

鉱床モデルと資源解析

古宇田 亮一 (鉱床部)

Ryuichi Kouma

1. はじめに

わが国における鉱山の数が少なくなってきたが、鉱物資源の需要そのものは減少していない。鉱物資源の産業経済に果たす重要性・不可欠性は万人の認めるところであろう。わが国の輸入額の半分近くが鉱物資源(うち3分の2は石油)であることからみて、存立基盤の大きな部分を占めることはまちがいないだろう。わが国で資源開発が低迷しているのは、資源産品の価格が低迷していることに原因がある。価格の低迷には複雑な原因があり、技術的側面のみから判断することはできないが、資源開発技術からみるなら、例えば

- [1] 世界的に大規模鉱床の新規発見が続いた
- [2] 大規模鉱床の開発が相次ぎ、旧来の小規模鉱床が競争からとり残された
- [3] 海上輸送を柱とする通商ルートが安定確保された

等が挙げられるのではない。

それでは、なぜ大規模鉱床の新規発見が続いたのだろうか。これも複雑な要因がからむ。やはり、技術的側面を見るなら、次のことが言えよう。

- [A] 新しい型の鉱床が発見され、従来対象とされていなかった地質に対する探査が進んだ。
- [B] 物理探査・化学分析技術が発達して、従来なら見逃していた対象も的確に探り当て、広い範囲の情報が収集されるようになった。
- [C] 鉱床モデル化などの深部資源探査技術が進歩し、深部大規模鉱床が発見された。
- [D] 採鉱・精錬技術が発達したため、従来対象とされなかった低品位鉱の開発が可能となった。

今日の大規模資源開発による過剰なまでの供給と価格低迷の原因の一つとして、明らかに資源に関する調査・研究が進んだことが重要である。しかも、今日発見され、開発の進んでいる鉱床も、あと半世紀も持続する保障はなく、来世紀初頭には、逆に供給不足すら心配されている。ただし、供給不足になったからといって世界的に「鉱物危機」が発生するかというと、これも単純な因果律にはならないだろう。例えば、代替品需要が

発生することによって、その時点で豊富かつ安価に存在する資源を活用する技術革新が相次ぐことも考えられる。しかし、その場合でも、何が代替品として適当なのか、やはり資源開発技術の側面から明らかにする必要がある。

86年末から世界的に開発競争が激化した高温超伝導では、従来の液体ヘリウム冷却によるニオブ素材からイットリウム・ランタン・バリウム・銅等の酸化物を使う方式が有望とされる変化を生じた。ニオブとイットリウム・ランタンのような希土類資源は、各々分布や鉱量の点で同じではなく、探査の手法も異なるが、わが国から見て政情不安地域等に偏在している点で、問題がある。バリウムは石油掘削井で泥水として多量に消費されているほどで、資源的には問題なく、国内的にも十分な埋蔵量がある。むしろ超伝導が実用化された時、熱伝導性の高い素材として銅等の金属が大量に必要とされるかもしれない。銅は現在の価格下落の最たるもので、わが国の多くの銅鉱山は閉山の憂き目に合っているところである。

数多い鉱物資源のうち、何が今後重要になるのか、不確実な今の時代には判然としていない。技術的観点から言えば、何が重要になっても、見通しのある評価ができるように、全ての元素種に対して解明が進むことが望ましい。いきなり全てをを求めることは困難であるにせよ、近年急速に発展した資源探査の成果を総合することが求められている。資源評価につながる資源分布解析やその量的解析を行なう分野を資源解析 (Resource Analysis) と呼ぶ。資源解析は、最近、定量的手法が進歩したため、世界的には大きく発展しつつある。残念ながら、わが国では、経済学的資源評価が主流であったため、地質学的な資源解析の手法が著しく遅れている。ごく少数の大学研究室で地質統計学 (Geostatistics) の一部として行なわれているにすぎず、体系だった研究は少ない。

小文では、地質学的な資源解析手法を、近年、世界的に盛んになっている鉱床モデルの研究成果を通じて紹介したい。

第1表 鉱床モデルの分類と用途によるレベル (Vokes, 1986)

用途	モデル				
	品位-鉱量モデル	記載モデル	成因モデル	産状モデル	定量的生成過程モデル
探査/開発	◎	◎	◎	○	○
供給ポテンシャル	◎	△	△	◎	△
土地利用	◎	○	△	◎	△
教育	△	○	◎	○	◎
研究ガイダンス	○	○	◎	○	◎

【用途のレベル】 ◎：主要
○：副次的
△：少数

2. 鉱床モデル研究の国際的広がり

モデルとは模型のことである。飛行機や自動車のプラスチック模型、模型飛行機のようにある対象の属性の一部を選んでその対象を「再現」する試みである。飛行機のプラ・モデルが現実の飛行機のようにはガスタービンを積んでいないが如く、モデルはあくまで属性の一部を切り出して構成されているだけである。あたかも現実の飛行機のように見えるのは、例えば形態の相似等の特徴量が同一視できるから、と言えるだろう。

鉱床モデルもまた複雑な自然現象から存知可能な属性の一部を切り出して構成することにより、あたかも現実の鉱床と同一視できるようにすることである。どの属性を選ぶかは、どんな特徴量で同一視したいのかという目的意識で異なる。プラ・モデルなら形態が相似であればよく、発動機付模型飛行機なら相似な機構で飛翔してほしい。鉱床モデルにも、目的が鉱床記載にあるのか、起源・成因にあるのか、生成過程にあるのか、又は品位・鉱量予測をしたいのかによって、それぞれ異なる属性を切り出さなければならない。又、起源・成因のモデルは、主義・主張によって異なり得るし、最も客観的と見られる記載モデルであっても、個人差や成因に対する考え方の違いで、見落としや重点の違いがあって、結果が異なることもある。

鉱床モデルは、作成者の目的意識で左右される意志的な性格をもつ。従って、定量的鉱床評価に使われる統計手法の選択にも、目的の違いが影響するだろう。鉱床成因の考え方が異なるなら、まったく相異なるモデルが組立てられることもある。従って「鉱床モデル」を論ずる場合

