

特集 銅 資 源

# 世界及びわが国の銅鉱床

## Copper Deposits in the World and Japan

武 内 寿 久 禰\*

Sukune Takenouchi

### 1. はじめに

近年の日本の工業の発展は著しいが、それを支えるエネルギー・原料の自給に関しては、全く心許ない状況である。現在は幸いなことに海外からのこれら資源の輸入が順調におこなわれており特別の危機感はないが、何らかの理由でこれら資源の輸入が途絶えた時の状況は予想するだに恐しい。しかし、現実には資源の海外依存度は今後ますます高くなるであろうから、その安定供給の確保はこれからの重要な問題である。本稿では銅資源について世界の産状を概観し、その開発を思索する参考に供したい。

わが国の単位面積当りの金属資源量は比較的恵まれている方<sup>1)</sup>であり、昔から鉱業がさかんで、江戸時代、明治時代には銅の輸出国であった。しかし、現在は銅価格の低迷、物価・人件費の上昇、諸種の社会情勢から、銅鉱生産はほとんど採算がとれず、昔から有名な銅鉱山の多くが閉山され、銅の自給率は数%という状態になっている。例えば、1981年のわが国のプリスターの生産は98万tであったが、国内鉱からの生産は僅に51,500tであり、海外からの輸入銅精鉱が84.4%を占めていた。

かつてのわが国の銅資源は、銅鉱脈（栃木県足尾、秋田県尾去沢など）、別子型含銅硫化鉄鉱床（愛媛県別子、茨城県日立など）、スカルン鉱床（岩手県釜石など）と黒鉱鉱床であったが、現在では銅鉱脈と別子型鉱床を採掘する鉱山は無い。一方、日本に輸入されてくる銅精鉱は斑岩銅鉱床、始生代の塊状硫化物鉱床、銅鉱層などから生産されたものであり、これらは日本には存在しない型の銅鉱床である（図-1）。

### 2. 斑岩銅鉱床<sup>2,3)</sup>

斑岩銅鉱床は中性-酸性の斑状貫入岩（斑状花崗岩

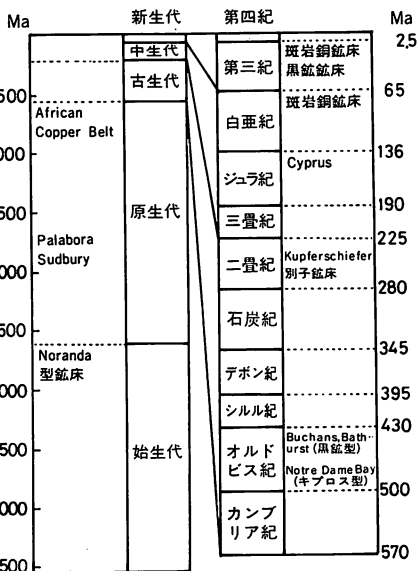


図-1 各種銅鉱床の地質時代 (Maは百万年)

または斑岩)の活動に伴い生成した低品位ではあるが莫大な鉱量を有する鉱染状または細脈の網状鉱床で、もっとも重要な銅資源であり、おそらく世界の銅資源量の50%以上を占めているであろう。鉱床生成の地質時代は比較的若い。古生代に生成した鉱床も若干はあるが、多くの鉱床は中生代から第三紀にかけて生成したもので、環太平洋造山帯やヒマラヤ-アルプス造山帯に分布し、銅のほか微量のMo, Auを伴う。とくに、米国西南部および南米大陸西海岸には白亜紀から第三紀にかけて生成した鉱床が多数集中している。南西太平洋地域ではフィリピン、パプア・ニューギニア、ソロモン群島に多いが、この地域の鉱床は第三紀中新世・鮮新世に生成した若いものが多い。アルプス造山帯ではパキスタン (Chagi 地域)、イラン (Kerman 地域)、ブルガリア (Srednogorian)、ユーゴスラビア (Majdanpak)、ルーマニア (Banat) などに斑岩銅鉱床が発見されており、中国雲南省一チベット褶曲帯中の玉竜鉱床なども一連の鉱化作用といわれてい

