

モロッコにおける鉛床探査技術協力 -見えざる所に鉛-亜鉛鉛鉱石はあり-

渡辺 寧¹⁾

1. はじめに

2000年3月の末日、地質調査所次長から1枚の紙を受け取った。それにはモロッコにおける鉛物資源探査のためのマニュアルの目次が記されていた。それから瞬く間にモロッコでの国際協力事業団(JICA)のプロジェクト型技術協力を手伝うことが決まった。これまで環太平洋地域で鉛物資源の研究をしてきた私にとって、大西洋側の鉛床の知識はない。さらにこのプロジェクトでは、鉛床探査理論の専門家として石原舜三・佐藤壮郎両氏の元・前工業技術院長が既に派遣されている。これらの前任者の後継ということ考えると気が重かったが、「乗りかかった船」で2000年6月20日から約40日間、現地に滞在することになった。

モロッコで現在行われている「鉛物資源探査技

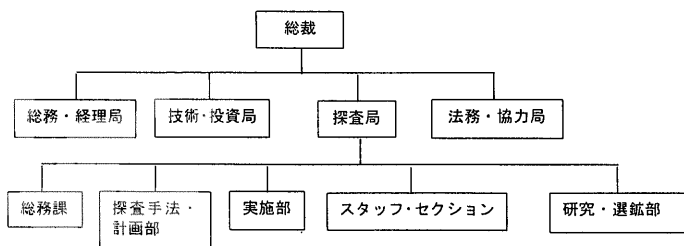
術向上プロジェクト」(1998-2002年)は、モロッコ鉛床探査開発公社(BRPM)の探査部門(第1図、写真1)をカウンターパート機関としている。BRPMは日本の金属鉛業事業団に相当する組織で、モロッコ国内の金属・非金属資源の探査を行っている。かつては鉛山の開発も行っていたが、現在では発見した鉛床はテンドーにかけられ民間企業に売却されている。BRPMの探査部門には約30名の地質技師が在籍し、その他に物理探査・地化学探査を行う技師も所属している。このプロジェクトでは、探査部門の技師が中心となり、モロッコで鉛物資源探査を行う際に有効なマニュアルを作成することになっており、私の任務はその編集作業を手伝うことであった。

私が首都ラバトに着任した時、BRPM探査部門は新鉛床の発見で沸き返っていた。ラバトから約300km南西に位置するマラクেশ付近で火山堆積性塊状硫化物鉛体を2本のボーリングがヒットしたのである。マニュアル編集にあたってはモロッコの鉛物資源の実態を知る必要があり、幸いにも新しく発見された鉛体のボーリングコアを含め、幾つかの鉛床を観察する機会を得た。モロッコの地質と



写真1 首都ラバトにあるBRPM探査局の外観。

鉛山探査投資公社組織図(人員: 1,121名)



第1図 BRPMの組織図。

1) 産総研 地圏資源環境研究部門

キーワード: モロッコ, JICA, 鉛床探査, 鉛山探査投資公社, 技術協力

第1表 モロッコの主要金属鉱物資源生産量.

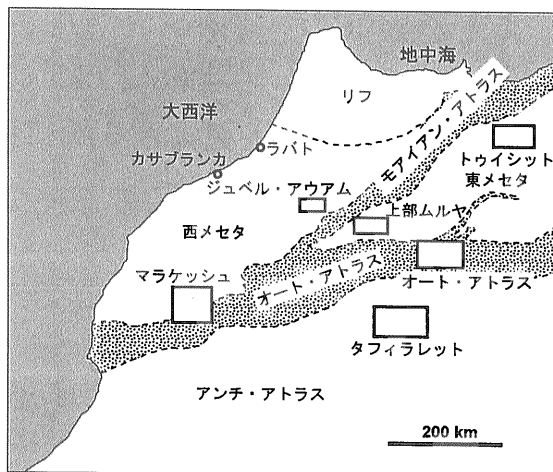
金属鉱物資源	1994年	1995年	1996年	1997年
鉛精鉱	104,545	101,631	105,577	110,507
鉄精鉱	65,233	47,192	11,842	11,965
銅精鉱	36,010	35,952	37,623	37,344
亜鉛精鉱	150,201	153,125	152,580	171,796
回収銀	3,767	3,892	482	262
マンガン鉱石	31,452	31,263	29,466	28,845
コバルト	3,810	4,885	5,033	7,137

(単位トン) Abarro et al. (1988)による.

鉱物資源の概要は既に松任谷 (1999), 石原 (1999) により本誌に報告されているので, ここではモロッコの主要な金属鉱物資源である鉛-亜鉛鉱床に絞った紹介をする.

2. モロッコの鉛-亜鉛鉱床

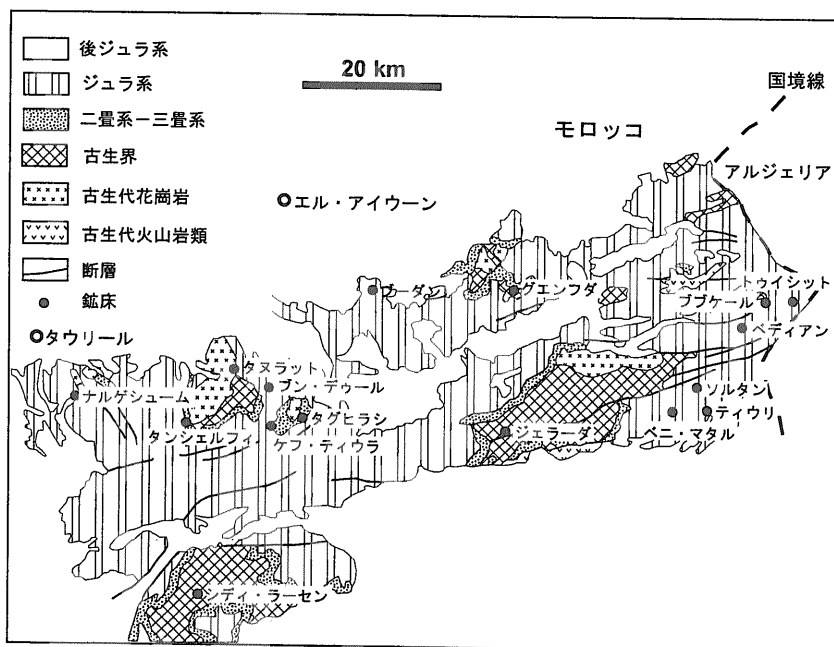
モロッコはローマ時代から北アフリカで最も重要な鉛の生産地であった (Emberger, 1965). モロッコの金属産出量を見ると, 現在でも亜鉛・鉛が最も多く生産されており, 銅・マンガン・コバルト・銀がこれらに次いでいる (石原, 1999; 第1表). 金鉱山も存在するが, 生産量は現在のところあまり多くない. この特徴は, モロッコがヘルシニア期を除いては海洋地殻の沈み込みに伴う弧火成活動の場に



第2図 モロッコの主要な鉛-亜鉛鉱床区 (Wadjinny, 1998を改変).

位置しなかった (Boullin et al., 1988) ことが原因と考えられる.

