

21世紀, 資源枯渇の世紀に向けて —生活の維持と資源—

中 嶋 輝 允¹⁾

1. はじめに

現代の私達の生活は, 資源の多量消費の上に成り立っている. 過去の資源の消費に較べるとその消費は飛躍的に増大している. アジアを中心にかつての発展途上国は急速な経済発展を遂げつつあり, 資源の多量消費はもはや日本や欧米など, 先進国に限られた問題ではなくなった. 経済の発展を望む国であるならばどの国においても資源を多量に消費する方向に向かっている. 21世紀には世界人口の一層の増加が見込まれることを考えると, 我々は「資源枯渇の世紀」に向かってまさに一歩を踏み出そうとしているようにみえる.

日本は産業の活動や我々自身の生活を維持するため多くの資源を海外に依存している. 1973年の石油危機を除くと, 70年代から90年代にかけての30年間, 資源の供給は大きな支障もなく順調に行われてきた. しかしより長いスパンで見た場合, 資源の供給には大きな障害の時期があった. 21世紀に向けて資源の安定的な供給と生活を維持しようとするならば, 我々は過去の供給障害に学び, 資源の消費と生産の将来を見通したうえで, 十分な対策を用意する必要がある.

ここでは, 我々の生活における資源の利用と消費についてその実状を概観するとともに, 生活維持のために21世紀に向けて日本がとるべき資源安定供給の方策について考えて見よう. また, この問題に対して地質調査所はどのような役割を果たし得るのか, 資源情報の集約と資源研究の2面から将来の方向を探ってみる.

2. 資源の利用と消費

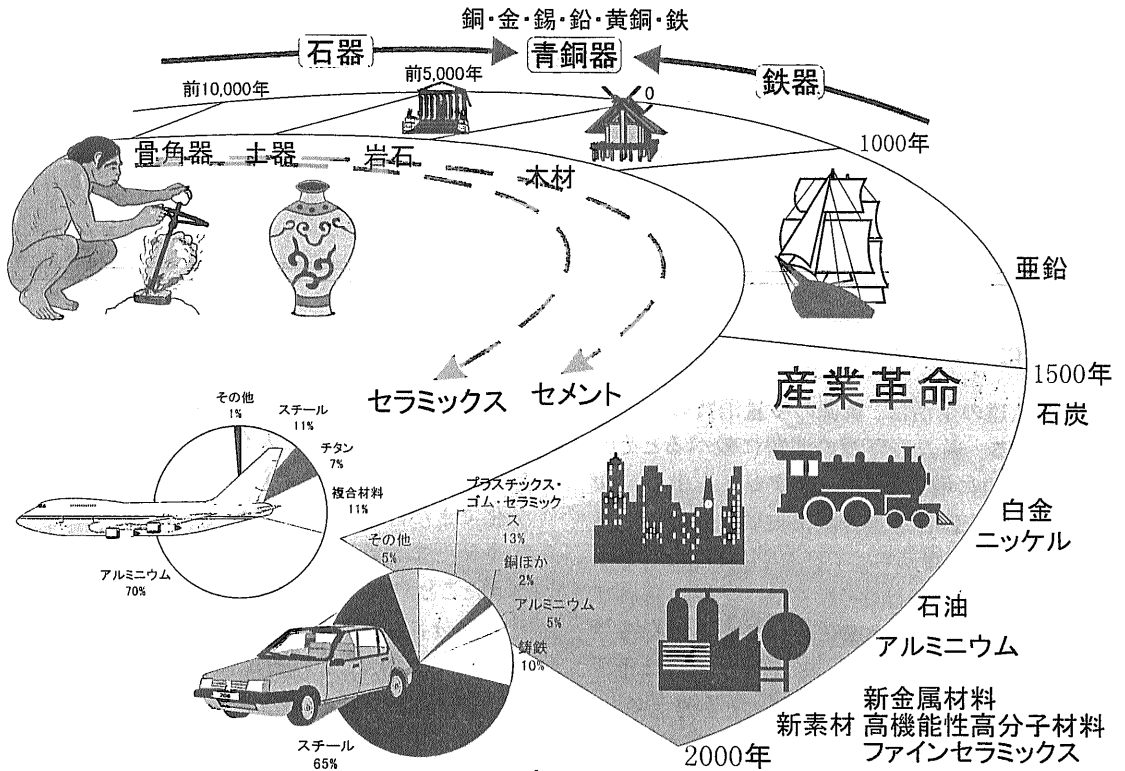
まず最初に, 我々は資源をどのように利用してきたのか, 資源利用の歴史を振り返って見よう. 人類が猿の仲間から分かれてヒトという新しい種に分化した背景には, 2足歩行によって解放された手を使っていろいろの道具を作り, 生活に利用してきたことがある. 人類史が石器, 青銅器, 鉄器時代と区分されるように, 人類の使ってきた道具とその素材は時間とともに進化し, 多様化してきた. 素材, すなわち資源利用の移り変わりは人類の進化を計る尺度なのである.

