

21世紀の鉱物資源問題

佐藤 壮郎¹⁾

1. はじめに

ほぼ1世紀前、アメリカのワシントンDCで第5回IGCが開かれた。1891年には世界はまだ小さかった。生活のペースは遅く、変化の訪れは緩かだった。98年後、同じ場所で開かれた第28回IGCには6000人の地質学者が登録したが、当時の参加者は2~300人足らずで、恐らく皆旧知の間柄だったろう。

過去1世紀の間に世界と私たちの生活はあまりにも大きく変わり、第5回IGCで議論された問題は現在の問題とずいぶん違っていたのではないかと、だれもが想像するのではなからうか。ところが事実は違うのである。19世紀末の地質学者は、自動車、飛行機、プラスチック、家庭電化製品、その他諸々の資源消費型の工業製品はまだ知られていなかったのにもかかわらず、重要な鉱物資源の量についてすでに心配を抱いていた。石炭と鉄はとくに関心の的となった。既知の鉱床は大きかったが、採掘量もまた膨大だった。第5回IGCから10年足らず後には、資源枯渇問題は各国国内で、あるいは国際的な場で政治問題となっていた。ホワイトハウスで行われた会議で、アンドリュー・カーネギーはこう述べている。「私はわが国の鉄資源が徐々に枯渇していることにずっと心を痛めてきた。かつては豊富にあると思われていた高品位鉱が次の世代の間に底を突き、今世紀後半には低品位鉱しか残らないことを知らされるのは皆さんにとってあまり嬉しいことではないだろう。しかし、わが国の繁栄の基礎となっている原料問題を長年扱ってきた実務家として、今や明日の心配をすべき時に来ていると私は判断する。」

以上はブライアン・スキナーがEpisodes誌に発表した論文「21世紀の資源：供給は需要に応えることができるか?」(Skinner, 1989)の冒頭の部分である。スキナーが指摘しているように、資源が枯渇するかもしれないということはこの数十年の間繰り返し専門家によって警告されてきた。それにもかかわらず私たちは(少なくとも先

進国に住む私たちは)豊かな物質生活を楽しんでいる。そして現在の心ある人の悩みは資源の枯渇ではなく、むしろ資源の浪費による地球環境の悪化と、益々広がりつつある先進国と開発途上国の間の生活レベルの格差である。

小論では前掲のスキナーの論文を参考にしつつ、来るべき21世紀の非燃料鉱物資源問題に対する筆者の考えを述べてみたいと思う。

2. 資源はなぜ枯渇しなかったか

現在人類はいろいろな形で、周期率表にあるほとんどの元素を利用している。その量も膨大で、世界中の人間一人一人が1年間に10トンの鉱物資源(エネルギー-鉱物資源を含む)を消費している計算になる。先進国における消費量はもっと大きく、第1表に示すように世界平均の2倍近い。スキナーは前掲の論文で、世界中で1年間に

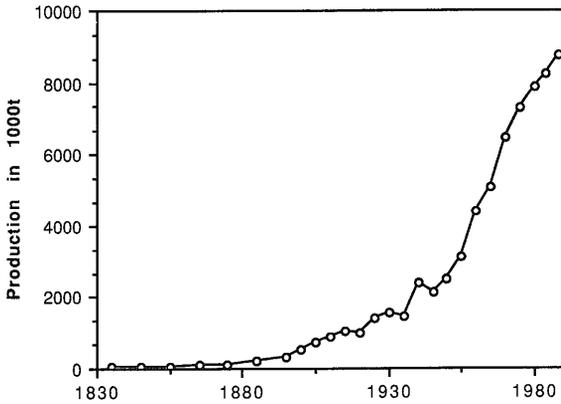
第1表 日本およびアメリカ国民一人当たりの1987年の鉱産資源の消費量 (Skinner(1989)および資源エネルギー庁資料による)

	日本	アメリカ
石材	5160kg	4900kg
砂利	2700	3770
セメント	653	383
鉄および鉄鋼	2260	562
アルミニウム	18	22
銅	12	9
鉛	2	5
亜鉛	6	6
石油	2430	3100
石炭	884	2600
天然ガス	416	1950

