

# 金属鉱物資源問題と将来の研究課題

石原 舜三 (鉱床部)

## 1. ま え が き

私たちの近代生活は 金属鉱物資源の消費において成立っていると 言うて過言でなく たとえば鉄 アルミニウム 銅などは ビル 車 アルミ罐 電線などとして 直接にその利用を日常生活にみることができ、近年において関心が高いエネルギーも金属の利用なくしては使用することができない。

金属鉱物資源に対する最近の危機感 は 人類のその使用量が著しく急激に増加した点にある。たとえばアメリカにおける一人当りの鉱物消費量は1776年には0.6トンであったが 1950年台から急激にのび 1975年には20トンに達している。有用金属は地球の45億年の歴史の中で地質時間を必要として蓄積されたものであり 一般に再生利用が困難な性格を持つから 20世紀に住む私たちが子孫の鉱物資源をも先取り消費してしまうのではなからうかと思われた。

この様な危機感以後 多くの資源消費工業国では国策として金属資源問題が取上げられ 民間ベースの探査を勇気づける政策のみならず 国が直接的に探査を援助する傾向があらわれはじめた。しかしわが国においてはたとえば地震対策のような国策と民衆をあげての一致対策は 金属物資源に対してはまだ樹立されていない。

金属鉱物資源の利用面における一つの特色は代替えが できにくい点にある。たとえば熱は石油から太陽熱に至る幅広い根源物質から得られる。また非金属資源においては主に鉱物としての特性が利用されるために 類似の性質を持つ鉱物あるいは岩石間における代替えが広く可能である。しかし金属鉱物資源における元素としての利用面においては その特性範囲に限られるために代替え利用が一般に困難である。

この小文では金属鉱物資源に含まれる若干の問題点について記述するが とくに今後の鉱物資源確保において重要な課題となるであろうと思われる微量金属鉱物資源に焦点をしばってみた。微量金属鉱物資源は高価であり かつ鉱床が小規模でその発見が難かしいなどの特殊な背景を有し したがって深淵な問題を含んでおり興味深い。

## 2. 金属鉱物資源の存在度

鉱物資源は鉱物や元素の形で用いられる。かりに元素金属として主に用いられる鉱物を金属鉱物資源と呼ぶと その資源は多量に(大陸地殻中0.1重量%以上)存在する鉄 アルミニウムなどの構造材用金属と 銅 鉛 亜鉛 金 銀 錫 タングステン モリブデンなどの多方面に使用される微量金属(大陸地殻中 0.1重量%以下)とに分けることができる。これらの元素は私たちが開発しうる所—大陸地殻—における存在度も また鉱床中の存在度もそれぞれの元素によって異なっている。

マッケルビィ(1960)は 当時アメリカで知られていた鉱物資源の可採しうる鉱量を地殻中の元素存在度との関係を総括し 両者の間に正の相関関係を見出し(図1) それを将来資源の予測に適用しようとした。この考えはその後の多くの資源問題の論文に引継がれ たとえばエリクソン(1973)はアメリカで深さ 1km の地殻をとる場合に 長年探鉱された Cu Pb Zn Au Ag Mo などの可採鉱量(R トン)は  $R=2.45A \times 10^6$  (Aは地殻中存在度 ppm)で近似しうると指適し この式で与えられる鉱量を最小値とみなしている。表1にはこの法則に従ってアメリカ学士院(COMRATE 1975)が試算した最大値を示した。

大陸地殻中に0.1重量%以上存在する重要な金属鉱物

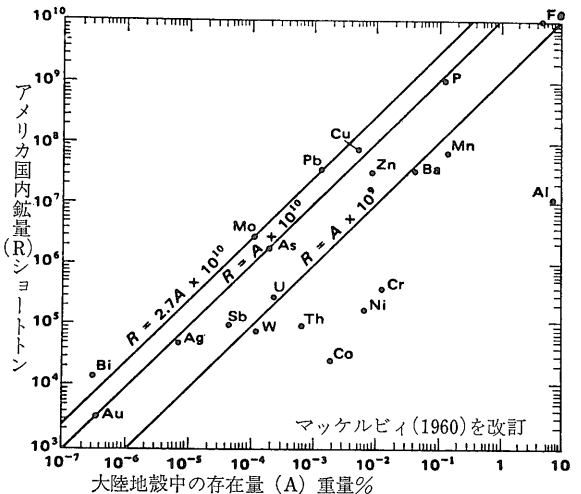


図1 大陸地殻中の元素存在度とアメリカ国内発見鉱量との関係 (エリクソン 1973による)

