

# 鋳物資源小論

西脇親雄 (資源開発大学校顧問)  
Chikao NISHIWAKI

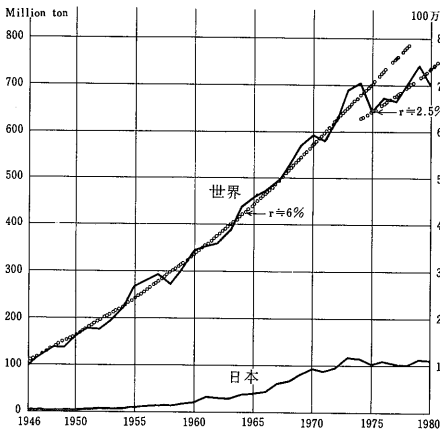
## 序

この鋳物資源小論では 鋳物経済論 (ミネラル エコノミックス)の面からと 鋳床地質学の面からの両側から鋳物資源の今の問題点の幾つかを見る事にした。 鋳物の種類は非常に多いので 代表的な鋳種について述べた。 経済論の統計数字は 主に 国連統計 World Metal Statistics, US 鋳山局 Mineral commodity summaries 1982 通産省鉄統計月報 によった。

## 1 鋳物経済小論

鋳物経済を論ずるとき 先ず気になるのは各鋳種の資源の寿命であり これを検討するのがその第一の関門である。 先ず鋳量 資源量から入らなければならないが 鋳量 資源量の分類とその定義は 今では最も広く親しまれている いわゆる McKelvey's box 即ち McKelvey 氏の分類図表 (第1図) によるのが最も便利であろう。 けだし 資源量数字の最も信ぴょう性のある米国地質調査所及び鋳山局がそれを使用しているからである。 次に米国鋳山局1982年発表の数字による鋳量及び資源量は第1表の通りである。

次に将来の使用量の予測をしなければならぬが それには過去の統計が必要である。 年消費量をC 金属精



第2図 粗鋼生産量 (単位: 10<sup>6</sup> t/年)

		鋳種名		
		単位		
過去の 総生産量	地域	判明している資源		未発見の資源
		証拠のある鋳量 確定 推定	想定	確率の程度
				仮説的又は 投機的
経済的		鋳量		
かろびて 経済的		資源量		
非経済的				

計算年 月 日

但し 本論に於ける鋳量 本論に於ける資源量

第1図 資源表

第1表 鋳量及び資源量 (特記してない限り金属含有量)

単位 1000M.T.			
鋳種	鋳量	資源量	記事
鉄	107,100,000	236,000,000	
アルミ(ボーキサイト鋳)	22,400,000	45,000,000	
マンガン鋳	4,900,000		ノジュール を含まず
クロム鋳	3,360,000		Mnノジュール を含まず
ニッケル	54,300	130,000	
コバルト	3,090		
銅	505,000	1,624,000*1	陸上のみ
亜鉛	240,000	1,800,000	
鉛	165,000	1,400,000	
錫	10,000		
タングステン	2,450		
モリブデン	9,840	20,860	
ヴァナヂウム	18,500		
ジルコニウム	43,500		
ニオブ	3,450*2		
タンタル	213*2		

- (1)鋳量及び資源量の範囲については第1図を参照
- (2)鋳量の数字で未だ寿命にあまり心配の無いと判定されるものや資料不足のもの資源量は省いた。
- (3)\*1には未発見のものが含まれている。 \*2は共産圏の数字が入っていない。

鋳生産量をR 全鋳山生産量をM 精錬に使う金属スクラップをS 精錬実収率をYとすると 長い期間を平均すれば  $Y(M+S) = R$ となる。 何十年という期間を

平均すれば  $C \approx R$  であるし 精錬量の方が使用量より浮動が少ない。 実際に R と M との比を年毎に調べて見るとその比はほとんど一定しているので 金属統計のより完備した精錬量の増加率を算出して これを鉱山生産金属量にあてはめて将来の資源採掘 (消耗) 量を計算した。

鉄の実例について見よう。

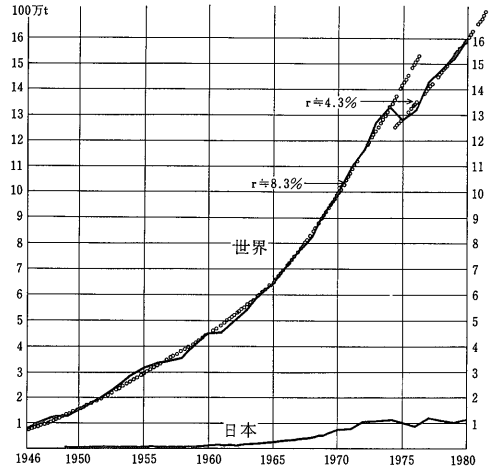
第2図は粗鋼の世界の年生産量の終戦から今日迄のグラフである。 その1974年即ち第1次オイルショック迄の生長率は実に年累増率6%であった。 その後累増率はやや減少したように見える。 2.5~3%位であろうか。 年累増率6%ということは 約12年で消費量が2倍になるという事であって この様な高率はここしばらく無いであろう。

1980年の鉄鉱石生産量 (パレットを含む) は873,633,000 t で その中の金属量は約  $506 \times 10^6$  t である。 これから出発して 第1表の鉄の金属としての鉱量  $107,100 \times 10^6$  t を食いつぶすのには 何年かかるか。 即ち  $(1+r)^n$  但し  $r$  = 年累増率  $n$  = 年数 の積分値が この1,071億 t と見合うのは何年であろうか。

$r = 5\%$  の時大략 50年  
 $r = 2.5\%$  // 75年

地殻に5.4% 多量元素とされている鉄でさえ 現在の知識ではこの有様である。 鉄よりも地殻中に多量に存続するアルミが代替すれば と思うので鉄資源を長もちさせる考えは後の鉱床各論にゆずって アルミの統計を調べて見よう。

第3図はアルミの世界の精錬生産量である。 アルミは精錬コストが高いので昭和のはじめには僅か年20万 t 第二次大戦の航空機需要ピークにも最高190万 t であ



第3図 アルミニウム生産量 (単位:  $10^6$  t /年)

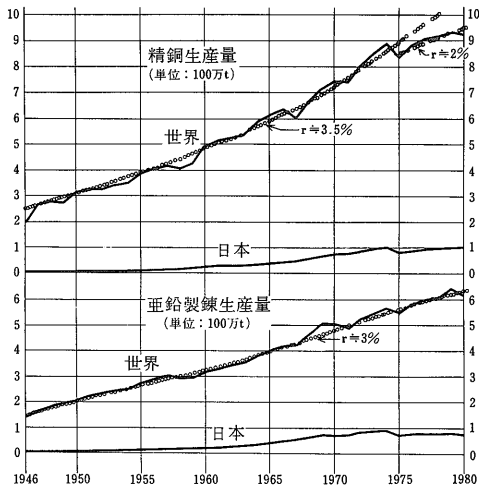
った。 戦後の伸長は著しく年率は実に8%を起す勢いでオイルショックに会ったが その後も 多少は低くなりにはしたものの その増率は依然として4.3%の高率を示している。 電力料高騰のため日本国内のアルミ精錬はほとんど落伍せざるを得ないが 世界全体では安い水力電気の力で依然増え続け得るのであろう。 1980年のボーキサイト生産量86,400,000t から出発して寿命を計算すると

第1表より

ボーキサイト鉱量 (224億 t)		全資源量 (450億 t)	
累増率 8.3%	寿命 35年	寿命 48年	
4.3%	寿命 57年	寿命 67年	

この結果から見れば 鉄含有量30%の層状鉄鉱床が無くなる頃には ボーキサイトも無くなっている事になる。 それぞれ 代りの鉱石原料と それに向けた精錬技術を21世紀前半には見付けておかねばなるまい。

銅と亜鉛についても同じ様な方法で寿命を算出して見た。 それは第4図の銅と亜鉛金属の年生産量の推移から年増率を出し それぞれの1980年の鉱山生産金属量と第1表の鉱量及び資源量とから推計したもので第2表の通りである。 なお銅の場合は図に示した様に 鉄アルミの場合と同じく 第一次オイルショックを境に累増率の減少が見られるので 前と同じ様にそれぞれの場合の推定を行った。 亜鉛の場合は累増率も低く そのカーブもほとんど直線なので計算法等差級数としたものも附記しておいた。 年累増率  $r$  を算出して前出の式を用いて行う方法が正しい事は当然であるが この伸び率が低く 且つ直線的に見える亜鉛の場合ですら長期予



第4図 精鋼・亜鉛製錬生産量 (単位:  $10^6$  t /年)

測には直線法は甚だ危険である事がよくわかる。

これ等重要な金属の寿命は 現在判明している鉱床の経済水準以下の部分迄を含めた確定 推定合計鉱量の場合ではいずれも30年内外 未発見 想像だけのものあるいは現在の技術をもってしては経済的に稼働不可能のもの迄を含めた総資源量を対象とし 且つその地下資源の消費量の増率を低く見ても100年の計算値の出るものは無い。この対策は (1)新鉱床発見 (2)新技術開発による未利用資源の利用 開発 (3)スクラップ回収への画期的努力 (4) 資源の節約 がある。これらの問題については 個々の鉱種により異なった様相を持っているので 次節の鉱種別の鉱床論に附随して略記したい。

第一表に掲げたマンガン鉱 クローム鉱 ニッケル以下の鉱種については第3表に 全鉱種の最近の全世界の年資源消費量(主として鉱山生産量)と それで 全世界鉱量を簡単に割った数値 即ち見せかけの擬似耐用年数と さきに述べた理論的に出した一部の金属の寿命見込みとを対比して表示した。