1) 地質調査所 次長

キーワード：鉱物資源，エネルギーコスト，付加価値，生産コスト，資源の略奪，開発途上国

Copper production



第1図 1835--1988年間の世界の銅生産量の変化 (Mining Annual Review (1985) および資源エネルギー庁資料から作成)。

消費される鉱物資源の総量(約500億トン)は世界中の河川が1年間に海に運ぶ堆積物の量(165億トン)の3倍にもなることを指摘して、人間の活動は第1級の地質営力になったと述べている。

1891年には年間一人当たりの鉱物資源の消費量は2トン程度であったと推定されているから、この1世紀の間に5倍の増加があったことになる。非鉄金属だけに限ると増加率は更に著しい。第1図には世界の銅の生産量の変化を示してあるが、この図のような幾何級数的な生産量(=消費量)の急激な増加は、亜鉛や鉛のような他の金属資源の場合でも同様である。

このような傾向を見ると、だれもが資源の枯渇を心配するであろう。実際、冒頭にも述べたように、資源が直ぐにも枯渇するという警告がこの数十年の間に何回も出されてきた。しかし実際は採掘された鉱石量以上の鉱量が常に発見されて、警告は空振りに終わった。

この“歴史的事実”は私たちが安心させる。しかし楽観的になる前にもうちょっとこの1世紀の変化を分析してみよう。第2図は第1図と同じ期間の銅鉱石の品位の変化である。銅品位の急激な下降は、銅の生産量の増大が、より品位の低い鉱石を掘ることによって実現されてきたことを物語っている。ふつう低品位鉱など条件の悪い鉱石を採掘し金属を回収する場合にはコストの上昇を招くものであるが、この間の非鉄金属の価格の変化を実質価格で見ると、横ばいかむしろ下がり気味である(第3図)。このからくりのたねは何だろうか。

結論的にいえば、コストの上昇が押さえられたのは、豊富な石油による安価なエネルギーの供給があったのと、露天掘採掘法や選鉱・精錬などの鉱石処理法に目覚

ましい技術進歩があったからである。

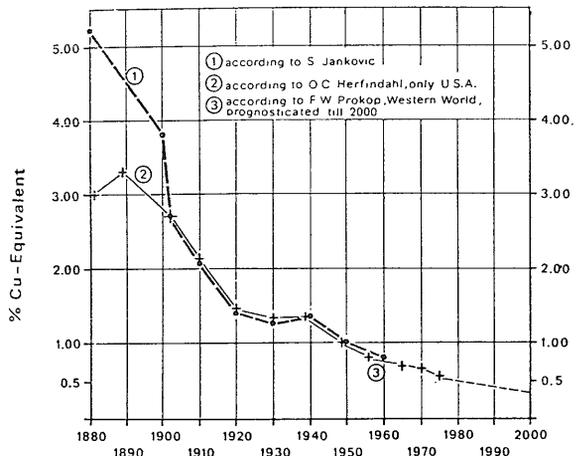
ある経済学者は「地球は鉱物でできているから、鉱物資源が枯渇することは有り得ない」といったそうだが、これはある意味では真実である。例えば陸地部分の深度2 kmまでの地殻中だけで 49×10^{12} トンの銅が含まれている。これは現在の消費量の460万年分である。現在の技術でもコストを無視すれば普通の岩石から銅を抽出することができるだろう。しかし資源はその定義から経済性があることが必要であり、高々数10 ppmの銅を含有するだけの普通の岩石が、予見し得る未来において銅の資源になることは有り得ないだろう。

より低品位の鉱石を採掘することによって生産量を伸ばしてきた過去の歴史を安易に未来に外挿することは、この経済学者と同じ誤りをおかすことになる。次章では、低品位化が進むであろう将来の鉱物資源を考える上で、最も大切な要素であるエネルギーとの関係について論じてみたいと思う。