Al Ni Cr Co など大勢からはずれているのは アメリカでは これらを生産するボーキサイトや特殊な苦鉄質

表 1 大陸地殻中の鉱床から得られる地球化学的に乏しい金属の推定最大産出量 (OMRATE 1975 による)

元 素	大陸地殻中での平均存在度 (ppm)	鉱床から採取し得る最大量 ( $\times 10^6 t$ )
ニッケル	72	1200
銅	58	1000
ニオブウム	20	340
鉛	10	170
トリウム	5.8	100
タンタル	2.4	40
ウラン	1.6	27
錫	1.5	25
モリブデン	1.2	20
タングステン	1.0	17
銀	0.08	1.3
白金	0.005	0.084
水銀	0.002	0.034
金	0.002	0.034

注) この計算では 探掘は地表から深さ 10km まで 大陸地殻中の金属全量の 0.01% だけが探掘および選鉱可能な鉱物として存在していることを仮定してある また 大陸棚の下にある大陸地殻も含まれている。

資源としては Al (8%) Fe (6%) Mg (2.8%) Ti (0.9%) Mn (0.1%) などがある。アルミニウムは高温多湿の風化条件下で生じたボーキサイトから得られその量は莫大である。また同様に生成したラテライトや霞石閃長岩や明ばん石なども利用することができるのでアルミニウムの将来問題は一般には少ない。アルミニウムの問題はむしろ鉱石から金属に変えるために必要な莫大の電力をいかに安価に得るかの点にある。

一方 鉄は BIF (縞状鉄鉱層) と呼ばれる堆積性鉱床から主に得られ これは約20億年前の先カンブリア時代における特殊な堆積岩であるから 一般の鉱床と異なり鉱量は莫大である。鉱石としては鉄酸化物のみが現在稼行されており その品位が低下する方向にあるが 低

品位鉱石は選別分離されてペレット化して利用するなどの工夫もあって 現時点では将来資源面での問題が少ない。マンガンも堆積性鉱床から主に得られて多量に産出し マグネシウムは現在では主として海水から抽出されている。チタンはチタン鉄鉱やルチルを含む砂鉱床から得られるが チタン鉄鉱は苦鉄質岩の造岩鉱物として極めて一般的なものである。

以上のように量的に多い上記元素は 鉱床と呼ぶよりは堆積岩あるいは火成岩などの岩石体から得られている。したがってその鉱床規模は大きく その探査は比較的容易であり 一度発見されるとその鉱量は長く利用される性格を持っている。したがって金属鉱物資源の将来問題は量的に少ない資源の探査をいかに進めるかによって 鉱床規模が小さくその分布の普遍性も限られるこれら微量金属鉱物資源の発見開発には 高度の地質学的研究が要求される点にある。

大陸地殻存在度と発見鉱量との間には第一近似としての相関性があるが 私たちが利用できる微量金属にはその存在状態に制約があって たとえば銅や亜鉛は一般岩石中に苦鉄質鉱物中に元素として取込まれ また鉛は造岩鉱物のカリウムを置換するものが量的に多いが これらは現時点あるいは近い将来においても抽出利用することはできない。利用できるものはすべて黄銅鉱 閃亜鉛鉱などの硫化物として濃集しているものだけと言ってもよい。

スキナー (1976) はこの点を図 2 で示すように模式的に表わし 微量金属鉱物資源においては可採部分のかなりの量がすでに探掘済みである点を指適し 注意を喚起した。この微量金属利用面における鉱物学的障壁が選鉱製錬過程において 近い将来に解決される見通しはないから 地質家としてのつとめは新しく既知タイプの鉱床を発見するか 新しいタイプの鉱床を発見するかにかかっている。金やベリリウム鉱床については 火山岩中に微粒で鉱染するカーリンの自然金鉱床やスポー山地のベルトランダイト  $[Be_4SO_7(OH)_2]$  鉱床などの新しいタイプの鉱床がアメリカでは発見されており ベリリウムの場合には古典的なペグマタイト鉱床より重視されている。これらの発見はアメリカで国を挙げての探査活動の結果もたらされた。