\* 東京大学工学部資源開発工学科教授  
〒113 東京都文京区本郷7-3-1

る。いずれも古第三紀に生成したものである。

古生代の鉱床としては、カナダ Appalachian 造山帯中の Gaspe (デボン紀)、オーストラリア Queensland 州の Moonmera (二畳紀) や、カザフ共和国の Kounrad、ウズベク共和国の Almalyk、モンゴル北西部の Erdenetiin-Obo 鉱床などの二畳紀の鉱床が知られている。

中国では、前述の雲南省一チベットの古第三紀鉱床のほかに、燕山期 (中生代ジュラ紀一白亜紀) の火成活動に関連して徳興・城門山 (江西省)、八宝山 (河南省) や黒竜江省の鉱床が生成している。とくに江西省の徳興鉱床は銅量 850 万 t といわれる大鉱床である<sup>4)</sup>。

斑岩銅鉱床は Cu-Mo 型と Cu-Au 型に大別される。Cu-Mo 型は Andean 型、Cordillera 型とも呼ばれ 0.1~0.2% の Mo を伴い、地殻の比較的厚い大陸部に多い。Cu-Au 型は島弧型と呼ばれ、0.3~1.0g/t の Au を伴い、地殻の薄い大洋環境下の島弧に分布する。しかし、アラスカ、カナダ西部には中生代三畳紀一ジュラ紀のアルカリ岩に伴い Au を含む斑岩銅鉱床があり Hollister<sup>5)</sup> により閃緑岩型と呼ばれている。

斑岩銅鉱床の生成環境の概念は図-2 に示されるように、成層火山の基部のマグマ溜りの頂部付近で、地表から 2,000~4,000m の深さと推定されている。水を含

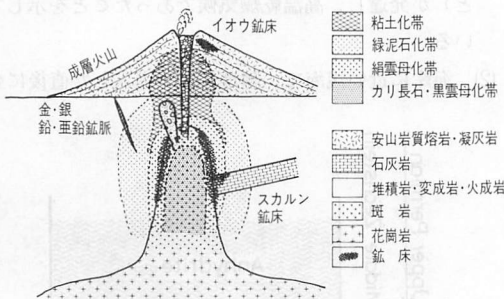


図-2 斑岩銅鉱床のモデル (Sillitoe, 1973 による)

んだマグマが比較的急速に地殻浅所に貫入し圧力が低下すると、マグマは水に過飽和となり、高温熱水が放出される。この熱水は塩化物に富み、時には数十%の濃度に達し、重金属を多量に溶解している。この熱水 (マグマ水) が貫入岩体から周囲に拡散し、地下水と混合すると、塩濃度、温度ともに下り、溶解していた重金属を沈殿して鉱床を形成する。従って、熱水による岩石の変質は貫入岩体を中心にして、カリ長石・黒雲母の生成するカリ変質帯、絹雲母を主とする変質帯、緑泥石を主とする変質帯と同軸状の帯状分布を示し、上部にはカオリンを主とする粘土化帯を形成する。鉱

石は貫入岩体の周縁部および被貫入岩中に細脈の網状体または鉱染体として形成されているが、とくにカリ変質帯と絹雲母変質帯の境付近に高品位鉱が形成されている。

日本は島弧にあり火山は多いが、斑岩銅鉱床はまだ発見されていない。斑岩銅鉱床地帯にはカルデラを作るような大規模な火砕流堆積物が無いが、日本には大規模なカルデラが多い。カルデラを作るような大規模な火砕流の噴出はマグマ溜り頂部に濃集した金属を含む揮発性成分 (熱水) も放出してしまい、そのために斑岩銅鉱床ができなかったとの説が提唱されている<sup>2)</sup>。

### 3. 砂岩・頁岩型銅鉱層<sup>3, 6)</sup>

この型の銅鉱床は世界の銅資源の約30%を占め、斑岩銅鉱床に次いで重要なものである。なかでも、ザイールとザンビアの国境に沿い約 500 km に及んで鉱床が分布する African Copper Belt と呼ばれる地帯は銅、コバルトの重要な供給地となっている。また、ヨーロッパではドイツ、ポーランドを中心に含銅頁岩層が広範囲に分布している。

#### 3.1 African Copper Belt

基盤の高まりを囲むように分布する原生代後期 (700 Ma) の堆積岩層のなかに層状鉱床が胚胎する (図-3)。結晶片岩、片麻岩、花崗岩よりなる基盤岩を不整合に覆う Katanga 累層の Lower Roan 層は崖錐堆積物、

