

広域的な鉱物資源評価について ——その現在と将来——

Donald A. SINGER (米国地質調査所)

1. はじめに

私は近年 米国地質調査所で行いました研究を主体として 主に広域の資源評価についてのお話をさせていただきます。お話の順序として 最初に鉱物の短期的な供給についてお話しし その後で長期的な供給についてお話ししたいと思います。そして 3番目に広域の評価 必要な情報 将来の予測をお話しすることになります。

長期的なものであれ短期的なものであれ最も重要なことは 供給を決めるのは あくまでも規模の大きな鉱床が基本となるということです。第1図は 165の斑岩銅鉱床に金属としての銅がどのような比率で含有されているかということを示したものです。ここで言っていることは 非常に小さなパーセンテージの数の鉱床に 大変大きなパーセンテージの金属銅が含まれているということです。これはどの金属をとった場合にも またどのようなタイプの鉱床をとった場合にも 共通する事実です。

鉱物の供給においては周知の事実ですが 鉱床の発見から生産段階に至るまでに 大変に長い開発の時間を要します。そのために短期的な将来を考えた場合には 必要な量の鉱物は現在すでにある鉱山から供給を得る以外ないわけです。つまり これから5年・15年を考えた場合には 現在ある鉱山ごとに鉱床の検討を行い その埋蔵量・また生産のキャパシティを考えていく必要があります。

第2図は 1979年に D. Cox らが検討した例です。彼らは銅の埋蔵鉱量と生産能力に基づき 米国における各鉱床について どれだけの生産が可能かということをやを追って計算しました。

この生産量のカーブを見ていきますと 将来あるピークに達し その後は減少していきます。破線で示したカーブは需要予測です。つまり既知の鉱床は 将来ある時点で需要予測と生産能力の間にギャップが生じる時期に達するというを示しています。

そのギャップを埋めるためには 既知の鉱床で生産のキャパシティを増やしていくか または新しい埋蔵鉱量を開発していくか 新しい鉱床を発見するかはわからないわ



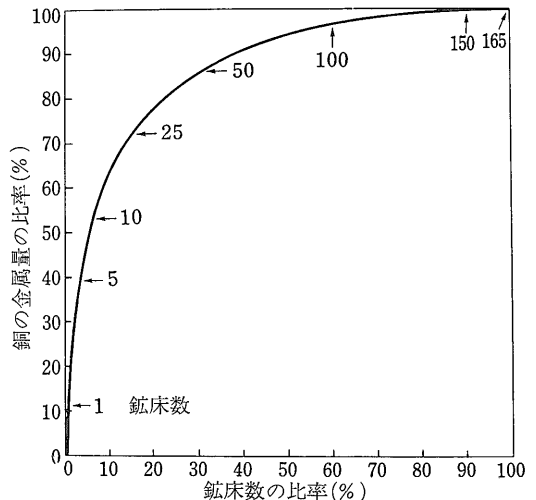
Donold A. Singer 1943年生れ。鉱物資源評価 鉱床の統計的経済的解析の専門家として知られる。鉱床の品位鉱量モデルを提唱し、多種類の鉱種について幅広い解析を行っている。現在米国地質調査所(メンロパーク) 鉱物資源部主任研究官。PhD.

けです。

このような検討はあらゆる金属に関して行うことができます。大変に手間のかかる困難なものですけれども非常に単純 明快でもあります。さて次は5年~15年といった短期的な見通しを越えて もっと遠い将来に資源を供給し得る可能性のある そして現在まだ発見されていない鉱床についてお話をしたいと思います。

2. 3段階評価法

資源のアセスメントを行う際に非常に重要なことは 資源が存在するという事 それを発見するという事 そして将来の価格とコストとテクノロジーを はっきりと区別して考えることです(第3図)。多くの資源アセスメントは こういったことをすべてごっちゃにして総合的な判断をしようとしています。しかし このようないっぺんに一つのファクターをとって その一つのファク



第1図 165の斑岩銅鉱床における金属銅の含有率

ターの占める重要度を判断することは非常にむずかしい また これを総合することも非常にむずかしいわけです。ですから これらを一つにひっくめて estimation (資源の見積り) を行うということは そのうちの一つに何か変更が生じた場合には全体が使えないということになってしまいます。

