考察することにする。

## 2. 海嶺型鉱床

大洋中央海嶺で大洋地殻を形成するマグマ活動、ならびにこの活動に関連して生成した鉱床を海嶺型と呼ぶ。縁海の大洋地殻は厚さがやや薄いこと (MENARD, 1967)、縞状磁気異常が顕著でないこと (ISEZAKI and UYEDA, 1973)、などによって地球物理的には典型的な大洋地殻から識別できる。しかし、縁海を構成する玄武岩の化学組成は大洋のものと同様であり、識別は不可能である (HART et al., 1972; SCLATER et al., 1972; HAWKINS, 1974)。したがって筆者の海嶺型には、大洋・縁海の両方を含める。

1966年に紅海と東太平洋海嶺の重金属に富む堆積物が相次いで報告されたが (MILLER et al., 1966; BOSTRÖM and PETERSON, 1966)、大洋底に Fe・Mn に富む堆積物があることは前世紀から知られていた。しかし、1969年に DEGENS and ROSS の編集によって紅海の底の重金属に富む堆積物の研究が出版されると、鉱床形成の場としての大洋中央海嶺の名を一挙に高めることになった。調査が進むにつれ、大洋中央海嶺の周辺に重金属に富む堆積物が分布する範囲は著しく広がり、むしろ異常な堆積物が分布していない部分が少なくなることが分かってきた (第 1



第 1 図 大洋中央海嶺における重金属に富む堆積物の分布

主として BONATTI (1975) による。大洋中央海嶺周辺に重金属に富む堆積物が存在しない部分は少ない。しかし、その多くは Fe・Mn であり、蒸発岩との関連が考えられる紅海にだけ Cu・Zn の著しい濃縮が知られている。縁海中央海嶺周辺からはまだ重金属に富む堆積物が知られていない。

図).

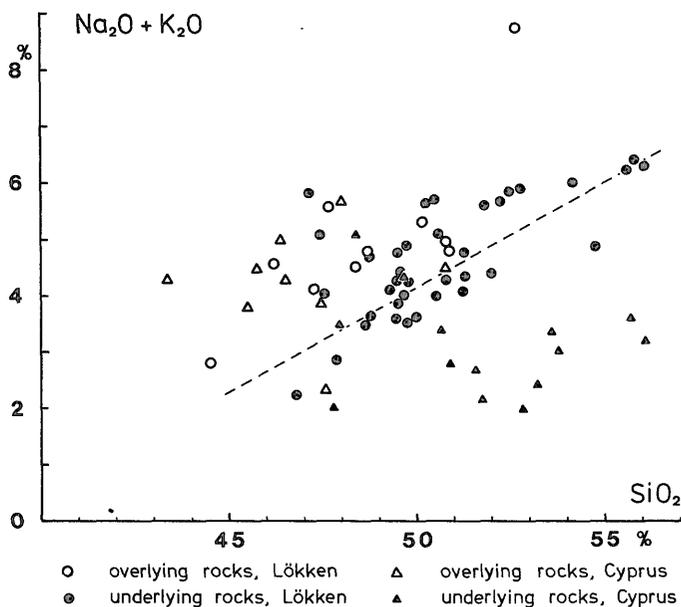
オフィオライト大洋地殻説は, GASS(1968), LAUBSCHER (1969), COLEMAN (1971), DEWEY and BIRD (1971) などの研究によって広く受け入れられるようになった。しかし, オフィオライトと呼ばれる多くは典型的な大洋のものではなく, 縁海の大洋地殻であるらしい (DEWEY and BIRD, 1971)。その根拠には色々ある。

一般にオフィオライトの厚さは現在の大洋地殻と比較すると著しく薄い (HAWKINS, 1974)。この矛盾はオフィオライトが縁海の大洋地殻であるとするで軽減される。オフィオライト玄武岩の化学組成にはかなりの幅がある。これは変質のためだけではないらしい (MIYASHIRO, 1975)。キプロスやレッキン (ノルウェー) の鉱床母岩の例では, 明らかに主要成分の化学組成が上下で変化している (第2図)。微量元素からみると, 海嶺型から島弧の火山岩類へ変化する (GALE and ROBERTS, 1974; PEARCE, 1975)。またオフィオライト生成の地質環境にも, 陸に近かったことを示すものが多い。たとえば安山岩や陸源堆積物に覆われている例があり (DEWEY and BIRD, 1971), 衝上した時代もオフィオライト生成の時代に近いものが多い (DEWEY and BIRD, 1971; PEARCE, 1975)。

このような事実は, オフィオライトの形成が大陸地殻に近い縁海である可能性を強く示唆している。おそらく, 現在の西太平洋に特徴的である縁海は, 地質時代を通じてほかの地域にも形成され, その後海溝から沈み込んで消え失せてしまったのであろう。

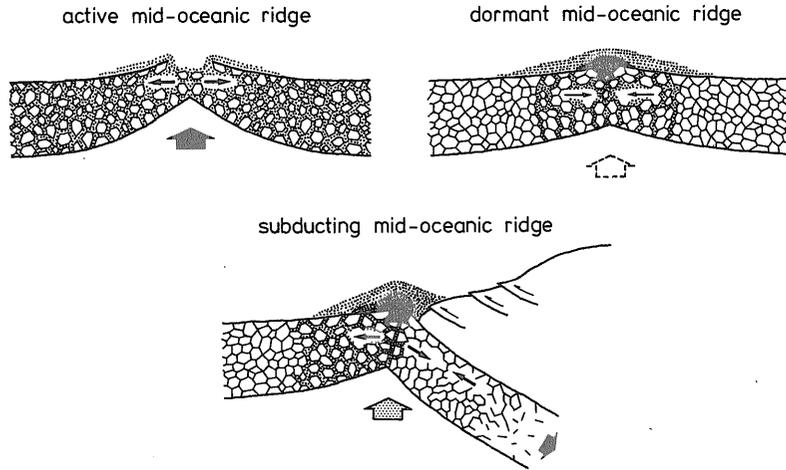
オフィオライト中に大規模な鉱床が存在する例は少ない。その主なものは熱水性堆積鉱床であり, キプロス島鉱床群の比重が著しく高い。キプロス鉱床の主体は下部枕状熔岩上の堆積性黄鉄鉱・黄銅鉱であり, 下部は枕状熔岩中の網状脈に移化する。上部は黒鉱型鉱床の鉄石英に似た堆積物に覆われている (HUTCHINSON and SEARLE, 1971; CONSTANTINOU and GOVETT, 1972; CONSTANTINOU and GOVETT, 1973)。

大洋中央海嶺の火山噴出率 (volcanic production rate) は島弧のそれよりも一桁ほど高い (NAKAMURA, 1974)。しかし, 蒸発岩の影響が考えられる紅海の鉱床のほかには, 大洋中央海嶺にはいまだ鉱床の名に値するものが発見されていない。海嶺型マグマが活動する中央海嶺は伸張場である (KARIG, 1970; 1971; SYKES, 1970; SCLATER et al., 1972)。もしも, この造構造が圧縮場に転換したならば, 地殻の空隙率の減少に伴って熱水が吐き出され,



第2図 キプロス・レッキン鉱床上下盤からの玄武岩の化学組成のアルカリ・シリカ ダイアグラム

鎖線は MacDONALD and KATSURA (1964)。キプロス・レッキンともに鉱床上盤のほうがアルカリに富む。PEARCE (1975) によると, キプロス鉱床下盤の玄武岩は海嶺型, 上盤は前線型である。レッキンも同じであるかも知れない。資料: キプロス, MOORES and VINE (1971), レッキン下盤, GALE (1974), レッキン上盤, 堀越 (未発表)。



第3図 中央海嶺の造構造変化に伴う鉱床生成模式図

中央海嶺の伸張場が圧縮場へ転換することによって空隙率が減少し、熱水が放出され、鉱床が形成されるかも知れない。中央海嶺の活動がなんらかの原因で衰えた場合、また中央海嶺が海溝から沈み込みを始めた場合、そのような応力場の転換が起きるであろう。

黒鉱型の場合のように鉱床が生成するかも知れない(堀越, 1975; HORIKOSHI, in press). 考えられる造構造の転換の最も著しい場合は、中央海嶺の海溝からの沈み込みである(第3図).

海溝から沈み込みつつあるファン・デ・フカ海嶺には、分化の進んだ玄武岩が噴出している(KAY et al., 1970; 堀越, 1971). 定常状態の大洋中央海嶺の下ではマントルが盛り上がっている(TALWANI et al., 1965; MIYASHIRO et al., 1970). 中央海嶺が海溝に近づくにつれマントルが下がり、マグマ溜りの中での晶出分化が急速に進むことが考えられる。キプロス鉱床生成の先駆的火山活動の産物である下部枕状熔岩は変質しており、その化学組成をそのまま厳密な比較に使うことはできない。しかし、全体として  $\text{SiO}_2$ , total  $\text{FeO}/\text{MgO}$  の値が大きく(MIYASHIRO, 1973), 分化の進んだものが多く含まれていることを示している。

海嶺型鉱床は中央海嶺が海溝から沈み込む際に生成したのかも知れない。原因として考えられる要素は造構造の転換に伴う玄武岩の晶出分化の進行と、地殻の空隙率の減少である。とすれば、ファン・デ・フカ海嶺は海嶺型鉱床の生成環境を示している。しかし一般に、大洋地殻が沈み込まずに衝上するのはまれな現象である。したがって、地質時代を通じて海溝から沈み込んで行った海嶺型鉱床、ならびに重金属に富む堆積物の量は、膨大なものであるに違いない。

海嶺型鉱床の生成には、中央海嶺の間けつ的な拡大も原因となりうるかも知れない。拡大の開始と停止に応じ

た伸張場から静水圧場への変化が、地殻の空隙率を減少させ、鉱床を生成するかも知れない(第3図)。しかし、紅海鉱床の生成時期は間氷期の海面上昇に一致している(BIGNELL, 1975). おそらく紅海の場合は、海水の荷重増による地殻の空隙率の減少が、熱水の吐き出しの原因となったのであろう(HORIKOSHI, in press).