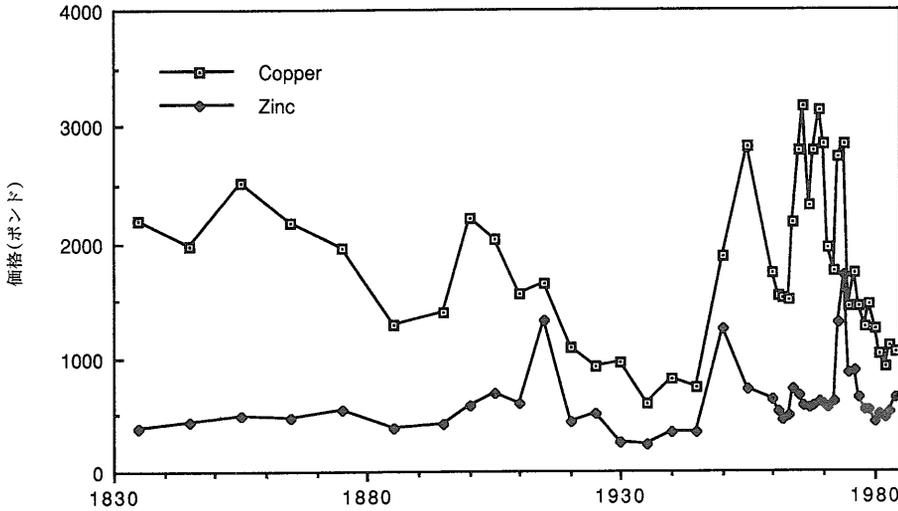
3. 鉱物資源とエネルギー

鉱石を採掘してからいろいろな過程を経て金属を回収するまでのコストには、いろいろな要素が含まれる。また、トータルコストの中での各要素の割合は、鉱種によって(より正確にいえばそれぞれの鉱床ごとの金属の品位と存在状態によって)異なっている。第4図～第6図には銅・金・アルミニウムについてコストの内訳を示してある。

これらの図を国別に対比してもいろいろと面白いことが読み取れる。例えば銅では、カナダが選鉱費・精錬費



第2図 1880—1975年間の銅鉱石の品位変化 (Routhier, 1980)。



第3図
1935—1984年間の銅
価格と亜鉛価格の変化
(1984年の貨幣価値に
換算してある.Mining
Annual Review (19
85)のデータから作成)

共に高いのは、複雑硫化鉱を処理している
鉱山が多いからである。しかしそのコスト
高は副産物の利益によって相殺されてい
る。オーストラリアは、採掘費と選鉱費が
各国中最低である。これは同国で最大の銅
鉱山であるマウントアイサ銅鉱山が高品位
(3.5%Cu)であり、かつ効率の良い新鉱山
であることを反映している。

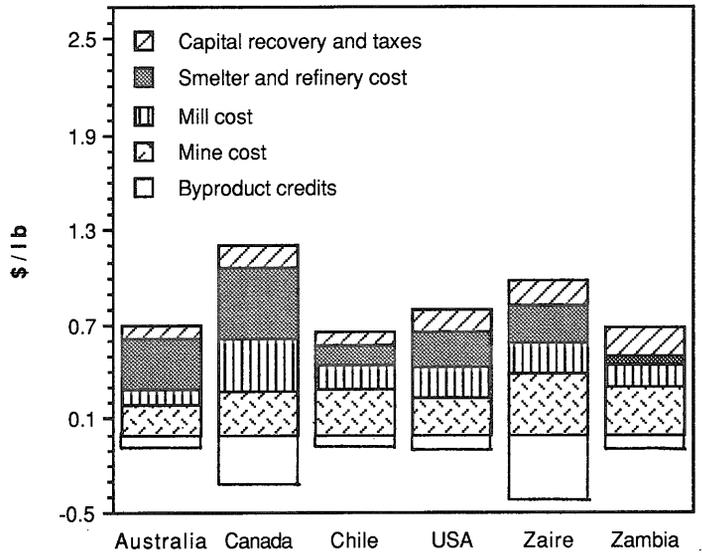
金では、南アの坑内掘鉱山のコストが圧
倒的に低いのは、品位が高い(平均7.7g/t)
のと安い労働力のためである。アメリカで
は低品位鉱山が多い(平均2.0g/t)ため、選
鉱(破碎)費が高くなっている。

一方、鉱種別のコストの内訳は、本章の
主題を考える上で大切な事実を示唆してい
る。すなわち、わずかに数ppmの含有量しか
ない鉱石を採掘している金の場合は、将来
低品位化が極端に進んだときの銅のコスト
を暗示している。精錬費に比べて選鉱費と
採掘費の割合が非常に大きくなっているこ
とに注意してほしい。一方、アルミニウムは銅の代替と
してアルミニウムを使用した場合、あるいはもっと一般
的に、硫化鉱物の代わりに酸化鉱物や珪酸塩鉱物から金
属を抽出する場合のコストを示している。この場合は精
錬費が極端に高くなる。