われわれ地球科学の専門家としては 最大限の能力を持って資源の見積りを行うということが重要だと思います。そして その一番の強みは 資源が存在するということにあるわけです。

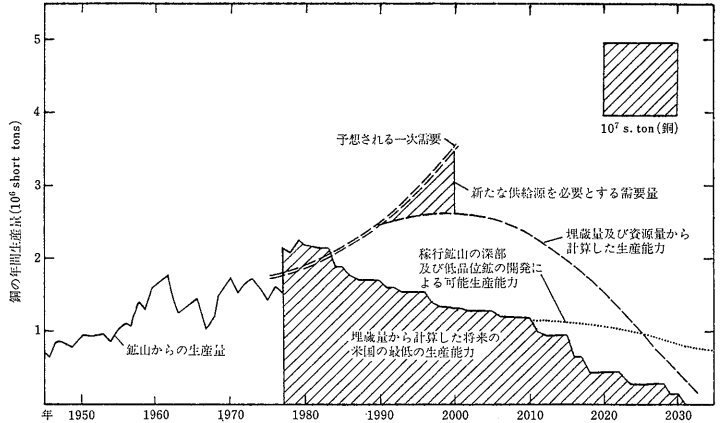
さて今日は アラスカ及びコロンビアで私どもが過去10年間にわたって用いた資源評価の一つの方式について特にお話したいと思います。この評価方式の基本となっている考え方は 一つひとつのファクターを分けて考えようということです。別々に考えた上で 資源の見積りを行うことにより 更にまた価格 コストといったものを解析することにより 本当に有用性のある情報を得ようというわけです。

そのやり方は第4図に示す三つの段階からなっているので 私達はこの方法を3段階法と呼んでいます。第1段階は 鉱床のタイプによって 地域の区分けを行います。第1段階で対象となったそれぞれのタイプの鉱床について 品位—鉱量モデルを作成することが2番目です。3番目は 各地域での鉱床の数の見積りを鉱床のタイプごとに行うということです。

これから例を示しながら 各段階についてご説明いたします。

第5図は私のお話していることの一つの例です。つまり手に入る限りのいろいろな情報やデータを総合して あるタイプの鉱床が賦存する可能性のある地域を区画するのです。

このような地域分けを行ったならば 対象とするタイ



第2図 米国の銅生産能力と銅需要の比較 (1976~2030) (Cox 他, 1979 を修正したもの)

プの鉱床に関しての品位—鉱量モデルを作成いたします。3番目はそれぞれのタイプの鉱床の数を地域毎に推定する訳です。

3. 広域評価の実例—アラスカ—

第6図は 70年代に私どもがアラスカで行いました地域分けで 珪長質火山岩の分布が示されています。この基礎となったのは 地質調査です。そして 塊状鉱床の分布をこの上に画くことにより 黒鉱がどこに形成されているかということを図示することが出来るわけです。

アラスカでは 苦鉄質火山岩の分布についても同じような地域区分を行い 塊状硫化鉄鉱床の分布をプロットしました。アラスカでは ごく一部にのみこのタイプの鉱床がありました。これはキプロス型です。しかし キプロス型が生成し得る地質的な環境は 苦鉄質火山岩が分布する所のすべてに認められました。

次に 斑岩銅鉱床について 主な分布地域を拡大してお見せいたします (第7図)。

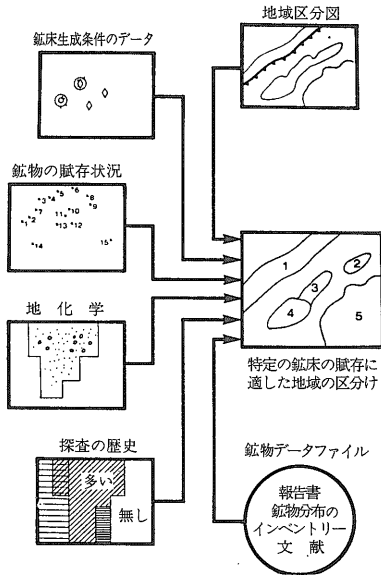
これは斑岩銅鉱床の分布地域を区分けしたものです。このように非常に隣接していながら 別の地域として区分されているのは それなりの情報が得られたからです。ある地域では 幾つかの斑岩銅鉱床が見付かって