モロッコの主要な鉛-亜鉛鉱床はミシシッピーバレー型, 火山堆積性塊状硫化物型, 鉱脈型の3つのタイプからなる. これらはトウイシット (Touissit), 上部ムルヤ (Upper Moulouya), ジュベル・アウアム (Jbel Aouam), マラケシュ (Marrakech) 等の6つの地域に分布している (第2図).



第3図 トウイシット地域の地質と鉱床分布図 (Azza, 1997).

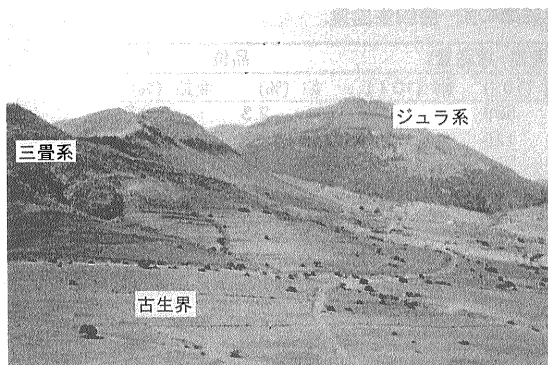
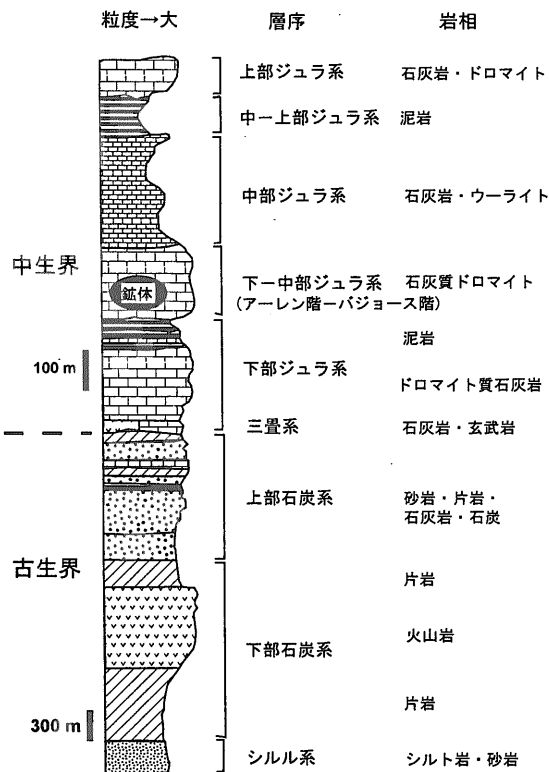


写真2 古生界とそれを覆う三畳系、ジュラ系の産状(シリ・モハメッド鉱徴地付近)。手前の小山を構成している地層が三畳系で、その下位が古生界、上位(遠方の山の頂上付近に見える水平な地層)はジュラ系石灰岩。

モロッコの地形は、高い山脈を形成するモアイアン・アトラス及びオート・アトラス、中程度の高さの解析準平原地形を持つメセタと呼ばれる古生代構造山地、地中海とアフリカ大陸の衝突で形成された北部のリフ山地、アトラス山脈南側の標高500~1,500mのアンチ・アトラス及び砂漠地帯である西サハラに区分される(松任谷, 1999)。地形区分との関係では、トゥイシット地域は東メセタ、上部ムルヤ地域は東メセタがモアイアン・アトラス山脈とオート・アトラス山脈に収斂する部分に位置する。ジュベル・アウアム及びマラケシュ地域は西メセタに位置する(第2図)。



写真3 鉱床胚胎層準の粗粒石灰質礫岩(シリ・モハメッド鉱徴地)。石灰岩はドロマイトに置換されている。



第4図 トゥイシット地域の模式柱状図(Azza, 1997)。

3. ミシシッピーバレー型鉱床

ミシシッピーバレー型鉱床のうち比較的規模の大きなものは、東メセタのトゥイシット地域と上部ムルヤ地域に分布する(第2図)。

3-1. トゥイシット地域

トゥイシット地域には片岩・堆積岩類と花崗岩類、火山岩類からなる古生界が「孤島」状に地表に露出しており、それらの孤島の間を埋めて中生界が広く分布する(第3図)。

この地域の模式的な柱状図(第4図、写真2)によると、中生界の最下部を占める三畳系は凝灰質泥岩、石灰岩、玄武岩からなり、部分的に蒸発岩を含む。層厚は50m以下と薄く、三畳系が欠けて、直接ジュラ系が古生界を覆っている場合も多い。下部ジュラ系ライアス統はドロマイト質石灰岩、凝灰質石灰岩、凝灰質泥岩からなり、その上位にはアーレン階-バジョース階の比較的粗粒のドロマイト質石灰岩が累重する(写真3)。その上位には中

第2表 トウイシット地域の主要鉱床の鉛-亜鉛生産量。

鉱床名		金属量(生産高+埋蔵量)			品位	
		鉛 (10 ³ t)	亜鉛 (10 ³ t)	銅 (10 ³ t)	鉛 (%)	亜鉛 (%)
モロッコ	ブブケール	520	595	—	2.3	5.7
	トウイシット	370	175	—	3	3.5
	メクタ	225	—	—	12	—
	ハッシ・ニア	160	—	—	12	—
	ベディアン	980	—	24	16	—
	ムシディラ	66	—	—	12	—
	シディ・アムール	30	—	—	5	—
モロッコ合計		2,351	770	24		
アルジェリア	エル・アベッド	360	1,200	—	1.5	3.8
アルジェリア合計		360	1,200			
総計		2711	1970	24	≈4700,000t	

(Ahmed, 1998)

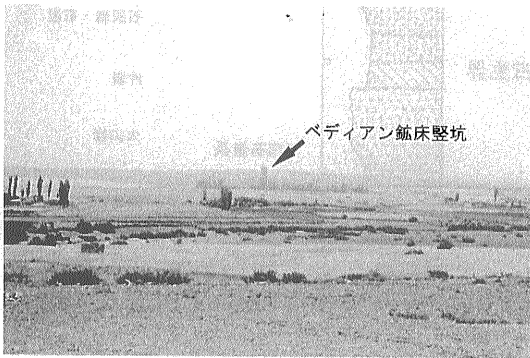


写真4 ミッスイン・グラーベン中央に位置するベディアン鉱床の堅坑。写真撮影を行った位置と写真中の遠方に見える丘がホルスト部、その間がミッスイン・グラーベン。写真中央部の搭状の建造物がベディアン鉱床の堅坑。

部ジュラ系バス階の石灰岩(ウーライトを含む)、中-上部ジュラ系の凝灰質泥岩、上部ジュラ系の石灰岩とドロマイトが累重する。トウイシット鉱床付近では下部ジュラ系は認められず、三畳系または古生界を鉱床母岩のアーレン階-バジョース階が覆っている。

トウイシット地域の地質構造の特徴は別名「ホルスト地域」(Lucas, 1942)と呼ばれるように、東北東-西南西方向のホルスト(地壘)とグラーベン(地溝)構造の発達することにある(第5図)。これらの構造は第三紀の東北東-西南西方向の正断層により切られている(第6図)。