- [A] 目的：何を目的としたモデルか
 - [B] 立場：結論を導くために選択された属性は何か
- 1987年10月号

を考慮することが最も重要である。捨象された属性の中に、実はその鉱床を最も的確に示すものが含まれているかも知れない。

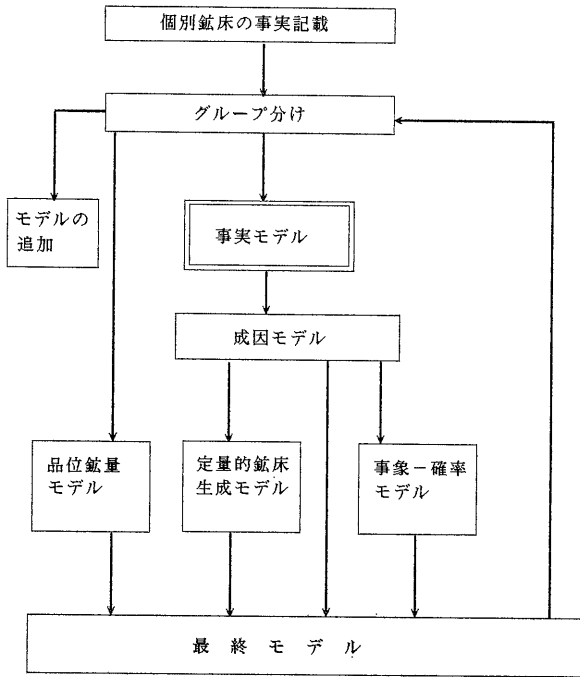
国際連合と国際地質科学連合では、鉱床モデルを開発途上国の資源探査家が、総合的に鉱床地質学を学ぶための不可欠な手段と考えるに至り、教育目的のモデリングを推進して、世界各地で国際会議を開催している (Vokes, 1986)。1984年1月のパリ会議で合意された UNESCO の10年計画によれば、アジア・アフリカ・ラテンアメリカの開発途上国で、鉱床情報の整備と技術移転を行なうことが定められている。即ち

- [1] 既存知識の開発途上国への移転と資源予測・開発の促進
 - [2] 記載・分析値・成因等が詳しくはわかっていない鉱床タイプのモデル化による探鉱有望性増加と広域資源評価の科学的基礎の確立
- を柱として、以下のような活動を行なうことになった。

- (1) 既知鉱床情報の標準形式による属性データベース化、特に鉱床モデルと構造層序単元 (tectonostratigraphic domain) の関係の解明。
- (2) 鉱床モデルに関するセミナーと野外巡検の開催。
- (3) 各地質単元における鉱床モデルの修正・更新。
- (4) 知識の不足する鉱床タイプのモデル化及び標準鉱床タイプの整備。

前半、即ち1984年から1987年までは、(1)と(2)に主力を置いて、鉱床モデルをコンパイルし、知識ベースを整備することになっており、これは、米国地質調査所を中心にしてほぼ実現されている (Cox and Singer, 1986)。

セミナーは、1985年にタンザニアの鉱物資源開発センターや、ブラジルのキャンピナス大学等で開催され、東南アジア諸国もいくつかの会議を開催している。前半4年間を通じて各鉱床モデルは野外調査も含めて検証さ



第1図 鉱床モデルの区分 (Cox and Singer, 1986)

れ (3) (4)も部分的に実現されている。 UNESCO では CCOP (アジア沿海資源共同探査調整委員会) の東アジア堆積盆解析計画とも連携して エネルギーと鉱物資源の両域にまたがる鉱床モデルの研究開発を推進した。

後半 1988年から1994年までは 教育目的の研修セミナーが続行されるが 前半で修練を積んだ資源探査家が各開発途上国で相応の社会的地位を得ていることを想定して 彼らを中心に 一層 資源探査が促進され 鉱床モデルの妥当性の検証 修正 追加へ発展していくことが求められている。 この UNESCO の計画には 国際地質科学連合も全面的に協力している。

この鉱床モデル計画を推進している欧米諸国 (米 独 仏 西 英 加 豪 北欧3国) では この間の成果を持ちより 1989年に予定されている第28回国際地質学会 (ワシントン開催) で研究集会を持つことになっている。

UNESCO が定めた鉱床モデルは 教育的配慮を目的としたものであって 鉱床に関する既存情報の全てを体系的に配置しようとするものである。 仮想的に区別された鉱床の型と鉱床の地質学的環境で分類しており “本質的な属性” (the essential attributes) を記述する。 各種の属性はある基本概念 (成因) で相互に関係づけられるか さもなければ 関係づけが困難としてもその鉱床タイプを定義するのに有効な属性を経験的特性によって区別し 理論的なモデルが構成される。 この前提と

して 数多くの鉱床が 共通の特性によってグループ分け可能なはずだという思想がある。 UNESCO では さらに鉱床モデルを記載モデル 成因モデル 産状モデル 定量的生成過程モデル 品位-鉱量モデルに5区分し 目的と用途に応じたレベルを定めている (第1表)。

属性として選別されるのは 鉱床の存在を識別するのに有効なパラメータでなければならない。 戦後数十年間に 流体包有物の研究 安定同位体の測定 絶対年代決定 放射性トレーサの研究の他 地熱地帯や海嶺系 紅海の底等で現に生成しつつある鉱床の直接観察等によって 鉱床の研究は飛躍的に進歩した。 1990年代以降は 計算機科学の発展を基に 更に一段の飛躍 即ち 数値生成モデル モデルの定量評価 データベース 知識ベースの発展が展望される他 より進歩した現代化学の分析手法やリモートセンシングを含む物理探査技術による発展が期待されている。 鉱床モデルは 技術的発達による新しい情報から有効なパラメータを選別することで知識を統合化する鉱床地質学の新技術になっているとも言えるだろう。 これは なぜ鉱床が特定の場所に存在し また 未発見の鉱床がどこにどれだけ期待できるかを理解する助けとなるだろう。 特に 駆け出しの資源探査家にとっては 教育効果が大変大きい。

開発途上国が 分析化学技術や重力測定技術などの要素技術の移転だけでなく 鉱床地質学の総合体系としての 鉱床モデルの移転を強く望み出したこと また 欧米各国の鉱床地質学者たちが鉱床モデル研究に力を注ぎ出したことは この分野の自然な流れ 発展であることが理解されよう。

3. 米国地質調査所資源解析室の鉱床モデル

UNESCO 等 最近における世界の鉱床モデル研究を先導してきたのは 米国地質調査所 (USGS) に他ならない。 その仕事を主導したのは 中でも資源解析室である。 第1表のモデルの区分を 資源解析室では 更に関連づけて 第1図のようにまとめた。 即ち 個々の鉱床記載 (鉱物組合せ 化学組成 同位体組成 密度計測 弾性波速度 絶対年代等と 地質学的記載) をまとめて グループ分けする。 これを記載モデルと称する。 このうち 品位と鉱量に関しては成因論による主観的ゆがみが少ないので独立させて品位-鉱量モデルとする。 残りは 成因モデルで区別し 成因によって 産状-確率モデルと定量的生成過程モデルを組立てる。 以上を総合して (最終的) 鉱床モデルとして完成する。 この鉱床モデルは暫定的なものであるため 更に個々の記載をやり直すことで検証する。 即ち 記載モデルの修正・更

第2表 鉱床モデルと地質構造環境の分類
(Cox and Singer, 1986)

地質構造環境		(鉱床モデル数)	
火成岩	貫入岩	苦鉄質・超苦鉄質	安定域 (4)
			非安定域 (6)
	噴出岩	アルカリ・塩基性	(2)
		珪長質	斑晶質 (3)
			斑状・非斑晶質 (7)
		苦鉄質	(2)
	珪長・苦鉄質	(4)	
堆積岩	砕屑岩	(3)	
	炭酸塩岩	(1)	
	化学堆積物	(3)	
広域変成岩	変火山岩と変堆積岩	(1)	
	変泥質岩と変砂質岩	(1)	
表層物	残留性	(1)	
	沈積性	(1)	
		計 (39)	

新と 成因モデル等の修正・変更である。品位-鉱量モデルは 情報の追加と 重大なミス往直修正以外には 余り変更がないことを前提にしている (Cox and Singer, 1986).