### 3. 前線型鉱床

プレートの沈み込みに伴って、島弧や大陸縁で活動するマグマを前線型と名付ける。前線型マグマ活動に関連する鉱床が前線型鉱床である。前線型火山活動では、多くの性質が火山前線に対して非対称である。火山活動の中心は火山前線のすぐ内側に集中し(SUGIMURA, 1960; SUGIMURA et al., 1963), マグマの化学組成は内側に向かって連続的に変化する(KUNO, 1966; DICKINSON and HATHERTON, 1967; DICKINSON, 1968). このようなマグマの化学組成の水平的変化に基づいて、東日本火山帯では火山前線に近い方からソレイト・高アルミナ玄武岩・アルカリかんらん石玄武岩の各帯が識別されている(KUNO, 1960). 前線型火山活動は圧縮場で起きている(中村・宇井, 1975). マグマの上昇には、最大圧縮応力軸に平行な張力割れ目が大きな役割をはたしているのであろう。

日本列島に数多く存在する第四紀自然硫黄鉱床は、陸上火山活動に関連して生成した熱水堆積鉱床である(堀越, 1965; HORIKOSHI, 1976a). 自然硫黄鉱床の分布は、知床硫黄山から東日本火山帯に沿って草津白根山に達している。これらの地域は背後に縁海が発達している。日本

海の拡大を伴った伸張場が及んだおよその範囲は、西黒沢・女川階の玄武岩の分布によって示される (HORIKOSHI, in press). 成因的に縁海の拡大に関連する黒鉱鉱床の分布は (堀越, 1976; HORIKOSHI, in press), 主として玄武岩の分布の東縁線より内側である. しかし, 自然硫黄鉱床はその外側, 火山前線との間に分布している (第4図). この事実は, 自然硫黄鉱床が黒鉱鉱床とは異なる造構造の下に生成したことを示している. 第四紀自然硫黄鉱床は, 縁海の拡大とは関係ない典型的な前線型鉱床であろう.

自然硫黄鉱床の多くは第四紀の生成である. 大鉱床である幌別・松尾鉱山の鉱床は, その生成時期が中でも古いと考えられる (高橋, 1962; 荒金, 1969). これら鉱床

の分布は, ほとんどがソレアイト帯に限られている (村岡, 1954; MUKAIYAMA, 1959). この原因は, 火山噴出物の量が圧倒的に多い, という事だけでは不らしい (ISHIHARA, 1974). また, MUKAIYAMA (1959) は硫黄の鉱化作用にはマグマの混成作用が重要な役割を演じていると主張した. 彼は自然硫黄鉱床の成因を浅所交代鉱床と考えたので, 混成作用と鉱化作用の時期的関係には再検討の余地がある.

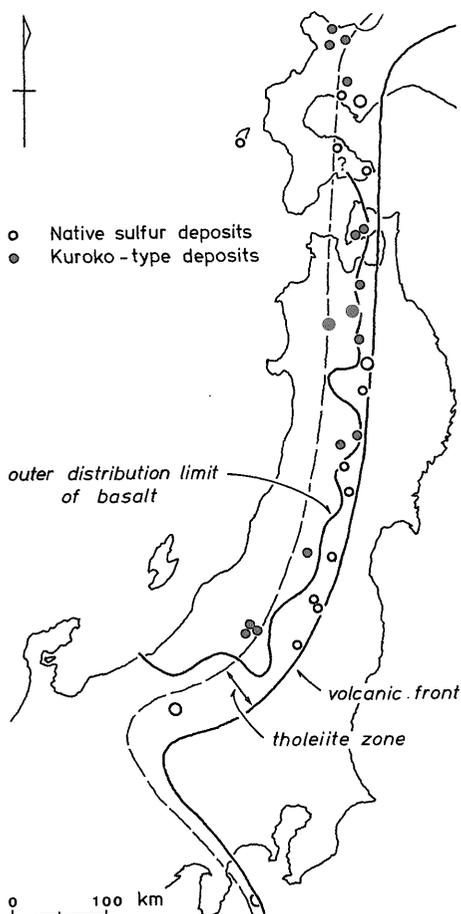
第四紀火山活動の特徴は, 火山噴出率が著しく増加したことである (SUGIMURA et al., 1963; ISHIHARA, 1974; 堀越, 1975). 青木・辛島 (1973) によると, 東北日本弧の火山帯に明瞭なソレアイト帯が表われるのは第四紀の初めである. 世界的に見て, 前線型のソレアイトの噴出はプレートの沈み込み速度が速い地域に限られている (MIYASHIRO, 1972; HORIKOSHI, 1976a). したがって, 日本海溝から沈み込むプレートの速度は, 第四紀の初めに加速された可能性がある. プレートの沈み込み速度の増加は火山噴出率の増大をもたらさうであろう (KENNETT and THUNELL, 1975).

推定されているプレートの沈み込み速度は, ほぼ第三紀を通じての平均値である (LE PICHON, 1968). 第四紀の初めにプレートの沈み込み速度の増加があったとしても, それを確認することは大変困難であるに違いない. 前線型のソレアイトを発生しているプレートの沈み込みの平均速度は, 約 8 cm/y. 以上である (HORIKOSHI, 1976a). もしも, これらのソレアイトが第四紀初めのプレートの沈み込み速度の増加に伴って出現したのなら, ソレアイト・マグマ発生に必要な沈み込み速度は知られている最高速度よりも早く, 約 9 cm/y. 以上であろう.

自然硫黄鉱床の生成には, プレートの沈み込みが加速され, 火山噴出率が増加し, 熱水の循環が増大する, という熱機関的造構造が適用できるかも知れない. 前線型火山活動が行われているカムチャツカ・千島火山帯には, Hg・Sb・As などの硫化物を沈殿している温泉がある (OZEROVA et al., 1971). したがって自然硫黄鉱床のほかにも, これらの元素を濃縮した前線型鉱床は存在するかも知れない.

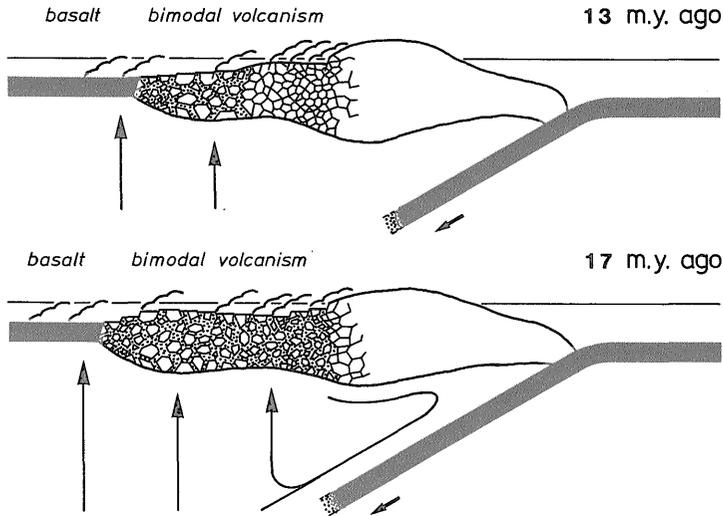
#### 4. 縁海型鉱床

主として東北日本弧に, 西黒沢階末に生成した鉱床群を黒鉱階鉱床と呼ぶ (堀越, 1975). 黒鉱階鉱床の生成は, 日本海を拡大した伸張場にたくわえられた熱水が, 圧縮場の前線型マグマ活動の影響によって一斉に吐き出されたことに原因がある (堀越, 1975; HORIKOSHI in



第4図 自然硫黄・黒鉱鉱床の分布と岩石区

輝石安山岩からなる第四紀火山は, 西黒沢・女川階に玄武岩が活動した地域にはほとんど分布しない. 自然硫黄鉱床は“輝石安山岩区”に, 黒鉱鉱床は“玄武岩区”に分布, しかも両者はソレアイト帯に多いという傾向がある.



第 5 図 黒鉄階鉄床生成の造構造

二元的火山活動で特徴づけられる西黒沢・女川階は、全体としては日本海の拡大に関連した伸張場であったであろう。しかし、西黒沢階末に生成した鉄床、すなわち黒鉄階鉄床は圧縮場の存在を示している。黒鉄階鉄床の生成は伸張場が一時的に圧縮場へ転換し、地殻中の熱水が追い出されたことに原因する。同様な造構造の転換は、船川階中期にも起きた。

press). このような縁海の拡大を伴う造構造の転換によって生成した鉄床を縁海型と呼ぶ(堀越, 1976). その生成には、縁海形成に至りうる伸張場の先行が不可欠である(第 5 図).