トウイシット地域の主要鉱床はグラーベン構造の中に位置している(写真4)。ミッスイン(Missouine)グラーベンには雁行する2列の鉱床群があり、ブブケール、トウイシット、ベディアン等の鉱床が分布している(写真5)。北側の鉱床列は国境を越

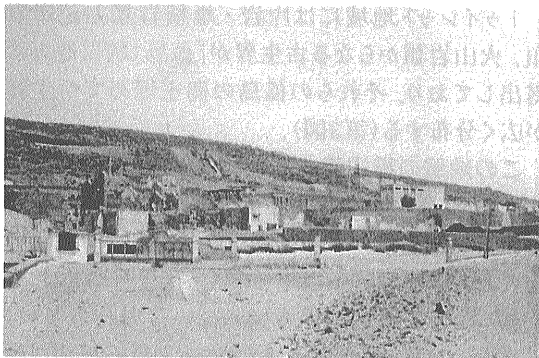


写真5 終掘したトウイシット鉱山の選鉱所跡。砂漠の中のゴーストタウンの様相を呈する。ここから1-2km東へ行くとアルジェリアとの国境に出る。

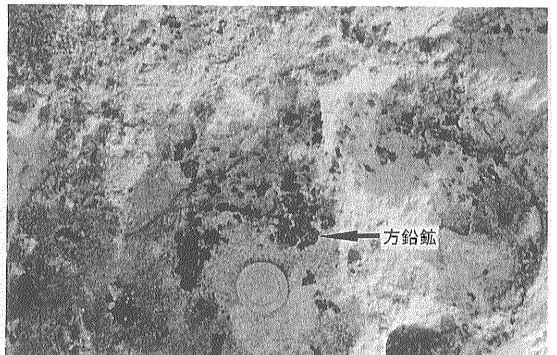


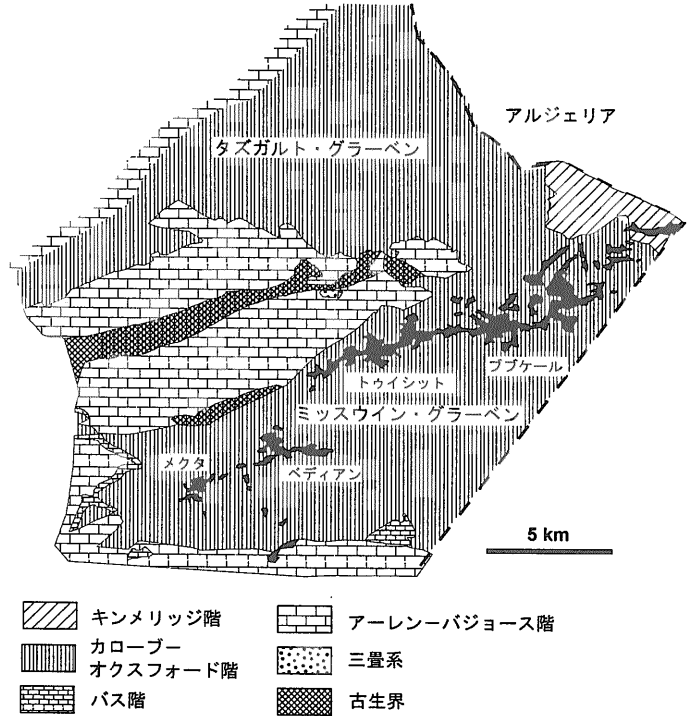
写真6 ドロマイト岩に鉱染する自形の方鉛鉱(シリ・モハメッド鉱徴地)。方鉛鉱は1cm大の自形結晶。

えアルジェリアに延長し、国境からはアルジェリア側の豎坑群を見ることが出来る。これら2列の鉱床群以外にも規模の小さな鉱床はこの地域に点々と分布する(第3図)。

この地域の主要鉱床の鉛、亜鉛生産量を第2表に示す。この地域ではベディアンとトゥイシット鉱床付近を境にして、南西側の鉱床は亜鉛よりも鉛に富んでおり、北東側の鉱床は亜鉛に富む傾向を示す(第2表)。

鉱床はアーレン階-バジョース階のドロマイト質石灰岩を母岩とする層状鉱床である。この地域の石灰岩には、ドロマイト化した母岩中に、カーストの空隙を崩壊物が埋めているチャンネル状の構造が認められ、この透水性の高い崩壊物の部分が鉱床胚胎の場となっている(Touahri, 1997; Hayan, 1997)。メクタ鉱床での研究によると、層状鉱体は塊状または鉱染状の方鉛鉱からなる(写真6)。

塊状鉱体は母岩が破碎された部分に認められ、鉛石鉱物が母岩の空隙に沈殿したことを示している(Rajlich, 1983)。鉱床胚胎母岩の石灰岩層の厚さ



第5図 トウイシット鉱床付近の地質図(Wadjinny,1998)。

と鉱化作用との関係が議論され、母岩層が余り厚くなりすぎると鉱床形成には適さないと考えられている(Wadjinny, 1998)。

第3表 メクタ鉱床の鉱石・脈石鉱物組み合わせ。

鉱石鉱物	組み合わせ 1	組み合わせ 2	組み合わせ 3
方鉛鉱	———		
閃亜鉛鉱	———		
黄鉄鉱	———		----
黄銅鉱	———		----
アンチモン	———		----
輝銅鉱	———		----
銅藍	———		----
白鉛鉱	———	———	———
硫酸鉛鉱	———		----
ファマチナイト	———		----
孔雀石	———		----
藍銅鉱	———		----
脈石鉱物			
白色ドロマイト	———		
多色ドロマイト	———	———	
黄土色ドロマイト	———	———	

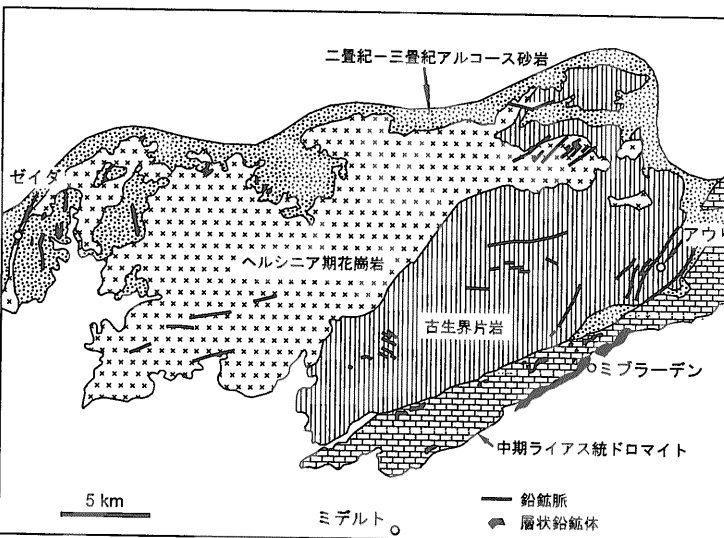
——— 初生鉱物(多量)
 ——— 初生鉱物(少量)
 ---- 二次鉱物(多量)
 ---- 二次鉱物(少量)

(Dupuy and Touray, 1986)