USGS で 初めて概念的鉱床モデルの統合化が試みられたのは Erickson (1982) からで 48 のモデルが総括された。翌年 コロンビアとの国際共同研究で 65 の記載モデルと 37 の品位-鉱量モデルが検証され またモデル記載様式も 1 ページの簡潔なものにまとめられた (Cox, 1983; Hodges et al., 1984). このモデル化作業がコロンビアのみにとどまらないことが認められ カナダ (Eckstrand, 1984) や 合衆国自身の石灰岩性亜鉛鉱床等に拡張された。他地域に適用しても モデルがよく検証されたため 地質学的に意義が高いと評価され 現在では 85 の記載モデルに 60 の品位-鉱量モデルを含む形で整理されている (Cox and Singer, 1986). この作業には わが国の地質調査所も大いに協力しており モデルのいくつかは以下の例でも見られる通り わが国から提案されたものもとり入れられている。しかし 全てを総括する膨大な作業は USGS 資源解析室の手で行なわれた。

1987年10月号

モデルを作ることそのものは 鉱床地質学の成立以来 数百年に及んでいる。しかし 体系化しようとするれば 記載が不完全である上 殊に成因論では不合理な空論が多く 現実の検証に耐えられぬモデルが多かったという反省がある。Paul Barton の序言によれば 最近の計測技術の進歩で 次のような重要な鉱床の成因モデルの交替があったという；

(A) 流体包有物の研究

ミシシッピ型鉱床が 堆積によるものでなく また単なる地表水の循環によるものでもないことがわかった。

(B) 安定同位体の研究

浅熱水性鉱床は化石地熱系における 浸透雨水の流動によって生じた。

(C) 野外観察と実験的研究

火山成塊状硫化物鉱床は 同生的な海底噴出過程によるものであって 火山堆積物の後生的交替によるものではない。

“Economic geology has evolved quietly from an ‘occult art’ to a respectable science as the speculative models have been put to definitive tests.” (鉱床地質学は オカルト 芸術から尊敬すべき科学へと静かに進化した。推測によるモデルが 決定的な検証を受けたためである : in Cox and Singer, 1986).

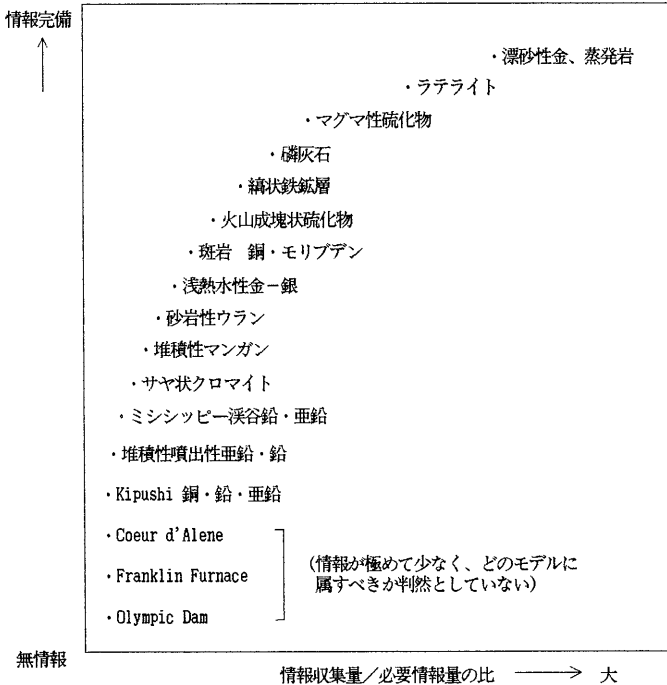
仮説 (又は speculative model, あるいは “空論”) をたて 検証によって その棄却か受容かを決めていくことは常識的な科学の方法である。

以上を念頭において 具体的な鉱床モデル例をみよう。モデルの分類は第2表にあるような「地質構造環境」から分類している。全モデルの構成は第3表に記載された。これらの各モデルが全て同じレベルで認識されているわけではない。品位-鉱量関係が知られているものもあれば 地質環境のみしかわからないものもある。最も苦勞した点は 文献データの精度がまちまちで データの欠落や誤りが少なくないことであったという。よく知られた鉱床は検証できるが そうでないものは とりあえず 文献記載を信じる他ない。第2図は 縦軸が情報の完備性 横軸が情報収集量/必要情報量の比である。グラフの右上ほどモデルの信頼性が高く 左下ほど未解明な点が多い。第3表中でも 4a 4b 11 13a 13b 21c 26b 33a 33b 35a 35b については不明な点が多く 記述が省略されている。また たとえば 38a のラテライト性ニッケル鉱床は 見方によっては B-2-3 のオフィオライトにも含まれる。第3表では このような重複可能性は省いた。鉱床の記載モデルの例を第4表に示す。又 品

第3表 鉱床モデルの全て (Cox and Singer, 1986; 原文のニュアンスを残すため直訳に近いものとした)