- 資源の賦存
- 資源の発見
- 将来の価格
- 将来のコスト
- 技術の発達

第3図 資源評価の要素

1. 鉱床のタイプによる地域区分
2. 品位—鉱量モデルの作成
3. 鉱床の数の推定

第4図 資源評価のための3段階



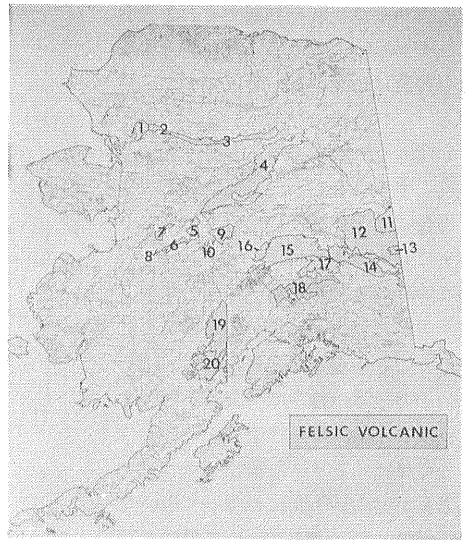
第5図 鉱床の賦存に適した地域を区域分けするプロセス

います。しかし別のある地域では 斑岩銅鉱床が埋蔵されている可能性がある母岩が発見されたにすぎません。

第1表はアラスカで 珪長質及び中性火山岩に関係する鉱床の数を地域毎に推定したものです。これでお分りのように 私達が鉱床の数を見積ることができなかつ



第7図 アラスカ南部の斑岩銅鉱床地帯の地域区分



第6図 アラスカにおける珪長質火山岩の分布

た地域がたくさんあります。見積りが可能であった場合には 確率に応じてこのように表現いたしました。

たとえば このNo.1という地域では 鉱床の数が一つ以上の確率が90% 五つ以上の確率が50% 20を超える確率が10%というふうに確率で示しました。

このようなやり方で資源の評価を行うということは 意志決定をする人々に対して 大変有用な情報を提供できると信じております。ただ 実際の数値を生み出す方法論に関しては なかなか確定的なことは言いにくいのです。この見積りは この地域の大変見識豊かな地質学者が 経験に基づいて主観的に行ったものです。

第2表も同様に 苦鉄質火山岩に関係のある塊状硫化銅鉱床の分布を示しております。ここは既知の鉱床がありましたので ずっと自信を持って数の推定を行うことができました。

第3表は斑岩銅鉱床に関しての同様の表です。これを ごらんになるとおわかりのように 鉱床の数を確信を持って予測できない地域もあります。非常に不明確な地域もあります。また 沢山の鉱床があるということ を 確信を持って推定できる地域もあります。そして 沢山あるとか少ししかないということに関して 実証が得られた場合には 資源評価を行い 決定を下す責任を持っている人々に対して その情報を適宜提供してゆくことが 大変重要であると感じております。

第4表はアラスカでわれわれが用いた塊状硫化銅鉱床

第1表 珪長質及び中性火山岩に関係する鉱床数の見積り
(アラスカ)

地域番号	存在が推定される鉱床の数		
	確率90%以上	確率50%以上	確率10%以上
No.1	1	5	20
No.2	3	8	30
No.3	15	20	30
No.13	0	2	4
No.15	4	9	20
No.16	5	7	12
No.17	2	4	9
No.18	1	3	9
その他の12地域	—	—	—

第2表 苦鉄質火山岩に関係する塊状硫化鉄鉱床数の見積り
(アラスカ)

地域番号	存在が推定される鉱床の数		
	確率90%以上	確率50%以上	確率10%以上
No.8	1	3	—
No.12	1	2	4
No.14	2	4	8
No.16	0	1	3
No.17	0	1	3
その他の12地域	—	—	—

第3表 斑岩銅鉱床数の地域別見積り (アラスカ)
(注)* 斑岩モリブデン鉱床を含む

地域番号	存在が推定される鉱床の数		
	確率90%以上	確率50%以上	確率10%以上
No.1	1	3	5
No.6	5	9	13
No.9	1	2	4
No.10	6	8	11
No.11	4	6	9
No.12*	0	1	3
No.13	4	6	10
No.14	0	1	4
No.15	1	2	4
No.17	0	1	2
No.18	1	2	5
No.19	0	1	3
その他の7地域	—	—	—