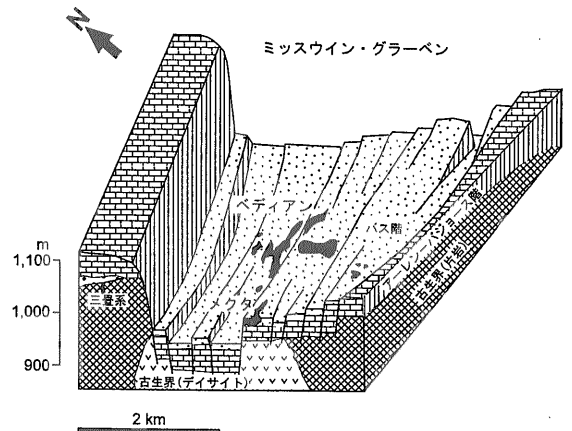
主要鉱石鉱物は自形の方鉛鉱で、時には長径が10cm程度の単結晶も認められる。その他に閃亜鉛鉱、黄鉄鉱、黄銅鉱等が認められ、白鉛鉱、モリブデン鉛鉱、硫酸鉛鉱が方鉛鉱の二次鉱物として出現する。Dupuy and Touray (1986)は3種類の鉱石鉱物組み合わせ(第3表)があり、少なくとも2回の異なる鉱化ステージが存在したと考えている。脈石鉱物はドロマイトからなり、重晶石の細脈を伴う。

閃亜鉛鉱中の流体包有物の研究によると、鉱化作用をもたらした熱水の温度は90℃以上であり、23wt%の塩濃度を示す(Dupuy and Touray, 1986)。方鉛鉱の硫黄同位体比は-3~+2‰で、硫黄の起源は下部の石炭紀の火山岩類であると考えられている(Rajlich, 1983)。

以上に述べたトウシット地域の鉱床は、典型的なミシシッピーバレー型鉱床の特徴を有している。鉱床は、透水性の良い古生界と中生界との境界直上のカースト構造を伴う粗粒石灰岩層を、比較的低温で塩濃度の高い熱水が流れて形成したと考えられている(Rajlich, 1983)。熱水の高塩濃度の理由はこの地域に発達する蒸発岩に求められ、金属の起源は中・古生界に求められる。鉱床の形成時期を示す明確な証拠はなく、ジュラ紀後期~第三紀の間に複数の鉱化ステージにより形成されたと思われる。



第7図 上部ムルヤ地域の地質と鉛鉱床の分布 (Jébrak et al., 1998)。



第6図 ミスウイングラベンと鉱体の位置 (Wadiny, 1997)。

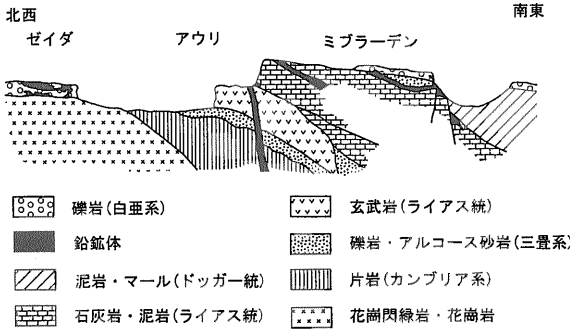
3-2. 上部ムルヤ地域

上部ムルヤ地域には、カンブリア紀の泥質岩と珪岩が分布する。これらの岩石は、ヘルシニア期に起こった低度の緑色片岩相の変成作用を受けている。後期ヘルシニア期にはこれらの堆積岩類に花崗岩が貫入している。

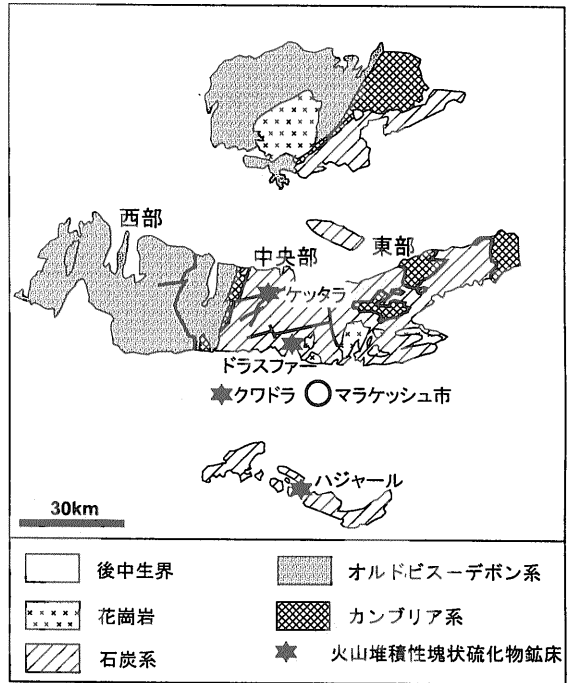
これらを基盤岩として、その上位には二疊紀から三疊紀のアルコース砂岩・礫岩が累重する。この中にはソレアイト質の玄武岩溶岩が挟在される。その上位にはジュラ紀のドロマイト岩、さらに上位には白亜紀の礫岩が分布する(第7図、第8図)。

上部ムルヤ地域には3つの主要な鉛鉱床が分布する。アウリ鉱脈鉱床、層状砂岩胚胎ゼイダ鉱床とミシシッピーバレー型ミブラーデン鉱床である(第7図、第8図)。

アウリ鉱床の鉱脈は主として古生代の岩石に胚胎される。北東-南西走向の最大幅40m、延長13kmにもおよぶ巨大な硫化物が卓越する鉱脈と、北東-南西または東西走向で最大幅10mの重晶石-蛍石が卓越するの鉱脈の二種類の鉱石からなる。これらの鉱脈は三疊紀に複数の鉱化ステージで形成されたと考えられている(Jébrak et al., 1998)。流体包有物の検討から、形成温度は120-150℃で高塩濃度の熱水により形成されたたと推定され



第8図 上部ムルヤ地域の模式断面図。ゼイダ、アウリ、ミブラーデンの鉛鉱体の関係を示す (Jébrak et al., 1998)。



第9図
マラケッシュ地域の地質 (Lescuyer et al., 1998)

る。
ゼイダ鉱床は三畳紀のアルコース礫岩に胚胎される塊状硫化物からなる。鉱化作用は古河川堆積物であるアルコース礫岩・砂岩の最も厚い部分の下底部に認められる。鉱石鉱物は方鉛鉱と白鉛鉱からなり、少量の黄銅鉱、黄鉄鉱を伴う。脈石鉱物は、多量の重晶石と少量の螢石からなる。三畳紀に形成したと考えられている (Jébrak et al., 1998)。

ミブラーデン鉱床は中期ライアス階のドロマイト岩～石灰質岩中のカーストによる空隙に鉱染した鉱床で、2層の鉱化層準がある。方鉛鉱はしばしば硫酸鉛鉱に置換されている。重晶石が方鉛鉱の沈殿したあとの空隙を埋めている。鉱化作用の時期の特定は困難である。

4. 火山堆積性塊状硫化物鉱床

モロッコの火山堆積性塊状硫化物鉱床は、イベリア黄鉄鉱帯の南西延長部に分布する。このタイプの鉱床は西メセタのマラケッシュ地域に分布する (第2図)。マラケッシュ地域では、3つの南北に伸びる地塊に区分されている (第9図)。西部はカンブリア紀～デボン紀の現地性地塊からなり、中央部は石炭紀のフリッシュ堆積物、東部はカンブリア紀