これらのコストはエネルギー費と人件費からなるが、
その大半はエネルギー費が占める。そこでエネルギーに
焦点を絞って、代替と低品位化の問題をもう少し分析し
てみよう。

いま、1トンの金属を生産するための全エネルギーを

Copper production costs



第4図 銅1ポンド当りの生産コストの内訳 (USBM (1987) のデータから作成)

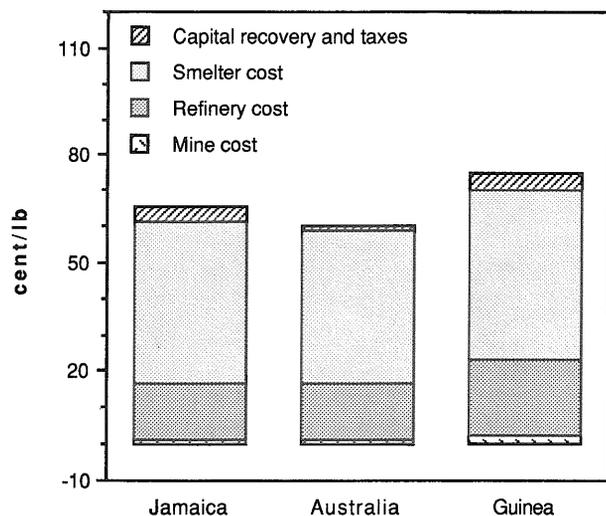
E_T とし、1トンの鉱石を採掘し選鉱するエネルギーを
 E_m 、精鉱から1トンの金属を精錬・精製するのに要す
るエネルギーを E_s 、鉱石の品位を g とすると次の式が
成り立つ。

$$E_T = (E_m / g) + E_s$$

ここで E_m と E_s は採掘法(坑内掘か露天掘か)を規定す
れば、大雑把にはそれぞれの金属について定数と見なす
ことができる。第2表には、幾つかの金属について E_m
と E_s を示してある。

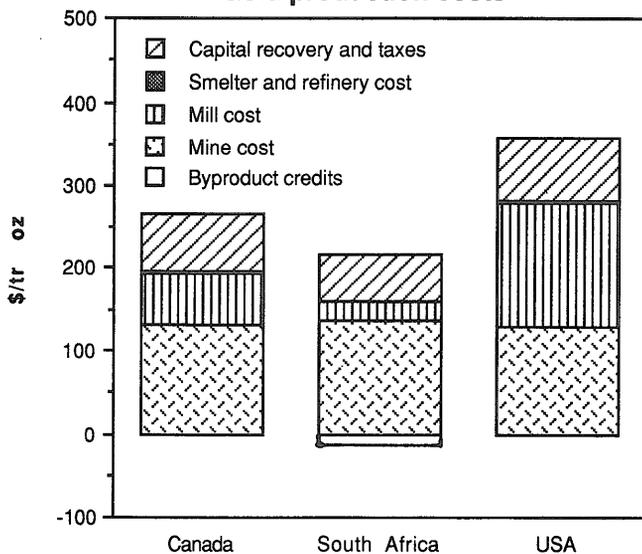
第7図と第8図は、これらの数値を基に品位の低下と

Aluminum production costs



第5図 アルミニウム1ポンド当りの生産コストの内訳 (USBM (1987) のデータから作成)。

Gold production costs



第6図 金1オンス当りの生産コストの内訳 (USBM (1987) のデータから作成)。

ともに必要エネルギーがどの様に増加するかを示した。銅の場合には、鉱石品位が下がるにつれて徐々に上昇しているエネルギー量が、品位0.3%を切るあたりから急激に上昇していることが分かるであろう。