の品位—鉱量モデルの例です。これは世界のほかの地域の鉱床を十分に研究して組み立てたモデルです。たとえばどれだけのパーセンテージである鉱床が存在しているかということも入っています。われわれが調べた中で少なくとも190万トン以上というのが50%を占めておりました。資源に関係のある政策は鉱床のタイプについて十分な知識を持っていない人たちが意志決定を行っていくわけでその人たちにこのような情報を提供することは非常に大切です。

例えば私達はアラスカで斑岩クロム鉄鉱の鉱床があると考えられる地域を一つ区画いたしました。そして意志決定を行う人たちはクロム鉄鉱の存在の可能性があるということを知って大変びっくりしました。北米西部ではクロム鉄鉱は非常に少なく200トンまたはそれ以下です。この場合には国有地をどのような形で土地利用するかという決定のためにこういった情報の提供を依頼されたわけです。そういう際に今のような情報を与えますと意志決定に大変大きな影響が及びます。

第4表 珪長質及び中性火山岩に関係する鉱床の品位—鉱量モデル

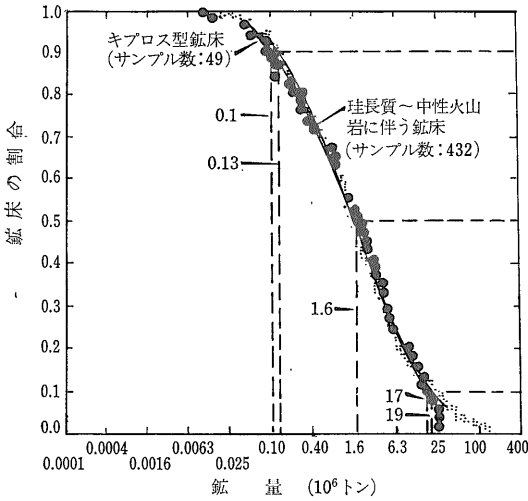
	鉱床数	相関係数 (r)	鉱床数(%)と鉱量及び品位の関係		
			10%	50%	90%
鉱量(10 ⁶ t)	85		18.0	1.9	0.19
平均品位	銅 (%)	-0.41**	5.40	1.70	0.54
	亜鉛 (%)	0.25	10.00	3.80	1.40
	鉛 (%)	-0.02	4.80	0.95	0.20
	金 (g/t)	0.78**	32.00	2.90	0.27
	銀 (g/t)	0.82**	1300.00	80.00	5.00

**有意の相関がある

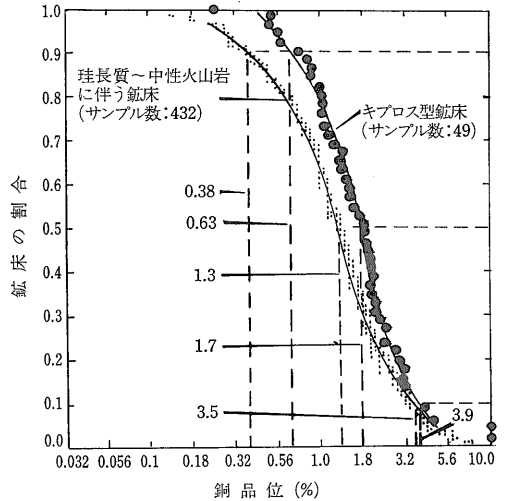
4. 品位—鉱量モデル

さてここで私達がいろいろなタイプの鉱床について作った品位—鉱量モデルについて御紹介しましょう。

第8図-aは塊状硫化鉄鉱床の鉱量モデルで珪長質及び中性火山岩に伴う鉱床を小さな点で苦鉄質火山岩に伴うキプロス型の鉱床を大きな点で示しています。これらは全て十分に探査された既知鉱床について横軸に各鉱床の鉱量を縦軸に鉱床の数を累積してプロットしてあります。この図からこの二つのタイプの鉱床のどちらも50%は160万トン以上の鉱量を有することが分ります。上位の10%をとった場合もよく似ていてそれぞれ1900万トン1700万トンという数字です。またキプロス型の場合には2500万トン以上の鉱量を有する鉱床はないということが一見して分ります。これに對