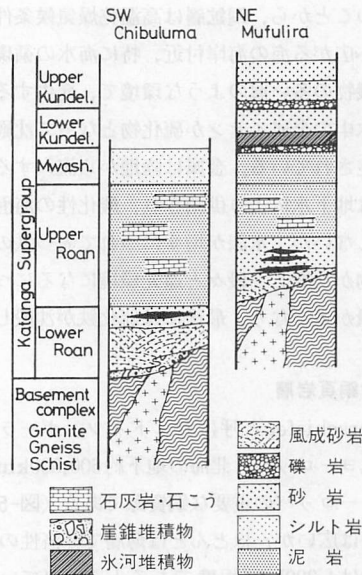
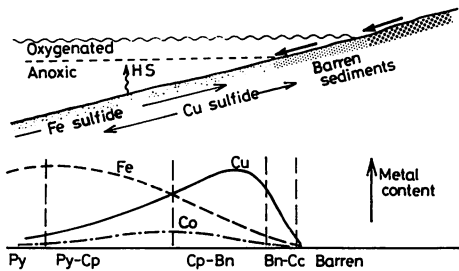


図-3 African Copper Belt 地帯の層序図 (Fleischer et al., 1976 による)

風成砂岩、砂岩、泥岩よりなり、上部の砂岩・泥岩層中に鉱床がある。鉱床の上は硬石膏 ( $\text{CaSO}_4$ ) を含むドロマイト質岩石からなる Upper Roan層となる。

African Copper Beltの鉱床の特徴として、1)層状で連続性があるが、分布範囲は原生代後期の浅海の海岸線に沿う数kmの幅の中に限られる、2)基盤の直上には陸成砂岩層が発達し、鉱床はその上に乗る海成砂岩・泥岩層中にある、3)古海岸線から沖へ向い、不毛帯、輝銅鉱 ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) 帯、斑銅鉱 ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) 帯、黄銅鉱 ( $\text{CuFeS}_2$ ) 帯、黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) 帯からなる鉱物の帯状分布が認められる (図-4)、4)鉱石組織に堆



Cc: 輝銅鉱, Bn: 斑銅鉱, Cp: 黄銅鉱, Py: 黄鉄鉱

図-4 頁岩型銅鉱層の鉱物の帯状分布と金属含有量の変化 (Fleischer et al., 1976による)

積を示す構造が認められる、5)鉱床を胚胎する海成層に石こうとストロトマタイト\*が含まれており、高温乾燥気候地帯の浅海に特徴的な濃縮海水条件を示唆している、などが掲げられる。

以上のことから、銅鉱層は高温乾燥気候条件下で南から北へ広がる海の海岸付近、特に海水の循環が不活発な有機物の多い渦のような環境で、発生する  $\text{H}_2\text{S}$  により海水中の金属イオンが硫化物となって沈殿したものと推定されている。金属は陸地から流入する河川水あるいは地下水により供給され、酸化性の海面付近では沈殿しないが、水深が増すにつれて先づ鉄の少ない銅硫化物が沈殿し、段々と還元環境になるにつれて鉄の含有量が多くなり、最後には硫化鉄が沈殿したものである。

### 3.2 含銅頁岩層

Kupferschieferと呼ばれ、ドイツ、ポーランドを中心に北ヨーロッパ、北海の地下約600,000km<sup>2</sup>に分布し、ヨーロッパの重要な銅資源である (図-5)。分布面積は広いが、ほとんどは薄層で経済性のある銅鉱層面積は1,200km<sup>2</sup>程度であると言われている。著名な東ドイツの Mansfeld では12世紀以来約150万t

\* 先カンブリア時代の石灰質化石

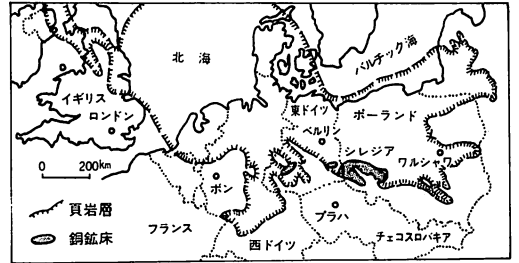


図-5 Kupferschieferの分布範囲 (Sawkins, 1984による)