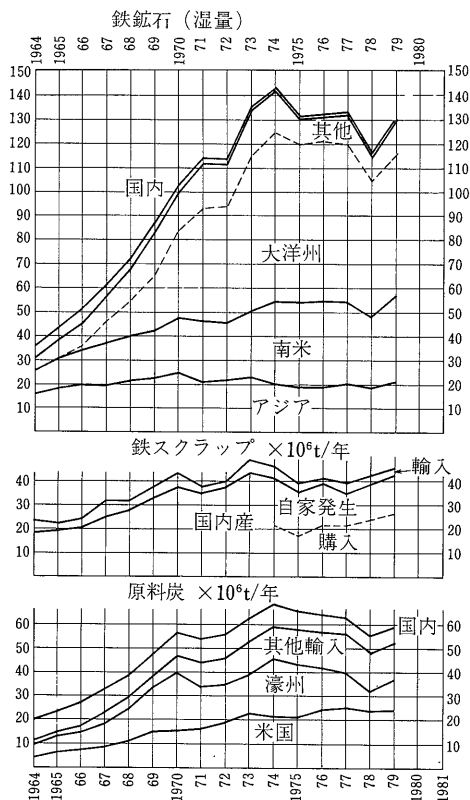
マンガン ニッケル コバルト クローム モリブデン

第2表 銅及び亜鉛資源の寿命

	累増率 r	鉱量の場合	資源量の場合
銅	3.5%	38年	約60年
	2%	51年	85
亜鉛	3%	35年	72年
	毎年138千t増	30年	120年強

第3表 鉱量及び消費量

鉱種	年消費量(1980年) t	鉱量 年消費量	計算寿命 (rは消費の年累増率)
鉄	500,961,000	195	{ r=5%...50年 r=2.5%...75年
アルミ (ボーキサイト鉱石)	86,360,000	259	{ r=8.3%...35年 r=4.3%...57年
マンガン鉱	26,300,000	186	
クローム鉱	8,980,000	374	
ニッケル	772,000	70	
コバルト	30,000	103	
銅	7,800,000	65	{ r=3.5%...38年 r=2%...51年
亜鉛	5,745,000	44	r=3%...35年
鉛	3,520,000	47	
錫	246,000	41	
タングステン	52,300	53	
モリブデン	107,200	91	
ニオブ*	14,650	235	
タンタル*	445	49	



第5図 製鉄原料年次グラフ

ン等鉄鋼合金用の金属の消費の増率は 鉄の伸びに伴いそれと同等か 更に高い率で伸びるかも知れない。

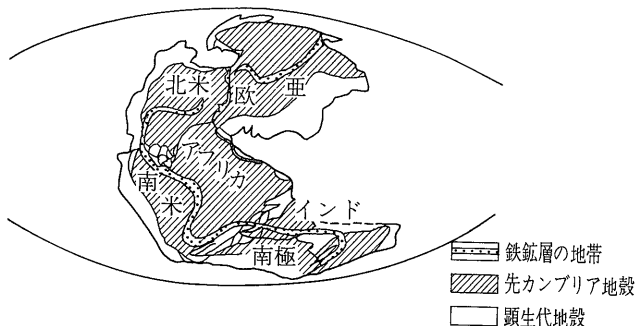
しかし 最初の三金属は 第一表の鉱量に含まれていない 深海底のマンガン団塊中に含有されているものが採取される様になれば 価格は高くても入手は出来る。クローム鉱は品位を低く取れば アフリカでさらに大きな鉱量が算出されよう。

銅 亜鉛 鉛 錫 タングステン 等の非鉄ベースメタルもその研究 探査 スクラップ回収等に大いに努めその寿命を延ばすと共に 寿命の永い代替品の合成開発に努めなければならない。

第2 3 4図にそれぞれ 日本の精錬生産もグラフで示してある。鉄は1980年はソ連に次いで第2位 1981年では ソ連 米国に次いで第3位であり 毎年世界生産の15%内外を占めている。

原料の大部分を輸入に頼っているにもかかわらず 技術とコストで優位に立っているの 今後も量が増える可能性は大きい。貿易バランスの問題が鍵であろう。鉄の主な原料需給の推移を第5図に示した。鉄鉱石では豪州の首位は変わらないが 南米の増加が目立つ。大部分はブラジルからで その量はインドとフィリピン





第8図 Pangaea上に描いた前期プロテロゾイックの縞状鉄鉱層とその頃の地殻の分布  
Pangaea 分裂の線即ち各大陸の境の線と鉄鉱分布の平行に近い関係に注意。

	生産量(1,000 t)	%	順位
銅	1,014.3	10.8	3位
亜鉛	735.2	12.0	2位 (1位はソ連)
鉛	304.9	5.6	5位
ニッケル	109.3	14.4	3位
アルミ	1,113	7.0	3位
銀	*269.5 t	2.6	7位

\* 数字は1979年単位は t

以上 ことにレーク スペリオル型 の縞状鉄鉱床 (便宜上本文ではLS-BIFと略記する) が恐らく65%以上を占めている。今後未だ 南米アマゾン流域や アフリカに大鉱床発見の余地がある。日本にとって最も重要な資源であるので この型の鉱床を中心にして述べたい。この他に鉱量の多いものに 下部 前カンブリア紀のアルゴマ型 下部古生代 (例・アパラキア山地) のクリントン型 ヨーロッパの中世代に典型的なミネット型等の層状鉄鉱床がある。G. A. Gross はそれ等の性質 賦存の状況を対比させた巧な図を作っているのをそれを訳して第7図に掲げた。

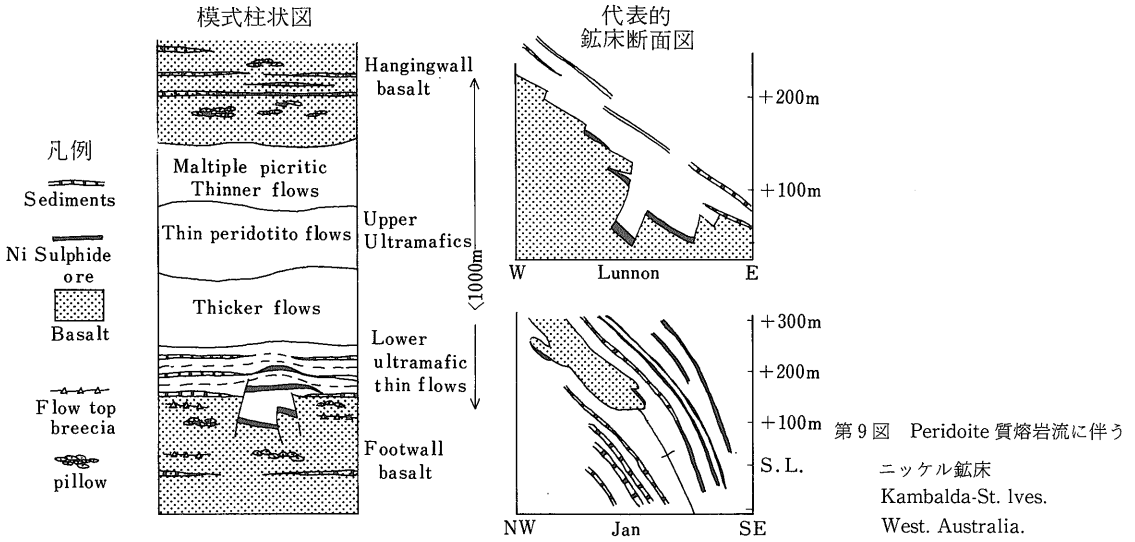
LS-BIF はその巨大なもの 例えばその資源量が粗鉄で500~1000億 t の地域は全世界に散在する。それは スペリア湖周辺 (米) ラブラドル (カナダ) クリボイログ (ソ連) ハマースレー (豪) トランスバール (南ア) セロポリバー等 (ベネズエラ) カラハス ミナスジェライアス (ブラジル) 等がその主なものである。

(2) 時代は中部前カンブリア紀(下部プロテロゾイック或いは前カンブリアX期) 25億-19億年前である。大きく見ると 全部非常によく似た堆積環境をもっている。グリーンストーンを含む原生代及び最下部始生代の深く風化し 準平原化した大陸の上の広大な海盆に堆積している。火山性及び破碎性堆積層の上に 非常に静かに水平に 破碎性堆積物がほとんど混じる事なく 化学的堆積によってこの鉄層ができた。その上に不整合に又

破碎性堆積層が重なっている。

鉄鉱層には大きな堆積輪廻と その中の数ミリの薄さの しかも広く永続性のある 木の年輪を思わせる様な鉄の品位の縞の繰り返しがある。20億年以上前の酸素に乏しい環境で 塩基性岩石も多かった基盤の鉄分は第1鉄として溶出した。そして沈降してゆく大きな盆地の海水は炭酸鉄に飽和した。20億年前頃から酸素を発生する原始生物が繁殖し始めた結果 鉄は3価の第2鉄の酸化物  $Fe_2O_3$  (赤鉄鉱) として急に沈澱し始めた。細かな縞は乾湿等の気象の変化のためであろうか。それ以後は生物の進化により高級な新陳代謝の作用が起こり大気中に自由な酸素ができれば もはや風化による二価の第1鉄の溶出は非常に少なくなるので 広汎な豊富な鉄鉱層の沈澱はなくなってしまふ。このような地質的環境はこの時代を除いては 地質構造的にも 岩石圏 水圏 気圏の進化の面からも 再び 大規模には起こり得なかった。というのが このどの大陸の楯状地にも分布する 均質で巨大で独特な鉄層生成環境の現在の説明である。この早期始生代の縞状鉄鉱床の分布を プレート テクトニクスによるパンゲア大陸にプロットして前カンブリア紀の地殻の状態を推測する試みが A. M. Goodwin (1973) によってなされた。すでに一般化した図であるが これを原図により第8図として掲げた。この曲がりくねった帯状の分布が 当時の大陸周辺の沈降海盆の帯を示すなら 又それは当時のプレートの縁辺部を暗示するかも知れない。また それが 今のプレート分裂のサイクルの プレートの境界と 平行 あるいはそれに近い部分が多いとすれば 何回も動きを繰り返したにしても 大陸の核心は昔から今迄余り変らないという事を示すのではあるまいかと Goodwin はいつている。