約6000年前に銅が発見されると, それまでの石器に代わって粘りと強度を兼ね備えた金属が使われ出す. はじめは銅, あるいは銅と錫の合金である青銅が利用され, 紀元前2000年頃からは鉄が使われる時代になった(第1図). 鉄はその後, 農具や武器を中心に利用がひろがり, 産業革命以後は種々の機械を作るための素材として欠かせぬものとなった. 現在の世界の消費量は年間約10億トン, 金属消費の9割以上が鉄である. したがって, 今なお鉄器時代にあるとも言える.

金属の中では, 金, 銀, 鉛, 錫, 水銀, 黄銅(銅と亜鉛の合金)は利用の歴史が古く, 数千年にわたって使われている. 余談となるが, ヨーロッパには古来金の産出が余りなく, ローマ時代には黄銅が金の代わりに貨幣として使われていた. また, 青銅や黄銅等の合金は, 当初は自然の状態で銅と錫や亜鉛が混じって産していたものを知らずに混和, 溶融して作られ, 2種の金属の混じったもの

1) 地質調査所 資源エネルギー地質部

キーワード: 金属資源, 非金属資源, 工業原料資源, 銅, 亜鉛, 資源利用, 地金価格, 需給, 鉱山, 消費量, 自給率, 資源探査の段階, 金属濃縮度



第1図 資源利用の歴史.

であることが分かったのは後のことである。こうした歴史の古い金属に対してニッケル、白金、アルミニウム、レアメタル等は18世紀(産業革命)以降に発見され、近年になって利用されるようになった金属である。

非金属については、石器時代の石器の原料としての岩石、鉱物の利用に始まり、土器や陶磁器そして現代のセラミックスの原料としての粘土の利用が挙げられる。建材としての石材、骨材の利用は、ほぼ全歴史時代を通じて行われている。セメント原料としての石灰石等の利用は現代に至ってからである。

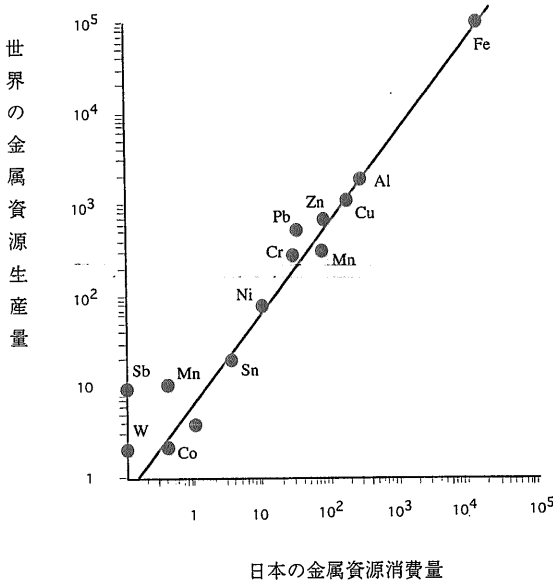
20世紀になると、石油、石炭を原料とするプラスチック等の化学製品の素材が加り、金属ではステンレスを含む特殊鋼や磁性体が新しい素材として使われるようになった。さらに、現在ではこうした在来型の素材にはない特性を持つ新しい素材、例えば新金属材料、高機能性高分子材料、ファインセラミックス等が人工的に作られ、新素材として利用されている。

現代の資源の使われ方は様々であるが、例えば、

自動車と航空機の代表的なものについて見ると、自動車の素材はスチール、鋳鉄合わせて75%、アルミニウムが5%、銅他が2%、プラスチック等の有機系素材が13%である。航空機では、アルミニウムが70%、スチールが11%、チタンが7%、有機系素材の複合素材が11%となっている。現代社会は様々な鉱物資源を多様に利用しているのである。

次に、日本あるいは世界が現在どのくらい資源を消費しているか、銅を例として見てみよう。世界では年間約1,100万トンの銅が消費されているが、そのうち1位の消費は米国で270万トン、日本が2位で140万トン、次いでドイツの100万トンである(1994年)。一方、同年の生産は、チリが1位で年間220万トン、米国が2位の180万トン、3位カナダの60万トンである。消費第1位の米国は自国の消費の67%を自給できるのに対して、日本は生産第1位のチリの銅生産の64%に当たる量を海外に依存しているのが現状である(第5図)。