千島弧の北海道・北見地区からカムチャツカ半島にわたって、中新世の海底火山活動があった。カムチャツカ半島の中新統の地質層序は、東北日本弧のそれと大変よく似ている(GNIBIDENKO, 1971). それにもかかわらず、北見・知床地区には多くの黒鉄階鉄床が生成し、カムチャツカ半島には知られていない。両地域の造構造の最大の相違は、背後の地殻の性質である。北見・知床地区の背後の千島海盆は大洋地殻であるのに対して、カムチャツカ半島の背後は大陸地殻からなるオホーツク海である(第 6 図). おそらく、カムチャツカ半島の中新世火山活動には伸張場の影響がなかったのであろう。これがカムチャツカ半島に黒鉄階鉄床が生成しなかった原因である。

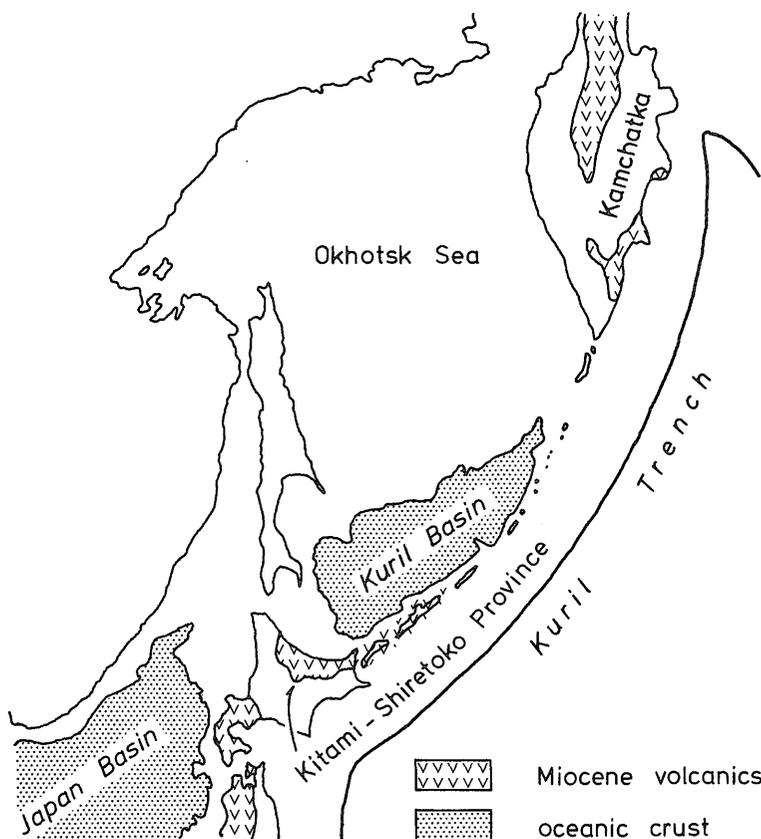
西黒沢・女川階は火山活動の性質から一括できる。火山岩の化学組成は主として石英安山岩であり、少量の玄武岩を伴う。前者は外側に多く、後者は内側、日本海側に多い。今田(1974)が説く二元的火山活動(bimodal volcanism)である。

ミズホ造山火山帯の沈降は西黒沢階に始まり、女川階に最大となった。西黒沢階初期に玄武岩の噴出があった区域が主として沈降区となり(池辺, 1962), 同様な傾向は女川階まで継続して認められる(今田, 1974). 玄武岩

岩脈の貫入方向は堆積盆に沿った南北性で(今田, 1974), 伸張場の存在を示している。ミズホ造山の火山活動は基盤の地塊状変動を伴って開始された、とするのが定説である(たとえば KITAMURA and ONUKI, 1973). しかし、基盤地塊の差別的隆起・沈降は、西黒沢階の玄武岩活動とともに始まったのかも知れない。玄武岩の活動は日本海の拡大の開始に関係しているのであろう。しかし、玄武岩の活動だけに注目すると、それはミズホ造山の初期から知られている。

黒鉄階鉄床は二元的火山活動の中でも石英安山岩の活動に関係し(HORIKOSHI, 1969), そのほとんどが西黒沢階末、約 13 m.y.b.p. に生成した(ISHIHARA et al., 1974). 黒鉄階鉄床の分布は玄武岩の分布の東限線のすぐ内側に多い(第 4 図). しかし、鉄脈型の分布はそれよりもやや広がっている。個々の地域を見ると、黒鉄階鉄床は沈降区に近い隆起地域に分布している(太田ほか, 1969). 鉄脈型鉄床の走向には東西性が多く、圧縮場の影響を示すことは重要である(金子, 1972; 堀越, 1975).

マリアナ、トンガ・ケルマデック弧では、プレートの沈み込みに伴って前線型・海嶺型のマグマ活動が起きている(KARIG, 1970; 1971). 両型のマグマ活動の中心は 100-150 km 位しか離れていない。圧縮場・伸張場はそれぞれのマグマ活動の中心からさらに広がっているのだから、異なる応力場の帯が 50 km より近い間隔で併列していることになる。東北日本弧での西黒沢・女



第6図 北見・知床鉱床区と中新世火山活動地域および縁海大洋地殻の位置関係図

縁海型鉱床の生成には、縁海の形成に関連する伸張場の存在が不可欠である。同じ島弧に属し、同じように中新世火山活動があったにもかかわらず、カムチャッカ半島に鉱床が生成しなかったのは背後に縁海の形成がなかったことに原因している。

川階の玄武岩の分布が伸張場の及んだ範囲を示し、さらにその外側に圧縮場でのマグマ活動の噴出物があるとすれば、日本海を拡大した伸張場は圧縮場から50 km以内の範囲にまで及んでいたことになる(第7図)。

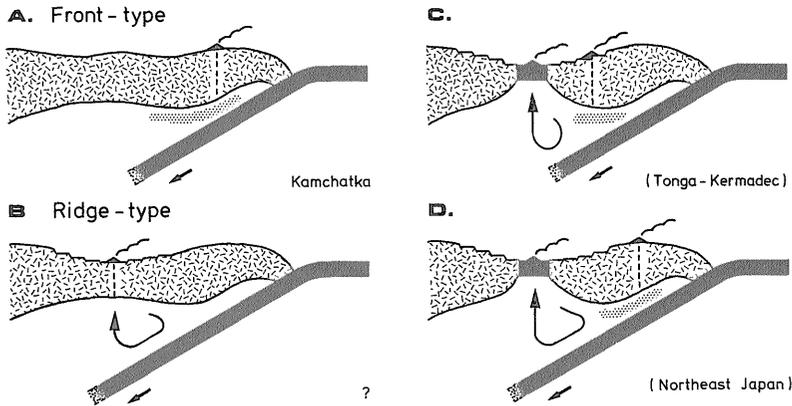
黒鉱階鉱床は伸張場の衰退を圧縮場が埋めた時に生成したのであろう。東北日本弧全体としては、伸張場は日本海に近い内側に卓越していたであろう。その内側から伸張場が消えるのは船川期であり、引続いて圧縮場を示す南北性の褶曲が始まる(池辺, 1962)。この最後の造構造の転換に伴ってめばしい鉱床が生成しなかったのは前線型の火山活動の中心がはるかに外側、現在の火山前線近くに存在したためである。

世界的に見ると、縁海存在はプレートの沈み込む速度の早い地域の背後に限られている。したがって、東北日本弧を含めて多くの縁海の前面にはソレイトが噴出している。アングマン海は中新世初期以来、現在にいた

るまで拡大を続けている(CURRAY and MOORE 1974)。この拡大を伴うプレートの沈み込み速度は6 cm/y. と計算されている(LE PICHON, 1968)。沈み込み速度の計算には誤差もあるし、またよく分かっていない部分もある。

しかし、アングマン・ニコバル諸島は縁海の拡大を伴うプレートの沈み込みの中で、その速度が最も遅い例の一つである。いずれにしても、縁海型鉱床の生成には十分に早いプレートの沈み込みと、圧縮場の火山前線に十分に近く伸張場が形成されることが必要である(第7図)。

日本海の拡大中心は東北日本弧の背後にあったにもかかわらず、西黒沢・女川階の伸張場を示すと考えられる玄武岩は、背後の拡大中心へ向かってSiO<sub>2</sub>が不飽和になる(茅原, 1967)。これは明らかに前線型火山岩の特徴である。しかし、この傾向が拡大中心へまで連続することはありえそうにもない。拡大中心では海嶺型のソレイト玄武岩が噴出したであろう。マリアナ、トンガ・ケ



第 7 図 海嶺・前線型火山活動の時空関係図

プレートの沈み込みに伴っては、Aのごとく前線型の火山活動から始まるのであろう。とすると、Bのような場合は存在しない。縁海を形成した伸張場に影響された地域と、その後の圧縮場における前線型火山活動の位置関係については、Cのごとく火山前線がかつての伸張場に位置する場合と、Dのごとく伸張場の影響外に位置する場合が考えられる。現在の東北日本弧は全体としてはDと考えられるが、黒鉱階鉱床が生成したときはCに近く、伸張場と圧縮場の干渉があったらしい。トンガ・ケルマデック、マリアナ弧はそのような状態に近いかも知れない。

ルマデック弧のように前線・縁海型火山岩共に玄武岩質の場合、圧縮場での玄武岩から伸張場での玄武岩への化学組成の変化と応力場の変化は対応するのであろうか。このような大洋地殻の環境にあっても、縁海型の鉱床は火山前線の近くに生成するのであろう。なぜなら、熱水の吐き出しを引き起こす圧縮場での火山活動は、火山前線のすぐ内側に集中するからである。しかし、鉱床の性質は黒鉱階鉱床と違って Pb に乏しくなる。造構造のいかにかわらず、それは玄武岩の活動に伴う鉱床の特徴である。

### 5. 深成型鉱床

深成型マグマはマグマの発生と上昇の造構造から定義される (堀越, 1976)。しかし一般には、深成型マグマとはいわゆる花崗岩質マグマ、深成型鉱床とは花崗岩類の活動に関連して生成した鉱床と考えてよい。