- (1) 苦鉄質・超苦鉄質貫入岩
- A. 構造的安定領域; 層状複合体
- A-1. 層状鉱床
- A-1-1. 基底帯
- [1] Stillwater 銅・ニッケル鉱床
- A-1-2. 中間帯
- [2 a] Bushveld クロマイト鉱床
- [2 b] Merensky 礁性ブラチナ属鉱床
- A-1-3. 上部帯
- [3] Bushveld 鉄・チタン・バナジウム鉱床
- A-2. バイブ状鉱床
- [4 a] 銅・ニッケルバイブ鉱床
- [4 b] ブラチナ属バイブ鉱床
- B. 構造的不安定領域
- B-1. 火山岩と同一年の貫入岩
- B-1-2. リフト環境
- [5 a] Duluth 銅・ニッケル・ブラチナ属鉱床
- [5 b] Noril'sk 銅・ニッケル・ブラチナ属鉱床
- B-1-3. グリーンストーン帯; 最下部に超苦鉄質岩含む
- [6 a] コマチアイト性ニッケル・銅鉱床
- [6 b] かんらん岩性ニッケル・銅鉱床
- B-2. 造山作用時の貫入岩
- B-2-1. 火山岩帯と同時造山性
- [7 a] 同生-同時火山性ニッケル・銅鉱床
- B-2-2. 非火山地帯の同時造山性貫入岩
- [7 b] アンソサイト性チタン鉱床
- B-2-3. オフィオライト
- [8 a] さや状クロマイト鉱床
- [8 b] 主要さや状クロマイト金鉱床
- 蛇紋岩
- [8 c] Limassol Forest コバルト・ニッケル鉱床
- [8 d] 蛇紋岩を母岩とするアスベスト鉱床
- B-2-4. 切断的貫入岩 (集中帯)
- [9] アラスカ ブラチナ属鉱床
- C. 安定領域のアルカリ貫入岩
- [10] カーボナタイト鉱床
- [11] アルカリ複合体鉱床
- [12] ダイヤモンドバイブ鉱床
- (2) 珪長質貫入岩
- D. 主として斑晶質テクスチャ
- D-1. ベグマタイト
- [13 a] ベリリウム・リチウム ベグマタイト鉱床
- [13 b] 錫・ニオブ・タンタル ベグマタイト鉱床
- D-2. 花崗岩質貫入岩
- D-2-1. 石灰岩質母岩
- [14 a] タングステン スカルン鉱床
- [14 b] 錫スカルン鉱床
- [14 c] 交代性錫鉱床
- D-2-2. その他の母岩
- [15 a] タングステン鉱脈鉱床
- [15 b] 錫鉱脈鉱床
- [15 c] 錫グライゼン鉱床
- E. 斑状非晶質貫入岩
- E-1. 高珪酸質花崗岩・流紋岩
- [16] Climax モリブデン鉱床
- E-2. その他の珪酸質・苦鉄質 含アルカリ岩
- E-2-1. 斑岩銅
- [17] 斑岩銅鉱床
- E-2-2. 石灰岩質母岩・接触近傍域鉱床
- [18 a] スカルン付斑岩銅鉱床
- [18 b] 銅スカルン鉱床
- [18 c] 亜鉛・鉛スカルン鉱床
- [18 d] 鉄スカルン鉱床
- [18 e] 石灰岩を母岩とするアスベスト鉱床
- E-2-3. 石灰岩質母岩から離れた鉱床
- [19 a] 多金属交代鉱床
- [19 b] 交代性マンガン鉱床
- E-3. 同時期火山性母岩
- E-3-1. 珪長質火山岩に含まれる花崗岩
- [20 a] 斑岩 錫鉱床
- [20 b] 錫-多金属鉱脈鉱床
- E-3-2. カルクアルカリ岩又はアルカリ岩
- [20 c] 斑岩 銅・金鉱床
- E-4. 火成岩・堆積岩性母岩の方が古い場合
- E-4-1. 貫入岩体内
- [21 a] 斑岩 銅・モリブデン鉱床
- [21 b] 低弗素斑岩モリブデン鉱床
- [21 c] 斑岩 タングステン鉱床
- E-4-2. 母岩内
- [22 a] 火山岩性銅・砒素・アンチモン鉱床
- [22 b] 金・銀・テルル鉱脈鉱床
- [22 c] 多金属鉱脈鉱床
- (3) 噴出岩
- F. 苦鉄質噴出岩
- F-1. 大陸性・リフト性クラトン
- [23] 玄武岩性銅鉱床
- F-2. 海洋性 含オフィオライト
- [24 a] キプロス 塊状硫化物鉱床
- [24 b] 別子 塊状硫化物鉱床
- [24 c] 火山成マンガン鉱床
- [24 d] Blackbird コバルト・銅鉱床
- G. 珪長質・苦鉄質 噴出岩
- G-1. 大気下
- G-1-1. 主として火山岩内
- [25 a] 温泉性金・銀鉱床
- [25 b] Creede 浅熱水性鉱脈鉱床
- [25 c] Comstock 浅熱水性鉱脈鉱床
- [25 d] 佐渡 浅熱水性鉱脈鉱床
- [25 e] 浅熱水性石英-明礬石 金鉱床
- [25 f] 火山成ウラン鉱床
- [25 g] 浅熱水性マンガン鉱床
- [25 h] 流紋岩母岩性錫鉱床
- [25 i] 火山岩母岩性磁鉄鉱鉱床
- G-1-2. 鉱床より古い石灰岩内
- [26 a] 炭酸塩岩母岩性金・銀鉱床
- [26 b] 螢石鉱床
- G-1-2. 鉱床より古い砕屑性堆積岩内
- [27 a] 温泉性水銀鉱床
- [27 b] Almaden 水銀鉱床
- [27 c] 珪酸-炭酸塩性水銀鉱床
- [27 d] 単純アンチモン鉱床
- G-2. 海洋

- [28 a] 黒鉛・塊状硫化物鉛床
- [28 b] Algoma 鉛床
- (4) 堆積岩
- H. 碎屑堆積岩
 - H-1. 礫岩と堆積性角礫岩
 - [29 a] 石英べブル礫岩性金・ウラン鉛床
 - [29 b] Olympic 銅・ウラン・金鉛床
 - H-2. 砂岩
 - [30 a] 砂岩母岩性鉛・亜鉛鉛床
 - [30 b] 堆積岩母岩性銅鉛床
 - [30 c] 砂岩性ウラン鉛床
 - H-3. 頁岩とシルト岩
 - [31 a] 堆積性噴出性亜鉛・鉛鉛床
 - [31 b] 層状パライト鉛床
 - [31 c] エメラルド鉛脈鉛床
- I. 炭酸塩岩
 - 火成岩を伴わない
 - [32 a] 南東 Missouri 鉛・亜鉛鉛床
 - [32 b] アバラチア亜鉛鉛床
 - [32 c] Kipushi 銅・鉛・亜鉛鉛床
- J. 化学堆積物
 - J-1. 海洋
 - [33 a] マンガン・ノジュール鉛床
 - [33 b] マンガン・クラスト鉛床
 - J-2. 陸棚
 - [34 a] Superior 鉄鉛床
 - [34 b] 堆積性マンガン鉛床
 - [34 c] 上昇海流型磷灰石鉛床
 - [34 d] 暖流型磷灰石鉛床
- J-3. 狭域堆積盆
 - [35 a] 海洋蒸発岩鉛床
 - [35 b] Playa 蒸発岩鉛床
- (5) 広域変成岩
- K. 主として優地向斜源
 - [36 a] 低硫化物金-石英鉛脈鉛床
 - [36 b] Homestake 金鉛床
- L. 主として泥質又はその他の堆積岩源
 - [37 a] 不整合ウラン・金鉛床
 - [37 b] 平坦断層上の金鉛床
- (6) 表層及び不整合に伴う
- M. 残留性
 - [38 a] ラテライト性ニッケル鉛床
 - [38 b] ラテライト型ボーキサイト鉛床
 - [38 c] カルスト型ボーキサイト鉛床
- N. 沈積性
 - [39 a] 漂砂性金・プラチナ属鉛床
 - [39 b] 漂砂性プラチナ属・金鉛床
 - [39 c] 沿岸漂砂性チタン鉛床
 - [39 d] ダイヤモンド漂砂鉛床
 - [39 e] 河川漂砂性錫鉛床



第2図 重要な鉛床タイプの情報完備性と理解水準の概念 (Cox and Singer 1986)