銅とアルミニウムの必要エネルギーを比較してみると、0.1%の銅鉱石から銅を回収するエネルギーはボーキサイトからアルミニウムを回収するエネルギーとほぼ

同じになる。さらに0.07%まで品位が下がると、その必要エネルギーは、膨大な資源量をもつ粘土やアノソサイトからアルミニウムを回収するエネルギーに等しくなる。このような低品位鉱石を掘らなければならない時代には、銅の需要の大部分はアルミニウムに代替され、どうしても代替のきかない用途にだけ高価格の銅が使用されることになるであろう。

スキナーは、有名な「A second iron age ahead?」と題した論文で、資源としてみた場合、銅・鉛・亜鉛のような地球化学的に乏しい金属には鉱物学的障壁があることを指摘した (Skinner, 1976)。すなわち、現在採掘されている鉱石中では、これらの金属は主成分として硫化鉱物中に濃集している。一方、普通の岩石中では、これらの金属は珪酸塩鉱物の主成分元素を置換して、造岩鉱物中にわずかずつ捉えられている。したがって、鉱石品位がどんどん下がりある限度を越すと、目的とする金属の鉱物学的存在状態が大きく変化することになる。この限度が鉱物学的障壁であり、金・ウラン等のわずかの例外を除いて0.01—0.1%程度のところにあるとされている。

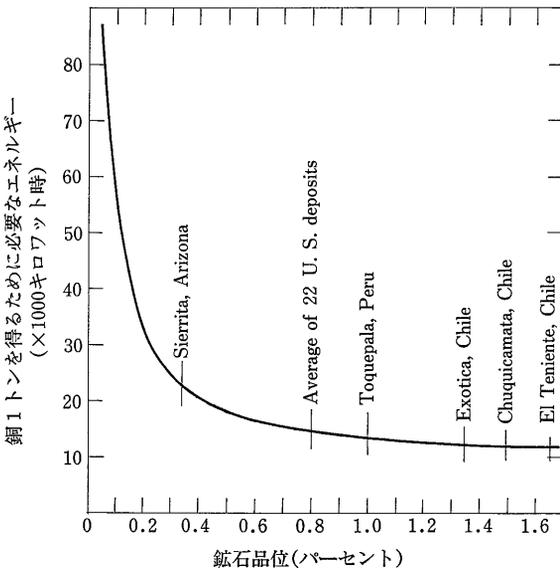
これがなぜ障壁なのか。まず第一に、有用金属は多量にある造岩鉱物中に分散して存在するため、選鉱によって大きく品位を上げることができない。例えば、全体として10 ppmの鉛を含む岩石の中で、鉛の大部分が長石に含有されているとしよう。仮にこの岩石中の長石の量が10%だとすると、選鉱で長石だけを取り出してもその鉛含有量はたった100 ppmでしかない。第二に、主として珪酸塩鉱物である造岩鉱物の結晶を化学的に壊して、わずかしこ含まれていない有用金属を他の元素から分離・回収するには、莫大なエネルギーを必要とする。したがって、この品位の限界は、主としてエネルギーコストの面から、資源供給の大きな障壁となる。

以上をまとめると、21世紀の鉱物資源の姿として、次のような予想が可能であろう。

まず暫くは鉱石の採掘品位は徐々に下がるが、供給は十分に行われる。コストの上昇があるかもしれないが、適切な技術進歩があれば十分吸収できる程度であろう。鉱石品位が第7図の曲線の立ち上がり部分(銅では0.3%)まで下がると、エネルギーコストの増大のために価格の上昇が始まり、鉄・アルミニウム・チタン・セラミックス等の地球化学的に豊富な資源による代替化が促進され

第2表 いくつかの金属に対する E_s および E_m (Page and Creasey, 1975)

金属種, 鉱床の種類および品位	エネルギー定数	
	E_s (キロワット時 /金属1トン)	E_m (キロワット時 /鉱石1トン)
アルミニウム:		
ボーキサイト, 50% Al_2O_3 , -----	38,774	5,302.5
粘土, 採掘法はボーキサイトと同じ, -----	38,500	9,216.6
30% Al_2O_3		
アノソサイト, 採掘法はポーフィリー銅 -----	38,500	11,455.6
鉱床と同じ, 30% Al_2O_3 .		
鉄:		
高品位赤鉄鉱, 58.5% Fe, -----	4,209	38,685
磁性タコナイト, 32.5% Fe, -----	4,209	145,275
非磁性タコナイト, 28% Fe, -----	4,209	297,97
鉄ラテライト, -----	4,209	988.8
銅: 露天掘, 1% Cu, -----	8,715	47,979
チタン: 海浜砂中のイルメナイト, 1.4% TiO_2 , -	148,357.5	65,765



第7図 銅1トンを生産するために必要なエネルギーと鉱石品位との関係 (Page and Creasey, 1975).