銅以外の金属も似たような状況にある。第2図は、種々の金属について世界の金属資源生産量と



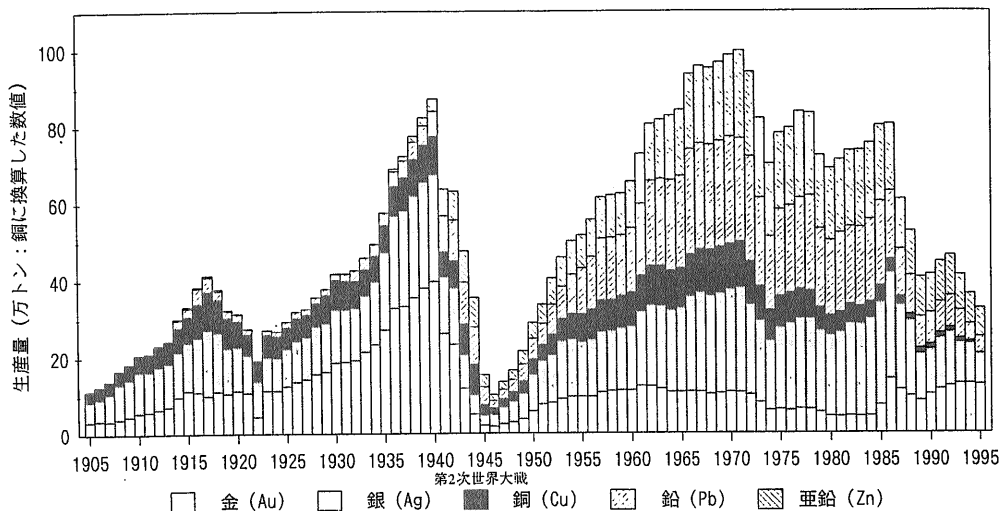
第2図 日本の金属資源消費(単位:×10,000トン).
記号のない点はその他の金属の合計.

日本の年間消費量の関係を示している。グラフ上の各金属についての点は直線上にほぼ乗る。つまり、日本は、鉄、アルミニウム、銅等いずれの金属も世界の生産量の中から一定の割合で消費している。このような金属の消費の仕方は米国等も同じであり、産業がある程度の成熟段階に達した国家ではこのような金属消費の規則性を持っている。日本の場合、金属資源は世界の資源生産量の約14%を消費していることになり、自国に資源がある

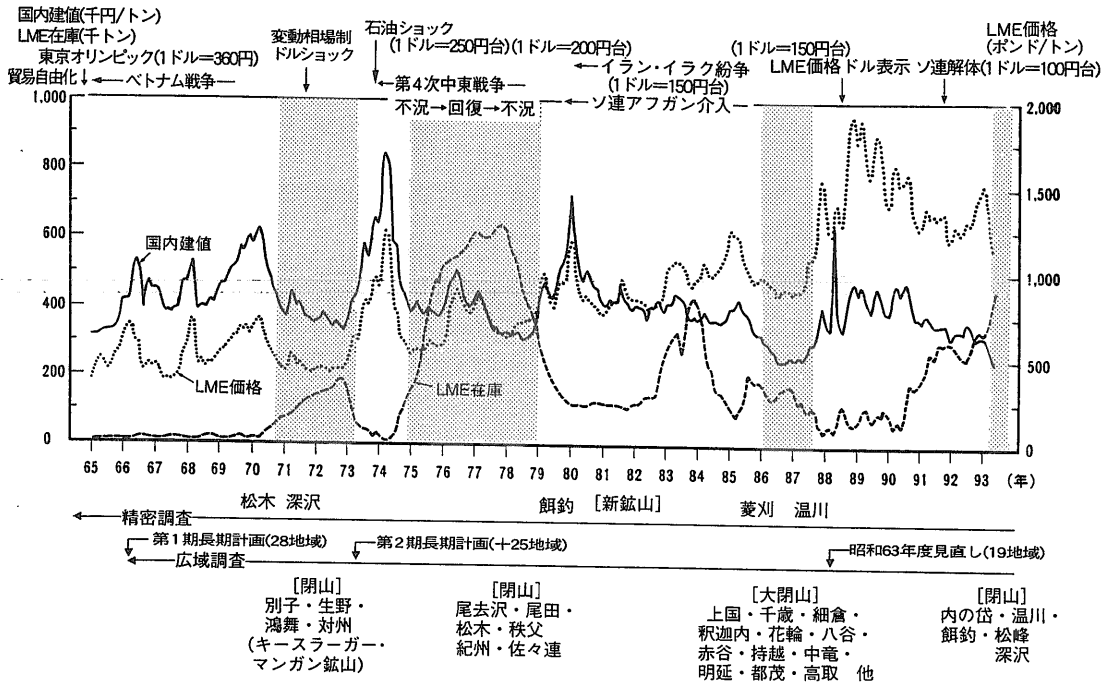
かないかを問わず、我々日本人は現在の生活を維持するために地球上の資源の中からこれだけの金属が必要なのだと理解すればよい。