位一鉛量モデルの例を第3図に示した。これらはわが国の地質調査所が協力している部分である。

第4表では第3表から検索された錫・多金属鉛脈鉛床について同意語をあげて用語上の統一をはかり簡単で特徴を良くあらわす記載を2行で済ませている。文献も一般的なものとどめており地質鉛床の各個別の記載も数行以内に納めている。極めて簡潔である。各鉛床モデルを概観するにはこの簡潔性が必要不可欠と言えるだろう。地質記載は母岩テクスチャ時代堆積環境構造的設定関連した鉛床等代表的性質のみである。又鉛床記載も鉛物テクスチャと構造変質鉛床規制風化地化学特性に限定されておりその他地球物理特性等も今後付加されるだろう。役に立つのは各鉛床モデルに属する鉛床例であり完全な文献が付いているのでこれによって鉛床のより詳しい姿を知ることができる。徒らに文献中の記述を多く引用することはしていない。

第3図は各鉛床の品位-鉛量統計をグラ

第4表 錫多金属鉱脈鉱床 (モデル20b) の記載モデル例 (富樫, 1986)

DESCRIPTIVE MODEL OF Sn-POLYMETALLIC VEINS

by Yukio Togashi (Geological Survey of Japan)

APPROXIMATE SYNONYMS Polymetallic xenothermal (Imai and others, 1978), Bolivian subvolcanic multistage.

DESCRIPTION Multistage Cu-Zn-Sn-Ag-bearing veins associated with felsic ignimbrites and subvolcanic intrusions.

GENERAL REFERENCES Nakamura and Hunahashi (1970), Grant and others (1977).

GEOLOGICAL ENVIRONMENT

Rock Types Rhyolitic tuff, welded tuff and tuff breccia. Rhyolitic to basaltic dikes. Sandstone, slate, chert, and basic tuff.

Textures Welded and airfall tuff. Porphyritic-aphanitic intrusives.

Age Range Late Cretaceous to Miocene in Japan, Miocene in Bolivia, but may be any age.

Depositional Environment Fissures in and around felsic ignimbrite.

Tectonic Setting(s) Continental margin. Syn-late orogenic.

Associated Deposit Types Polymetallic replacement, epithermal Ag veins, porphyry Sn.

DEPOSIT DESCRIPTION

Mineralogy Cassiterite, chalcopyrite, sphalerite, pyrrhotite, pyrite, galena, scheelite, wolframite, arsenopyrite, native bismuth, bismuthinite, argentite, native gold, magnetite, molybdenite, and complex sulfosalt minerals including teallite, frankeite, cylindrite, and stannite.

Texture/Structure Multistage composite veins with Sn, Cu, Zn, and Ag minerals occurring in the same vein.

Alteration Minor quartz-chlorite-sericite alteration close to veins. Tourmaline, fluorite, or siderite may be present.

Ore Controls Veins, breccia veins, and breccia pipes. Metal zoning sequence is Sn + W to Cu + Sn, Cu + Zn, Pb + Zn, Pb + Ag, Au + Ag from center to periphery, or from depths to shallow levels. Zones are commonly superimposed or "telescoped" to produce complex veins.

Weathering Limonitization. Cassiterite in soils and gossans.

Geochemical Signature Cu, Zn, Sn, Pb, W, Au, Ag, Bi, As.

EXAMPLES

Ashio, Akenobe, Ikuno, Kishu, JAPAN (Nakamura, 1970)

Potosi, BLVA (Turneure, 1971)

フ化したものであり 縦軸が総計を1.0に正規化した積算鉱床数である。白丸は個々の鉱床に対応する。横軸は品位又は鉱量である。実線はt分布で近似した有意検定であり 実線からはずれる左上と右下は 各々5%以下の領域である。たとえば 佐渡モデルに含まれる全20鉱床数の50%に相当する鉱量は 30万トンを閾値とすることがわかる。又 この図の横軸方向の分布から どのモデルが巨大鉱床を何%含むか推定できるので 鉱床探査の目的に沿う鉱床モデルを選択するための目安となるだろう。例えば巨大鉱床を生じるモデルの鉱床

なら 探査を進める意義が高い。

USGSの鉱床モデルにおけるいまひとつの特徴は できるだけ省略文字列をつかわない方針と 379ページ中 89ページにわたる索引の充実である。この種の著作は辞書などと違って 索引すべき表が多重に展開する内部構造を持つ。ページごと あるいは1行ごとの持つ情報の重みと多層性が極だっており 十分な索引なくして用いることはできない。

省略語は頻出する地域名(国名を含む)を4文字で示すのみである。次に 各モデルごとの鉱量と 各構成金

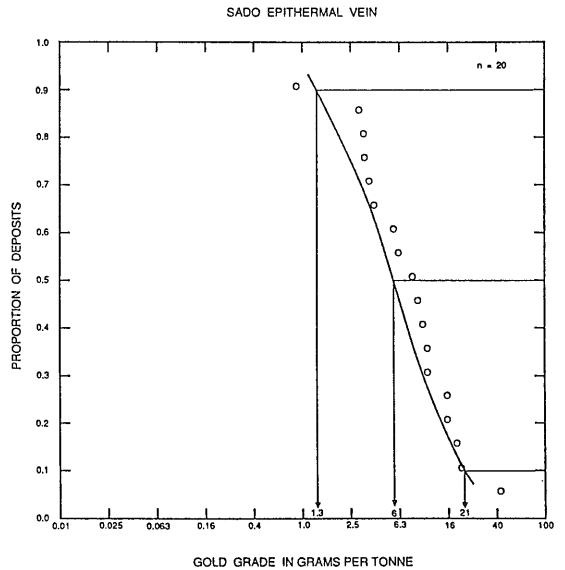
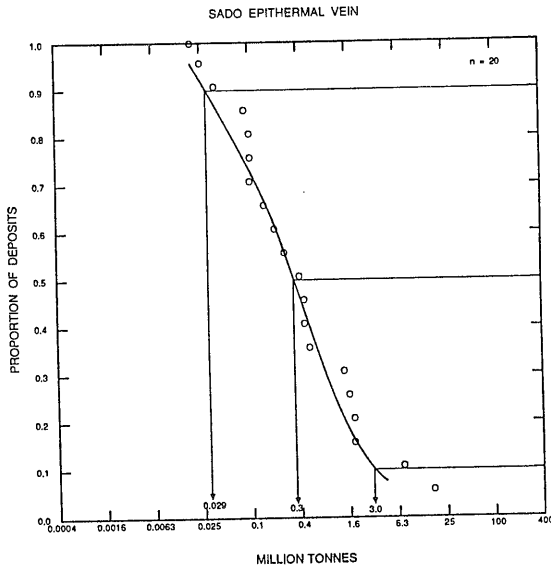
GRADE AND TONNAGE MODEL OF SADO EPITHERMAL VEINS

By Dan L. Mosier and Takeo Sato

COMMENTS The two lowest gold grades were not plotted because it is suspected that their reported grades are in error. See figs. 117-119.