る。同時に、エネルギーコストと環境保護の圧力がインセンティブとなり、地表下数 km の深部高品位鉱床の探鉱・開発が進むのではなからうか。

環境破壊防止の面から考えると、地表近くの低品位鉱の大規模開発より深部高品位鉱の開発のほうがはるかに望ましい。現在でも南アの金山などでは、3000m以上の深い坑内で採掘が行われており、採掘技術上の問題はない。将来、代替が不可能な鉱種あるいは用途について、深部鉱床が供給源となるかどうかは、探査技術の進歩に掛かっているといえる。スキナーはこの点について、超深層ボーリングなどによって深部地質情報が豊富

な北米やヨーロッパが、再び主要な鉱産地帯になると予測している (Skinner, 1989)。

多くの専門家は、上述のように低品位化と深部化に加えて希少資源の代替が順調に進めば、21世紀中に鉱物資源が物理的に枯渇することはないと予測している。しかし物理的な枯渇がないことと、社会・経済的な混乱なしに資源の供給が順調に行われることは別問題である。

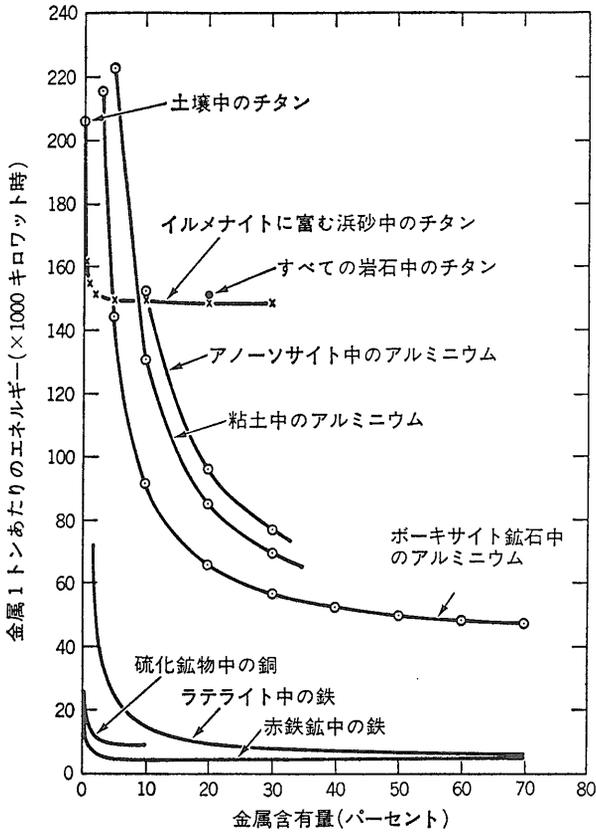
鉱物供給の阻害要因の一つは上に詳しく述べたようにエネルギーであり、安価で豊富なエネルギーの供給がなければ金属価格の大幅な上昇は避けられないであろう。環境問題についても、鉱物資源開発そのものの影響は（とくに深部鉱床の開発が進めば）マイナーであり、環境保護のためにエネルギーコストが上昇することのほうが問題となろう。

もう一つの、恐らく今後20~30年の近未来に、エネルギーよりもっと深刻な問題になると思われるのは、資源保有国が多い第三世界との共存の問題である。このことについては次章で詳しく述べることにする。

4. 鉱物資源と第三世界

15世紀末から16世紀初めにかけて、バスコ・ダ・ガマによる希望峰回りのアジア航路の開拓、コロンブスやアメリカ・ヴェスプッチなどによる南北アメリカ大陸の発見などが相次いだ。いわゆる植民地時代の始まりである。植民地時代とはいってもなく、当時の先進国であったヨーロッパ諸国によるラテン・アメリカ、アフリカ、アジアなどに対する資源の略奪の時代である。中でも中南米諸国の金・銀などの貴金属資源は、莫大な富をヨーロッパにもたらした。

マヤやアステカからの財宝の略奪に始まり、1545年の



第8図 ささまざまな金属1トンを生産するために必要なエネルギーと鉱石品位との関係 (Cloud, 1978: 原図は Page and Creasey (1975)).