の銅が採掘され、また、ポーランドの鉱床地帯では深さ600~1,000mに約1.5億t (Cu 0.7~1.7%) の埋蔵鉱量が報告されている。Cuのほかには微量のAg, Pb, Zn, Niが含まれている。

鉱層は古生代二疊紀中期の浅海堆積物である Zechstein層中に胚胎する。鉱床の下盤は赤色風成砂岩層で、その上に硬石膏、岩塩を伴うドロマイト質石灰岩・頁岩層が堆積している。鉱層は石灰岩・頁岩層の最下部の不整合面に近い所にある (図-6)。

含銅頁岩層の堆積環境は、地質時代は異なるが、African Copper Beltのそれに似た点が多い。すなわち、

- (1) 鉱床下盤に陸成赤色砂岩、上盤に蒸発岩 (岩塩など) が発達し、高温乾燥気候であったことを示している。
- (2) 海岸に近い浅海で、陸地に海が進入した直後に金

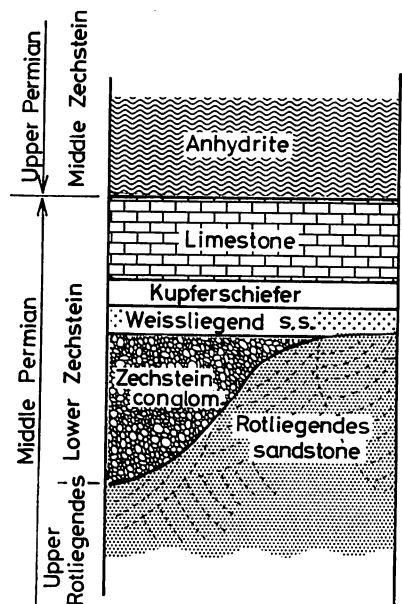


図-6 Zechsteinの層序図

属硫化物が沈殿した。

(3) 鉱床母岩中に有機炭素が多く含まれ、還元性の堆積環境であったことを示している。

砂岩・頁岩型銅鉱層の堆積した地質時代は上述のほかに数時期ある。原生代初期(ソ連シベリアのUdokan), 原生代中期(米国Montana州—カナダB.C.州のBelt Supergroup中の鉱層), 原生代後期(オーストラリアS. Australia州のRoxy Downs, Mt. Gunson; 米国Michigan州のWhite Pine), 二疊紀—三疊紀(カザフ共和国のDzhezkazgan; 米国New Mexico州—Texas州), 第三紀(ボリビアのCorocoro, Chacarilla)などが主なものである。

#### 4. 火山性塊状硫化物鉱床<sup>3,6)</sup>

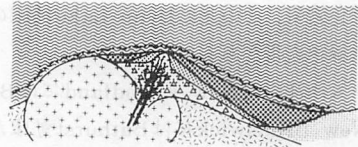
海底の火山活動に伴って生成した銅・鉛・亜鉛硫化物の緻密塊状鉱床よりなる鉱床を総称して火山性塊状硫化物鉱床(Volcanogenic massive sulfide deposit)と呼んでいる。この型の鉱床はある層準の地層に胚胎していることが多いので、層準規制鉱床(Strata-bound deposit)として総括されることもある。

火山性塊状硫化物鉱床はさらに、カルクアルカリ岩系の酸性火山岩に伴う黒鉱型鉱床(あるいはNoranda型)、および海洋性玄武岩に伴うCyprus型鉱床(あるいは別子型)に大別される。すなわち、黒鉱型鉱床は島弧において、Cyprus型・別子型鉱床は海嶺や海洋地殻の発生部において形成されており、両者の生成する地質環境は極めて対照的である。

##### 4.1 黒鉱型(Noranda型)鉱床<sup>7,8)</sup>

わが国の重金属資源のなかで現在もっとも経済的価値のある鉱床は、いわゆるグリーンタフ地域、とくに秋田県北部に分布する黒鉱鉱床である。黒鉱鉱床は第三紀中新世の海底に、酸性火山岩の活動に続いて噴出した熱水から沈殿した銅・鉛・亜鉛・銀に富む鉱床で、海底噴気堆積性鉱床(Submarine exhalative sedimentary deposit)とも呼ばれている。鉱床生成に関係する火山岩は島弧に発生するカルクアルカリ岩系の流紋岩ないし石英安山岩である。