～石炭紀の異地性地塊を石炭紀のフリッシュ堆積物が覆っている (Izart et al., 1997)。

鉱床胚胎層準である下部石炭系上部のビゼー統は、上部層と下部層に区分される。下部層は泥岩・シルト岩からなり、流紋岩・玄武岩質の噴出岩・貫入岩を狭在する (Lescuyer et al., 1998)。上部層は海退・海進の岩相変化を示すタービダイトからなる (Izart et al., 1997)。このうち下部層はマラケッシュ地域の中央部にのみ分布している。中央部のビゼー統は、ヘルシニア期の造山運動のため

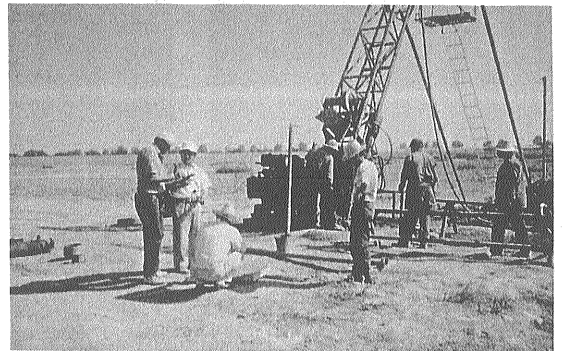


写真7 クワドラ地域でのボーリング作業風景。写真左端の人物がこの地域の鉱床探査責任者のカルビー氏。南雲JICA長期専門家にボーリングサイトの説明をしているところ。

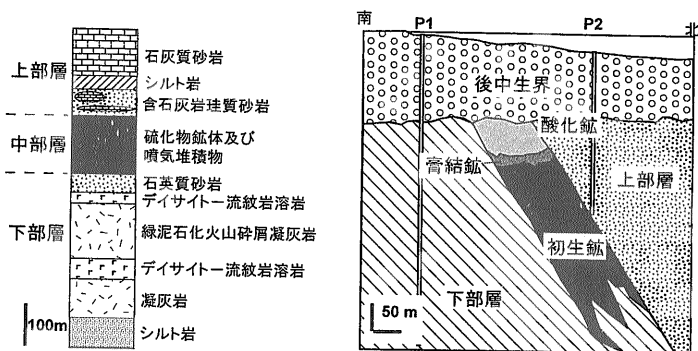
に、東西方向の圧縮を受け、激しく褶曲している。緑色片岩相の変成作用を蒙っており、この変成作用が、モロッコの火山堆積性塊状硫化物鉱床にイベリア黄鉄鉱帯のものや日本の黒鉱とは異なる特徴を与えている。

マラケッシュ地域中央部にはケッタラ (Kettara)、ドラスファー (Draa Sfar)、ハジャール (Hajar)、の3つの塊状硫化物鉱床が知られている(第9図)。それぞれの鉱量を第4表に示す。これらに加えて、冒頭で書いたように2000年6月に第4の鉱床(クワドラ:Khwadra)が発見された(写真7)。

ケッタラ鉱床は1937年に発見され、1982年まで主として磁硫鉄鉱が採掘されてきた。この磁硫鉄鉱はモロッコ特産の磷鉱石の還元剤として利用された。1982年に終掘したが、1,000万トンの磁硫鉄鉱が未採掘で残されている。

第4表 マラケッシュ地域の火山堆積性塊状硫化物鉱床。

鉱床名	主要鉱石鉱物	総鉱量	平均品位	現況
ケッタラ	磁硫鉄鉱	>20Mt	銅：0.6%	閉山
ドラスファー	磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱	>10Mt	亜鉛：7% 鉛：3%	探鉱中
ハジャール	磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱	15Mt	亜鉛：10% 鉛：3% 銅：0.7% 銀：70g/t	操業中
クワドラ	磁硫鉄鉱、閃亜鉛鉱、方鉛鉱	?	?	新発見



第10図 ハジャール鉱床の模式柱状図および断面図 (Hibiti et al., 1999)。

ドラスファー鉱床では、1953年に地表付近の酸化帯から鉄が採掘され始めた。1962年にBRPMは磁気調査とボーリングを行い、含銅磁硫鉄鉱の薄いレンズを捕捉した。その後、BRPMは1968年～1982年にかけて地表から150mまでの範囲で400万トンの鉱石の採掘を行った。1986年から1996年にかけて、探鉱ボーリングが続けられ、1997年に民間会社 (CMG) に払い下げられた。現在この鉱床はCMGにより鉱量確定のための探査活動が進められている(写真8, 9)。

ドラスファー鉱床では、数m～20mの厚さの1層の鉱体が、流紋岩および流紋岩質凝灰岩の上位に垂直に位置している。鉱体は800m以上側方に延長し、上位はシルト質岩に覆われている。

マラケッシュの35km南に位置するハジャール鉱床は、現在CMGにより操業中の鉱山である(写真10)。1984年に磁気異常域を狙ったBRPMのボーリングにより発見さ

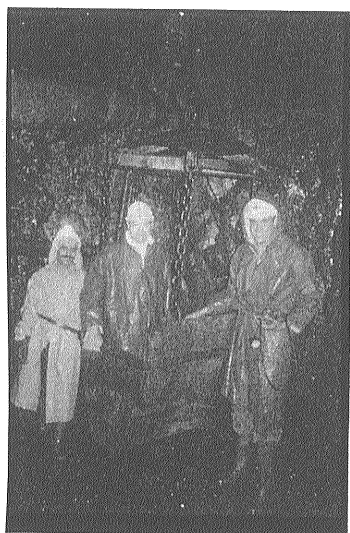


写真8 ドラスファー鉱床の竖坑を降りた所。探鉱中の鉱床なのでエレベーターはなく、鉱石運搬用のバケットで地表下400mまで降りる。

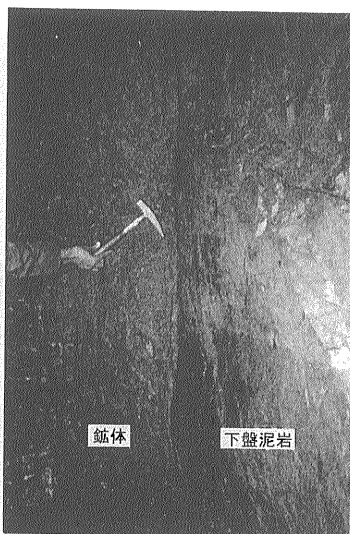


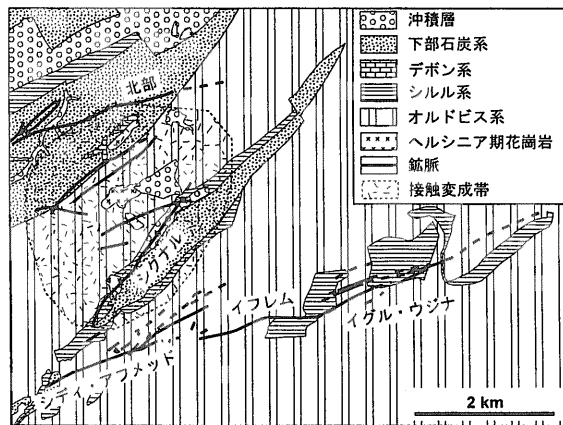
写真9 ドラスファー鉱床の鉱体の産状。右側が鉱体下盤の泥岩、左側が塊状磁硫鉄鉱からなる鉱体。後の変形のために本来水平であった境界が垂直になっている。