第8図-a 塊状硫化鉬鉱床の鉬量モデル



第8図-b 塊状硫化鉬鉱床の銅品位モデル

珪長質タイプでは2500万トンを超えるものが幾つかあります。このような差が出たのはキプロス型の鉱床のサンプルが少ないということが影響している可能性もあります。

次に品位モデルについてお話します。第8図-bは同じ二つのタイプの塊状硫化鉬鉱床に関して銅の平均品位と鉱床の数の関係をプロットしたものです。銅の品位に関しては二つのタイプの間にそれほど差がないということがわかります。しかし亜鉛の場合には大変に差が出ています。珪長質～中性火山岩タイプの76%において亜鉛の含有が報告されていますがキプロス型では34%になっています(第8図-c)。珪長岩型では10%のところまで亜鉛品位9%以上というふうになっております。しかしキプロス型では10%のところをとりましても亜鉛は2.1%以上に過ぎません。

鉛に関しては二つのタイプの鉱床の間にもっと大きな差が出てまいります。キプロス型では鉛0.5%以上といった品位はまずあり得ません(第8図-d)。

銀の品位に関しても二つの鉱床形式の間にはかなり大きな差があります。しかし金については珪長質タイプの方が多少多く報告されてはおりますけれども平均値をとった場合にはほとんど差がありません(図省略)。

次に斑岩銅鉱床の場合はどうでしょうか。斑岩銅鉱床の場合にはモリブデンが多いタイプと金が多いタイプの二つに分けられます。そして二つのタイプの間の鉬量には大きな違いがあります。またどのような地質学的な環境において存在するかということも大きく違っています。

第9図-aに示すようにモリブデンに富む斑岩銅鉱床は金に富むタイプに比べて大よそ倍近い鉬量を持っています。銅品位ではどうでしょうか。第9図-bに示すようにモリブデンに富むタイプの10%の鉱床は平均1.4%以上の銅を含むのに対し金に富むタイプでは0.71%です。50%の鉱床についても0.67%と0.50%でかなり大きな違いがあることが分ります。

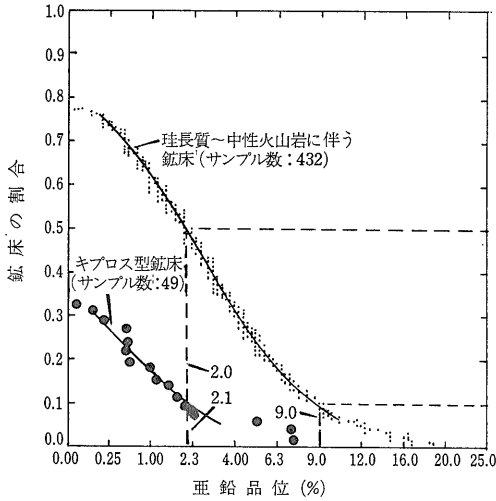
またモリブデン品位や金品位についても同じようなグラフを作って見ましたがもともとモリブデンと金の含有量で二つのタイプに分けたのですから二つのタイプの間に明瞭な違いが出るのは当然のことです。(図省略)

ここまで細かい区分を行うということはどの場合でも可能という訳ではありませんがこういう情報を知っておくことは有用です。

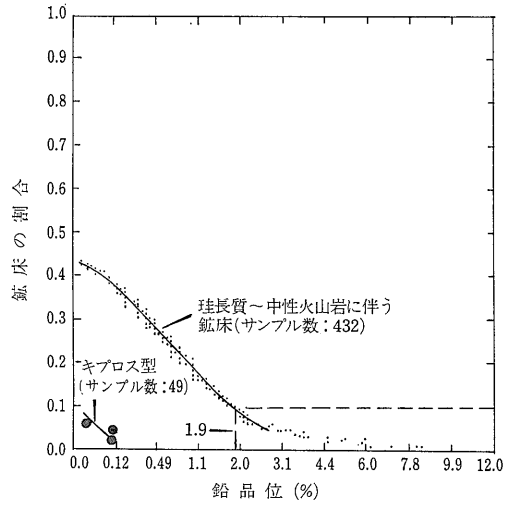
モリブデンタイプと金タイプに分類した品位鉬量モデルだけではなく斑岩銅鉱床に関する一般的なモデルの開発も行いました。ですから二つのサブグループに分けた場合の地質学的な差が明確でないという場合には一般的なモデルを使いました。