鉱床は塊状ないしレンズ状で、上部より黒鉱、黄鉱、珪鉱と呼ばれる鉱石が累積し、鉱体上部は海底に沈殿した堆積性の鉱石であるが、下部は凝灰岩類やドーム状流紋岩体中に脈状ないし網状に伸びており、かつての鉱化流体の通路であったと推定されている。鉱床の下盤は一般に第三紀中新世西黒沢階の酸性凝灰岩類、上盤は同女川階の泥岩であり、鉱床は両者の間の同一



- |          |          |
|----------|----------|
| ■ 黒 鉱    | □ 流紋岩円頂丘 |
| ■ 黄 鉱    | ■ 石英脈    |
| ■ 珪 鉱    | ■ 鉄石英    |
| □ 石こう    | ■ 火山角礫岩  |
| ■ 凝灰岩・泥岩 | ■ 酸性凝灰岩  |

図-7 黒鉱鉱床のモデル (Sato, 1974)

層準に胚胎している(図-7)。鉱石には緻密塊状、鉱石礫の堆積構造、級化層理による層状構造など変化に富み、堆積を示す構造の顕著な部分がある。下盤の流紋岩の熔岩円頂丘には角礫化構造の発達した部分があり、また不規則な貫入角礫岩脈があり、激しい水蒸気爆発があったことを示唆している。

鉱石のうち、黒鉱は細粒の方鉛鉱(PbS)、閃亜鉛鉱(ZnS)よりなり、銀の含有量の高いものがある。しばしば重晶石(BaSO<sub>4</sub>)を伴う。黄鉱は黄銅鉱(Cu-FeS<sub>2</sub>)、黄鉄鉱(FeS<sub>2</sub>)よりなり、珪鉱は石英を主体に少量の黄銅鉱・黄鉄鉱を伴う。鉱体の周辺には大量の石こう(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)を伴うことが多い。

秋田県大館市付近は北鹿地域と呼ばれ、花岡・松峯、釈迦内、餌釣、深沢、小坂(元山、内の岱、上向)、相内、古遠部など多くの黒鉱鉱床が分布し、埋蔵鉱量は1億tに達する。第三紀生成の黒鉱型鉱床はフィリピンSamar島のBagacai鉱床などが日本以外で知られているが、数は少ない。フィジー諸島Vanua Levuには第三紀中新世末生成の黒鉱型鉱床があるが極めて小規模である。

カナダOntario州南東部の楯状地には第三紀黒鉱鉱床に似た先カンブリア時代の塊状硫化物鉱床が発見されている。鉱床は始生代(2600Ma)の緑色岩帯中の流紋岩に伴い、形態も似ているが、鉛含有量が少く、石こう・重晶石など硫酸塩鉱物を欠く点が第三紀黒鉱鉱床と異なる。Noranda地域のHorne, Timmins地域のKidd Creek, Matagami地域のMatagami Lakeなど2,000万tから6,000万t以上に達する大規模な鉱床が発見されているので、先カンブリア時代の流紋岩に伴う銅—亜鉛塊状硫化物鉱床をNoranda型鉱床と呼ぶことがある。

Noranda型鉱床は原生代や古生代にも生成している。カナダのManitoba—Saskatchewan州境近くにはFlin FlonやSnow Lakeなどの鉱床を胚胎する原

生代の緑色岩帯，その北にLynn Lake鉱床のある別の原生代緑色岩帯がある。

カナダ大西洋岸のNew FoundlandにはBuchans鉱床，New BrunswickにはBathurst鉱床が古生代オルドビス紀の中性一酸性火山砕屑岩の中に発見されているが，これらの鉱床には方鉛鉱や重晶石が伴い，黒鉱型鉱床とされている。

先カンブリア時代に生成した鉱床は，生成後長い地質時代を通じて多少とも変形を受けており，生成時の鉱床の形態が失われていて，成因の考察が困難な場合がある。一方，第三紀に生成した黒鉱鉱床はあまり変形を受けておらず，日本の多数の鉱床研究者，探査関係者により詳細な観察データが蓄積されてきた。これらのデータが先カンブリア時代の鉱床の成因論に大きく貢献したことは言を待たない。現在では，黒鉱はKurokoとして国際的に使用されている。