3. 生活維持のための安定供給

資源の供給について、それが過去にどのように供給されてきたのか、安定的であったのか、不安定な時期があったのか見てみよう。第3図は、第2次世界大戦の前から、戦後を通じての日本の銅、鉛、亜鉛等の金属の生産統計である。戦前から戦後まもなくの頃は国内生産は、消費量に占める割合が高かったため、消費の動向もそれなりに分かる。ちなみに、1960-1970年代は鉛・亜鉛で50%の自給率、それ以前ではさらに高い割合となる。第2次世界大戦前には、2つのピークがあるが、これは第1次、第2次世界大戦に対応するもの。特に第2次世界大戦では、その直前に連合国の日本に対する経済封鎖があり、海外からの資源の輸入が途絶えた。このため国内資源の増産を急速に行った結果がこのピークである。しかし、これが生産の限界で、その後資源の大欠乏の時がくるのは明白であった。こうした資源の供給危機は戦争に至る発端ともなった。しかし、戦争による疲弊もあって、鉱物資源生産はたちまち激減し、遂に敗戦に至ったわけである。この図の示す戦前、戦中の資源の供給障害は、日本がなぜかくも大きな戦争に突入し、敗退し



第3図 日本の金属生産の推移。銅に換算した生産量:各金属生産量をそれぞれの金属の地殻存在度で割った値を加算し、その合計に銅の地殻存在度を掛けたもの。



第4図 銅地金価格・LME在庫の推移と国内非鉄金属鉱業。(LME：London Metal Exchange, ロンドン金属取引所)

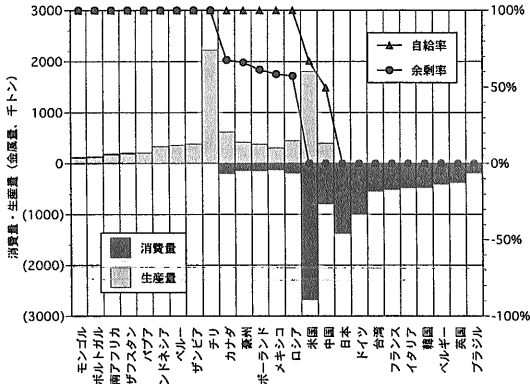
たか示していると言える。資源の安定供給は国の重要課題であって、戦争という事態にならないためにも万全を期す必要がある。

第2次世界大戦後、特に日本の経済復興後の資源供給の詳しい推移は、例えば銅の価格変動によって知ることができる(第4図)。このグラフは日本の戦後復興が本格化した東京オリンピック以後について、国内建値(千円/トン)、LME価格(ポンド/トン)、LME在庫の変動を示したものである。国内建値はLME価格にほぼ並行に変化している、為替レートが変動相場制になってからは円とドルのレートがこれに直接影響している。銅の価格はLME在庫に逆相関して変動している。白の帯は価格の高騰期、網掛けの帯は低迷期。高騰期と低迷期の交代は世界の紛争に関係しており、ベトナム戦争、石油危機・第4次中東戦争、イラン・イラク紛争、ソ連アフガン介入等が高騰期の始まりに対応する。現在の銅の国内価格はトン当たり32万円代であるが、石油危機の高騰期には80万円を越え、低迷期には20万円代前半まで下落した。銅価格には4倍に及ぶ変動のあったことが分かる。さらに、このグラフからは6~9年の周期で価格の変動があったこと、言い換えれば、中程度の周期で供給の不安定期の