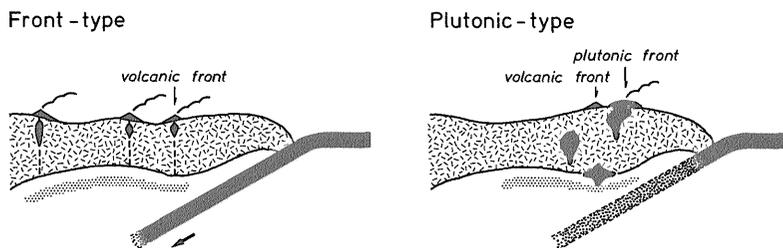
花崗岩質マグマの生成はプレートの沈み込みによる、という考えが出されている (HAMILTON, 1969)。この考えでは前線型と深成型のマグマ活動の造構造は同じである。しかし、既成のモデルでは造山帯における花崗岩活動の時期を説明できない。なぜなら、日本列島やアパラチア・カレドニア造山帯では、その初期の玄武岩質火山活動の後、50 m.y. 以上にわたるマグマ活動の休止期を隔てて花崗岩類の活動が始まっている。この空白期間をプレートの定常的な沈み込みで説明することは難しい (堀越, 1976)。

筆者が提案した深成型マグマ活動の造構造は次の通り

である (堀越, 1976)。プレートの沈み込みに原因して発生するマグマは、プレートの押しによる圧縮場の中の張力割れ目によって地殻の表面へ汲み上げられる。これが前線型のマグマ活動である。プレートの押しがなくなると地殻に張力割れ目ができにくくなり、マグマは部分的帯溶融 (partial zone melting) によって上昇する。したがって、上部に達しうるマグマはより軽い珪長質なものであり、岩体は大きなものになる (第 8 図)。推定される花崗岩岩体の大きさと (HAMILTON and MYERS, 1967) 前線型の火山のマグマ溜りの大きさには、著しい相違がある。沈み込んだ冷いプレートの加熱によって揮発成分が追い出されれば、プレートの沈み込みが止まった後にもマグマが発生しうるであろう。しかし、プレートの沈み込みの速度が十分に遅くなれば、同様の効果が期待できる。要するに深成型マグマ活動は、マグマが発生し、かつ地殻に張力割れ目が生じない造構造の下で行われる。

深成型鉱床は、ほかの型の鉱床には見出されない際立った特徴を示す。その第 1 は、鉱床の分布する範囲が著しく広いことである。佐川造山の深成型鉱床の分布は、海溝に平行な 100 km に及ぶ地帯に広がっている (SHIMAZAKI, 1975)。アジア大陸の太平洋側にも、中生代花崗岩類に関連して生成した多くの深成型と思われる鉱床がある。その分布は当時の海溝に平行な幅 300 km あまりの地帯に広がっている (ZONENSHAIN et al., 1974)。北米大陸の西岸の深成型鉱床の分布の幅もほぼ同様である (NOBLE, 1970; SILLITOE, 1972a)。

第 2 に、当時の海溝に平行な鉱床構成元素の帯状分布



第8図 前線・深成型火成活動の造構造の相違を示す概念図

プレートの押しがあると、マグマは張力割れ目を通して随時地殻表面へ噴出する。しかし、その一回の噴出量はわずかである。プレートの押しがやむと、この安全弁は機能しなくなる。マグマは部分的帯溶融によってのみ上昇し、体積が巨大なものだけが地殻表面近くに達する。上昇を通じてマグマの化学組成はより珪長質なものになる。

がある (堀越, 1976). アジア大陸の太平洋側では海溝から大陸側へ、Au-Mo-Pb-Zn-W-Sn-Hg-Sb の帯状分布がある (ZONENSHAIN et al., 1974). この場合、三疊紀から初期古第三紀に及ぶ鉱化作用の時期を3つに区切っても、その帯状分布は同様であるという。しかし、北米大陸西岸では帯状分布がこの逆になっており、海溝から大陸側へ Hg-Cu-Au-Ag-W-Pb-Zn-Mo の順である (NOBLE, 1970; SILLITOE, 1972a). 西南日本内帯の深成型鉱床の帯状分布は、当時の海溝から大陸側へ W-Cu-Pb-Zn-Mo と見なせるかも知れない (SHIBATA and ISHIHARA, 1974; SHIMAZAKI, 1975). これは北米大陸西岸の帯状分布に近く、アジア大陸太平洋側の帯状分布とは逆である。西南日本は白亜紀を通じてアジア大陸の一部であったので (村内, 1972; 堀越, 1972), なぜ同じ白亜紀頃の深成型鉱床の帯状分布が逆になるのかは分からない。

第3に、鉱化作用が行われた時間が非常に長い。非常に詳しく研究された西南日本の Mo-W 鉱床の場合、Mo と W の鉱床群の鉱化作用はそれぞれ 20 m.y. にわたっている。両者を合わせると 30 m.y. 以上も場所を変えて鉱化作用が継続したことになる (SHIBATA and ISHIHARA, 1974). アジア大陸と北米大陸の太平洋岸における鉱化作用の継続は、100 m.y. を越える。

第4に、個々の鉱床において鉱床構成元素の水平的帯状分布が認められる (堀越, 1976). 鉱床の帯状分布の古典として、多くの教科書に引用されているコーンウォール地域の実例は深成型鉱床のものである。

深成型鉱床のこれらの特徴は、海嶺・前線・縁海型におけるような造構造的な鉱床成因論が適用できないことを示している。おそらく、深成型鉱床の生成にはマグマの上昇・分化などの要素が強く作用しており、深成型マグマ活動の場という大枠を除いては、個々の鉱床の生成は広域的な造構造とは無関係なのであろう。その意味で

は、深成型鉱床は正マグマ性鉱床に近い。

## 6. 湧点・衝撃型マグマ活動

マントル湧点(mantle plume)の考えは WILSON (1963) によって初めて出された。しかし、この考えが普及したのは MORGAN (1971; 1973) の論文によってである。WILSON (1973) はさらにこのマントル湧点こそプレート動かす原動力であると主張した。WILSON (1973) によって指摘された地球上のマントル湧点は64カ所にもぼっている。いずれにしても、プレートの動きと独立しているマントル湧点の存在は、ハワイ・天皇海山列における火山活動の移動についての研究を通じて動かしがなくなった (JACKSON et al. 1972; JACKSON et al., 1975).

今までのところ、湧点型マグマ活動に関連すると思われる有用鉱床は知られていない。MITCHELL and BELL (1973) は、湧点型のハワイの玄武岩中の硫化物についての DESBOROUGH et al. (1968) の研究を引用し、湧点型鉱床の存在を示唆した。しかし、筆者は、湧点型マグマ活動に関連して鉱床が生成する場合にも、なんらかの造構造の変化が必要であると考え。

さらにそのほかの型のマグマ活動として、隕石落下の衝撃が引き金となって始まる衝撃型がある。この型のマグマ活動は、DIETZ (1964) がサドベリー隕石孔説を発表してから世に広く注目されるようになった。そこには世界のニッケルの半分以上を産出する大鉱床が存在する。しかし、衝撃型のマグマ活動が重要であった可能性があるのは初期プレカンブリア紀である。衝撃型については、最後の章でプレ・プレート・テクトニクス時代を論じる時にまた触れることにする。

## 7. 別子型鉱床の造構造

玄武岩類の活動に関連して生成した熱水堆積鉱床は、

その火山層序から、オフィオライトの上位層準に存在するキプロス型 (MITCHELL and BELL, 1973), オフィオライト層序は示さないが厚い玄武岩累層の上位層準に存在するレッケン型 (HORIKOSHI, 1976b), 玄武岩碎屑岩互層の中に存在する別子型 (MITCHELL and BELL, 1973), の 3 つに分類できる。キプロス・レッケン型に共通する特徴は、鉾床が玄武岩累層の最上位、あるいは最上位近くの層準に存在すること、鉾床下盤の玄武岩がソレアイトであること (PEARCE, 1975; GALE and ROBERTS, 1974), である。日本にはキプロス型の鉾床は存在しないが、レッケン型の層序を示すものには大久喜鉾山の鉾床があり、下川鉾山の鉾床もそれに近い。両鉾床ともに下盤の玄武岩がソレアイトであることも (SUZUKI et al., 1972; 池田ほか, 1972), 今までに記載された外国の実例とよく合っている。問題は模式地の別子型鉾床である。

三波川・ミカブ・秩父帯の層序は多くの地域で発表されているが、単層にまで分類した火山層序の研究は十分でない。したがって火山層序と玄武岩の化学組成の対比はいまだに行われていない。この点が造構造の解析を困難にしている。しかし全体として、これらの地域ではソレアイトとアルカリ玄武岩が混ざっているらしい (MIYASHIRO, 1975). SUGISAKI et al. (1971), SUGISAKI et al. (1972) はミカブ帯にソレアイトが、秩父、丹波・美濃帯にアルカリ岩が多く産出することから、ミカブ帯を中心とした大陸地殻縁における割れ目を考えた。彼らのように大陸地殻内に噴出の場を設定すると、三波川高圧変成作用を説明しにくい欠点が生じる。

三波川高圧変成作用について推定される 7 kb という圧力をうるために、三波川変成帯は一度海溝から沈み込んだ、と考えられている (MIYASHIRO, 1967; ERNST, 1971). 沈み込みうる地殻は典型的な大洋地殻か、縁海大洋地殻である。したがって、現在の三波川帯の南に大陸地殻があったとしても、一度沈み込んだと考えられる部分、すなわち、三波川帯でも変成度が高い北側には存在しなかったであろう。大陸地殻基盤を考える上でもう一つの重要なことは、大陸地殻の上の前線型火山活動は例外なく安山岩に富んでいるが、三波川・ミカブ・秩父帯を通じて、火山岩のほとんどが玄武岩である事実である。