ポトシ銀山の発見、引き続きメキシコでのサカテカスやグアナファート鉱山の開発は、1503—1660年の間に公式資料に記録されているだけでも185トンの金と16,000トンの銀をスペインにもたらした(ガレアーノ, 1986)。しかもこれらの鉱山における鉱石の採掘は、原住民の奴隷的な強制労働によって行われていた。そのため、ポトシ鉱山ではその3世紀の歴史の中で800万人ものインディオ鉱夫の死者を出したという(同上)。

このようにして新世界からヨーロッパに運び込まれた金・銀は莫大な量におよび、1520年から1世紀間でヨーロッパの銀の流通量は5倍になったといわれている。この富の蓄積を背景に、イギリス、ネーデルランドなどの当時の新興国を中心に資本主義が育っていったのである。

第二次大戦を機に、植民地の多くは独立を勝ち取った。しかしながら経済的には依然として旧宗主国へ従属せざるを得ず、欧米大資本による経済的支配が続いた。例えば銅の場合、チリは産銅量の90%、ペルーは50%以

上、ザンビアは96%、ザイールは100%がケネコット、アナコンダなどの産銅十大資本によってにぎられていた(資源エネルギー庁, 1983)。

しかしながら、1962年の第17回国連総会における「天然資源の恒久主権の確立宣言」を契機に資源ナショナリズムが台頭し、上記産銅国において鉱山の国有化が進んだ。さらに、銅、水銀、ボーキサイト、鉄などに関する生産国連合が相次いで結成され、先進消費国に対抗する手段が整えられた。

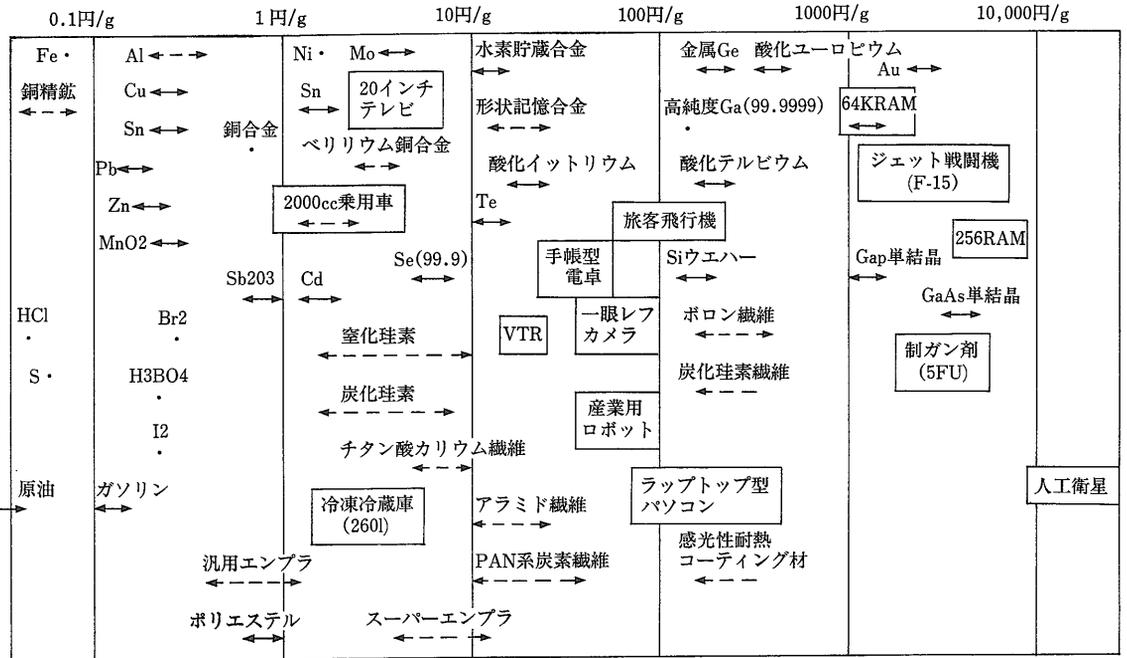
このような歴史を見ると、資源の略奪に痛め続けられてきた第三世界の国々も、少なくとも形式的には、その資源を自国の発展のために自由に使える状況になったように見える。しかし、それなら何故ザンビアやザイールは世界の最貧国から抜け出せないのか。チリやペルーが経済的に行きづまるのか、金属価格の低迷やこれらの国の政治的不安定さも理由の一つかもしれない。しかしもっと根本的な、世界の経済体制にビルトインされている原因があるように思える。