(3) LS-BIFの鉄鉱物は 赤鉄鉱 ( $Fe_2O_3$ ) 磁鉄鉱 ( $FeO \cdot Fe_2O_3$ ) 菱鉄鉱 ( $FeCO_3$ ) が主である。BIFは鉄品位15%以上と定義されているが 主に珪質で 初生のままであるならば大部分が Fe 35%以下で



あろう。

タコナイト (あるいはイタピライト等) と称するのは この低品位で そのままでは精錬に供されず 選鉱とその結果の精鉱の団鉱によっている 硅岩質の層状鉱の事である。

開発の当初は 前カンブリア時代であろうと思われる酸化と SiO<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> の溶脱による富化作用の結果できた Fe 60%に及ぶ高品位鉱を精錬に直送していたがこれが掘り尽くされてくると このタコナイト質の低品位鉱を 低コストの大規模露天掘りで採取して 磁力選鉱や浮遊選鉱で 品位60%以上の粉状精鉱をつくる。これに極少量のベントナイト等を混ぜて焼いて径15mmのペレットを作る。現在米国スペリオル湖地域の鉄鉱石は 93%迄がペレット化されている。又自然に富化した鉱石でも 例えばインドのブルーダストと称されている鏡鉄鉱の扁平粉状の高品位鉱も ペレットにしないと 運搬も給鉱も困難である。インドなどではこの様な点は未だおこなわれている。

将来 B I F の 鉱量が段々涸渇して来れば タコナイトの更に低品位の部分 例えば Fe 20%以下迄経済的に採掘できる様にならなければならぬ。鈍角三角形の底辺をひろげる努力である。

LS-B I Fの本論から離れるし また この最も古い時代のものとは限らないが 堆積性鉄鉱層は しばしば 海盆の岸の方から 酸化物 炭酸化物 硫化物の順序に帯状配列をしているのが認められる。勿論全体にわたって硅酸の沈澱が 帯状の鉄鉱層と共に同時に沈澱し又それ等の層の間に硅酸の層として挟まれている。一方硫化物層には硫化鉄に伴って 他の金属 例えば銅 ニッケル 亜鉛などの硫化物が賦存し それが採鉱の対

象となる事がある。 この場合硅酸質の酸化鉄鉱床は化学的に安定で 風化に抵抗力が強いので 露出がよく格好のキーベッドとして使う事ができる。これはもつと若い時代の堆積性鉱床にも応用できるし 化探や物探等の実施のよい指針となる。

### 2-B ニッケル

ニッケルは本来鉄に次いで地球には多量にある金属であるが コアやマントルに濃集していて地殻には さほど多くはない。それでもマントル源の超塩基性岩には普通0.2~0.4%入っていて その総量は7000万 tになる。

鉱床は 既に歴史の古い大鉱山のサドバリーで1~1.5%Ni (銅も1~2%含まれる)。豪州等の砂模地帯の新開発鉱山では2%Ni, Ni : Cu の比が低ければ更に高い品位を 酸化鉱のニュー・カレドニアでは1.5~3%の品位を必要とする。最近の西豪鉱染状の露天掘低品位鉱山 (例 Mt. Keith) では 不変帯の橄欖岩中に0.5%内外 その上の二次富化帯で0.6~2%位のところを対象とし粗鉱品位 Ni 1%でも採掘可能であろう。

このような品位のものを対象とするとなると鉱床の種類も自ら絞られてくる。ニッケル鉱床は上記の通り塩基性—超塩基性岩に限られている事 及びそれ等の岩石の中の硫化鉱床と 元来0.2~0.4%といった Ni を含んだ超塩基性岩が 熱帯性露天化作用によってラテライト化してガーニーライトその他の水酸化鉱物を作って富化した二つの型の鉱床が有る事はよく知られている。現在の生産量の中に占める割合は金属含有量で 硫化鉱物出70% ラテライト質30%である。

次の表はニッケル鉱床をその母岩の性質及び環境に従って更に細別して それぞれの大約の鉱量 (Ni×10<sup>8</sup> t) を示した。

母岩大別		0.4%以下	0.4%以上	
硫化 鉱 床	超塩基性岩類 (Komatiite系岩石)	Dunite 进入体に伴う鉱床	1,370	10,350
		橄欖岩質熔岩に伴う鉱床	—	2,080
	斑輝岩—超塩基性岩 系	塩基性—超塩基性 进入岩体の鉱床	300	11,900
		巨大な塊状进入体の鉱床 (ブシフェルトを含む)	41,200	7
		サドベリー、イラブティブ (いん石衝突による?)	不明	5,600
セラ イト 鉱 床	ガーニーライト質ラテライト	?	15,500	
	含ニッケル鉄ラテライト (Fe約40%)	?	14,300	
			約60,000	

第1表と比較すると数字がやや大きいのは0.4%という低品位を含めたためである。

硫化鉱床の各区分について新しい知見がふえているので重要な特徴を述べてみよう。

(1) Dunite 进入体に伴う鉱床

これは大きな 厚い(時に1000mに及ぶ)褶曲した造構地帯での Dunite (Mgo>45%) の进入体に伴い 硫化鉱は散点状に有るか (例 Mt. Keith) 又は 縁辺部に集合体として有る。

例としては カナダの Thompson-Wabowden の褶曲帯の鉱床の大部分 西豪州の Wiluna 地方 Mt. Keith, Agnew その他

鉱量は大きいが残念な事に平均品位が低く 二次富化 露天掘りなどの他の好条件が必要な事が多い。

(2) Peridotite Lava に伴う鉱床

Olivine Peridotite 又はその蛇紋岩化した熔岩流の積重ね (普通全体で100m以下) の中 或いは底に層状に賦存しその下部は塊状 上部にゆくに従い散点状になり 急に無鉱帯になる 普通10m以下の鉱層である。これ等の熔岩流の層位は Archean のグリーンストーンベルトの中の水成岩を挟んだ厚い超塩基性熔岩流の基底近くである。

平均品位が高く 2%の稼行標準以上のものの率が高いので 現在生産中のものが多い。銅の率が前者よりやや高い。マグマ噴出の前 又は途中で硫化物岩漿分化が行われて 今存在している所に置かれたと考える人が多い。最近発表された模式図

のいくつかを第9図に紹介しよう。この型の例は典型的なものは西豪カンバルダ鉱山及びその附近の鉱床や カナダ Manitoba 州の Thompson 鉱床群の一部である。

アフリカ ジンバブエの Trojan その他の幾つかの鉱床やカナダ オンタリオ Timmins のそばの Langmuir No.2 は噴出の火道かパイプも含んだこの型のものと考えられる。

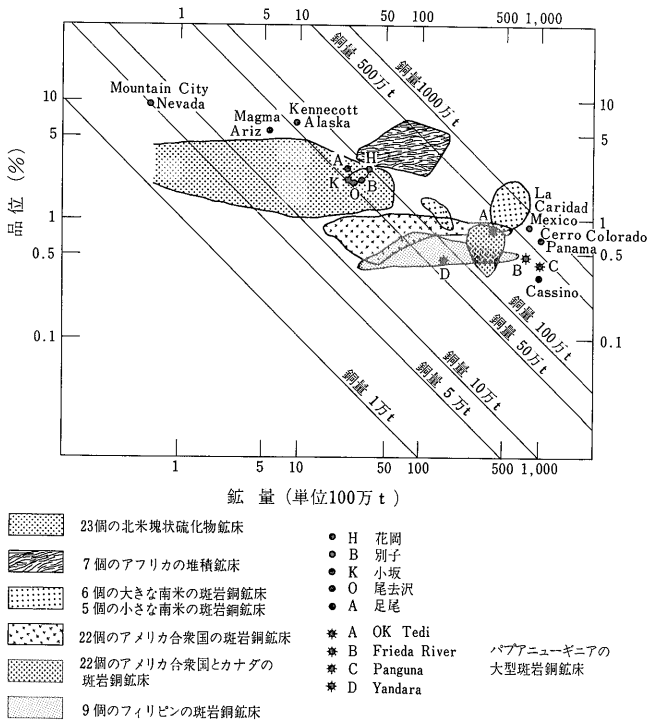
著者は15年前に2年間西豪州のニッケル鉱床探査を行い この1回の流れの厚さが10mか20mの超塩基性岩の熔岩流と その間に挟まる厚さ1mから10m位で時にニッケルを多量に含んだ黒色頁岩を 深いトレンチを10本以上掘って確かめた事があった。その時に 25億年以上前の地殻を想像して 我々日本の地質家の狭い経験と知識を思い知らされた事であった。

(3)塩基性(時に超塩基性を伴う) 进入岩体の鉱床

前二者と異なるところは 斑れい岩類を伴う 母岩の MgO が低い Ni : Cu 比が小さく普通 5 ~ 3 : 1 Ni : CO も低く 白金属がやや高い 进入体は次の(4)の様に大きくなく 不規則のものも多く 前カンブリア紀のみならず その後にも出るという事である。硫化物は 通常 角礫帯またはパイプに存在し 時に層状に移化するが ほとんど常に塩基性母岩のゼノリスを持っている。鉱石は 散点状 又は集塊状である事が多い。例は西豪の Carr Boyd, Jimberdana dyke 中国の Jinchuan Canada の Lynn Lake, Giant Mascot ボツワナの Pikwe ソ連の Noril'sk, Talnakh などである。

(4)巨大な層状进入体

巨大な超塩基—塩基性のいわゆる Layered Intrusive に伴うもので最も典型的な例は 南アの Bushveld Complex である。ニッケル又はニッケル・銅の硫化物はむしろクロームその他の副産物として存在し 低品位の事が多い。岩漿期に外部からの硫黄の導入がないと十分な硫化物は出来ない。白金属の鉱物に富む 例えば世界一の白金鉱床である Bushveld の Melensky reef は白金属鉱物の副産物としてニッケル硫化物を採取している。この他の例は米国の Stillwater ジンバブエの Great dyke などこの例であって いずれも品位は 0.4 以下 但し量は非常に大きい。