四国三波川変成岩の温度構造は単純に下部ほど高くなっておらず、見掛け上の層序の一部が逆転していることは間違いない。最も温度が高いのは三縄上部層であり (KURATA and BANNO, 1974), 化学組成がソレアイトの東平角閃岩が存在するのはほぼその層準である (SAWADA, 1973). したがって、横臥褶曲の antiformal plane が東平角閃岩の中、あるいはごく近くにあり、横臥褶曲が形成さ

れる前の原層序では、東平角閃岩の原岩が最下位層であった可能性が高い。また、東平角閃岩は一部にズン岩を伴うが、両者は後で多少動いているとしても原層序を残しているのかも知れない。

上位層準への変成度の上昇が確認できるのは三縄中部層から東平角閃岩までの間である。変成鉱物の粒度から見ると、これよりもやや下位、“点紋”が出現する層準から変成度が上位に向かって上昇しているかも知れない。おそらく、横臥褶曲のもう一つの軸面、synform plane は三縄中部層の上位に存在しているのであろう。この層準には多くの別子型鉾床が存在し (小島ほか, 1956), 異常線構造が発達し、ランセン石片岩の産出が集中している (堀越, 1958).

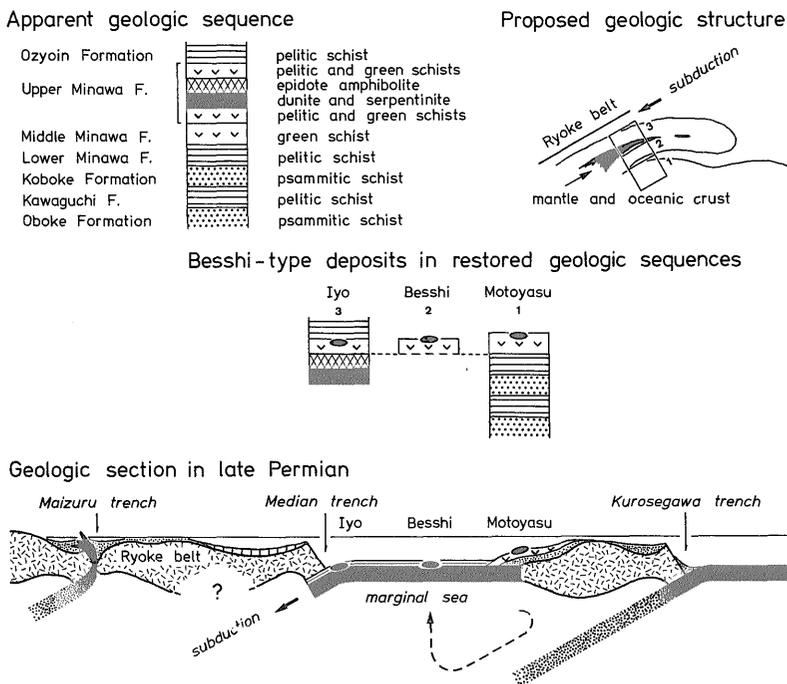
四国三波川帯では、玄武岩源のランセン石片岩の産出は著しく原岩の化学組成の影響を受けている。一般にランセン石片岩の化学組成はアルカリ・鉄が多く、 $\text{SiO}_2$  が少ない。このような化学組成の特徴はアルカリ岩的である (堀越, 1972). MIYASHIRO (1975) は三波川帯の玄武岩の特徴の一つとして鉄の量が多いことを挙げたが、これはランセン石片岩の特徴でもある。ランセン石片岩のように特徴的な変成岩の化学組成は、実際に存在する割合よりもどうしても多く報告される。おそらく、三波川帯の真の層序での最上位層準には、アルカリ玄武岩の噴出が多かった。

造山帯における横臥褶曲の形成には、潤滑剤となりうる特別な地層を伴っている場合が多い。アルプス造山帯では石灰岩であり、カレドニア造山帯でセキボク片岩である。ノルエーのスリテルマ“ハンレイ岩”岩体は、硫化物鉾床を潤滑剤として横臥褶曲を行ったらしい (堀越, 未発表). 四国三波川帯も、別子型鉾床を潤滑剤として横臥褶曲を行なった可能性がある。

以上のような考察に基づいて、四国三波川帯を復元した南北断面図が第 9 図に示されている。黒瀬川構造帯は当時の海溝斜面縁 (trench-slope break) か島弧であろう (堀越, 1972). この周囲に小さな大陸地殻が存在する可能性はある。しかし、三波川帯の北側、秋吉造山時の舞鶴海溝との間には大陸地殻がなかったかも知れない。高圧変成作用を著しく受けている別子型鉾床は縁海大洋地殻の上に生成し、一度海溝から沈み込んだのかも知れない。それに反して、弱変成帯の基安鉾床などの下部にはおそらく大歩危・小歩危の砂岩層があり、大陸地殻から著しく離れた環境は考えにくい。

第 9 図の復元図が大筋において正しいとすると、模式地の別子型鉾床は MITCHELL and BELL (1973) が考えたような島弧で生成した前線・縁海型ではなく、縁海中央

マグマ性鉱床の造構造と特徴 (堀越 毅)



第9図 四国三波川帯の地質復元図

三波川変成作用の 7 kb という圧力を発生させるには、海溝からの沈み込み以外には考えられない。四国三波川帯の見掛け層序のどこが逆転しているかについては種々の説がある。この復元図は図右上の 1 の部分、すなわち大歩危・川口・小歩危層などは逆転していないと考え、1 と 2 の境界を三層上部層の最下部近く、多くの別子型鉱床が存在する付近と仮定した。背斜の軸面は最も変成度が高い層準である。

海嶺の火山活動に関連した海嶺型 (SILLITOE, 1972b) の可能性が強い。

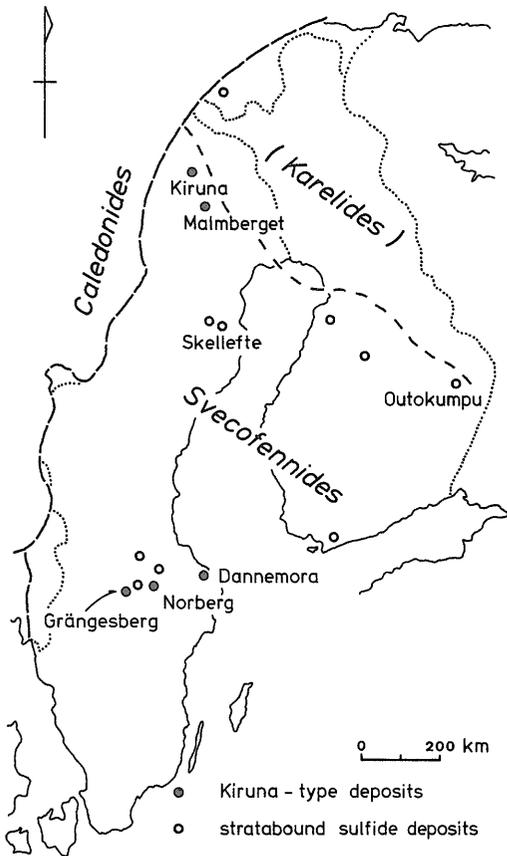
8. プレカンブリア紀の鉱床

プレート・テクトニクスが有効に働くには、厚くて強靱なプレートが形成されている必要がある。創世紀の地球上にそのようなものが存在したとは考えられない。BURK and DEWEY (1973) と SUTTON (1973) は期せずして同じく、過去20億年位はプレート・テクトニクスの時代であった、と考えた。主な理由は、地相斜概念が組み上げた細長い造山帯や、大陸地殻の中に岩脈群が現われるのがこれ以後であることにある。もしも彼らの考えが正しければ、プレート・テクトニクスの下に生成した最も古い鉱床の一つはスウェーデンのキルナ型鉱床である。キルナ鉱山の鉱床については、ごく最近に PARÁK (1975) がその地質概略を新しく記載し、今世紀初め以来の GEIJER (1919) の磁鉄鉱マグマの貫入説に換えて火山性熱水堆積説を唱えた。

地質的にキルナ鉱山の鉱床に類似しているのにグレン

ゲルスベルク鉱山の鉱床がある。両鉱床とも珪長質火山岩の上の層状鉱床で、その地質は鉱石鉱物の相違を除けば黒鉄型そっくりである。キルナ・グレンゲルスベルク両鉱床それぞれの東の方には類似の鉱床群が分布し、その鉱床地質には東の方への規則的变化が認められる (第10図)。

グレンゲルスベルクから東へ、チャート・Mn 層を伴うものが現れる。その代表的なものはノルベルク地域の鉱床群である。さらに東では、ダンネモラ鉱山の鉱床のように石灰岩中の層状・塊状の磁鉄鉱鉱床になる。このような鉱石相の変化に伴って、鉱床周辺の火山岩類も西の熔岩相から東の火山砕屑岩に富む岩相へと移化する。ストックホルムの周辺でよく使われるヘレフリントという名称は、火山砕屑岩・石灰岩・チャートの互層である場合が多い。ボツニア湾を越えたフィンランドには、この種の鉱床は知られていない。キルナ帯のチャート・Mn 相は南東方のマルムベルグ鉱山である。ここの鉱石には層状組織が強い。さらに東には重要な鉱山がない。しかし、露頭やボーリングコアでは石灰岩中の層状