木材や農水産資源のような他の一次産品とは異なり、金属資源は最終製品になるまでに非常に高い付加価値が付け加えられる。第9図には、各種原材料とその種々の製品の1g当りの価格を示してある。図の右側にいくほど付加価値が高い製品が並んでおり、人工衛星に至っては原材料の数万倍の価値が付加されている。

いま試みに、これらの製品を主要生産物とする国々の名前を横軸にいれてみると、その順序は各国の経済的豊かさ、あるいは先進度に一致することに気付かれるであろう。このことは、植民地主義的な資源の略奪はなくなったにしても、資源が本来持っている潜在的な価値の奪取という形で、現在でも第三世界からの富の略奪が続いていることを意味しているのではなかろうか。この世界的な経済構図が変わらない限り、途上国は何時までも途上国であり続け、先進国との距離は縮まらないであろう。

鉱物資源の多くは途上国に偏在している。前章で述べたように、物理的な枯渇の心配は当分の間ないにしても、貧困を原因とするこれらの国々の政治不安が鉱物資源の供給不足をもたらす恐れがある。さらに、貧困は人口爆発を生み、環境破壊と食糧不足を加速させる。

資源はその定義上、潜在的に付加価値を有するものであり、資源消費先進国はこのことを改めて思い起こす必要がある。21世紀の早い時期までに、第三世界との間で、資源の潜在的価値を含めた利益の適正な配分に成功しないと、世界は破滅的な状況に陥る心配がある。



第9図 各種原材料と製品の1g当りの価格(主として興銀資料による)。

4. おわりに

小論ではまず、安価で豊富なエネルギーの供給さえあれば、21世紀中には人類の文明に脅威を与えるような鉱物資源の枯渇は物理的には起こらないと予測した。さらに近未来のより重要な問題は、第三世界と先進工業国との間での真の意味での適正な利益配分であることも指摘した。

前者は科学技術上の、後者は政治経済上の、いずれも第一級の困難な問題である。もちろん筆者に解決策があるわけではないが、国家間の相互依存が強まり、一地域の出来事がすぐさま世界全体に影響を与えるようになったこれからの地球において、先進工業国だけが特等席に座り続けることはもはや不可能であることを強く認識しておく必要がある。

鉱物資源の供給を途絶えさせぬためには、今後ますます多くの新たな鉱床を発見して、人類の財産目録の残高を増やす必要があることはもちろんである。しかし同時に、鉱山開発—原料生産—加工—製品—消費—廃棄というプロセス全体が地球とその住人に及ぼす影響を見極める視点も、これからの資源関係者に求められるのではなからうか。

文献

Cloud, P. (1978): *Cosmos, Earth and Man*. Yale University Press, London, 372 p.

ガレアーノ, エドゥアルド (1986): *ラテンアメリカ500年—収奪された大地*. 評論社, 494 p.

Mining Annual Review (1985): *Metals output and prices—A historical review*. London Mining Journal Books Ltd., London, p. 22-25.

Page, N. J. and Creasey, S. C. (1975): *Ore grade, metal production, and energy*. Jour. Research U.S. Geol. Survey, p. 9-13.

資源エネルギー庁 (1983): '83資源エネルギー年鑑. 通産資料調査会, 956 p.

Skinner, B. J. (1976): *A second iron age ahead?*. American Scientist, **64**, p. 258-269.

Skinner, B. J. (1989): *Resources in the 21st century: Can supplies meet needs?*. Episodes, **12**, p. 267-275

Routhier, P. (1980): *Où sont les métaux pour l'avenir?*. BRGM Mémoire, no. 105, 409 p.

SATO Takeo (1992): *Mineral resource problems in the 21st century*.

<受付: 1991年10月8日>