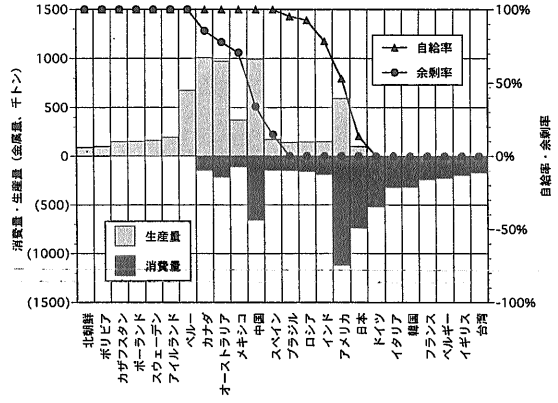
あったことが分かる。

最も確実な安定供給は国内鉱山による生産である。自国生産量の消費量に対する割合(自給率)はその国の資源供給の安定性を計る目安となる。銅については、米国とロシアの自給率は75%以上、中国が34%、日本は0.7%、ドイツ、フランス、イギリスは0%である(第5図)。亜鉛については、ロシア、中国が100%、米国が45%、日本は16.5%、ドイツ、フランス、イギリスは0から6%の自給率。ロシア、中国、米国は資源国で、自給率は高いが、日本、ドイツ、フランス、イギリスはいずれも資源非保有国で、わずかに日本が若干の自給率を維持している(第6図)。しかし、これら4国でも、フランス、イギリスは単なる資源非保有国ではなく、かつてはカナダ、オーストラリア、アフリカ等の資源国に植民地を持ち、現在なおそれらの国と密接な関係を保っていることを考えると日本と同列に扱うことはできない。日本は独自の資源安定供給の策を持つ必要がある。

生産国の輸出に回せる余剰分、すなわち生産量から自国消費量を差し引いた量の生産量に対する割合(余剰率)は、世界全体の資源供給の状況を見通す目安になる。高い余剰率を持つ国が世界の消費を支えているわけで、例えば、米国は銅や亜



第5図 世界の銅需給バランス。これら25カ国で生産量は世界の90%、消費量は88%をしめる。



第6図 世界の亜鉛需給バランス。これら24カ国で生産量は世界の90%、消費量は80%をしめる。

鉛について高い生産量を誇るが余剰率は0で他国に回せる分はない。銅については、余剰率、生産量ともに高い国はチリ1国のみ、亜鉛はカナダ、オーストラリア、ペルーの3国である。中国の亜鉛生産量は高いが余剰率は34%で、近い将来自国の消費の大きな伸びも予測されることから余剰率は一層減少すると見込まれ、世界全体の供給への貢献は期待出来ない。同じ資源国と言っても世界の資源供給への貢献度には大きな違いがあるので、そのへんを見通した上での資源政策ということになる。

金属に較べて非金属資源(工業原料資源)については、日本は世界最大級の消費をしているセメント原料をはじめまだ高い自給率のあるのが特徴である(第7図)。安定供給の切り札ともいえる国内鉱山による供給は日本としては大事にしてゆかねばな

らない部分である。

以上のように、先進国グループ内には各国の資源へのアクセスの相違や自給率に違いがあり、資源非保有国である日本の資源政策は当然きめ細かな独自の政策が必要となる。途上国の中には、いつまでも日本等から工業製品を買うばかりの輸入国の地位に甘んじているわけではなく、自ら工業製品の生産国となろうと努力している国が増えていることを考えると、日本も自給は難しいとしても資源の安定的な輸入には最大の努力を払わねばならない。

第1表には、従来から取られている政策も含めて、日本の取りうる資源戦略を示している。この中で地質調査所が関係しうる部分は、8と9の「探査関連の技術での国際貢献」と「資源情報の集約」で

自給率

100%	石灰石、ヨウ素 硫黄	陶石 長石類	鉍酸鉛		燐石・77・77 カリン・77(77) 膨脹珪酸	クレー カス(77)77 セオライト 酸性白土	
90%	珪石	ろう石		ざくろ石			
70%	天然ソーダ	耐火粘土				ベントナイト 珪藻土	
50%	珪砂 石こう	ドロマイト			パーライト 花崗岩 天然スレート	セリサイト	
10%		77 77(77)77				タルク カオリン	
0%	ホーキサイト 螢石 水晶石 黒鉛 47(77)・77(77) 47(77)77 電晶石 77(77)77 明ばん石 矽酸石 磁鉄 磁鉄 磁鉄・磁鉄	クロム鉱 ばん土質岩 カイヤナイト類 マグネサイト ジルコン	珪灰石 リチウム鉱石	チリ銅石 リン鉱石 カリ鉱	石綿 雲母 水晶 ダイヤモンド 77(77)77・77(77)	バーミキュライト 大理石	77(77)77(77)・ 77(77)

1. 工業原料 2. 耐火物原料 3. 陶磁器原料 4. 肥料原料 5. 物理的特性 6. 建設材料 7. 粉末原料

第7図 日本の非金属資源(工業原料資源)の自給率。

第1表 資源安定供給のための戦略。

1. 省エネ
2. リサイクル
3. 輸入国の分散
4. 備蓄
5. 代替資源の開発
6. 資源国への経済協力
7. 資源開発の恒常的努力
8. 技術面での国際貢献
9. 資源情報の集約
10. 資源消費の制約