第10図 スベコフェニア造山帯におけるキルナ型鉄床の分布図

参考までに熱水堆積硫化物鉄床の分布も示してある。シュレフタ地域の鉄床母岩は25億年前と考えられており、キルナ型鉄床の母岩よりかなり古い。

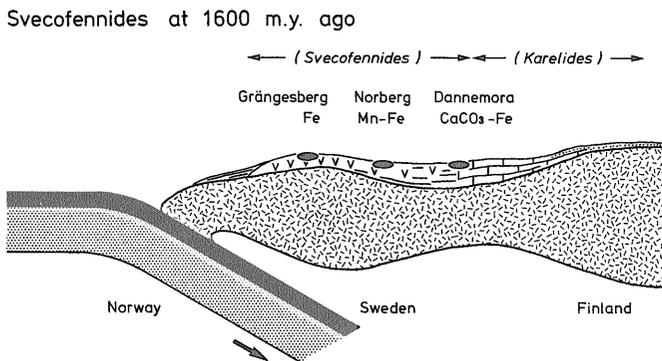
磁鉄鉱が確認されている。

キルナ鉄床母岩の年代は約16億年前である (PARAK, 1975)。上にあげた広い意味でのキルナ型鉄床の個々の母岩の年代は十分には分かっていない。しかし、一般に熱水堆積鉄床が存在する層準が著しく違うことはない。とすると、当時の地質は現在のスベコフェニアの西縁に沿う火山帯、その東側のチャート・石灰岩・火山砕屑岩からなる層相、そしてさらに以前カレリアンと呼ばれた大陸棚相へと続くことになる。スベコフェニア造山の初期、しかも限られた時代ではあるけれども、このような地質は現在のアンデス型の造山帯とよく似ている。すなわち、現在カレドニア造山帯が分布している地域に大洋地殻があり、それは東へ沈み込んでいた。このプレートの沈み込みに伴ってスベコフェニアの西縁に火山帯が形成されたのであろう。しかし、スベコフェニア造山帯全体から見た火山岩相と大陸棚相の境界は、上に推定した海溝の伸びの方向と著しく斜交している (第11図)。

キルナ型鉄床は単なる前線型なのか、あるいは縁海の形成となんらかの成因的關係を持っているのかは、よく分からない。知られている限りでは、プレカンブリア紀の衝突型造山は大陸・大陸であり、その接合部は非常に明瞭である (たとえばグレンビル・フロント)。プレカンブリアの縁海はまだ記載されたことがない。縁海の最も古いものはアパラチア造山に伴った古ものである (DEWEY and BIRD, 1971)。

### 9. プレ・プレート・テクトニクス時代

先述の BURKE and DEWEY (1973) と SUTTON (1973)



第11図 キルナ型鉄床生成時の地質復元図

キルナ型鉄床の層相変化についてはグレンゲルスベルク・ダンネモラ間を参考とし、地質についてはキルナ鉄床を通る東西断面が画かれている。あるいはこの断面図に縁海を加えるべきかも知れない。プレカンブリアの衝突型造山運動に伴っては、なぜか大陸地殻の接合面に沿った大洋地殻の衝上が観察されず、つぶれた縁海を見出すことは大変困難である。

は、27億年前以前はプレ・プレート・テクトニクスの時代であったと考えた。北米のプレカンブリア楯状地はスーパーイオル区を核として、衝突型造山運動の繰り返しによって形成された (WILSON, 1968; GIBB and WALCATT, 1971)。この核となったスーパーイオル区の変成の時代が約27億年前である。

それでは、プレート・テクトニクスの前の時代にマグマ活動を起こした造構造は何であったろうか。マントル・ダイアピルに伴って、時空的にも全く不規則にマグマ活動が起きた、とする考えもある。しかし、筆者にとって大変魅力的なのは隕石落下衝撃説である (GREEN, 1972)。サドベリーでは17億年前の隕石落下が衝撃になってマグマ活動が始まり、Ni 鉄床が生成した (DIETZ, 1964)。同じような現象は地球生成の初期にはもっとひんぱんに起きたであろう。現に、月の火山活動は隕石落下が引き金となっている事実はよく知られている (第12図)。

最も古い火山活動の産物の一つにグリーンストーン帯と

呼ばれるものがある (ANHAEUSSER et al., 1969)。この時代は30億年前より古いものが多い。これはその後の火山岩累層のごとく細長い分布をしておらず、どちらかというのとまとまっている。噴出したマグマの多くはソレアイトであるが (BARAGAR, 1968; GLIKSON, 1971)、注目されるのは超苦鉄質熔岩を伴うことである (NALDRETT and MASON, 1968; NALDRETT, 1970; PYKE et al., 1973)。この種の熔岩は非常に高温であったと考えられる。GREEN (1972) は、これらこそ隕石落下の衝撃が引き金となった火山活動であると結論した。超苦鉄質熔岩にはサドベリーのごとくNi 鉄床を伴うことが多い (NALDRETT, 1973)。

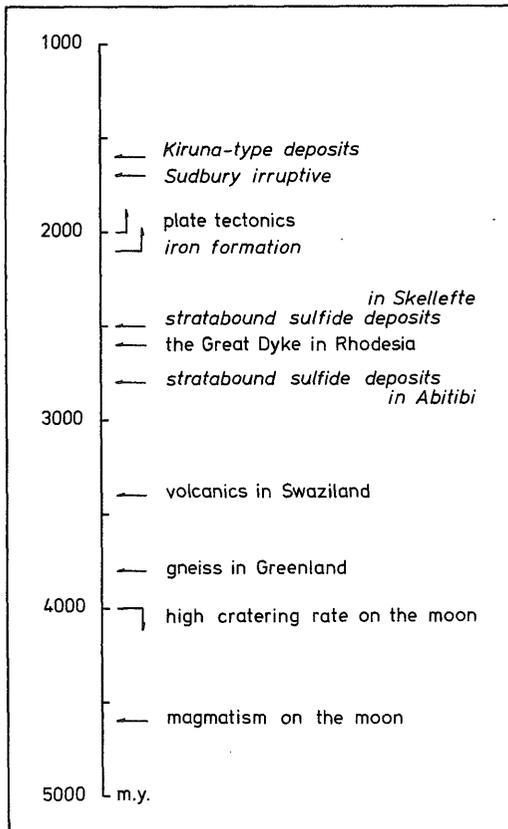
これに反して GOODWIN (1973) は、スーパーイオル区でもとくに鉄床が集中しているアビティビ地域の火山岩の化学組成に帯状分布があることを見出し、その原因としてプレートの沈み込みによる前線型の火山活動を考えた。確かに、GOODWIN and RIDLER (1970) によって発表されたアビティビ地域の地質断面図は、プレートの沈み込みを考えさせるのに十分である。

## 10. おわりに

マグマ性鉄床の造構造的分類は、最近の鉄床学における一つの流れである。堆積鉄床も含めて、鉄床全体を分類し直す試みもなされている (GUILD, 1972)。しかし、造構造的分類の重要性が納得され、広く普及するには、各型に属する鉄床の特徴が十分に明らかにされる必要がある。もしも、造構造的に分類された各鉄床の成因・特徴が明らかにされれば、鉄床の研究は造山運動の研究に非常に役立つに違いない。

本論文では単なる鉄床の分類にとどまらず、ある型の鉄床の生成が造山運動の造構造においてどのような意味があるのかも論じたつもりである。しかし、この点についてはまだまだ色々の問題がある。おそらく、造構造の変化がマグマ活動の性質に反映し、さらに鉄床の生成へと導かれるのであろう。この辺の解明は今後の課題である。

謝 辞：本稿は筆者が工業技術院流動研究計画により地質調査所研究員であった期間のうち、1972年11月30日に鉄床部談話会で行った講演をもとにして書かれた。地質調査所での研究については鉄床部大町北一郎部長、佐々木昭課長、東京大学立見辰雄教授に深い配慮を賜った。地質調査所佐藤壯郎博士は講演の内容につき助言をされ、論文を読んで下さった。また、東京大学地震研究所中村一明助教授、東京教育大学梶原良道博士からも多くの示唆を受けた。さらに、本稿の完成については東京大学地質学教室の田康子さん、鹿園直建博士の御助力に