### 金属鉱床の偏在性

微量金属はそれが微量であるが故に稼行しうる現在の鉱床はすべて特異な元素濃集体から得られており それが

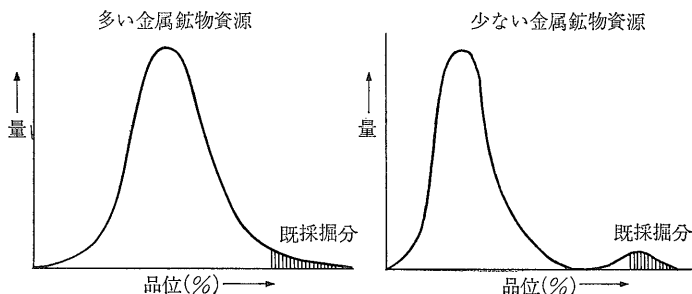


図 2 量的に多い元素と少ない元素間に見られる利用面における相違 (スキナー 1976 による)

私たちが利用するに至るまでの過程にもさまざまな要素がからんでいる。たとえばニッケルはカナダのサッドベリー鉱床から世界生産量の40%が得られ、この鉱床はあさがお型苦鉄質貫入岩体の基底部にニッケル硫化物として濃集するものであるが、その成因は隕石の衝撃により誘発されたマグマ活動により生成したものだと考えられている。もしこの説が事実であるとする、この様な事件は長い地球の歴史でも稀であろうから、カナダはニッケルの生産で今後とも有利な立場を占めるに違いない。

一方、高品位クロム鉱石の85%はローデシアの苦鉄質貫入岩床の基底部に層状クロム鉄鉱として産出する。南アの苦鉄質貫入岩体であるブッシュフェルドにも層状クロム鉄鉱が大量に産出し、両国合せて世界の95%（高品位+低品位鉱石）もの供給源である。この著しい偏在性はアフリカにおける不安定な政治情勢とあいまって、ここでは資源安定供給の問題はすなわち政治の問題である。ウラン資源問題も本質的に別の意味で政治問題化する点を含むことは衆知の事実である。

ニッケル、クロム、ウランなどは基本的には安定地塊に産出する。ニッケル鉱床にはニューカレドニア島のニッケルラテライト鉱床があって、これは熱帯の風化作用の助けによって、かんらん石中のNiが風化土壌に濃集した特異な産状のために利用価値が生じたものである。造岩鉱物中に捕捉された金属元素は現在の技術では経済的に抽出できないことは既にのべたが、ニッケルラテライトにおいては天の助けによりニッケルの抽出と濃集とがおこなわれた。

安定地塊に特徴的な金属鉱物資源が存在する反面、錫、タングステン、モリブデンなどの多くは造山帯に主に産出する。たとえば銅のように、ポーフィリー型や黒鉱型として造山帯に産出する一方、一部は層状銅鉱床とし

て安定地塊に産出し、また鉛亜鉛も両地質単位にわたって分布するが、安定地塊と造山帯とは金属資源の供給面において基本的な相違をもたらしている。したがって日本の資源安定供給の面からは、両者を備えた諸国との交流が望ましいし、双方の鉱床を地質調査所としては研究する必要がある。

わが国には安定地塊は分布せず、したがって金属鉱床の研究も造山帯の鉱床で非常に進んでいる。造山帯の鉱床はこれまで一括して取上げられ、時代的な変遷からは議論されている。しかし、たとえば環太平洋地域の中生代の火成活動を注目する時、大きくは同一の地質単位に属するのであるが、太平洋の東側ではポーフィリー型の銅やモリブデン鉱床が多く、一方西側では錫やタングステン鉱床が卓越している違いがある（図3）。この性質はそれぞれをもたらした花崗岩類の性質に原因するのであるが、この巨視的な鉱床の分布の相違は従来あまり重要視されず、たとえばオーストラリア東部やマレー半島においてもポーフィリー型銅鉱床の探査が継続されている。

造山帯の鉱床においても、天然の助けが資源利用を可能にしているものがある。その好例はマレー半島の錫鉱床であって、錫鉱床の多くは半島南部のところにその西側に集中していることは、同じ花崗岩類が半島南部からタイ北部を経て中国の雲南省に続いていることと合せて印象的である。ここでは長い低い海岸線による花崗岩体頂部の鉱化部分の風化浸食、波浪風力による錫石の移動濃集によって稼行しうる錫砂鉱床が生成した（写真1-3）。