4.2 Cyprus型・別子型鉱床<sup>3,6)</sup>

Cyprus島の銅鉱は紀元前2500年頃から採掘されていたが，鉱床の規模は概して小さい。島の南西部に中生代ジュラ紀一白亜紀の海底火山活動の産物と考えられる塩基性一超塩基性火成岩体（Troodos岩体）が北西一南東方向に伸びて分布する。岩体の中央部は蛇紋岩，かんらん岩，斑れい岩からなる深成岩類，その周囲に多数の塩基性岩岩脈群よりなる輝緑岩，さらに外側に3層の玄武岩質枕状熔岩が分布している（図-8）。これらの岩石の上下関係は海洋地殻の構造に似ており，Troodos岩体はプレートの衝突により地表に顔を出し

た海洋地殻（Ophioliteと呼ばれる）と考えられている。Cyprusの銅鉱床は枕状熔岩の上部層と中部層の間にあり，鉱床は上部の塊状硫化物鉱体と下部に伸びる網状鉱体よりなる。網状鉱体周囲の熔岩は緑泥石一黄鉄鉱一石英の変質を受けており，そこが熱水の通路であったことを示している。

熱水が海底に噴出すると急冷され含まれていた金属類は非晶質泥状の硫化物となって沈殿する。堆積物はその後の続成作用により再結晶して緻密塊状鉱となったものであろう。最近，東太平洋の海嶺付近で発見され，新しい海洋底資源として注目されている海底熱水鉱床<sup>9,10)</sup>はCyprus型銅鉱床の原型かもしれない。トルコのErgani-MadenやMurgul鉱床はCyprus島の鉱床と同時代のCyprus型鉱床と考えられている。また，カナダNew Foundland, Notre Dame Bay地域のBetts CoveやTilt Cove鉱床は古生代オルドビス紀のCyprus型銅鉱床である。（図-9）

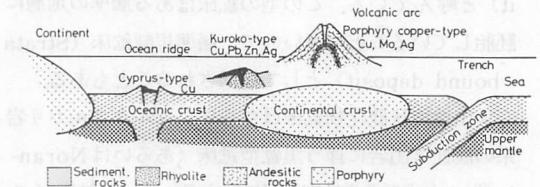


図-9 斑岩銅鉱床，黒鉱鉱床，Cyprus型鉱床の生成環境

別子型あるいはKieslager型銅鉱床<sup>2)</sup>は海洋玄武岩の活動に関連して生成した鉱床である点はCyprus型鉱床に似ているが，玄武岩熔岩は薄く，粘板岩・チャートなどの堆積岩と互層をなし，鉱床は層状である点が異なる。

わが国の三波川系結晶片岩のなかには愛媛県別子鉱床（Cu 2.5%，3,000万t）のほか佐々連（愛媛県），白滝（高知県），飯盛（和歌山県），久根・峯の沢（静岡県）など多くの別子型銅鉱床があり，かつてはさかんに採掘され，日本の重要な銅資源の一つであった。別子鉱床は走向方向1,800m，厚さ平均3m，露頭から最下底坑道まで傾斜方向に約2,500mの間が開発された大規模な鉱床であった。三波川系全体が広域変成作用を著しく受け，泥質岩は黒色片岩に，塩基性凝灰岩・熔岩は緑色片岩となり，鉱床は変形して生成時の状況を推定することは極めて難しい。

近年の精力的海洋調査の結果，紅海の2,000m前後の深さの海底のくぼみに50°~60°Cで25%にも達する高濃度の塩水が溜り，その下にCu 1%，Zn 5%前後

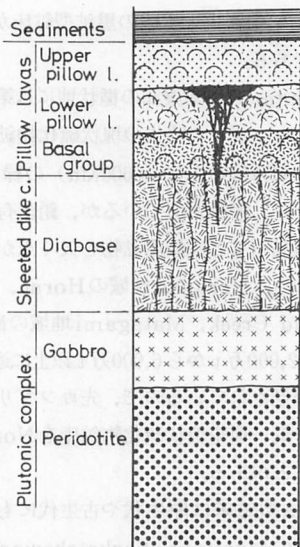


図-8 Cyprus島Troodos岩体の層序図

の含有量で約5,000万tに達する未固結泥状沈殿物が発見され<sup>11)</sup>、金属資源として開発計画がたてられている。別子型鉱床の原形は、このような陸地に近く碎屑物の供給が多いプレートの開口部の海底において、玄武岩の活動に伴い金属の硫化物が層状に堆積したものと考えられる。