DEPOSITS

Name	Country	Name	Country
Bajo	JAPN	La Libertad	MXCO
Benten	JAPN	Mamuro	JAPN
Bruner	USNV	Mizobe	JAPN
Chitose	JAPN	Nagamatsu	JAPN
Guadalupe and Calvo	MXCO	Sado	JAPN
Hayden Hill	USCA	Sanei	JAPN
High Grade	USCA	Takahata	JAPN
Innai	JAPN	Takatama	JAPN
Kawasaki	JAPN	Takeno	JAPN
Koyama	JAPN	Winters	USCA



第3図 品位-鉱量モデルの例：佐渡浅熱水性鉱脈鉱床（モデル25d）（Mosier と佐藤，1986）

属の平均標準偏差 鉱床数の統計表が掲げられている。更に各金属に対するモデルのクロス索引 鉱床モデルと地化学特徴の一覧表 主生産物か 副産物かの区別の表がある。各鉱物に相当する鉱床モデル索引には 鉱石鉱物か脈石鉱物かの区別があり 母岩 周辺岩 変質帯 風化帯の産状による区別を行なっている。最後に各鉱床（モデルでなく 一つ一つの個別鉱床）とモデルとの索引 これには省略された4文字の地域名を付けている。

欲を言えば 年代別 堆積環境別 構造区分別 変質区分別等の索引も必要であろうし 関連鉱床とのクロス索引も欲しいところである。ただし 豊富な索引の重要性を示している点では ひとつの発見と言えよう。

USGSの鉱床モデルは代表的な鉱床に対しての入門的学習には威力がある。しかし 少しでも関心が深くな

れば 目的とするものが見あたらないもどかしさが出てくるだろう。それは 今後建設すればよいのだ。

4. 資源解析に向けて

鉱床モデルから多重索引を作成する視点で見ると 複数の表から成り立ち かつ表の各欄に空白が多いことに気が付く。地質情報は人類が鉱業の仕事をはじめて以来の数千年にわたる知識と技術の蓄積から成るため 知識のレベルと情報の質と量にいろいろな差があり不均質である。その上 古来知られた鉱山でも掘り尽くされれば情報のフローも乏しくなり 鉱山として最盛期の時点における知識が主になろう。どうしても不均質な情報しか手に入らない。近代化が進んだ後は 標準的定量情報が得られるように思われるかもしれないが 実

際には各国 各鉱山における探査技術はマチマチである。ボーリングを主とするところもあれば 沢砂の地化学探査を主とする場合もあるし 空中磁気を測るもの 微化石分析によるもの等 対象によっても 又企業体によっても様々である。品位・鉱量データだけは共通してほしいと思いたいが いつの時点で どんな意図で発表された品位・鉱量データかを検討する必要がある。

たとえば 証券会社を考慮したデータか 新聞広告的発表だったのか 全統計か 一部か 他鉱山のデータと一諸にしていないかどうか等は 真のデータを歪める要因になり易い。多くのデータは 完全に揃わないことが通例である。

一方 現状のモデル体系が最善とは言えないことは 前述の地質構造環境による一元化された体系でも 一つのモデルが複数の区分項目に属してしまうことから明らかであろう。塊状硫化物鉱床を 一応 火山性と非火山性で別々のモデルに区分したが 安定同位体のデータが鉱床生成時を示すと仮定したからこのように分かれるので もし そうでなく 後生的火山活動の影響があるとの仮説をとれば そうはならない。今のところ 後者を棄却するデータは得られていない。つまり検証されていない。第2図の右上の鉱床に関しては必要な議論が少なく済むため 大した検証はいらぬが 中央から左下にかけては今後の検証結果によって 大いに変化する可能性が高い。一部の詳しく検証されている鉱床モデルについては大体固まっているものもあるが この問題は索引作成上避けて通ることができない重大問題である。

ということは 鉱床モデルの情報構造を表現する上で 個別情報の関連性を固定化し 構造全体の可変的再構成を困難化するような階層型やネットワーク型のデータ構造は不適当だということになる。鉱床モデルを表現するには 多数の表からなるリレーショナル型が適当と言えるだろう。しかし かくも多数の属性と複雑な多重性を持つ鉱床モデルに対しては 更なる工夫が必要であり 現状の計算機の処理能力は未だ満足すべきものが少ない。

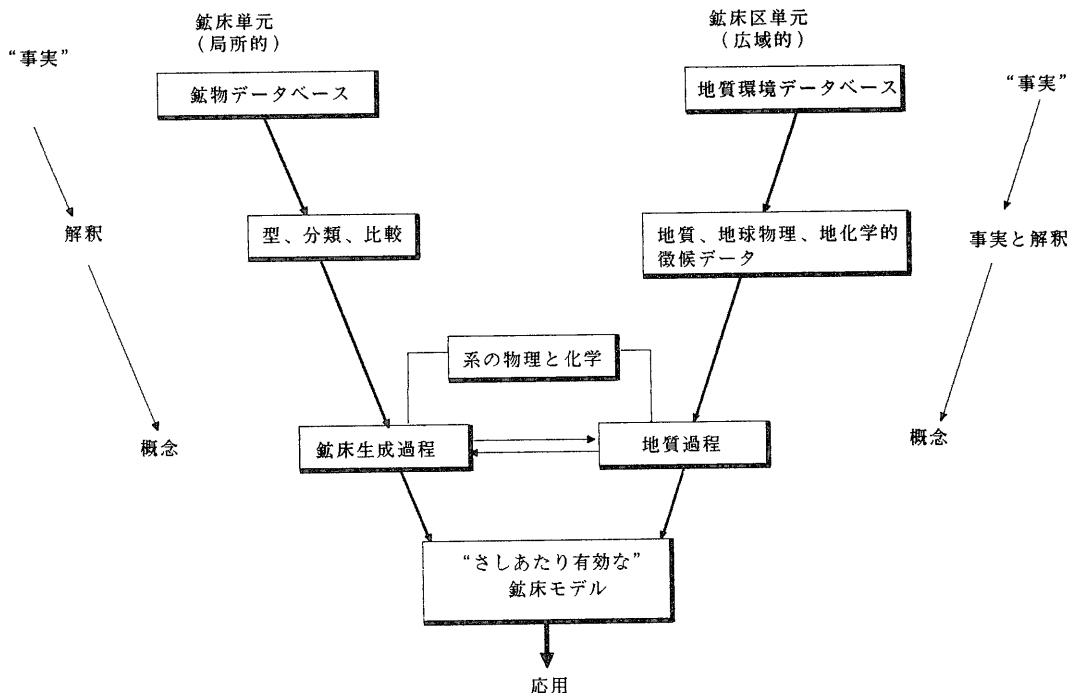
ここで どのようなシステム構成が求められるか見てみよう。まず データとその構造の更新が繰り返す必要のため 高い能力の MMI (マンマシンインタフェース) が必要である 行エディタしかできない機種は言うに及ばず 単に画面エディタがあるだけでも使用に耐えられない。MIT の X windows や SUN Microsystems 社の NeWS 等の ウィンドウ・マネージャに 表の分割編集 行ごとの移動 列ごとの移動等の備わったアプリケーション 更に全体の中で作業している位置が見易い