第12図 プレ・プレート・テクトニクス時代の地質鉄床年代表。

プレート・テクトニクスは20億年前以後とする考えがあるが、それ以前にもプレート・テクトニクスが働いたのではないと思われる徴候は存在する。

負う点が大きい。以上の方々に深い謝意を表する。

文 献

- ANHAEUSSER, C. R., MASON, R., VILJOEN, M. and VILJOEN, R. (1969) A reappraisal of some aspects of Precambrian Shield geology. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 80, p. 2175-2200.
- 青木謙一郎・辛島由美子 (1973) 山形県大滝粗粒玄武岩々床の分化. *岩鉱*, vol. 68, p. 183-188.
- 荒金敏光 (1969) 幌別硫黄鉱床第三鉱体について. *北海道鉱山誌*, vol. 25, p. 45-50.
- BARAGAR, W. R. A. (1968) Major elements, geochemistry of the Noranda volcanic belt, Quebec, Ontario. *Can. J. Earth Sci.*, vol. 5, p. 773-790.
- BIGNELL, R. D. (1975) Timing, distribution and origin of submarine mineralization in the Red Sea. *Trans. Inst. Min. Metall.*, Sec. B, vol. 84, p. 1-6.
- BONATTI, E. (1975) Metallogenesis at oceanic spreading centers. *Annual Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 3, p. 401-431.
- BOSTRÖM, K. and PETERSON, M. N. A. (1966) Precipitates from hydrothermal exhalations on the East Pacific Rise. *Econ. Geol.*, vol. 61, p. 1258-1265.
- BURKE, K. and DEWEY, J. F. (1973) An outline of Precambrian plate development. in Tarling, D. H. and Runcorn, S. K., eds., *Implications of continental drift to the earth sciences*, vol. 2, Academic Press Inc. (London) Ltd., p. 1035-1045.
- 茅原一也 (1967) 東北日本内帯グリーンタフ地域における中新世後期玄武岩類の岩石化学的特徴. 柴田秀賢教授退官記念論文集, p. 119-126.
- COLEMAN, R. G. (1971) Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. *J. Geophys. Res.*, vol. 76, p. 1212-1222.
- CONSTANTINO, G. and GOVETT, G. J. S. (1972) Genesis of sulfide deposits, ochre and amber of Cyprus. *Trans. Inst. Min. Metall.*, Sec. B, vol. 81, p. 34-46.
- and ——— (1973) Geology, geochemistry, and genesis of Cyprus sulfide deposits. *Econ. Geol.*, vol. 68, p. 843-858.
- CURRAY, J. R. and MOORE, D. G. (1974) Sedimentary and tectonic processes in the Bengal deep-sea fan and geosyncline. in Burke, C. A. and Drake, C. L., eds., *The geology of continental margins*, Springer-Verlag New York Inc., p. 617-627.
- DEGENS, E. T. and ROSS, D. A. eds. (1969) *Hot brines and recent heavy metal deposits in the Red Sea*. 600 p., Springer-Verlag New York Inc.
- DESBOROUGH, G. A., ANDERSON, A. T. and WRIGHT, T. C. (1968) Mineralogy of sulfides from certain Hawaiian basalts. *Econ. Geol.*, vol. 63, p. 636-644.
- DEWEY, J. F. and BIRD, J. M. (1970) Mountain belts and the new global tectonics. *J. Geophys. Res.*, vol. 75, p. 2625-2647.
- and ——— (1971) Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland. *J. Geophys. Res.*, vol. 76, p. 3179-3206.
- GIBB, R. A. and WALCOTT, R. I. (1971) A Precambrian suture in the Canadian Shield. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 10, p. 417-422.
- DICKINSON, W. R. (1968) Circum-Pacific andesite types. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, p. 2261-2269.
- and HATHERTON, T. (1967) Andesite volcanism and seismicity around the Pacific. *Science*, vol. 157, p. 801-803.
- DIETZ, R. S. (1961) Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. *Nature* (London), vol. 190, p. 854-857.
- (1964) Sudbury structure as an astrobleme. *J. Geol.*, vol. 72, p. 412-434.
- ERNST, W. G. (1971) Metamorphic zonation on presumably subducted lithospheric plates from Japan, California and the Alps. *Contr. Mineral. Petrol.*, vol. 34, p. 43-59.
- GALE, G. H. (1974) Geochemical investigation on Caledonian volcanics and intrusives in

- middle and south Norway. *NGU rapport*, no. 1228A, 93 p.
- and ROBERTS, D. (1974) Trace element geochemistry of Norwegian lower Paleozoic basic volcanics and its tectonic implications. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 22, p. 380-390.
- GASS, I. G. (1968) Is the Troodos Massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? *Nature* (London), vol. 220, p. 39-42.
- GEIJER, P. (1919) Recent developments at Kiruna. *Sveriges geol. unders.*, Ser. C, no. 288, 22 p.
- GLIKSON, A. Y. (1971) Primitive Archaean element distribution patterns: chemical evidence and geotectonic significance. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 12, p. 309-320.
- GNIBIDENKO, H. S. (1971) 樺太, 千島およびカムチャツカの地質と深部構造. 浅野周三・ウジンツェフ, グレープ篇, 島弧と縁海, 東海大出版会, p. 5-16.
- GOODWIN, A. M. (1973) Plate tectonics and evolution of Precambrian crust. in Tarling, D. H. and Runcorn, S. K., eds., *Implications of continental drift to the earth sciences*, vol. 2, Academic Press Inc. (London) Ltd., p. 1047-1069.
- and RIDLER, R. H. (1970) The Abitibi orogenic belt. *Geol. Surv. Canada, Paper* 70-40, p. 1-30.
- GREEN, D. H. (1972) Archaean greenstone belts may include terrestrial equivalents of lunar maria? *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 15, p. 263-270.
- GUILD, P. W. (1971) Metallogeny: A key to exploration. *Mining Eng.*, vol. 23, p. 69-72.
- (1972) Massive sulfides vs. Porphyry deposits in their global tectonic settings. *MMIJ-AIME Joint Meeting, Tokyo*, Print no. G13, 12 p.
- HAMILTON, W. (1969) The volcanic central Andes, a modern model for the Cretaceous batholiths and tectonics of western North America. *Oregon Dept. Geol. Miner. Ind. Bull.*, vol. 65, p. 175-184.
- and MYERS, W. B. (1967) The nature of batholiths. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper* 554-C, 30 p.
- HART, S. R., GLASSLEY, W. E. and KARIG, D. E. (1972) Basalts and sea-floor spreading behind the Mariana island arc. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 15, p. 12-18.
- HAWKINS, Jr., J. W. (1974) Geology of the Lau Basin, a marginal sea behind the Tonga Arc. in Burk, C. A. and Drake, C. L., eds., *The geology of continental margins*, Springer-Verlag New York Inc., p. 505-520.
- Hess, H. H. (1962) History of the ocean basin. in *Petrological studies*, Buddington volume, Engel, A. E. J., James, H. L. and Leonard, B. F., eds., Geol. Soc. America, p. 599-620.
- 堀越 叡 (1958) 佐々連鉱山の線構造と鉱床の形態. 鉱山地質, vol. 8, p. 33-40.
- (1965) 岩手県松尾鉱床の堆積性組織 (演旨). 鉱山地質, vol. 15, p. 56.
- HORIKOSHI, E. (1969) Volcanic activity related to the formation of the Kuroko-type deposits in the Kosaka district, Japan. *Mineral. Deposita*, vol. 4, p. 321-345.
- 堀越 叡 (1971) 紅海の底——重金属に富む堆積物. 科学, vol. 41, p. 617-625.
- (1972) 日本列島の造山帯とプレート. 科学, vol. 42, p. 665-673.
- (1975) 新生代造山運動と火山性鉱床のテクトニクス. 火山, vol. 20, 特別号, p. 341-353.
- (1976) 花崗岩生成のテクトニクスと鉱床. 鉱山地質特別号, no. 7, p. 1-14.
- HORIKOSHI, E. (1976a) Development of late Cenozoic petrogenic provinces and metallogeny in Northeast Japan. *Geol. Assoc. Canada, Spec. Paper* no. 14, p. 121-142.
- (1976b) Caledonian volcano-stratigraphy in the Höydal area near Trondheim. *NGU Bull.* (in press).
- (in press) Metallogenic epoch of Kuroko-stage deposits in the Northeast Japan arc. *Econ. Geol.*
- HUTCHINSON, R. W. and SEARLE, D. L. (1971) Stratabound pyrite deposits in Cyprus and relations to other sulfide ores. *Soc. Min.*

- Geol. Japan, Spec. Issue* no. 2 (IAGOD volume), p. 198-205.
- 池辺 穰 (1962) 秋田油田地域における含油第三系の構造発達と石油の集積について. 秋大鉱山地下資源研報告, no. 26, p. 1-59.
- 池田周作・窪田康宏・永松武彦 (1972) 下川鉱床下部におけるいくつかの新事実. 鉱山地質, vol. 22, p. 150-165.
- ISEZAKI, N. and UYEDA, S. (1973) Geomagnetic anomaly of the Japan Sea. *J. Marine Geophys. Res.*, vol. 2, p. 51-59.
- ISHIHARA, S., KANEHIRA, K., SASAKI, A., SATO, T. and SHIMAZAKI, Y. eds. (1974) Geology of Kuroko deposits. *Soc. Min. Geol. Japan, Spec. Issue* no. 6, 435 p.
- (1974) Magmatism of the Green Tuff tectonic belt, Northeast Japan. in Ishihara, S. ed., *Geology of Kuroko deposits, Soc. Min. Geol. Japan, Spec. Issue*, no. 6, p. 235-249.
- JACKSON, E. D., SILVER, E. A. and DALRYMPLE, G. B. (1972) Hawaiian-Emperor Chain and its relation to Cenozoic Circumpacific tectonics. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 83, p. 601-618.
- , SHAW, H. R. and BARGAR, K. E. (1975) Calculated geochronology and stress field orientations along the Hawaiian chain. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 26, p. 145-155.
- 金子史朗 (1972) 地形図説(2). 229 p., 古今書院.
- KARIG, D. E. (1970) Ridges and basins of the Tonga-Kermadec island arc system. *J. Geophys. Res.*, vol. 75, p. 239-254.
- (1971) Structural history of the Mariana island arc system. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 82, p. 323-344.
- KAY, R., HUBBARD, N. J. and GAST, P. W. (1970) Chemical characteristics and origin of oceanic ridge volcanic rocks. *J. Geophys. Res.*, vol. 75, p. 1585-1613.
- KENNETT, J. P. and THUNELL, R. C. (1975) Global increase in Quaternary explosive volcanism. *Science*, vol. 187, p. 497-503.
- KITAMURA, N. and ONUKI, Y. (1973) Geological and crustal sections of the A-zone, Northeast Japan. in Gorai, M. and Igi, I., eds., *The crust and upper mantle of the Japanese area, part 2, geology and geochemistry*, Geol. Surv. Japan, p. 38-60.
- 小島丈児・秀 敬・吉野言生 (1956) 四国三波川帯におけるキースラーガーの層序的位置. 地質雑, vol. 62, p. 30-45.
- 今田 正 (1974) 東北日本弧における Bimodal volcanism. 地質雑, vol. 80, p. 81-89.
- KUNO, H. (1960) High-alumina basalt. *J. Petrology*, vol. 1, p. 121-145.
- (1966) Lateral variation of basalt magma type across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, vol. 29, p. 195-222.
- KURATA, H. and BANNO, S. (1974) Low-grade progressive metamorphism of pelitic schists of the Sazare area, Sanbagawa metamorphic terrain in central Shikoku, Japan. *J. Petrology*, vol. 15, p. 361-382.
- LAUBSCHER, H. (1969) Mountain building. *Tectonophysics*, vol. 7, p. 551-563.
- LE PICHON, X. (1968) Sea-floor spreading and continental drift. *J. Geophys. Res.*, vol. 73, p. 3661-3697.
- MACDONALD, G. and KATSURA, T. (1964) Chemical composition of Hawaiian lavas. *J. Petrology*, vol. 5, p. 82-133.
- MENARD, H. W. (1967) Transitional types of crust under small ocean basins. *J. Geophys. Res.*, vol. 72, p. 3061-3073.
- MILLER, A. R., DENSMORE, C. D., DEGENS, E. T., HATHAWAY, J. C., MANHEIM, F. T., MCFARLIN, P. F., POCKLINGTON, R. and JOKELA, A. (1966) Hot brines and recent iron deposits in deeps of the Red Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 30, p. 341-350.
- MITCHELL, A. H. and BELL, J. D. (1973) Island-arc evolution and related mineral deposits. *J. Geol.*, vol. 81, p. 381-405.
- MIYASHIRO, A. (1967) Orogeny, regional metamorphism and magmatism in the Japanese islands. *Medd. Dansk Geol. Foren.*, vol. 17, p. 390-446.