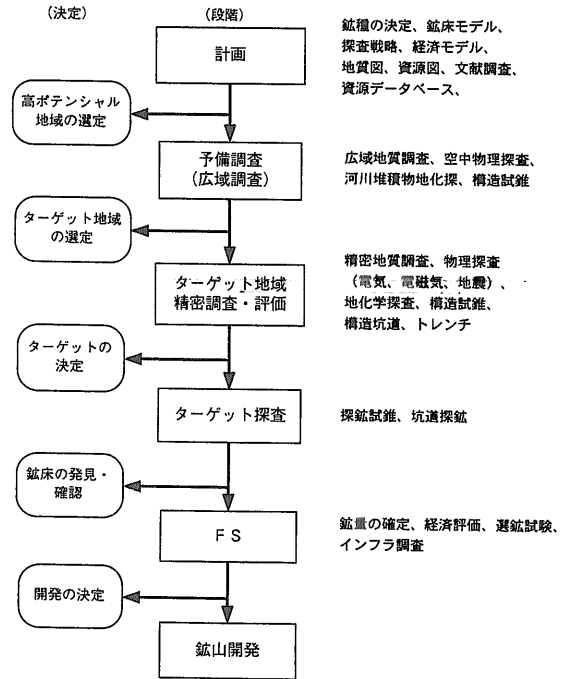
ある。特に様々の資源政策を行う場合、その基礎として資源情報が必要欠くべからざることは、石油危機の教訓に学ぶところでもある。

4. 地質調査所の資源情報と将来への戦略

地質調査所が資源情報を扱う場合、資源開発あるいは探査の流れの中でどのような位置にあるか示そう。第8図は一般的な資源探査の段階を示している。資源探査の最初の計画段階では、鉱種の決定、鉱床モデルの検討、探査戦略、経済モデル、地質図・資源図の検討、文献調査・資源データベースの検索等を行い、探査計画を策定し、高いポテンシャル地域を選定する。次いで予備調査によって精密に探査すべきターゲットの選定、精密調査によるターゲットの決定、ターゲットの探査、鉱床の発見、FSを経て、最終的な鉱山開発へと進む。

予備調査からFSまでをひとつの鉱山会社が行う場合、あるいは複数の会社が行う場合、予備調査からターゲット地域の精密調査まで、日本のように国が補助する場合等様々である。この中で、地質調査所が係わるのは、計画段階における基礎資料となる鉱床モデル、探査手法、地質図、資源図、資源データベースに関する部分である。また、予め日本列島の各地域について、資源ポテンシャルの高い地域を示す評価図表の作製に係わることもある。計画段階において必要な鉱床モデルや探査手法の提案、種々の地質・資源情報の解析には、日頃からの基礎研究や日本列島全体に渡る均質かつ多量のデータの集積を必要とする。これらはただちに金銭的な利益に結びつくことはないが、国の知的基盤あるいは国土評価の基礎として重要である。以下に地質調査所の資源解析部門の現状をまとめてみる。

現在の地質調査所の目指すところは、第1に地質図・資源図・資源データベース等の情報整備であり、第2には、鉱床の成因や鉱床モデルの研究とそれに基づく有効な探査手法の研究開発である。資源図については、従来、国内の金属及び非金属鉱物資源に関する200万分の1「鉱種別鉱物資源図」を作成・出版してきたが、近年、地質と鉱物資源に関する新しい情報が多く加わったので、それらの情報をデータベース化するとともに、より精度の高



第8図 資源探査の段階。

い資源図として新たに50万分の1「地方別鉱物資源図」の作成に着手し、北海道から出版を開始している。また、採石・骨材資源の枯渇に伴って、その資源情報を求める声が大きくなっていることから、現在、50万分の1「地方別採石資源図」の作成を計画している。

日本を中心とする国際的な資源図としては、環太平洋マッププロジェクトによる1,000万分の1「鉱物資源図」と500万分の1「日本及び周辺地域の鉱物資源図」を既に出版している。今後は、ロシア、中国、韓国、モンゴル、カナダ、米国等と協力して、アジア大陸から北米大陸に渡る鉱物資源未開発地域の資源データベースを作ることをめざして、各国との連携を強めている。

資源情報については、国内のいくつかの機関や民間会社が行っている。しかし、その多くは資源に関する生産統計や鉱山経営等の情報で、鉱床タイプや地質データを取り込んだものはない。これは、日本だけでなく、世界的にもそうで、地質情報を含む系統的な資源情報は少ないのが現状である。第2表は、地質情報、採掘法、生産コスト、鉱山ライフ等を含む世界の主要銅鉱山に関する資源情報の1例である。これから分かるように世界の