## 5. おわりに

前述の各種鉱床型のほかにも銅資源となる鉱床は少ない。地殻の割目に銅鉱物が沈殿した鉱脈鉱床や、炭酸塩岩（日本ではほとんど石灰岩）に花崗岩が貫入した時に主に炭酸塩岩を交代してできるザクロ石・単斜輝石からなるスカルン岩体中の銅鉱床などは日本の重要な銅資源である。世界的にはこれらのほかに、玄武岩熔岩の孔隙に沈殿した自然銅の鉱床や、塩基性—超塩基性貫入岩中の銅—ニッケル鉱床（Sudbury型およびKomatiite型）が重要である。

玄武岩中の自然銅鉱床としては米国Michigan州Superior湖南岸のKeewenaw半島にある原生代後期の玄武岩熔岩中の鉱床がMichigan native copperとして知られている。この鉱床の上位には前述のWhite Pine頁岩型銅鉱層がある。

Sudbury 鉱床<sup>2)</sup>はカナダOntario州南部Huron湖の北にあり、しそ輝石斑れい岩からなる大きさ60×25 kmの舟底形貫入岩体（貫入年代2,000Ma）で、Cu600万t、Ni600万tを含有している。金属硫化物はマグマ（珪酸塩メルト）の中に不混和液として分離していた硫化物メルトが固結したもので、正マグマ性鉱床に分類されている。この貫入岩体のマグマや構造は隕石の衝突によりつくられたとの説もある。Komatiite型鉱床<sup>3)</sup>は始生代の緑色岩帯に分布するMgに富む超塩基性岩（マントル物質の部分熔融の産物と考えられている）の基底部分にNiに富む硫化鉱物が濃集したもので、西オーストラリアのKambalda、カナダのManitoba、Abitibiなどの銅—ニッケル鉱床がある。

南アフリカ共和国の北東部にあるPalabora 鉱山はカーボナタイトと呼ばれる炭酸塩マグマが固結した岩石の中の銅鉱床を採掘している世界に例のない鉱山である。カーボナタイトは上部マントル物質が部分熔融してできたアルカリ岩系マグマから分化して生成した岩石で、ダイヤモンドを伴うKimberliteと成因的関連があるとされている。

以上のように、銅は地球におきる種々の地質現象に伴って濃集している。最近では前述の地球の割目に生成

する海底熱水鉱床や大洋底のマンガン団塊も銅資源として注目されている。これはSn, W, Mo鉱床が花崗岩活動に伴い生成していることや、Ni, Crがかんらん岩、蛇紋岩に伴うこととは対照的である。従って、銅資源の探査・開発に際しては、これら種々の鉱床型の性質をよく把握した上で無駄のない計画をたてる必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 立見辰雄；総鉱物資源量見積りのための1つの試み，鉱山地質，29巻，4号（1979），227～238。
- 2) 立見辰雄（編）；現代鉱床学の基礎（1977），東京大学出版会。
- 3) 佐々木昭・石原舜三・関陽太郎（編）；地球の資源/地表の開発（1979），岩波講座地球科学14。
- 4) 石原舜三；中国の鉱物資源 2—ポーフィリー型Cu, Mo 鉱床，地質ニュース，335号（1982），18～32。
- 5) Hollister, V.F.；Geology of the Porphyry Copper Deposits of the Western Hemisphere（1978），AIME。
- 6) Wolf, K.H.（ed.）；Handbook of Strata-bound and Stratiform Ore Deposits Vol.6（1976），Elsevier。
- 7) Ishihara, S.（ed.）；Geology of Kuroko Deposits.（1974），Mining Geology Special Issue No.6。
- 8) 堀越 毅（編）；黒鉱，島弧，縁海（1983），鉱山地質特別号11号。
- 9) 佐藤壮郎・水野篤行；新しい海底鉱物資源，科学，53巻，2号（1983），101～106。
- 10) 浦辺徹郎；海底の熱水鉱床とユニフォームタリアニズム，海洋科学，15巻，9号（1983），548～553。
- 11) Degens, E.T. and Ross, D.A.（eds.）；Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea（1969），Springer-Verlag。
- 12) Sawkins, F.J.；Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics,（1984）Springer-Verlag。