- (1972) Metamorphism and related magmatism in plate tectonics. *American J. Sci.*, vol. 272, p. 629–656.
- (1973) The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 19, p. 218–224.
- (1975) Classification, characteristics, and origin of ophiolites. *J. Geol.*, vol. 83, p. 249–281.
- , SHIDO, F. and EWING, M. (1970) Petrologic models for the Mid-Atlantic ridge. *Deep-Sea Res.*, vol. 17, p. 109–123.
- MOORES, E. M. and VINE, F. J. (1971) The Troodos Massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, vol. 268, p. 443–466.
- MORGAN, W. J. (1971) Convection plumes in the lower mantle. *Nature* (London), vol. 230, p. 42–43.
- (1973) Plate motions and deep mantle convection. *Geol. Soc. America Memoir* 132, p. 7–22.
- MUKAIYAMA, H. (1959) Genesis of sulfur deposits in Japan. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo, Sec. 2*, vol. 11, supplement, 148 p.
- 村岡 誠 (1954) 本邦の硫黄鉱床と母岩についての 2, 3 の事実——特に松尾鉱床について. *鉱山地質*, vol. 4, p. 28–33.
- 村内必典 (1972) 人工地震探査による日本海の地殻構造. *科学*, vol. 42, p. 367–375.
- NAKAMURA, K. (1974) Preliminary estimate of global volcanic production rate. *The utilization of volcano energy*, Proc. U.S.–Japan Cooper. Sci. Seminar, p. 273–285.
- 中村一明・宇井忠英 (1975) 岩脈群などによるテクトニック応力場復元の問題. GDP 連絡紙: 構造地質, no. 3, p. 75–82.
- NALDRETT, A. J. (1970) Ultramafic and related mafic rocks of the Abitibi region. *Geol. Surv. Canada, Paper* 70–40, p. 24–29.
- (1973) Nickel sulfide deposits—their classification and genesis with special emphasis on deposits of volcanic association. *Bull. Can. Inst. Min. Metall.*, vol. 76, p. 183–201.
- and MASON, G. D. (1968) Contrasting Archaean ultramafic igneous bodies in Dundonald and Clergue Townships, Ontario. *Can. J. Earth Sci.*, vol. 5, p. 111–143.
- NOBLE, J. A. (1970) Metal provinces of the western United States. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 81, p. 1607–1624.
- 太田垣亨・阿部喜治・木村彰宏・藤岡洋介 (1969) 北鹿ベーズン北東地区の地質構造と鉱床について. *鉱山地質*, vol. 19, p. 122–132.
- OZEROVA, N. A., NABOKO, S. I. and VINOGRADOV, V. I. (1971) Sulphides of mercury, antimony, and arsenic, forming from the active thermal spring of Kamchatka and Kuril Islands. *Soc. Min. Geol. Japan, Spec. Issue* no. 2, p. 164–170.
- PARÁK, T. (1975) Kiruna iron ores are not “intrusive-magmatic ores of the Kiruna type”. *Econ. Geol.*, vol. 70, p. 1242–1258.
- PEARCE, J. A. (1975) Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus. *Tectonophysics*, vol. 25, p. 41–67.
- PEREIRA, J. and DIXON, C. J. (1971) Mineralization and plate tectonics. *Mineral. Deposita*, vol. 6, p. 404–405.
- PYKE, D. R., NALDRETT, A. J. and ECKSTRAND, O. D. (1973) Archean ultramafic flows in Munro Township, Ontario. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 84, p. 955–978.
- SAWADA, K. (1973) Geochemistry of geosynclinal greenstones of the Chichibu and Sambagawa belts in central Shikoku. *J. Geol. Soc. Japan*, vol. 79, p. 651–668.
- SAWKINS, F. J. (1972) Sulfide ore deposits in relation to plate tectonics. *J. Geol.*, vol. 80, p. 377–397.
- SCLTER, J., HAWKINS, J., MAMMERICKX, J. and CHASE, C. (1972) Crustal extension between the Tonga and Lau ridges: petrologic and geophysical evidence. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 83, p. 505–518.
- SHIBATA, K. and ISHIHARA, S. (1974) K–Ar ages of the major tungsten and molybdenum deposits in Japan. *Econ. Geol.*, vol. 69, p.

1207-1214.

- SHIMAZAKI, H. (1975) The ratios of Cu/Zn-Pb of pyrometasomatic deposits in Japan and their genetical implications. *Econ. Geol.*, vol. 70, p. 717-724.
- SILLITOE, R. H. (1972a) Relation of metal provinces in Western America and the subduction of oceanic lithosphere. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 83, p. 813-818.
- (1972b) Formation of certain massive sulphide deposits at sites of sea-floor spreading. *Trans. Inst. Min. Metall.*, Sec. B, vol. 81, p. 141-148.
- SUGIMURA, A. (1960) Zonal arrangement of some geophysical and petrological features in Japan and its environs. *J. Fac. Sci. Univ. Tokyo*, Sec. 2, vol. 12, p. 133-153.
- , MATSUDA, T., CHINZEI, K. and NAKAMURA, K. (1963) Quantitative distribution of late Cenozoic volcanic materials in Japan. *Bull. Volcanol.*, vol. 26, p. 125-140.
- SUGISAKI, R., MIZUTANI, S., ADACHI, M., HATTORI, H. and TANAKA, T. (1971) Rifting in the Japanese late Palaeozoic geosyncline. *Nature* (London), vol. 233, p. 30-31.
- , ———, HATTORI, H., ADACHI, M. and TANAKA, T. (1972) Late Paleozoic geosynclinal basalt and tectonism in the Japanese islands. *Tectonophysics*, vol. 14, p. 35-56.
- SUTTON, J. (1973) Some changes in continental structure since early Precambrian time. in Tarling, D. H. and Runcorn, S. K., eds., *Implications of continental drift to the earth sciences*, vol. 2, Academic Press Inc. (London) Ltd., p. 1071-1081.
- SUZUKI, T., KASHIMA, N., HADA, S. and UMEMURA, H. (1972) Geosyncline volcanism of the Mikabu green-rocks in the Okuki area, western Shikoku, Japan. *J. Japan Assoc. Min. Pet. Econ. Geol.*, vol. 67, p. 177-192.
- SYKES, L. R. (1970) Earthquake swarms and sea-floor spreading. *J. Geophys. Res.*, vol. 75, p. 6598-6611.
- 高橋維一郎 (1962) 松尾硫黄硫化鉄鉱山の地質鉱床および母岩の変質に関する研究. 岩手大工研報告, vol. 15, p. 1-129.
- TALWANI, M., LE PICHON, X. and EWING, M. (1965) Crustal structure of the mid-oceanic ridges. 2. Computed model from gravity and seismic refraction data. *J. Geophys. Res.*, vol. 70, p. 341-352.
- WILSON, J. T. (1963) A possible origin of the Hawaiian Islands. *Can. J. Phys.*, vol. 41, p. 863-870.
- (1968) in: *Science, history and Hudson Bay*, Dept. Energy, Mines and Resources Canada, Ottawa, 1015 p. cited in BURKE, K. and DEWEY, J. F. (1973).
- (1973) Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*, vol. 19, p. 149-164.
- ZONENSHAIN, L. P., KUZMIN, M. I., KOVALENKO, V. I. and SALTYSKOVSKY, A. J. (1974) Mesozoic structural-magmatic pattern and metallogeny of the western part of the Pacific belt. *Earth Planet. Sci. Letts.*, vol. 22, p. 96-106.

(受付: 1976年5月11日; 受理: 1976年6月5日)