第10図 代表的銅鉱床の大きさ品位

(5) Sadbury の nickel Irruptive

わざわざここで この世界一のニッケル鉱床を説明する要はないが 過去に採掘した量まで合わせると 0.8%Ni 以上の世界の既採掘 未採掘の鉱量の39%を占める 1250万 tのニッケル量を持っていた事になる。

その独特な地質構造 鉱物組織やその組合せなど他に類を見ない多量のニッケル金属の濃集を併せ考えれば 20億年前のいん石の衝突という様な成因説も うなずけるのではあるまいか。

ニッケルは工業技術が進むにつれて ますますその需要の高まる鉱種である。 勿論その収益性からいえば 精錬 加工技術の方が採鉱・採掘にくらべてより望ましい分野であろうが 一次産業的な資源の面も 世界の資源が INCO 社の独占に近いという現実はあるけれども腰を落付けた調査探鉱が望ましいものである。

深海底のマンガンノジュールの資源については 他の機会に譲り ここでは触れない。

2-C 銅

銅はその多くの物理 化学的特性ことに高い電気伝導率 (等断面では銀に 等重量ではアルミに負けるだけ) や展性 延性 無磁性 等により 人類が電気エネルギーを多用

する限り その需要は増加するであろう。 銅の人口1人当たり使用量は機械文明の尺度として使われる。 従ってその世界の資源の消費量の年増加率も どんなに小さく見ても2%はみなくてはならない。 再び1950-1970の期間の様な世界的経済発展の時期が今後50年の間にくるとすれば3%以上を見なくてはならない。 そうなると資源の寿命は40年位になる。 それを見越しての資源対策が緊要である。

銅の消費量は年間955万 t 採掘量は788万 t (共に最近3年間の平均概数) その差は銅スクラップ等でうめいていると考えてよい。

銅の資源の大部分は次の3つの型の鉱床に属している。 それぞれの占める割合を附記して列挙すれば

- (1) 斑岩銅鉱床 (スカルン鉱床も含む) 約50%
- (2) 堆積鉱床 (続成作用も含む) 約25%
- (3) 塊状硫化物鉱床 (主に火山因) 約15%

この他に マグマの直接分化 鉱脈 その他の種々の成因のものが10%位は有るであろう。

日本には (3)の型に属する別子型キースラーガーと黒鉱 それに近縁の東北地方の鉱脈 むしろ斑岩銅鉱にも似た面を持った足尾の様な鉱脈などがある。 今は多くが掘り尽くされたが面積の割からいえば銅の資源国であった。 筆者が小学生の頃 1915年頃は 世界第3の産銅国と教えられたものである。 現在では銅の海外依存度90%に近い。

第10図は世界の主要な銅鉱床の大きさ及び品位をまとめた図である。 縦軸は品位を横軸は鉱量をそれぞれ対数目盛に取って 鉱床の点をプロットし それをグループ別にしてある。 斜の線は含有銅量であり これによって鉱山の規模が大体判定出来る。 また上記の3つの型の鉱床のそれぞれの特徴も或程度あらわされている。 地域別 鉱床別に比較的近い所にまとまるのはコストその他の経済的な要因も入ってはいるが成因的にも注目してよい。 原図は Kinkel, Peters 両氏によって作られ 米国地質調査所の Prof. Paper 820 (1973) に掲載されたものである。 日本の5大銅山 別子 足尾 尾去沢 花岡 小坂 と また最近のバブアニューギニアの大斑岩銅鉱系をプロットしたら それぞれ近い所にまとまった。



上記の3重要鉱床型について筆者の最近の所見についてそれぞれの鉱床別に以下に述べる事とする。

#### (1) 斑岩銅鉱床

斑岩銅鉱床についてはここ20年の間多くの新鉱床開発の成功と共にその成因や生成の過程の研究ことに地化学的研究が非常に進んだ。大鉱床の様々な角度から見た詳細な研究や広域的にまとめた研究集成やまたそれらの共通点を捕えそれを物理化学的プロセスとして明快に説明できるに至った。新しいテクトニクスによるテクトニクコントロール(造構規制)については Sillitoe Mitchell 等の論説が有る。その地球的な分布は確かにプレートの収斂部沈み込みの上の火成弧の上にならんでいる事は少なくとも中世代以後にできた斑岩銅鉱床については間違いない。しかしその収斂部の長い地帯の上に平均に有るとは限らない。この型の銅の濃集の極めて貧弱な部分即ち顕著な切れ目がある。日本やスダグ列島あるいはメキシコ中部などがそうである。この理由はよくわかっていない。筆者は西太平洋の島弧群の場合には鉱床生成の時の造構応力が規制の一つの重要因子ではないかと考えている。

即ち筆者等は黒鉱を含めた塊状硫化鉄鉱床は引張り応力の場に出来易く一方斑岩銅鉱床は圧縮応力の場に出来易いと論じた。

日本へ輸入される銅精鉱の大部分は斑岩銅鉱殊に西太平洋島弧群からの斑岩銅鉱の精鉱である。そのために副産物の金の量が大きく日本の金精錬生産の過半を占めている。

この西太平洋諸島の斑岩銅鉱床は戦後間もなく1953年頃から開発に着手されその精鉱はほとんど全部我国に輸入され彼我両方の戦後経済の発展に大きな貢献をした。筆者は1953年初めてフィリピンで斑岩銅鉱の存在を推定し54年試錐によって Sipalay 鉱床の一角を買った。その年にはそれ迄アジアでの斑岩銅鉱の存在に疑念を持っていた米国地質調査所は A. R. Kinkel 氏以下数名を筆者のキャンプに派遣した。1ヶ月余の調査の後キンケル氏もこれの斑岩銅鉱である事を確認した。現在の Atlas も以前は上部の脈を掘っていたがこれも斑岩銅鉱であったしその後数年ならずしてフィリピンの銅ブームが起こった。日本の鉱業界ことにその地質陣がこれに始まって Bougainville や Papua New Guinea の時代に到る迄終始変わらぬ努力を重ねて来た事は大きな実績といえよう。

#### (2) 塊状硫化鉄床

これは火山源のある特定な層序に限定された主として銅(亜鉛・鉛等)鉄の硫化鉄物の鉱床で黒鉱はその代表者の一人である。この鉱床についてもここ20年来越来ことに日本の黒鉱鉱床の調査探鉱の成功それに引続く学界の真摯な研究が世界の学界を刺激し塊状硫化鉄床全体の海底火山源の成因説が確立した。それにしても黒鉱の様に火山弧の裏側の海底火山特にその中の酸性岩の活動に関係があるのもあればまた他方にはサイプラスの様に海嶺のリフトに関係あるものまで様々である。

ことに現在の海嶺については60年代始めに紅海中央の深淵の0歳の硫化物層群がリフトの底に発見されて以来1977年にはガラパゴス海嶺の海底の硫化金属を含む熱水の噴出とその周辺の異常生物群落の発見があって注目を集めた。続いて1979年末には北緯21°の東太平洋海嶺での金属硫化物の噴出沈澱いわゆるスモーカーの発見があり1981年には再びガラパゴス沖でスモーカーのみならずその結果出来たと思われる銅と鉄の硫化物を主とする1000m×幅218m×厚43m+の鉄塊が潜水艇(アルペン)による映画撮影及び多量の試料採取によって確認された。試料は銅鉄を主として各品位10%と略報されている。

また潜水艇によって確かめられてはいないがオレゴン州沖 Juan de Fuca プレートの西の海嶺の底でもこれは亜鉛に非常に富んだ試料が広範囲ドレッジされた。これ等一連の発見については調査の困難性もありまた未発表の部分も多い事であろう。今までの断片的な多くの報告から主要な数値を挙げて見ると

水深 2400—2500m  
 熱水の温度 高い所では300°~400°C  
 圧 250気圧  
 リフティングの速さ 約 3.5cm/yr  
 硫化物の品位(スモーカー附近)鉄:非鉄金属(銅・亜鉛等) ≤ 1  
 普通の塊状硫化鉄では1より大きい  
 尚周辺の岩石は枕状又は平板状の玄武岩である。

いずれにしても塊状硫化鉄床の成因に非常にはっきりした情報をもたらしただけでなく鉱床生成の現場を初めて目撃できたという意義は大きい。米国のある当事者の一人は鉱物資源は最早 unrenovable ではないなどと叫んでいる程である。

米国その他ではオレゴン沖 中南米沖等米国の力の及ぶ海域の海嶺で探鉱を始めた。海底鉱物資源探査もマンガン団塊から遙かに浅い海嶺の限定された海域へ転向しはじめるのは当然かも知れない。

この探鉱の一つの手がかりとして $^3\text{He}/^4\text{He}$ の同位体比率が用いられ得る。即ち マントルから直接上昇した物質に伴う He ガスには $^3\text{He}$ が多く通常気圏の He に比較すると この熱水の $^3\text{He}/^4\text{He}$ の値は20~30%高い。

### (3) 堆積性銅鉱床

銅のもう一つの大きな資源で アフリカのみならず各地で最近注目されているものに堆積性銅鉱床がある。ザンビア ザイール アンゴラ にかけて存在する巨大な先カンブリア最終期の銅鉱層が 堆積性の同成ないし続成因であると論ぜられてから 最近是世界各国で この型の銅資源が改めて見直され 開発され始めた。欧州で中世の頃から掘られた Kupferschiefer 層群の銅 鉛 亜鉛銅鉱床が広く探鉱され また米国でも古くから掘られたスベリオル湖畔の White Pine 以外にも堆積性銅鉱床が幾つも発見された。

これらの堆積性銅鉱床は堆積と同時に物理的に(例えば砂鉱として)あるいは化学的に(例えば前出の綿状鉄鉱床の様に)沈澱した場合も数多く認められる。しかしその大部分は 既に堆積した層の続成作用として その上下左右の近隣の層からも金属を溶かしたブラインが浸入してくる事によって金属がもたらされたと認められる。鉄鉱層の様な一次的な化学沈澱とちがった いわば二次的な化学沈澱による堆積型銅鉱床 Syn-and Diagenetic な成因の銅鉱床と考えられている。