モニタ等の付加が必要であろう。これに広大な配列空間の直接アクセスが不可欠である。また データフォーマシンのような並列処理動作や スーパーコンピュータで実現されている高速ベクトル演算も必要になる。資源情報が 第一に空間分布で制約される情報であるため データ処理の流れは 図形・画像処理を含むからである。表同士の演算が加わる他 空間統計も行なう必要があるので ベクトル処理の高速化は 鉱床モデルのデータを使用した処理系に必須であろう。ここまでなら 投資しさえすれば現状でも不可能ではない。更に言えば 近い将来どのような形か未定としても実現されるであろう知識処理プロセッサ (第5世代計算機) が 必須の道具として有望と言えよう。

このようなシステム構成で 鉱床情報の解析が行なわれるなら 方法的にも先導的技術革新が必要とされる。従来の鉱床地質学分野では 現場探査家が必要に応じて部分的に応用する用途が大半だった空間統計の処理に関わる技術の革新と体系化 リモートセンシング・データの常用 地質過程の中で鉱床生成過程を数値解析する手法の創造 もはや商業的にサポートできるようになった 重・磁力 電気探査や 化学分析 同位体分析等の他に 商業的サポートの困難な より発達した物理学的 化学的 先端技術の積極的導入等が考慮されてよいであろう。

従来型の鉱床成因モデル研究の概念図を第4図に示す。既往の研究で これほど体系的に行なわれた例は必ずしも多とは言えないが 大半の研究が第4図的流れを考慮して あるいは その中に位置付けてなされてきたと言えるのではないだろうか。個々の鉱床に関する研究の場合には 第4図の手法は今でも有効と考えられる。しかし 資源解析をする場合 もはや一つ一つの鉱床のみで論理的完全性が保てればよいわけではなく 地球上の全鉱床の総合的成因群の中で体系化せざるを得ない。

このように変更した要因は はじめに述べたように 資源産品の価格低迷をもたらした 必需金属種の見直しを困難にしている現代の市場経済のダイナミズムなのであろうか。資源解析は 銅・鉛・亜鉛のような基礎金属で安心していられなくなり 全ての鉱物種について 汎世界的に行なわざるを得なくなっている。しかも 一つの鉱床モデルさえあれば安心していられるわけではなく 常に複数の代替モデルが用意されていることが望ましい。ダイヤモンドのように二つのモデル (キンバライトと漂砂鉱床) しかない鉱物種もあるが その場合は 人工合成による代替が技術開発の目標になる。そのため 別な素材が必要になるだろう。資源解析はどのような市場のニーズにも見通しのある対応ができるだけの知



第4図 “さしあたり有効な鉱床モデル” の発達概念 (Hutchison, 1986)

識ベースを構築する必要があり これは今後の課題である。

資源の流通から見た従来型資源評価は 第5図のように位置付けられる。従来は 特定の鉱物種に関して第5図のサイクルが閉じて完結していればよかった。このサイクルを大きく引き崩しているものが技術革新による市場の需要動向の激変である。しかも 今日市場経済は単なる需給バランスのみや弱肉強食の自由競争ばかりで成り立つものではない。政治経済的要件の比重が高くなっており これを加味するなら 第6図のような資源評価のフレームワークが組み立てられるだろう。資源解析は もちろん純粋科学として 政治経済的枠組から独立して行なえるし 先導的手法を発達させるためにそれも時々必要なことではある。しかし その成果を生かすも殺すも 政治経済の枠組が重要であるため 政策立案と経済解析に ある程度リンクする必要があるだろう。

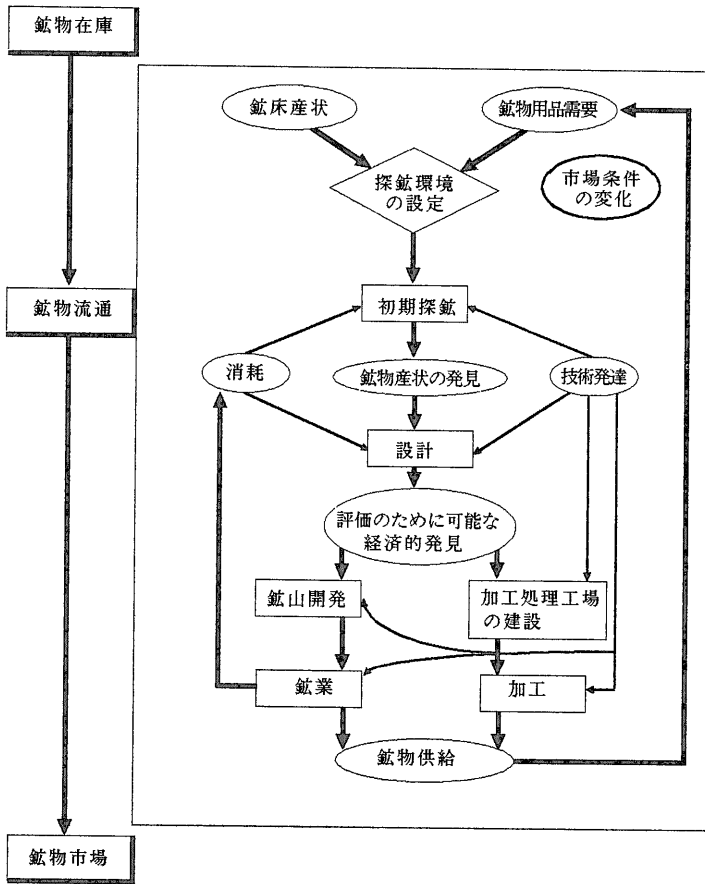
政策過程と資源評価の関わりは長期的課題と 短・中期の方針で異なる。鉱床モデルは どの目的に対しても知識ベースを提供する。しかし 対象の空間的広がりや 時間的尺度によって ある鉱物種の単一の鉱床モデルによる評価手法から複数の鉱物種の多重の鉱床モデルによる評価手法まで 段階的に異なる方法が用いられる。前節で示したように 一つの鉱物種に一つの鉱床

モデルが対応しているわけではなく 鉱物種とモデルとが多重に相関し 多重の索引を必要とする情報構造を持っている。資源解析ではどれだけ多くの知識ベースをどれだけ関係づけて検索できるかが基本的な拘束条件となる。現状では 未だ 複数の鉱物種の重層した鉱床モデル化による解析手法は不可能に近く その前に果たすべき技術開発の課題は余りにも多い。それは当面次のようなものであろう；

- (1) 鉱床モデルの見直しとより深いレベルでの更新
- (2) 不完全情報の判断手法の標準化
- (3) 知識情報の定量化
- (4) 経験的ベイズ手法の導入
- (5) 大規模知識ベース管理システムの開発
- (6) 多重情報の多重表示システムの開発
- (7) 鉱床モデルのクロス索引手法の標準化
- (8) 空間分布処理システムのユーザ・フレンドリ MMI の開発
- (9) 以上を前提にした地質統計解析とその手法の革新。