天然の風化作用を利用することは人類の偉大な知恵であるが、私たちへの最大の宿題は最初に生成した状態において、何故に偏在性が存在したかを解きほぐすことにある。マレー半島においても砂鉱床からの生産には限界が予想されており、初生錫鉱床の探査が今後の重要な課題である。将来の探査対象が初生の潜頭鉱床に向うことは疑のない事実であり、そのためには初生鉱床の地質学的な研究が残された大きな問題である。

環太平洋地域では初生鉱床に限っても微量金属資源の著しい偏在性が認められる。たとえばマレー半島から続く造山帯には重要な硫化物鉱床が知られていない。しかし、フィリピン、ニューギニア、ソロモン群島などの新しい島弧ではポーフィリー型銅鉱床など硫化物鉱床が卓越している。

環太平洋地域では初生鉱床に限っても微量金属資源の著しい偏在性が認められる。たとえばマレー半島から続く造山帯には重要な硫化物鉱床が知られていない。しかし、フィリピン、ニューギニア、ソロモン群島などの新しい島弧ではポーフィリー型銅鉱床など硫化物鉱床が卓越している。

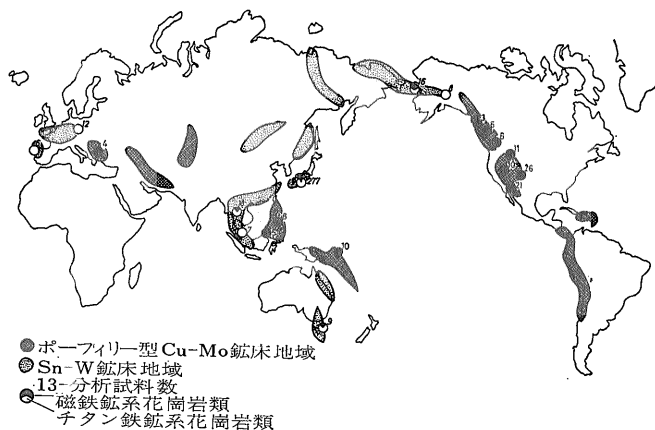


図3 鉱床の種類と花崗岩の種類との関係  
磁鉄鉱系花崗岩類がポーフィリー型鉱床とチタン鉄鉱系花崗岩類が錫タングステン鉱床と関係する（石原 1977による）

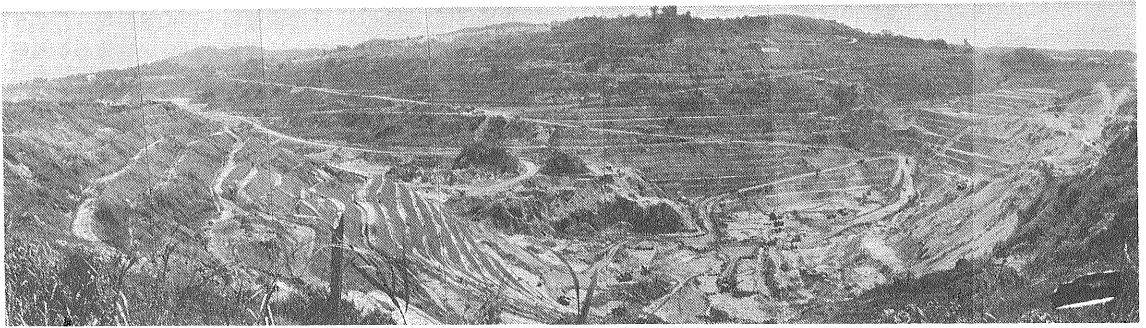


写真1 マレーシアの西側にある代表的な砂錫鉱山 クアラランブールに近いスンガイベシ鉱山 (1979年3月)

これらの地域では大洋プレートの沈み込みが明白であり同様にプレート運動が活発な南アメリカでもポーフィリー型鉱床が多産する。 これらの間には何らかの成因的關係があるのであろうか。 またアジア側ではポーフィリー型鉱床の金含有量がアメリカ側より多く 黒鉱鉱床は日本の東北日本に集中して産出する。 アメリカ側ではチリ最南部ではポーフィリー型鉱床はあられず アメリカの多産地帯ではアリゾナ州に鉱床が密集する (図4)。