構造史的には 非常に風化の進んだ 地形的な起伏も有る 火成岩 変成岩 あるいはその上の礫岩・砂岩の大陸基盤が 例えば リフティング という様な理由で海侵を受けた。その最初の海侵に伴う有機質の頁岩や砂岩 しかもやや乾燥気味であり還元環境で堆積した事が含銅層としては望ましい条件である。その上を更に乾燥した赤色砂岩の様な層や 蒸発岩によって覆われている というのが一般的である。この海侵は前述の様にリフティングを想わせる場合が多いが 確実な直接の証拠は無い。この海侵によって出来た層は有機質 炭質であるばかりでなく 藻類の礁から出来た苦灰岩の Bar に水平的に挟まれている(同時に出来た)場合が多い。よい例としてザンビア カッパーベルト 豪州マウントアイサ等があげられる。

銅の大部分は 海侵を受けた盆地のプリズムを形成している厚い基盤の堆積岩や火成岩からブラインにより溶出されて川などで流れて来てその場で沈澱したものもあるが 海侵層の堆積後に 続成作用で動いてきて この海侵による有機質 無酸素の新しい堆積中の還元性の硫

黄と遭遇して銅などの金属を沈澱した場合が多いと認められている。

上盤側に顕著な蒸発岩層を伴う事が多いのも注目すべき探鉱上のプラス要因である。この様に古気候に支配される事が多く 堆積当時の赤道から30°内外の緯度以内のところに存在する事が多いようである。

銅層は有機質を含む頁岩 泥岩 泥質苦灰岩などが多いが 有機質かつ硅質の砂岩の事もある。三次的に銅が動いて行った先の粗砂岩のこともある。

米国 ホワイトパイン や北部カナダの銅鉱床では 基盤が塩基性火成岩類で その上の銅層は ほとんど鉄と銅の硫化物だけであるが 欧州の Kupferschiefer やアフリカのカッパーベルト等では上盤 または水平的に同じ層準でも堆積盆のはしの方では 亜鉛・鉛の銅層となる様な帯状分布を示す。カタンガでは銅の硫化物が輝銅鉱一斑銅鉱一黄銅鉱一黄鉄鉱と分帯を示す事が多く認められている。アフリカでは一般に CO:Ni 比が高く コバルトの(時にはウラン)資源としても非常に重要である。世界のコバルト資源の60%以上を占めている。

最近では 今世紀の初め頃盛んに稼行された非常な高品位の輝銅鉱の銅石で有名で ケネコット社の基礎を作った。Kennecott Alaska 銅山は中世代の Sabkha 層に伴った。この様な堆積性銅鉱床ではなかったかという説も出ている 最近の Accretion tectonics によってそれは遙か南の太平洋のどこかの大陸縁辺でも出来てここまで漂移して来たものと考えてよいのだろうか。

これ等の銅床の生成温度は勿論低く 100°Cを越えることはない。

### 2-d. 亜鉛・鉛銅床

亜鉛は電気化学的な鉄の防蝕性とか 鋳物等に特徴はあるが 銅程の有利な物理化学性を持たぬ故に また鉛はプラスチック等の様な有力な代替品があるので 種々の電池などに欠くことのできない必需金属ではあるが 全体の需要の伸びが必ずしも冴えない。これを反映して最近15年間に生産や需要の増は 銅の300万tに対して亜鉛は約200万t 鉛は100万t強である。もっとも鉛は化学的に安定しているので 故鉛 即ち鉛スクラップの市場への回転率が最も大きい。

亜鉛 鉛共にクラークナンバーは銅より低いし 深海底団塊からも回収出来そうにない 現在推定出来る鉱量も銅より少ないので その寿命はいずれも 30~35年といったところで探鉱が必要である。探鉱すれば銅床発見の可能性のあるところは多いと思われる。

亜鉛と鉛は単純な硫化物しか作らずしばしば 共存す

るがその稼行品位は鉛の中にしばしば含まれる銀の量によってかなり左右される。米国中部のミシシッピー型鉱床では操業の低コストと母岩であるドロマイト廃石が売れる事によって亜鉛・鉛合計2~4%である。一方非常に高品位の大鉱山もあるが普通は4~10%位のものが多い。

亜鉛・鉛の鉱床の重要なものは各種の stratabound のものでそれは母岩の堆積岩と(1)同時生成(2)低温後生 epigenetic の関係にある(3)黒鉱の様な火山源堆積性の3種類に大別して考えられる。実際の鉱床はこの中間性であったり重複したりしているケースも沢山あろう。

鉱量的に最も重要なものは(2)を代表する広義のミシシッピー型で主に安定した大陸のクラトンの炭酸塩岩(古生層のものが多い)を母岩としているのに対し(3)はその鉱床の出来た時のプレート縁辺部ことに大陸縁辺部の造山帯弧状山脈や島弧に多い。

#### (1) ミシシッピー型 (アルパイン型も含んだ広義のもの)

広義のミシシッピー型鉱床は普通厚い礁性の炭酸塩岩層を母層としているがその中でもこのサンゴ礁が海盆の縁辺部にあって頁岩相などと境している所などがよく鉱化を受けている。またその反対側に蒸発岩相が発達していると いっそう好条件の様である。即ち暖い海の coral reef が fore reef に shale, back reef に evaporite を持つといった組合せがよいと考えられる。最も典型的に発達している米大陸では多くの鉱床の群が古生代の海盆の縁辺部やそれより更に古い累層が露出している山地や台地の周辺を囲んで配列している事が多い。

当時の海盆を取りかこんだ基底岩層のウェッジやその隆起した高地から塩化物に富んだブラインによって溶出された金属は岩層の空げきやことに破砕帯や断層などを通して移動してきて有機物に富んだ空げき率の高い礁性炭酸塩岩層に遭遇して金属(亜鉛・鉛)を沈澱し始める。ことに隣の蒸発岩から逆流してくる Mg による苦灰石化は更に石灰岩中に空げきを作るしまたその  $SO_4$  は有機質により還元性の S をもたらして硫化金属の沈澱を促進するであろう。銅に欠けているのは下部古生代の基盤層の中に銅が少なかったことと  $150^{\circ}C$  以下の低温の塩水では銅の溶解度は低過ぎて運ばれてこないという様な説明がなされている(温度が  $200^{\circ}C$  になると銅を伴う)。

ここに注意すべき事はミシシッピー型鉱床と石油その他の炭水化物の関係である。この種の鉱床はよくその中に少量の油を伴ったりその他の炭水化物を持って

いる。また位置的にも油田に近接し同じ礁性石灰岩が貯油層になっていることがある。

サンゴ礁の出来る様な暖い海には石油源の微生物も多く有機質頁岩は石油の母層と成り得たであろう。その頁岩から金属を溶出した塩水も油も共に移動したであろう。そして両者共空げき率の高い礁性の石灰岩層に入り金属は硫化物として沈澱し石油もまたそこにたまり得るであろう。しかし充分な油量のある油田となるとミシシッピー型とは近接していてもお互に避け合っている。炭水化物の様な有機物が有ると有機化合物によって S が還元されないのであろうかそれとも亜鉛・鉛の硫化物の溶解度が大きくなるのであろうか。

火成活動などが起こって温度が  $200^{\circ}C$  以上に上る様な事があれば石油はガス化して消滅し鉱床も又鉱液の再活動鉱物の転位が始まり鉱脈や交代鉱床などとの重合体が出来るであろう。

メキシコ中部山地の中世代石灰岩中の銀・鉛・亜鉛の鉱床も北部の石油臭のする様な火成作用の無い Manto 型のもは本来のミシシッピー型に相当し中南部のスカルンを伴う manto-chimney 型で含銀高品位の鉱床はこのミシシッピー型の鉱床に後からの火成作用に伴う第2回目の鉱化が様々な程度に重合したと考えてよいのではないか。

最近米大陸中央部の古生層特に石炭期の石炭の中に少量ではあるが割合に普遍的に閃亜鉛鉱が含まれていることが報ぜられている。技術的にも回収の可能性もありその量は数百万tになると報ぜられている。

#### (2) アイルランド型の亜鉛・鉛鉱床

1960年代後半から急に発見開発されたアイルランドの石炭紀の炭酸塩岩中の亜鉛・鉛鉱床もミシシッピー型の様なものであったかも知れぬ。ただ鉱液は更に下部の古生層の砂岩等の残留水が深い断層や裂隙に沿って上昇してきたと考えられている。この断層には角礫構造の亜鉛鉱が多く見られる。鉱液の温度も  $200\sim 350^{\circ}C$  と高かった様であるし銅を時には水銀さえも含んでいる。小さな火山岩の露出も無いわけではない。

#### (3) 頁岩中の層状亜鉛・鉛鉱床

以上に述べたミシシッピー型及びアイルランド型の亜鉛・鉛鉱床は古生層あるいはそれ以後の炭酸塩岩中に賦存しているが層状の亜鉛・鉛鉱床の世界で最も大きなものの幾つかが原生代の頁岩の中に賦存している。豪州のマウント・アイサ マッカーサー・リバー やカナダのサリバンやハワード・パス等が代表的なものであ

る。

変質 変形をほとんど受けず 最も原形をとどめていると思われる マッカーサー・リバーでは 閃亜鉛鉱方鉛鉱と硫化鉄鉱の極めて微細な結晶が それぞれほとんど単一鉱物の組成を持った薄層の縞の積重ねとして炭質を含んだ石灰質頁岩の中に堆積している。これ等の外観が時に 組織的には縞状鉄鉱層と同じ様に見えるところすらある。硫化物は頁岩を作る破砕物質と同時沈澱と考えられる。スランピングと認められる褶曲以外には層はほとんど擾乱を受けていない。面積2平方km 全体の厚さ最大400m(その下部に厚さ約40mの亜鉛・鉛鉱の層あり)の東に深い大きな2つの断層が有って その断層に沿って別の幾つかの銅を含んだ亜鉛・鉛の層理と不整合な小さな鉱体がある。この断層(複数)を鉱液を供給した通路と考えている。断層から溢れ出た鉱液が原生代の塩濃度の高い浅い還元性の泥質の盆地の中で金属硫化物を沈澱したと考えるのは非常に合理的である。