れ、1988年までBRPMにより探査が続けられた。1988年にCMGに譲渡され、その後、鉱石の生産が始まった。現在では毎年10万トン前後の亜鉛、4万トンの鉛、3万トンの銅が生産されている。

ハジャール鉱床での地層は、下部、中部、上部の3部層に区分されている(第10図)。下部層は、シルト岩～泥岩互層からなり、デイサイト～流紋岩質の溶岩および火山砕屑岩を狭在する。中部層は硫化物鉱体からなる。上部層は150-200mの厚さのシルト～泥岩からなり、薄い石灰質岩を狭在する。硫化物からなる鉱体を覆っている。鉱床の下部では硫化物鉱体が消滅し、下部層を直接上部層が整合で覆っている。上部層にも部分的に火山砕屑岩が含まれることから、鉱床形成後も火成活動が続いていたことがわかる。

ハジャール鉱床の主要な鉱体は約50-90mの厚さを持ち、少なくとも側方に200-300m追跡される。現在の地表に近い部分の鉱石は約20mにわたって酸化している。この部分では黄鉄鉱は磁硫鉄鉱を置換している。酸化を受けていない鉱体は75-95%が磁硫鉄鉱からなり、閃亜鉛鉱、方鉛鉱、黄銅鉱、黄鉄鉱、硫砒鉄鉱を伴う。

鉱体の下部は、層理面を高角度で切るストックワーク状の磁硫鉄鉱細脈群からなる。母岩は流紋岩や火山砕屑岩、泥岩からなり、珪化、緑泥石変質を受けている。流紋岩には黒雲母、アルカリ長石からなるポタシク変質が認められ、緑泥石変質がこれにオーバープリントしている。



第11図 ジュベル・アウアム地域の地質概略と鉱脈群 (Wadjinny, 1998).

鉱体の上部に向かうに従い、層理面に平行な細脈群が出現し、やがて塊状鉱、または縞状鉱からなる主要な鉱体へと移化する。一部では堆積岩と硫化物層とのリズム的な互層も認められ、硫化物が海底面下で堆積したことを示す。主要な熱水変質鉱物は緑泥石と絹雲母で鉱体下部では黒雲母が認められる。

この鉱床の大きな特徴は、ヘルシニア期の変成作用のために、もともと黄鉄鉱として沈殿した鉄硫化物が磁硫鉄鉱に置換されていることである。この変成作用のおかげで、鉱床形成時の熱水の温度や性質を推定することは困難となっている。鉱床形成中～後にかけて、マラケッシュ地域では周辺の陸塊から供給された砕屑物が硫化物鉱体を覆って厚く堆積している。

5. 鉱脈型鉱床

ジュベル・アウアム地域はモロッコの鉛と銀の主要生産地になっており、11世紀から鉛鉱脈の開発が行われてきた。12-13世紀には、既に200mの深度まで鉱脈の開発が行われている。1957年から1993年にかけて、含銀鉛を平均8%含む鉱石が600万トン以上生産されている。この地域の鉱石の埋蔵量と生産量の合計は、1,100万トン以上で、100万トンの鉛と1,000トンの銀が見積もられている(Wadjinny, 1998)。現在の鉱石の年間生産量は27万トンで、1,300g/tの銀を含む鉛精鉱(鉛78%)3万トンと、200g/tの銀を含む亜鉛精鉱(亜鉛52%)



写真10 ハジャール鉱床の竖坑。砂漠の中のアオアシとなっている。

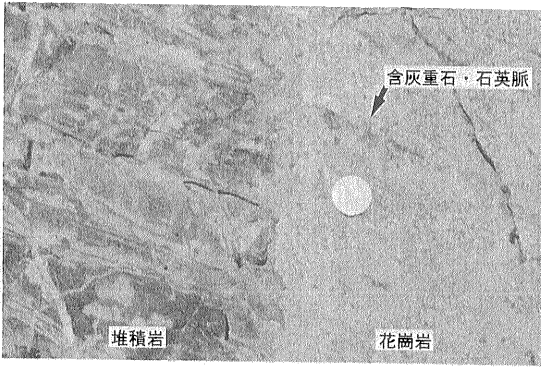


写真11 堆積岩と花崗岩との境界(ジュベル・アウアム地域)。堆積岩は接触変成作用を受け、黒雲母・白雲母・紅柱石が生じている。堆積岩・花崗岩とも灰重石を含む石英細脈に切られている。

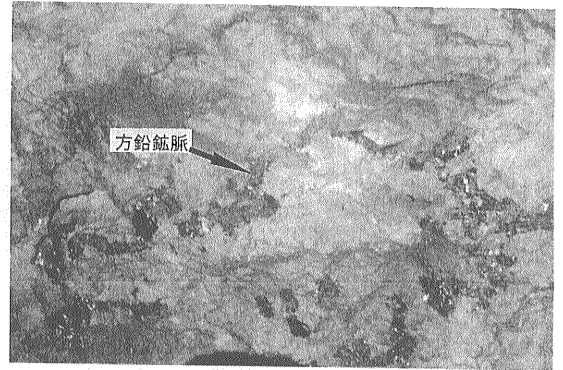


写真12 アンケライトを貫く方鉛鉱脈(ジュベル・アウアム地域)。

5,000トンが生産されている。ほとんどすべての鉛精鉱はウジダにある精錬所に送られ、亜鉛精鉱は外国に輸出されている。

この地域には北東-南西方向の背・向斜を繰り返すオールドビス系~下部石炭系の堆積岩が分布する(第11図)。この堆積岩の中に、前期二畳紀の3つの小さな花崗岩の貫入が認められる。これらは、カルクアルカリ系列・チタン鉄鉱系列に属し、北の方から、ミスピックル(Mispickel)、マイン(Mine)、カオリン(Kaolin)岩体と命名されている。これらの花崗岩体の周辺には、黒雲母・白雲母・アルカリ長石・斜長石・紅柱石・チタン鉄鉱・赤鉄鉱からなる直径約2kmにおよぶ接触変成帯が広がっている。ミスピックル岩体が石灰質岩と接する部分ではスカンが形成されている。

この地域の鉱化作用は高温・中温・低温の3つのフェーズに分かれる。高温の鉱化作用はタングステン・モリブデンで特徴づけられ、花崗岩内外に発達する石英細脈群に伴われる(写真11)。石英細脈には石英・黒雲母・白雲母・緑泥石・アルカリ長石・燐灰石・方解石・灰重石・黄鉄鉱・黄銅鉱が含まれる(Cheilletz and Isnard, 1985)。