微量金属の鉱物資源問題は以上のマクロな偏在性の問題から個々の鉱床がそこに存在する原因の追及に及ぶ偏在性の解明にあると言ってよく とくにその偏在性が他の鉱物資源と比較してきわだっている点が特色である。 したがって広域的な研究から きめ細かい鉱床成因論に至る詳細な地質情報を得て それを十分に理解することが鉱床探査に必要である。

### 今後の研究方向

地質学における新しい成因論 すなわち対象物生成過程の定量的な解明は 金属鉱床においては早くから実施されており わが国においても個々の鉱床の生成条件はかなり具体化されている。 しかし将来の潜頭鉱床を指

向する新しい鉱床学においては 個々の変数を集約化し自然の地質体における立体像をも画く必要性が生じている。 その様な新しい課題に対処する例に昨年度から発足した日本 アメリカ カナダ協同の黒鉱研究プロジェクトがある。 これは本誌293号(1979年1月号)に古宇田氏によって紹介されたものであるが 次にその概要を若干のべてみたい。

この研究計画は滞米中の大本洋教授の提案によるもので まず世界的に重要な鉱物資源を抽出する全米をあげての2回の資源問題討論会を経て 黒鉱型鉱床の世界的重要性を認識し その代表例として地質的に若くて生成の原形が得られかつ各種情報が多い日本の黒鉱鉱床を選んで 集中的に研究しようとする。 ここでは大本氏の黒鉱カルデラ生成モデルのもとに 微量金属の起源から始まりそれがどの程度の規模の循環熱水機構をどの様に流れて 最終的な鉱床の形態をとったかの過程を立体的に明らかにしようとするものである。 この様な基礎的で多面的な研究は何故にグリーンタフ帯のなかで北鹿盆地に多量の金属が濃集されたかと明らかにするであろうしカナダ オーストラリアなどの他地域における同種鉱床の探査に指標を与えるものであろう。 かつ潜頭鉱床探査に必要な定量的な地質情報を提供してくれるものとし



写真2 タイ南部リドン鉱山の放水による採掘風景 未風化花崗岩直上の風化花崗岩とその上位の第四紀層基底部に錫石は濃集している (1977年11月)

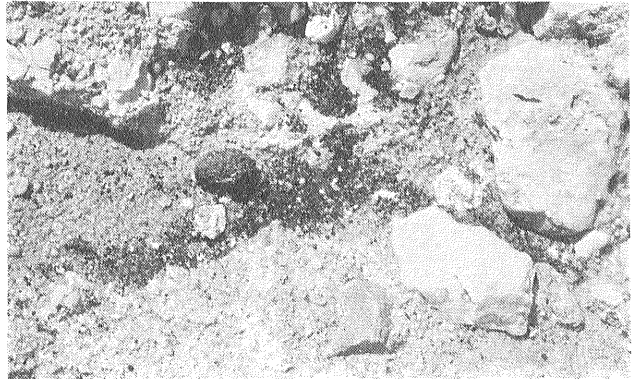


写真3 タイ南部サハカン鉱山 基岩礫岩中に多量に濃集しているスズ石 (中央黒色砂) タイ南部の鉱床は小規模であるために錫石の濃集過程がわかり易い (1977年11月)

て今後に大きな期待をいだかせるものである。

鉱床生成のモデリングと同時に必要なことは新しいタイプの鉱床を注目することである。かつて2%Cuの二次富化帯の採掘から出発したポーフイリー銅鉱床が現在0.6%Cu品位の鉱床を稼行して私たちに多量の銅を供給している歴史は僅かに70年前に始まったが現在錫鉱床についてもボリビアにおいて同様な傾向があらわれておりかつての低品位変質岩はポーフイリー型錫鉱床として開発されようとしている。同種の鉱床は日本の明延地域やマレー半島には存在しないのであろうか。またタングステン鉱物はポーフイリー型の鉱染網状鉱床を本質的に形成しないのであろうか。近年ドイツ学派により宣伝されている堆積性タングステン鉱床は事実なのであろうか。ネバダ州のカーリン金鉱床のような新しいタイプの鉱染状金鉱床は西南日本内帯から大陸にかけてのやや類似した構造場には伏在しないのであろうか。