マウント・アイサも頁岩層の中の亜鉛・鉛層と黄鉄鉱層は 後からの大褶曲は受けてはいるが マッカーサー・リバーと同様な 同時及び続成因の鉱床と考えられる。しかし この場合は塩基性の火成活動がこのペーズン堆積の時代の前に有り また酸性の火山灰層が鉱層に挟まれていて火成活動は明らかである。一方鉱層と同時に発達した藻類の礁があり その有機質苦灰岩の中には 亜鉛・鉛の様に見事な縞状にならず 粗い層状または斑状の銅鉱床がある。恐らく 塩基性-酸性のbimodalの火成活動と それ等の火成岩を挟んだ厚い頁岩質堆積層の中の深い大きな断層—Rifting—を通過して多量の鉱液が上昇し銅は藻礁と共存し 溢れた亜鉛・鉛の液は浅い泥質有機質の海盆に硫化鉄として沈澱したと考えてよいであろう。

カナダのサリバンも似た様な成因が考えられているがユーコン州東部の アンヴィル鉱山等も含んだハワード峠の鉱床は 成因は似ているが オルドビス紀の炭質頁岩の中にあって時代が若い。ユーコン州からアラスカにかけて点々と発見されているこの種の下記古生層の鉱床は 恐らく当時の Back-arc basin にそこに起こったリフティングに関係があって出来た鉱床ではないかと考えられている。これ等は顕著な火成活動は伴わず銅もない。

メツゲン サルジニア その他のより小さな欧州の鉱床も似た様な成因と考えられる。深く埋没した岩層の中にある地層水 時には炭化水素の様な有機物も共にその地層の中の金属をとかして 水平に あるいはまた上に動いてくる。火成活動は熱のエネルギーによって

その運動を活発にするだけでなく それ自身 火成岩から金属を供給する事もある。後者が強くなれば Volcano-exhalative といえる様になるであろうが ここに述べてきたものは埋没による温度の上昇により その母層から溶出され 運ばれてきた金属が 石灰質岩層等に遭遇して沈澱したり 浅い有機質泥質の堆積盆に沈澱したもの等の組合せが主体をなしている物である。

世界で最も大きな そして最も古い 高品位の鉛・亜鉛の鉱床である豪州のブロークンヒルも 非常に激しい褶曲と 変成作用を受けた 堆積性の鉱床であると 考えられている。

黒鉄をはじめとする亜鉛・鉛の塊状硫化鉄床については最近の多くの研究発表があるので この小論に筆者が蛇足をつける必要はないであろう。ただ上記の堆積性の鉱床との考えられる成因的關係については筆者は興味を持っている。

## 2-e チタン

チタンの広汎な利用は最近の事である。勿論主要な用途は 金属チタンとして航空機その他の宇宙機器や特殊交通機器 最近は巨大な潜水艦(ソ連)等がある。一方酸化チタンは白い顔料として塗装用はもとよりほとんど全部の機器用合成樹脂の最も安定した白色顔料成分として重要である。

その年間消費は非常な急増を続け チタン金属(スポンジの形)の生産量は $\odot$ とされているが1981年には恐らく100,000 t/年を超えていて その45%はソ連が占めているであろう。

チタン金属は比重4.5で 800°C以下では強度高く 強さ:重量比ではあらゆる普通の金属に勝っている 海水に対してもアルミより安定している。

資源としてはチタンは地球上に多量に普遍的に存在する元素であって チタン採取の主な原料は

ルチル	TiO <sub>2</sub>
アナターゼ	TiO <sub>2</sub> 結晶形が異なる 稀
イルメナイト	FeTiO <sub>3</sub> 最も多量
リユーコキシ	イルメナイトが酸化し 大部分が不純な酸化チタンの細粒の集合体となった鉱物
チタン スラッグ	高チタン 鉄鉱石の鉄精錬の鉱さい(スラッグ) TiO <sub>2</sub> 70~80%を含む。

チタン スポンジ(金属)は主にルチルから精練される(クロール法)。四塩化チタンを作り 窒素中で金属マグネシウムにより還元してスポンジを作り それを真空中で焙かしてインゴットにする。最近イルメナイトの品位を高め いわゆる人工ルチルを作ったり チタンスラッグから スポンジを作る努力が各国でなされている

る。日本はチタンスポンジの生産では米ソに続き世界3位である。その大部分は米国に輸出している。

酸化チタンは主にイルメナイトやスラッグから作る。日本は原料は殆ど輸入であるがチタン白の製造も米西独に次いで大きい産額を持っている。世界の全製造能力は年間2,838,000 tである。実績は発表されていない。金属スポンジの自由世界だけの年生産量は55,000 t ±である。米国鉱山局は世界需要の年累増率を4.5%と見積っている。参考のためにスポンジ金属1 lbを作るに要する原材料は

ルチル2.2lb 塩素3.5lb マグネシウム1.25lb 窒素等の不活性ガス0.3ft<sup>3</sup> 石油コークス0.3lb 電力7-22KWH (大きい数字は塩素やマグネシウムの再生を含めたもの)

更にスポンジから金属インゴットを作るのに2~2.5 KWHの電力を要する。

需要が大きいので価格も急上昇して1977~78年には約3 \$/lbであったものが1980年に7 \$台に81年に7.65 \$/lbになった。

このような需要に対してルチルの供給は今迄は豪州ことに東豪州の海岸砂鉱に頼っていた。しかしこれも限りがあり Sierra Leone と南アも余り大きな期待は持てない。現在生産は無くまたアナターゼではあるがヴァナジウムも共産するといわれるブラジル 中西部内陸にある Campo Alegre の鉱床は興味あるものである。

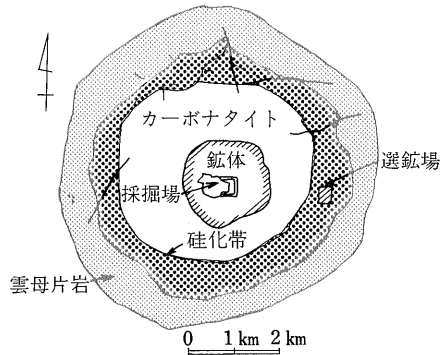
1981年のルチルの鉱山生産約490,000 t に対しブラジルを除いた全世界の鉱量33,600,000 t でブラジルを含めば1億t以上の鉱量がある。低品位が問題である。

酸化チタン(チタン白)は普通はイルメナイトを硫酸処理して鉄を除く方法が途上国でも用いられるがその含鉄廃滓が深刻な環境問題を起こす。ルチルやアナターゼを塩素処理する方法は環境問題的にも高い実収率からいっても塩素と酸素が入手出来るところなら有利の場合が多い。鉱石原料代のコストの中に占める割合は20%内外のはずである。

イルメナイト(スラッグも含む)の生産量約480万tに対し確推鉱量は660×百万t。資源量をとればTiO<sub>2</sub>の含量で10億tは有り得る。

どうもチタンの問題は資源の量よりも処理の技術にあるようである。尚スクラップの回収にも非常に大きな問題がある。

多くの新金属と称するものは処理利用技術がその死命を制することが多いことは注意すべきことである。



第11図 Araxá カーボナタイト地質略図

### 2-f ニオブ(米ではコロンビウム)とタンタル

新金属の代表に少しうの立った選手だがその重要性によってチタンを選んだが稀金属の代表には流行のニオブとタンタルの兄弟を充てることにした。

元素ニオブ及びタンタルの諸性質を表示すると

番号	原子量	原子価	イオン半径	地殻平均	融融点
Nb	41	92.91	5	0.69A	20ppm 2468°C
Ta	73	180.95	5	0.68A	2ppm 3030°C

両者共 lithophilic 元素で酸素との親和力が大きく原子価は等しくイオン半径も近似であるので共存する事が非常に多く代表的な鉱物コロンバイトとタンタライトは (Fe Mn)(Nb Ta)<sub>2</sub>O<sub>6</sub> でただ Nb と Ta の比が異なるだけである。主な鉱物は上記のコロンバイト-タンタライトのほかには Euxenite(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ti, Ta)<sub>2</sub>O<sub>6</sub> Fergusonite(Y, Er, Ce, Fe)(Nb, Ta, Ti)O<sub>4</sub> Pyrochlore(Na, Ca)<sub>2</sub>Nb<sub>2</sub>(O, OH, F)<sub>7</sub> が経済的には主要なものである。ニオブはアルカリ花崗岩 ネフェリン閃長岩 それ等と関係ある超塩基性岩 ベグマタイトやカーボナタイトに濃集することが多くタンタルは曹長石化した花崗岩やベグマタイトの様な花崗岩バソリスの後期の分科した岩石に濃集する。

ニオブはフェロニオブや五酸化ニオブの形で (1)合金鉄 ステンレス鋼 HSLA 鋼 (High strength, low alloy steel) に交ぜ 主としてその鋼の組織を細かくすることによって その物性 特に強度:重量比を高める。このような鋼は橋 高い建造物 パイプライン等に使ってその耐久性を利用する。 (2)ニオブを混ぜた合金 特にスーパーアロイ (鉄 ニッケル コバルトをベースとして他の特殊金属を混ぜた合金) は高温に於ける強度:重量比を高めまた耐蝕性も非常によい。船舶構造物 石油化学プラント 航空機部品等に使われる。 (3)今後の新しい用途として注目されるのはニオブ合金の超高電導体として