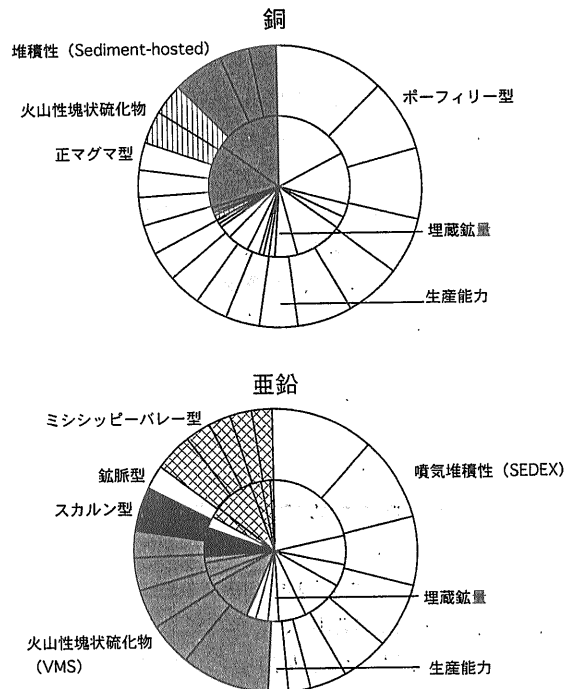
第2表 世界の主要銅鉱山の資源情報。生産能力：IWCC Summer 1994，埋蔵鉱量・生産コスト・鉱山ライフ：主にDatabase “Metalica 2000” 1994。コブおよびマシヤンバについてはGecamines Western Group 鉱山の合計。

	鉱山名	国名	鉱床タイプ	生産能力 (千t)	埋蔵鉱量 (千t)	採掘法	生産コスト (cUS/lb)	鉱山ライフ (年)
1	チュキカマタ	チリ	ポーフィリー型	601	40439	露天	65	
2	ラエスコンディーダ	チリ	ポーフィリー型	390	27746	露天	40~45	47
3	モレンシー	アメリカ	ポーフィリー型	389	7207	露天		
4	ビンガム	アメリカ	ポーフィリー型	310	6419	露天		20
5	エルテニエンテ	チリ	ポーフィリー型	307	25500		54	
6	グラスベルグ	インドネシア	ポーフィリー型	300	12156	露天	40	23
7	エヌチャング	ザンビア	堆積性 (Sediment-hosted)	280	2804	露天		
8	オクテディ	PNG	ポーフィリー型	210	3262	露天		13
9	サンマニュエル	アメリカ	ポーフィリー型	185	2722	露天	69	14
10	ハイランドバレー	カナダ	ポーフィリー型	180	2527	露天		12
11	ラカリダット	メキシコ	ポーフィリー型	180	6447	露天		
12	マウントアイザ	オーストラリア	火山性塊状硫化物 (VMS)	178	2415	坑内		
13	ネベスコルボ	ポルトガル	火山性塊状硫化物 (VMS)	170	1475	坑内		14
14	コブ	ザイール	堆積性 (Sediment-hosted)	164	34560	露天		
15	カナネア	メキシコ	ポーフィリー型	163	11414	露天		43
16	レイ	アメリカ	ポーフィリー型	162	6913	露天		21
17	チノ	アメリカ	ポーフィリー型	155	2219	露天		
18	カホーネ	ペルー	ポーフィリー型	150	1879	露天		
19	サドベリー	カナダ	正マグマ型	150	427	坑内		12
20	マシヤンバ	ザイール	堆積性 (Sediment-hosted)	148	34560	露天		

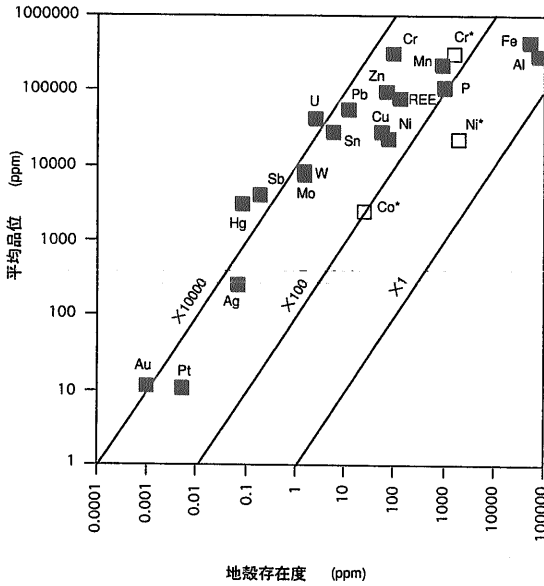
上位20鉱山を選んだだけでも、生産能力から見て世界の95%以上の情報を把握することが出来る。