金属鉱物資源の特色がその偏在性と代替えがおこなわれにくい性格にある以上ほとんどあらゆる地質単元を持つアメリカにおいても全種目を自給することはできない。種類と量において金属鉱物資源に乏しくかつ資源大消費国の日本において可能なことは種類が多い造山帯特有の地質単元を利用して鉱床成因論を高度に発展せしめ国際的舞台上でそれを適用し新資源の発見確保に国際的に貢献することであろう。このような地質学的な課題は国の資源政策あるいは外交政策と一致しなければならないことは当然である。わが国が加工工業国として生きる以上汎世界的に鉱床学分野の調査研究を進展させることが必要と考えられる。

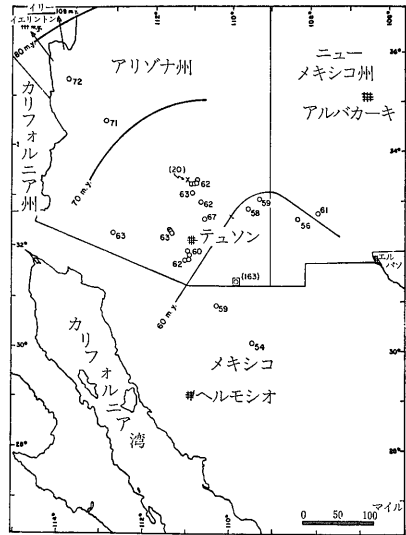


図4 アリゾナ州南東部に密集するポーフイリー銅鉱床 数字は同位体年代 (m. y.) (ロウエル 1974による)

終りに未発表論文をお送り下さり 種々の助言を与えられた立見辰雄東京大学名誉教授に感謝する。

引用文献

BROBST, D.A. & PRATT, W.P. 編(1973): United States mineral resources U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 820, 722p (マッケルピイ エリクソンの論文が集録されている。なおこの本の補充は元素別に毎年鉱山局から出版する形式でおこなわれている)

COMRATE (1975): Mineral resources and environment. Rept. Comm. Miner. Res. Environ. Nat. Acad. Sci.—Nat. Res. Council., USA, 348p.

ISHIHARA, S. (1977): The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks. Mining Geol., vol. 27, p. 293-305.

LOWELL, J. D. (1974) Regional characteristics of porphyry copper deposits of the Southwest. Econ. Geol., vol. 69, p. 601-617.

SKINNER, B.J. (1976) A second iron age ahead. Amer. Scientists. vol. 64, p. 258-269, (立見辰雄訳 1978, 第2の鉄時代も間近か? 日本の科学と技術 '78, vol. 19, p. 62-71).

参考文献

岩尾裕純・黒田吉益編 (1977): 日本の鉱物資源 共立出版 181p. (国内問題の現状を認識せしめ 問題点を指摘する)

KESLER, S. E. (1976): Our finite mineral resources. McGraw-Hill Inc., 120p. (石原舜三訳 1978 限りある資源 サイエンス社 177p., 資源問題全般を扱った教養の書)

岡野武雄 (1975): 地下資源 共立出版 230p. (世界の鉱物資源を総括し 鉱床の分類 探査に及ぶ)

立見辰雄 (1978): Reserve と Resource 鉱山地質, vol. 28, p. 35-38 (資源用語解説)

立見辰雄 (1979): 総鉱物資源見積りのための一つの試み 鉱山地質, vol. 29. (投稿中) (地球化学的に総鉱床量や鉱化度を算出する原著論文)

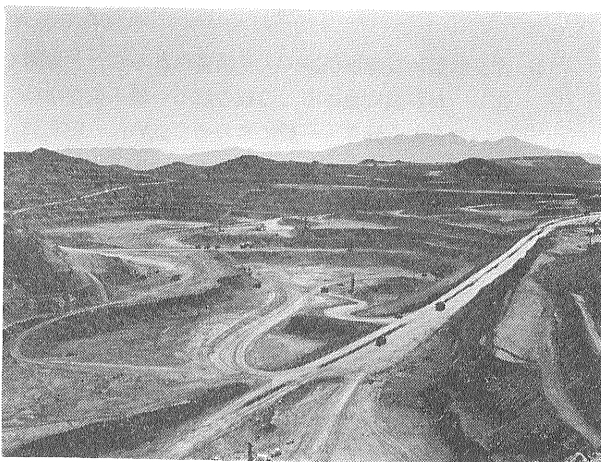


写真4 アリゾナ州シエリタ鉱山 ポーフイリー銅鉱床の採掘ピット (1975年4月)