更に 将来的には(10)知識処理の技術革新 も課題になるだろう。

地質学の立場から見て今後重要になりうることは 鉱床モデルの数値解析手法を開発することである。このためには 鉱物とその地球化学 地球物理のみでなく



第5図 供給過程から見た資源評価 (Mackenzie, 1986)

より多くの物理学的研究手法を構造地質 水文地質等に取り入れて 資源解析に応用する必要がある。基礎的でしかも創造的能力が必要とされるだろう。このような試みは先導的であり 開発過程で得られる技術の波及効果が大きい。地質学における この新しい分野は今後の技術革新の動向にも大きく依存しており 諸外国のどこにも「お手本」と言えるものがないのである。

5. おわりに

資源の研究は 従来 既開発中の鉱山を前提に行なわれることが多かった。20年ほど前に 既存の黒鉱鉱床に関する基礎的研究が 当時権威のあった学説を退けて 黒鉱の鉱床モデルを革新し わが国に「黒鉱ブーム」と呼ばれる発見ラッシュを引き起こした。今日 わが国が資源研究の点で国際的に尊敬を受け協力を要請されているのは このような独創性があったからである。その後 石油危機を経て 国内鉱山が減少すると 「それ

なら 海外鉱山を研究すればよい」ということになった。しかし 国内と異なって海外の場合には国情の違いもあるほか 開発の主導権が得にくい事情等から 従前のスタイルとは異なる方法が必要なようである。

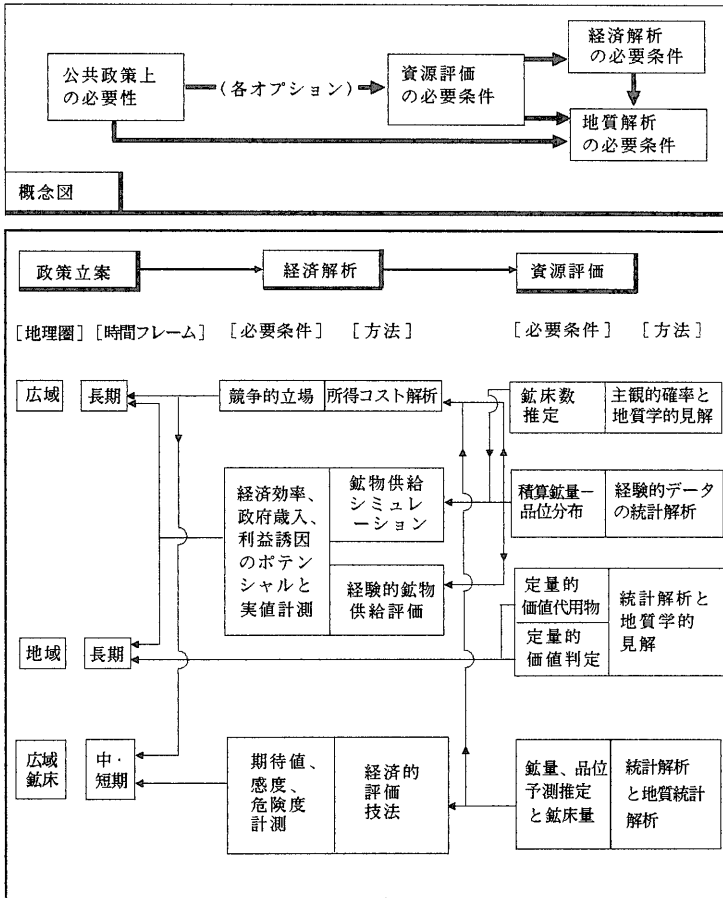
はじめに述べたように 例えば超伝導技術が進歩して 早急に特定資源の需要が高まったとしても 既に活動を停止した段階から資源開発がフル操業に入るには時間がかかるため 簡単には市場に素材を供給できない。いち早く 資源を得たものが市場を席卷するかもしれない。その時になってあわてないためには 資源解析技術の蓄積が不可欠と言える。この技術も又従前のように 何もしないで外国からコピーできる時代ではなくなりつつある。一方では 先導的技術開発に貢献することが国際社会の一員として当然の義務となっている。又 一方では 米国関税法337条の改正 (知的所有権の侵害を IUC に提訴するのに 被害立証の必要性をなくす) をめぐる動きに象徴されるように 自力で技術を開発しないで生産し 通商活動を行なうことがますます困難になるだろう。

現状の資源解析技術が最も進んでいると言われる米国地質調査所の公表されたレベルでも 内容的には大いに不満がある。公表されていない彼等の技術蓄積の差を思う時 わが国でも あるいは協力しあるいは独自に資源解析技術の先導的開発を進めていく必要があるのではないだろうか。

小文は 東北工業試験所石原舜三所長 地質調査所広域地質課山田直利課長。鉱物資源課神谷雅晴課長にご検討いただき 有益な御指摘をいただいた。米国地質調査所資源解析室 Paul Barton 博士 D. Cox 博士 D. Singer 博士から多くの御示唆を得た。清書はいつまながら岸井範子氏の御手をわずらわせた。以上の方々へ厚く感謝申し上げる次第です。

文献

Cox, D. P., ed., 1983, U. S. Geological Survey-INGE OMINAS mineral resource assessment of Columbia; ore deposit models: U. S. Geological Survey Open-



第6図
資源評価のフレームワーク
(Mackenzie and Watson, 1986)

File Report 83-423, 64p.

Cox, D. P. and Singer, D. A., eds., 1986, Mineral deposit models: U. S. Geological Survey Bull. 1693, 379p.

Eckstrand, O. R., ed., 1984, Canadian mineral deposit types, a geological synopsis: Geological Survey of Canada, Economic Geology Report 36, 86p.

Erickson, R. L., compiler, 1982, Characteristics of mineral deposit occurrences: U. S. Geological Survey Open-File Report 82-795, 248p.

Hodges, C. A., Cox, D. P., Singer, D. A., Case, J. E., Berger, B. R., and Albers, J. P., 1984, U. S. Geological Survey-INGEOMINAS mineral resource assessment of Columbia: U. S. Geological Survey Open-File Report 84-345, 193p.

Hutchison, W. W., 1986, National geoscience programs; A base for resource assessments of Canadian lands:

U. S. Geological Survey Circular 980, p. 1-18.

Mackenzie, B. W., 1986, Economic aspects of mineral resource assessment: U. S. Geological Survey Circular 980, p. 293-303.

Mackenzie, B. W. and Watson, Jr., W. D., 1986, Economic aspects of resource assessment: U. S. Geological Survey Circular 980, p. 83-93.

Mosier, D. L.・佐藤壮郎, 1986, 佐渡浅熱水性鉱脈鉱床の品位・鉱量モデル (英文), in Mineral deposit models (Cox and Singer, eds.), p. 155-157.

富樫幸雄, 1986, 錫・多金属鉱脈鉱床の記載モデル (英文), in Mineral deposit models (Cox and Singer, eds.), p. 109.

Vokes, F. M., 1986, Mineral deposit modeling: I. U. G. S. Commission on storage, automatic processing, and retrieval of geological data, UNESCO, 98p.