第9図のグラフは、このような資源情報を基に作られたもので、銅と亜鉛について埋蔵鉱量と生産能力の鉱床タイプ毎の割合を示したものである。例えば、この図から銅を生産する鉱床タイプは圧倒的にポーフィリー型鉱床が多く、堆積性鉱床や火山性塊状硫化物鉱床の生産能力はずっと低いことが分かる。一方、亜鉛については、逆に堆積性や火山性の塊状硫化物鉱床に重要なものが多く、次いでミシシッピーバレー型鉱床が重要な鉱床タイプとなる。こうした地質や鉱床の産状についての情報が世界的に集積されてはじめて、将来ターゲットとすべき鉱床タイプや資源の高ポテンシャル地域の選定が可能になる。

最後に、探査手法・鉱床モデルについて、将来の目標を考えてみたい。第10図のグラフは、横軸が「金属の地殻存在度」、縦軸が「現在世界で稼行されている鉱山の金属平均品位」を示す。横軸は自然の量であるが、縦軸は人為的要素の強い数値である。しかし、自然のある部分を代表する量であることは確かである。黒の四角の各点は、おおまかに言って、ひとつの曲線上にのる傾向が読みとれる。斜めの直線は、鉱床中の金属元素濃度(品位)



第9図 世界の銅・亜鉛鉱床の規模と鉱床タイプ。内円は埋蔵鉱量，外円は生産能力の割合を示す。円グラフ中の区分線で仕切られた部分は世界の個々の主要鉱山の割合に対応する。例えば、銅については、第1表に示された鉱山が大きさの順に対応する。



第10図 鉱床形成の元素濃縮度。

がその元素の地殻存在度に対して何倍になるか、すなわち地殻からの一種の金属濃縮度を示している。白の四角は、ニッケルやクロムで、これら2つの金属鉱床はつねに超塩基性～塩基性岩に伴うので、横軸の値はこれらの岩石中の金属存在度を示している。

鉄(8倍)やアルミニウム(3.5倍)、クロム(191倍)、マンガン(236倍)、燐(104倍)、ニッケル(11.2倍)、コバルト(100倍)等の金属濃縮度は、数倍～200倍で、比較的低い値が特徴。鉱床タイプは風化・堆積性またはマグマ性の鉱床である(ニッケルとクロムは超塩基性岩や塩基性岩の金属存在度に対する濃縮度を示す)。一方、金、銀、銅、鉛、亜鉛、錫、タングステン、モリブデン(500～21,000倍)等多くの金属は鉱床となるためには、地殻の濃度に対して数千倍から1万倍以上の濃縮が必要である。そして、この種の鉱床はその多くが熱水性あるいはある種の低温のfluidの作用でできた鉱床である。

普通の地殻岩石から人為的に金属を濃縮・回収するには、膨大なエネルギーが必要である。熱水のエネルギーとその作用による金属の濃集があっ

てはじめて多くの金属を経済的に利用することが可能になるのである。日本には、幸い数多くの熱水鉱床が存在し、温泉など現在進行中の熱水現象も各地にみられる。また、その研究は日本の得意とする分野でもある。この好条件を生かして熱水性鉱床の研究を進め、優れた探査手法を確立することこそ世界の資源開発に貢献する近道であると考えられる。

5. あとがき

ある金属、例えば亜鉛の世界の埋蔵量があと20年分残っているとしよう。1年経てば残りは19年分となるが実際にはそうはならない。相変わらず20年分ある。これはその後の資源探査によって1年分埋蔵量が増えたためである。これが資源の供給の正常な姿である。もし1年経って19年と減少したなら、これは非常事態に至ったと考えなければならない。先がみえたのである。確実に減少すると分かったとき供給は不安化し、価格は上昇に転じ、買い手の立場は極めて弱くなってしまふであろう。また、その打撃は地震等の自然災害とは異なり日本全体に影響が及ぶ。現代社会では国際的な規模で打撃がひろがるであろう。そうなるからでは遅すぎる。供給が安定な時にこそ、将来に備えて着実に手を打っておく必要がある。

資源は地球上のどこにでも均一に存在しているわけではない、偏在しているのがひとつの特徴である。必然的に持てる国と持たざる国ができ、日本は後者である。一方、地球の資源は有限であり、マクロ的には枯渇の方向へと向かっている。21世紀はこの枯渇の世紀の出発点と言える。資源の安定的、持続的な利用は日本だけの問題ではなく、地球規模の問題として真剣に対応するときである。今こそ資源屋は奮起してこの問題に取り組まねばならない。

NAKAJIMA Terumasa (1997): Are we ready for the coming mineral crisis in the next decades?

<受付: 1997年9月16日>