磁気浮上列車用電導磁石としては他に代るもの無しといわれ 氷点下の寒冷地の高圧送電 更には核融合装置の磁場にて色々な特殊用途が考えられている。

需給の統計は自由世界のものだけしか判っていないがソ連邦も非常に大きなニオブ資源を持っているから 恐らく鉱山生産は全世界で3万 t 弱 自由世界では15,000 t 土 (ニオブ金属含有量換算) といったところであろう。尚 原鉱石品位は ブラジルのカーボナタイト 鉱で  $Nb_2O_5$  2.5% (Nbで1.75%) である。

資源の方は自由世界だけで約350万 t の鉱量があり そのうち約300万 t がブラジルで発見されているカーボナタイトで占められ 将来も大きな資源の発見は大半はカーボナタイトであろう (主にブラジル アフリカ 北米大陸部)。

参考のために ブラジルの Araxá 鉱山を例にとつてカーボナタイト 鉱床につき要点を下に述べる。

Araxá 鉱山は有名な Minas Gerais 州の南東部 Rio de Janeiro と Brasilia の中間にある。カーボナタイトの常としてこの辺はアルカリ岩の発達した区域で7倍のカーボナタイトの進入体及びその接触変質帯が有る。それぞれのカーボナタイトに特有の様々の鉱化が有るが Araxá 以外は開発されていない。Araxá は第11図 の様に径4.5km の円筒型のカーボナタイトの略真中に1,800m の径の  $Nb_2O_5$  2.5%以上の酸化富鉱体がある。この部分は厚い(最厚40m) ゴサン ( $Nb_2O_5$  0.4%) に覆われていた。その下の鉱石は淡褐色のラテライト質で 含バリウム Pyrochlore (Pandaite  $Nb_2O_5$  63.4%) を含み 前述の如く平均品位  $Nb_2O_5$  2.5%である。ラテライト化した高品位部は厚さ100m 最厚部200m で その下の不変帯のカーボナタイトは品位が急に低下する (1%以下?)

鉱量は約46万 t である。露天掘で 3,500 t/day 処理の選鉱場を持ち 60% $Nb_2O_5$  の精鉱を年に42,000 t 出し得る。精鉱は焼鉱と不純物溶出の処理を受けた後 アルミニウム粉末を燃やす Aluminothermic 法で Ferroniobium を作って輸出する。職員93人従業員406人である (mining magazine 1982 2月号による)。

資源としてはこの外にナイジェリア中部の JOS 高原の大きな花崗岩複合体 ことにその中のジュラ紀と思われる特定な時期の黒雲母花崗岩 及びその風化によって出来た残留または流出した土 砂鉱が採掘されている。この花崗岩は グライゼン化したものと考えてよい様に見受けられる。

ソ連邦のものは非常に豊富な Nepheline syenite の鉱床が主の様である。ことにその曹長石化した部

分やペグマタイトあるいはカーボナタイト等が鉱床を形成しているのであろう。数多いこの様な鉱床の中でも Kola 半島の Lovozero アルカリ岩複合体は非常に豊富なニオブ及びタンタル資源を持っていると報告されている。

次にタンタルについて略述しよう。

タンタルの存在はニオブの1/10と考えてよい。それだけに稀少価値としては次の様なものがあげられる。(1)耐食性が白金と同じ程度に優れ 高温で機械的強度が高く 展延性に優れ 衛星部品 ジェットエンジン用のスーパーアロイ 航空機用等に用いられる。(2)金属中最も安定した陽極強化皮膜を形成する (エレクトロニクス用コンデンサー キャパシター の材料—総需要の60~50%を占める—)。(3)高温下で酸素や窒素との親和力が大きく真空機器内のゲッターとして用いられる。(4)タンタル炭化物は他の金属カーバイト類でセメントして高級超硬工具類を作る。

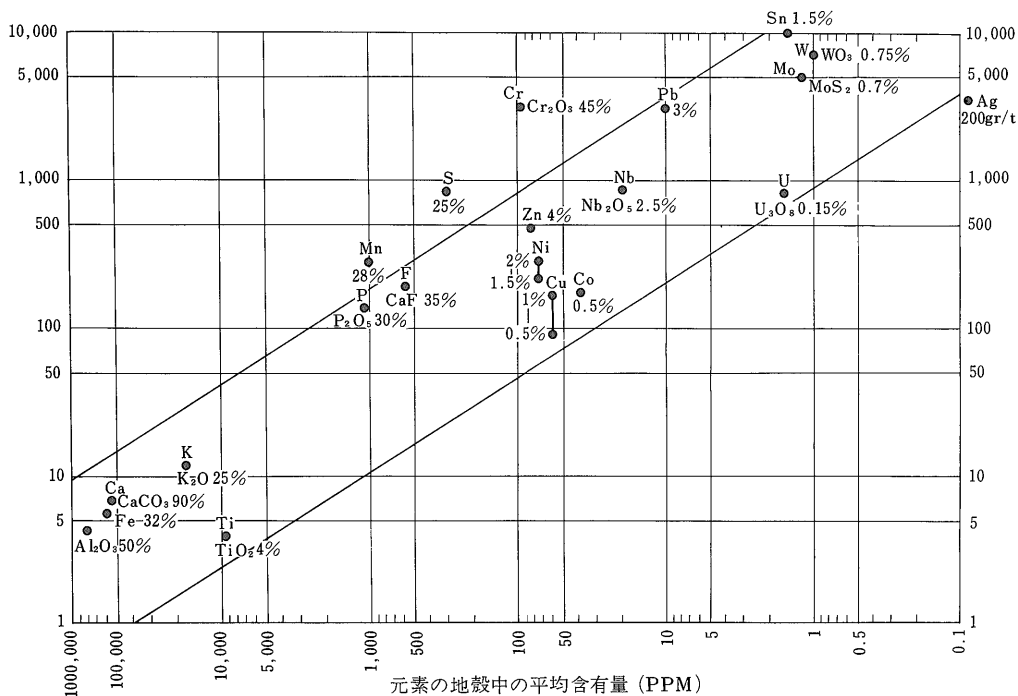
この様にタンタルは 電子工業の部門と宇宙部門に独特の強みを持っている様である。

鉱山生産は 自由世界だけで年約450 t (金属含有量)で 1980~81年は値上りのため需要は少し減ったが 鉱山業者 原料供給者は強気の様に見える。

資源は 花崗岩 特にグライゼン化を受けたあるいは曹長石化を受け 錫石などを産する地帯 ことにその様なところの複雑な Zoned pegmatite が目標になる。タンタライトやユークセナイトなどの鉱物は リシウムやベリリウムや錫などの鉱物のあるところに多い。

現在世界の主なタンタルの鉱山は 西豪の Green Bush 錫鉱山 カナダ マニトバ州の Tanco 同 N. W. 州 Yellow Knife 附近の Thor Lake 等であり 中国の南嶺山地には大きな可能性が有る。日本と交渉のある 江西省宜春 (曹長石化花崗岩) や西独の援助が報ぜられている湖南省のものも この世界最大のタングステン資源を包蔵する南嶺花崗岩最末期の鉱化作用のものであろう。自由世界だけのタンタル金属の鉱量は 21,770 t で 今後新しい需要が増加するとすれば 探鉱開発が急がれるところである。これ等の探鉱には地質的要素 カーボナタイト グライゼン化傾向のある花崗岩 複雑なペグマタイト その残留土や流出した砂鉱等の 地質的・鉱物的特徴のほか 空中あるいは地上の磁探 放射能探査 あるいは リモートセンシング等の利用も考えられる。

この様な鉱物の概略平均価格は



第12図 品位＝地殻中の平均含有率×濃集率のグラフ

	1977-78	1980-81	
コロンバイト	3.18\$	10.00\$ 内外	含有 Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1 ポンド当
バイロクロア	2.50\$	3.00\$	
タンタライト	25\$ 内外	100\$-80\$	含有 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 1 ポンド当 但 Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 60% ベース

タンタライトの値の急上昇のため消費が減って（代替品等により）値段がまた少し下がりはじめた。

### 3 総論

#### (1) 品位考

本論を依頼された時に 鉱山の品位の問題についても書いてくれとの注文があった。ただ幾つかの鉱種の品位の数値を表示するだけでは面白くないので それぞれの鉱種の現在の各国の実績品位の低い部分の平均的数値を使った 筆者独自の品位考を 極めて簡単に紹介する事にした。

鉱山の経営の中では 品位とは 日本式経営特意の QC 即ち品質管理 経営のかなめ 制御に骨の折れる部分 である。探査の場合にしても その仕上げ作業の評価の段階で 品位のコンピューテーションがまたそのかなめであるのは周知の通りである。

鉱床の品位というものは 如何にして自然がそれを作

って そしてそれが鉱山の品位として経済的に合意されきめられるのであろうか。

ごく大ざっぱに考えると 地殻の平均の含有量なり 岩石の中の含有量としてはもともと極めて少ない ある元素がある場所に 様々な地質的 物理的 化学的プロセスによって濃集してその元素に特別に富んだ岩石——経済的に採掘に堪える可能性あれば鉱床——を作る。即ち

$$\text{品位}(\% \text{又は ppm}) \div \text{もとの含有量(ppm)} = \text{濃集率(倍率)}$$

但し式の右端の品位が採掘 精錬 経費等のすべてのコストを支払い得るだけの価値を持っていなければ 経済的な品位とはいえない。またコストが同じであっても その元素（あるいは金属）の価格が上昇すれば 品位を低くしても経済的に成立つ。即ち品位を落すことができる。故にこの経済がきめる人為的な 鉱山の品位は 一定の条件は付いてはいるが価格と逆比例の関係にある。一方価格を決定する大きな因子は勿論需要と供給である。需要は その元素が持っている物理 化学的特性を その時の社会が如何に評価し 欲しいと思うかにかかっている。昔はアルミやチタンは評価しなかったが 今は我々はそれを評価し 欲しいと思うだけの技術と資本を持っている。供給の方は 人間の技術と資