中温の鉱化作用は鉛・亜鉛・銀、低温の鉱化作用はアンチモン・バリウムで特徴づけられる。これらはいずれも断層に胚胎する鉱脈中に認められる。鉱脈は3つの花崗岩体をはさんで、東北東-西南西方向の左横ずれ断層に胚胎する。北部、シグナル、シディ・アフメッド、イフレム、イグル・ウジナ脈はいずれも全長2km以上に達する。シグナル脈は

マイン花崗岩を切っている。現在はシグナル脈とイフレム脈で採掘が行われ、いずれも地表下600mまで開発されている。鉱化作用は次の5つのステージに区分されている(Wadjinny, 1998)。

第1ステージ:褐色の菱鉄鉱の沈殿。

第2ステージ:角礫化を伴い、褐色の菱鉄鉱、黒色の閃亜鉛鉱、方鉛鉱、石英、カルセドニーの縞状鉱石の形成。方鉛鉱は銀に富む。

第3ステージ:アンケライト土方解石・カルセドニーの縞状鉱石の形成。黒色閃亜鉛鉱は少量、方鉛鉱は多量、銀に富む(写真12)。

第4ステージ:角礫化に伴う空隙の重晶石、銀に乏しい方鉛鉱、閃亜鉛鉱、黄鉄鉱による膏結。

第5ステージ:剪断帯に沿うフィルム状方鉛鉱の沈殿。

6. 鉱床探査指針

さて、私が編集を手伝っている「マニュアル」には、以上に述べた鉱床の探査指針を書かなければならない。ところがこれが一筋縄ではいかない。と言うのは、これらの鉱床が地表に露出していることは稀で、そのほとんどが地下に埋没しているからである。トウイシット地域やマラケッシュ地域では、乾燥地帯とはいえ、平坦な所が多く、鉱床どころか、岩石の露頭を見ることもままならない。しかし、それだからこそ未発見の鉱床が埋没している可能性も残されている。ここでは、上に述べた3種の鉱床の探査指針について紹介する。

6-1. ミシシッピーバレー型鉱床

鉱床探査で最も苦戦するのがこのタイプの鉱床である。これまで発見された主要な鉱床はすべて潜頭性である。ベディアンやメクタ鉱床の発見は、水井戸ボーリングを掘っていたところ、偶然鉱体を貫いたことから始まっている。

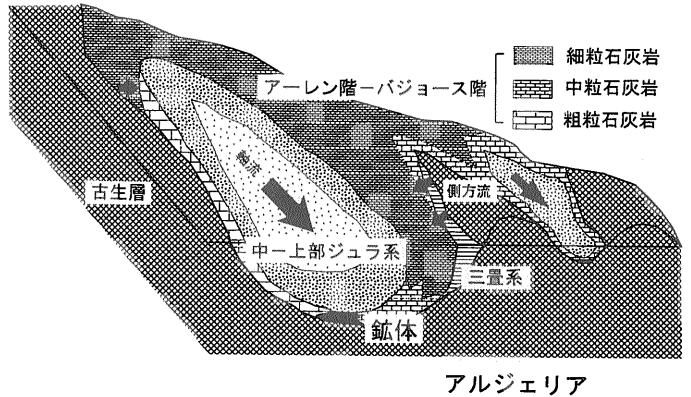
ミシシッピーバレー型鉱床の探査には、①鉱床胚胎層準(特に熱水変質ドロマイト岩)の追跡、②断層等の追跡、③地化学異常の検出、④IP法や重力測定による硫化物鉱体の把握、が通常行われている(Edwards and Atkinson, 1986)。しかし、ミシシッピーバレー型鉱床は、東メセタ全土に渡って分布しており、物理探査を行う前にも有望地域を絞り込む必要がある。鉱床探査を成功させるためには、いかに規模の大きな潜頭性鉱床を含んだ探査地域を絞り込むかにかかっている。それには確たる鉱床成因モデルを持っていなければならない。

モロッコのミシシッピーバレー型鉱床の形成場としては、①僅かな厚さのドロマイト岩、②鉱徴を伴うグラーベン構造、③N70°EおよびN40°Wの断層、④三畳系泥岩の欠如、が重要であると考えられている(Azza, 1997)。これらのことを私なりに解釈すると以下に述べるモデルとなる。

鉱液の生成に関してはさまざまな解釈があるが、熱水がこの地域に発達する蒸発岩中を流れ高塩濃度になり、中・古生界から重金属を溶脱したことは間違いがない。鉱床が東メセタ全体に分布していること、東のアルジェリアまで鉱床が延長されること、東メセタの外側には鉱床がないこと考えると、モアイアン・アトラス及びオート・アトラスの山脈に区切られた大盆地構造の中を鉱液が西から東に流れたと考えられる。

鉱液は基盤岩の古生層上面である不整合面に沿って中生層の中を、特に透水性の高い粗粒石灰岩(又はドロマイト岩)中を選択的に流れたことは明らかである。この粗粒石灰岩の堆積場としては、陸に極めて近い石灰岩礁が考えられる。同時期に形成された厚い石灰岩層は、陸からやや離れたところに堆積したために、粒度が細粒になり、鉱液の通路としては適さなかったであろう。このことが、

至上部ムルヤ地域



第12図 東メセタ地域におけるミシシッピーバレー型鉱床形成場のモデル。

「僅かな厚さのドロマイト岩」が鉱床胚胎場になった所以と思われる。

重金属を溶かし込んで密度が大きくなった鉱液は、東メセタという巨大な盆地の中でも最も深い部分に向かって流れ(側方流)、そこで集積した鉱液は軸流となり、盆地の最下底を東に流れ、硫化物を沈殿しながらアルジェリアを経て地中海に達したと思われる。従って巨大鉱床を見つけるためには、鉱床形成時の東メセタ盆地の地質構造(特に中生層と古生層との間の不整合面の形態)を復元し、その最も深いグラーベンの中心部を探鉱すれば良い(第12図)。

主要な鉱床がいずれもグラーベンの中に存在することは、このモデルの裏づけであり、ベディアン鉱床発見の端緒が水井戸ボーリングであることは極めて示唆的である。幸いにも、東メセタは中生代から第三紀に起こった正断層運動以外は、大きな変形を受けていない。従って、鉱床形成当時のグラーベンの復元は現在でもそれほど苦労しない。以上のことから、上部ムルヤ地域からトゥイシット地域に至る間のグラーベン構造の復元が今後の鉱床探査の焦点になると考える。

6-2. 火山堆積性塊状硫化物鉱床

このタイプの鉱床は、モロッコでは下部石炭系ビゼー統の流紋岩と玄武岩の分布する範囲に限られる。このタイプの鉱床の探査も、ミシシッピーバレー型と同じく、平坦な、岩石露頭の少ない地域で

行われている。しかし幸いなことにこのタイプの鉱床探査は磁気探査と重力探査が極めて有効である。

先に書いたように、モロッコの火山堆積性塊状硫化物鉱床の主要構成鉱物はヘルシニア期の変成作用により生じた磁硫鉄鉱である。従って、鉱体は磁気探査により捕捉され、磁気異常域にボーリングを直接打ち込み、鉱体が存在するか否かを調べれば良い。バジャーやクワドラはこの方法により発見されている。現在行われているドラフター鉱床での鉱量確認作業も、磁気異常の範囲を大いに参考にして進められている。