本との及ぶ範囲内で しかも ある場所にその元素がまとまって存在しているのが発見され 人の労力で開発され 運ばれなくてはできない。 価格は需要とは正の関係に 供給とは負の相関関係にあるが 人間の技術 能力 資本等以外に 需要はその元素の物理化学的性質 (例えばよい電導体であるとか錆ないとか) 供給は地質的に 手の届くところに鉱床としてまとまったものが賦存しているかどうか の自然の条件に支配される。

前置はこれ位にして第12図の両対数グラフを見て頂こう。 この図は横軸に色々な元素の地殻中の含有量 (Crustal abundance) を ppm でとり 縦軸にそれらの元素が経済的に採掘出来る品位になる迄濃集するには何倍にしたらよいか その濃集率を取ってある。 尚この品位は前述の様に低い方の部分の平均値を採ってある。 ニッケルと銅については 中と低の両方を鉄亜鉛型に示してある。 元素即ちここでは鉱種は現在の社会生活に重要なものを一応入れてある。 金は地殻中の平均量あまり低く (0.003ppm) 欄外になるので外した。

全体として右上りのゾーンの中に点が納まるが それぞれの点の上に述べた様な品位の数値を普通使う表現で附記してある。 まず左下のはじの5元素はすべて地殻のいわゆる abundant element といわれる多量元素である。 これ等は 所詮何十倍にも濃集する事は有り得ないからこのあたりにかたまるのは当然である。 次に少し右上にゆくと P, F, S の非金属有用元素が集まっているのが目立つ。 地殻中の含有量がこの辺にかたまっているところに 燐鉱石や螢石の濃集度がちょうどこの辺にあってくれたわけであろう。 その次は非鉄金属のグループである。 大体クラーク ナンバーが30—100のあたりで 通常の塩化物錯体を溶媒として運搬され濃集するものはこの辺に集まっているのだろうか。 濃集度が低ければ 現在の需要供給では稼行品位に到達しないから当然亜鉛の足は下に延びない。

鉛だけはクラークナンバーが低い 即ち存在が少ないのに値段が低い (鉛は錆びたり腐ったりしないので何時迄も残る) のでちょっと仲間外れとなった。 最後の一番右上のグループは花崗岩固結末期のいわゆる気化作用やペグマタイト等の一連のステージの鉱化に関係のあるものが集まっている。

結局 このゾーンの右上りの傾斜は これより高い濃集率を持つ確率は低いし このゾーンより低い所は経済的に引き合いはないから鉱床にならない という理由で出来たのであろう。 そうとすればこれを経済的に見ると品位問題として示唆的である。 試みに このゾーン

の下の線に近い元素を見ると Ti, Ni, Cu, Co, U など現代の売れっ子ばかりである。 最近の機械文明に欲しいもの その地殻中の存在量の割には値段の高いものばかりである。 品位が相対的に低い鉱床でも掘れる 掘る必要のあるものなのであろう。

今から30年後に 段々資源が少なくなり 供給が逼迫してきた時に どの元素が下 即ち品位の低い方に向かってどれだけ経済的に引き下げられるであろうか。 それとも代替品に取って替わられるであろうか。 これ等の元素の黒い点を下に押し下げるという事は それ等の元素の鉱量の三角形の底辺を下に押し上げて 三角形の面積を増大する即ち鉱量を増す事である。 そのそれぞれの元素の持っている固有の三角形の頂点の角度が鈍角か鋭角かは それぞれの濃集の物理化学的なメカニズムによるであろう。 鈍角なら少し品位を下げると鉱量が非常に増える。 ここに今後の資源の永続性を解く一つの鍵が有りそうである。 鉱床学とミネラル・エコノミクスを一つの頭で考える事の重要さの一例になるかも知れない。

## (2) 日本の資源問題と鉱床学

筆者は50余年 様々な境遇 地位にあって 探鉱家として常に日本の資源問題とつき合ってきた。 そして今ひとり書齋でこの問題を思うとき 頭の中を去来する事の幾つかを 備忘録の様に書き留めて この小論のむすびとしたいと思う。

第1は鉱床生成の物理的規制についてである。 戦前からの中国や東南アジアの長い探鉱生活のため 筆者は大陸や島弧の大構造が鉱床の分布にどうかかわっているか 今様にいえば テクトニクスと鉱床の生成の關係に興味を持ち それを探鉱の広域選択の指針にして来た。 フィリピンのモビルベルトに斑岩銅鉱床の存在を想像し 実際に現地ゆき 多くの人の批判を浴びながら探鉱を推し進めた事は前にも述べた通りである。 その後その夢はニューギニア ソロモン群島のモビルベルトへと延び その探鉱の一翼を担い始めた頃 プレートテクトニクスの学説を学んだのであった。 西太平洋島弧群でモビルベルトといわれていたところの大部分は弧の衝突の所で それが斑岩銅鉱床の生成に好条件を提供しているのではないかと考える様になった。 地殻の横圧力 水平応力が鉱床の生成にどう関係するかを考え始めた。

地球の大構造が 地球の物理的パラメーター 即ち力や熱によって支配されるなら 鉱床の生成もそれと一緒に支配されるにちがいない。 一方鉱床生成の地化学的支配は 鉱床学の最近の最も大きなテーマであったし



その成果は真に素晴らしいものであった。また今後も素晴らしいであろう。しかしその化学的条件を決定したり支配したりする 鉱床生成の場所でのその時の 物理的条件 (あるいは physical parameter) を解明しておかないと その化学的成果が 実際の鉱床からかけ離れてゆくのではないだろうか。

筆者は探鉱屋仲間には 「物理が鉱床の位置や大きさをきめ 化学が鉱物や鉱床の品位をきめる」という乱暴な言葉を ここ数年来 折にふれて吐いている。勿論自然はそんな簡単なものでない事は承知しているが 一種の刺激剤として用いる事している。過日ペンステート大の H. L. Barnes 教授来日の際 この鉱床の物理規制の意見と共にこの乱暴な標語を述べたら教授は一瞬真剣な顔をして考えた後「百パーセント賛成 これからは物理的パラメーターをはっきり検討してゆかなければ地球化学が進められなくなる」と述べていた。この事は 独学の探鉱屋の筆者にとっては非常に大きなはげましであった。

筆者は物理的規制 (Physical Control) をもっと体系化すると共に 地殻応力の部門の具体的な計測や 鉱床への応用も進め 地化学的な研究や考察と結び付けて 世界の様々の地域の色々な鉱床の成因の解明や 探鉱の成功に役立たせて貰いたいと願っている。ここに大きな研究の余地ありと思っている。

第2の筆者の興味は Stratabound の鉱床から離れる事がない。その一つは 同時堆積性の鉱床その物にあるが もう一つは続成あるいは後成の鉱床でも乾燥堆積環境 即ち蒸発岩とかサブカとかいった層や 礫性石灰質岩層や浅い還元質泥岩の堆積盆とか そういふものとの組合せである。

筆者は曾て各地のレーク・スペリア型の化学沈澱の巨大な縞状鉄鉱層を専門に見て歩く機会を得 またザイール ザンビアの銅鉱層を歴訪したが 同じ同時堆積でも時代による大きな差 生物の鉱床生成とのかかわり合いの多様性に深く印象づけられた。またカッパーベルトの偽層を持った砂岩のその偽層の一層一層に銅分が入っている層を見た後で 南アの金の化石砂金層抗内を見て歩いて 機械的な鉱粒の運搬もまた見落さない様にならなければいけないと感じた。この古い20億年前という砂金層のおどろくべき自然金の富鉱部はしばしばほとんど石墨化した石炭素のうすい層にうまっているのを見て その時の河の底の石英の砂利の上に原始的な藻類が マットの様に生えていたのを 深さ2,000m以上の 暑くしかも狭い坑内を這って歩きながら想像したのを今でもよく憶えている。

あの年輪を思わせる様なミリメートル単位の 全く平行で広くひろがった 堆積層は 完全な化学沈澱のチャート質の鉄鉱層にも またマウント・アイサの黄鉄鉱層や鉛・亜鉛の硫化物の細かな縞状の層を持った有機質泥岩にも ザンビアの黄銅鉱 黄鉄鉱などの縞を持った有機質泥岩にも 同じ様に存在する。続成作用は当然あったとしても 根本は石英や泥質粘土や有機物と同時の化学沈澱を考えざるを得なかった。ところがミシシッピー型の鉱床になると 後の時代に他所から来たものが殆ど全部であろうと考えざるを得ない。前の場所より一層乾燥環境や 頁岩と礫性の石灰岩相との Facies Front という様な様々な特殊環境の組合せを考えなくてはならない。しかも石油と共に動いた鉱液を考え 有機塩類の金属に及ぼす化学的影響等 よくわからないだけに尽きない好奇心がわいてくる。石油の移動と鉱液の移動とはどんな関係にあったのであろうか。石油の移動の機構が石油地質学の方で よく研究されているだけに それに学ぶ所も多いであろう。

火山弧の島国に住む我々にとって この様な古い大陸のペーズンの堆積鉱床は身近とはいえない。しかし日本は所詮これ等の資源を輸入し 製錬し 加工して 輸出する形で 我々の知能を売って生きてゆく国であろう。筆者は日本のジオロジストが一人でも多く そして若いうちに これ等の日本に無い型の鉱床をよく見て好奇心を湧かして 彼等の問題点を本質的に理解して欲しいと思うのである。敵を知り 己を知れば 百戦空しからず とは孫子の言である。

地質調査所は今迄100年の間地質や地下資源の研究に尽力してきた。これから次の世紀に向って踏み出すにあたって以上述べた点をふまえて 世界の地質調査所として グローバルな観点に立ち 活発な基礎的研究によって資源開発に大きく貢献されん事を期待するものである。

この小論には多くの人の意見を引用したが 文献は終りに付ける暇も無く 省略した。何かの機会に補遺させて頂きたい。

地質調査所の百周年記念は 又筆者にとっては 若き頃神岡鉱山で 円山鉱床を発見した時から ちょうど50周年になる。長い探鉱生活の一つの区切りにと 予定よりやや長くなったが 近來の考えの幾つかを述べた。この機会を与えられた事を感謝する次第である。