このタイプの鉱床探査に際し注意すべき点は、重力探査を平行して行い、磁気異常が塩基性岩によるものでないことを確認することである。

6-3. 鉱脈型鉱床

モロッコの鉱脈型鉱床は花崗岩の貫入に関連して形成されており、横ずれ断層が鉱脈を胚胎している。従って、花崗岩や断層の分布は重要な探査指標になる。潜頭性鉱床の上部では、スメクタイト変質帯が広がり、中心部ではカオリナイトや重晶石が認められる。地化学探査も有効である。現在BRPMが探査を行っているアグエルムス地域(写真13)にはこれらの指標がそろっており、ボーリングの結果が楽しみである。

7. おわりに - 見えざる所に鉛-亜鉛鉱石はあり

以上に述べたように、鉱脈型鉱床を除いて、モロッコの鉛-亜鉛鉱床の兆候を地質調査により地表から捉えることは困難である。鉱床探査に限ると、モロッコは地質屋のフィールドではなく、物理探査屋のフィールドなのである。ミシシッピーバレー型鉱床は中生代の堆積盆の最下底に形成され、また火山堆積性塊状硫化物鉱床も伸張テクトニクスによるリフト帯での海底火山活動の産物であり、鉱床形成後のフレッシュ堆積物に厚く覆われている。従って、鉱床形成後に大きな変動のない限り、もともと人目には触れにくい所に鉱床が位置するという特徴があるのである。いかにそれを察知して新鉱体の発見に結びつけるかが鉱床探査家の腕の見せ所となっている。

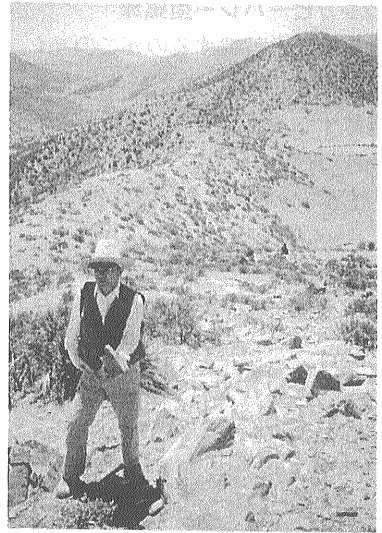


写真13 現在探鉱中のアグエルムス地域。尾根上にはセリサイト変質を伴う花崗岩脈が露出する。写真中の人物は木戸JICA長期専門家。

謝辞：モロッコ滞在中は小野プロジェクトリーダー、木戸長期専門家、南雲長期専門家、古賀調整員にお世話になった。ここに感謝の意を表します。

文 献

- Abarro, A., Bouchta, R. and Barodi, E.B. (1998): L'activité minière au Maroc. Chronique de la Recherche Minière, no.531-532, p.3-8.
- Azza, A. (1997): Résultats des programmes d'exploration du pays des Horsts. Notes et Mém. Serv. géol. Maroc, no.388, p.135-142.
- Boullin, J., Bouabdelli, M., El' Houicha, M. (1998): Evolution paléogéographique et géodynamique de la chaîne paléozoïque du Moyen-Maroc: un essai de modélisation. CR Acad Sci Paris 306, II: p.1501-1506.
- Cheilletz, A. and Isnard, P. (1985): Contribution à la prospection des gisements hydrothermaux de tungstène sur l'exemple du district polymétallique W-Pb-Zn-Ag du Jbel Aouam (Maroc Central). Mineralium Deposita, v. 20, p.220-230.
- Dupuy, J.J. and Touray, J.C. (1986): Multistage ore deposition at the Oued Mekta strata-bound lead deposit, Touissit-Bou Beker district, eastern Morocco. Economic Geology, v. 81, p.1558-1561.
- Edwards, R. and Atkinson, K. (1986): Ore deposit geology and its influence on mineral exploration. Chapman and Hall (London), 466p.
- Emberger, A. (1965): Eléments pour synthèse métallogénique du district plombifère de la Haute Moulouya, In Colloque sur des gisements stratiformes de Plomb, Zinc et Manganèse du Maroc (1962). Notes Mem Serv Géol Maroc 181, p.205-244.
- Hayan, M. (1997): Morphologie des minéralisations des gisements du

- district minier de Touissit-Boubeker. Notes et Mém. Serv. geol. Maroc, No. 388, p.181-190.
- Hibiti, M., Bouabdelli, M., Mouttaqi, A. and Sagon, J.P. (1999): L'effet du métamorphisme sur les minéralisations sulfurées de la province hercynienne (Meseta sud-occidentale, Maroc). Exemple des gisements sulfurés de Hajar et de Kettara. Chronique de la Recherche Minière, No. 536-537, p.23-37.
- 石原舜三 (1999): モロッコにおける地質鉱床と花崗岩系列. 地質ニュース, no. 540, 31-44.
- Izart, A., Beauchamp, J., Vachard, D., Tourani, A.I. and Essamani, M. (1997): Stratigraphie séquentielle du Carbonifère inférieur du Haut Atlas central et des Jebilet (Maroc): un exemple de bassins à turbidites contrôlées par la tectonique. Journal of African Earth Science, v. 24, p.445-454.
- Jébrak, M., Marcoux, É., Nasloubi, M. and Zaharaoui, M. (1998): From sandstone- to carbonate-hosted stratabound deposits: an isotopic study of galena in the Upper-Moulouya District (Morocco). Mineralium Deposita, v. 33, p.406-415.
- Lescuyer, J.L., Leistel, J.M., Marcoux, E., Milési, J.P. and Thiéblemont, D. (1998) Late Devonian-Early Carboniferous peak sulphide mineralization in the Western Hercynides. Mineralium Deposita, v. 33, p.208-220.
- Lucas, G.M.L. (1942): Description géologique et pétrographique des Monts de Ghar-Rouban et du Sidi-el Abed (frontière Algéro Marocaine). Service Carte Géol. Algérie, 2nd ser., Stratigraphie, no. 16, p.538.
- 松任谷滋 (1999): 物語-モロッコの地質. 地質ニュース, no. 540, 21-30. 地質ニュース, no. 540, 21-30.
- Rajlich, P. (1983): Geology of Oued Mekta, a Mississippi Valley-type deposit, Touissit-Bou Beker region, eastern Morocco. Economic Geology, v. 78, p.1239-1254.
- Touahri, B. (1997): Le gisement de zinc plomb d' El Abed, (Pays des horsts algéro-marocains): Environnement géologique, les dolomies, les minéralisatins. Notes et Mém. Serv. geol. Maroc, No. 388, p.165-180.
- Wadiny, A. (1997): Le district à plomb-zinc de Touissit: Présentation géologique et synthèse des travaux réalisés. Notes et Mém. Serv. geol. Maroc, no. 388, p.151-164.
- Wadjinny, A. (1998): Le plomb au Maroc: cas des districts de Touissit et de Jbel Aouam. Chronique de la Recherche Minière, no.531-532, p.9-28.
-
- WATANABE Yasushi (2001): Technical cooperation for mineral exploration in Morocco: How to find blind lead and zinc ores?
-

< 受付: 2000年8月21日 >