5. 資源評価に必要な情報

われわれがアラスカで開発した3段階評価法が実際にどのようにして行われたのか簡単に御説明したいと思います。こういった評価を行う際には幾つかの種類の情報を必要とします。それらの情報は次のように要約出来るでしょう。



第8図-c 塊状硫化銅銅床の亜鉛品位モデル



第8図-d 塊状硫化銅銅床の鉛品位モデル

A. 対象地域に関する情報

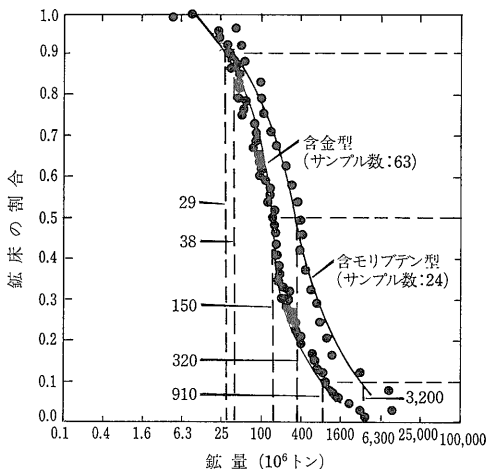
- 1) 地質図
- 2) 銅床インベントリ
- 3) 地球化学的・地球物理学的データ
- 4) 探査情報

B. 銅床モデル

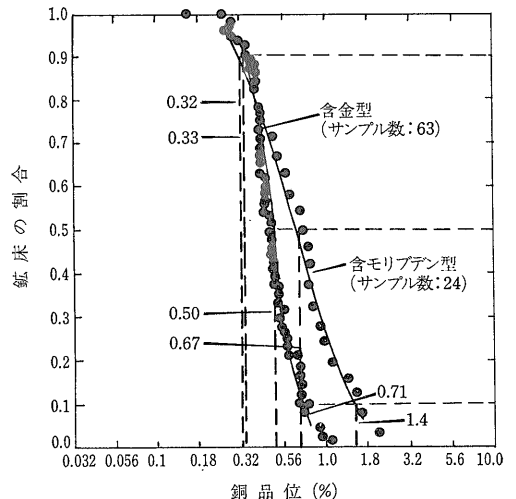
まず 評価を行う地域の中で必要な情報としては その地域の地質図 既知の銅床 また存在が予想される銅床のリスト すべての地球化学的および地球物理学的な情報 その地域で過去に行われた探査の情報があります。また その周辺の地域の情報を得ることも大変有用です。

銅床の数を推定する際には 過去の探査の情報が大変有用です。つまり よく探査された地域であればあるほど 銅床の数に関して確信のある推定が行われます。しかし対象とする地域が どこまで探査されたかということが なかなかわからない場合も少なくありません。ですから 過去に行われた探査の程度とその質に関しては 十分に吟味する必要があります。問題は このような情報を いかにか総合して判断していくかということです。銅床のモデルがそのために作られる訳です。つまり既知の銅床に関して銅床のモデルを作ることにより これらの個々の要因が どのように相互に関連し合っているかということが分るのでした。

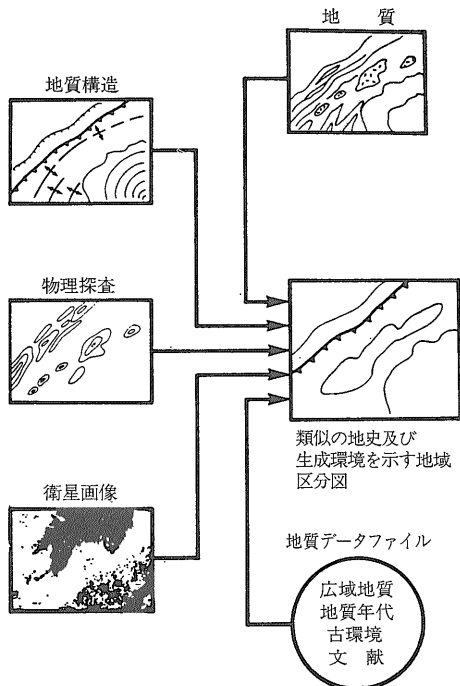
コロンビアで行いましたアセスメントでも 前述のよ



第9図-a 斑岩銅銅床の銅量モデル



第9図-b 斑岩銅銅床の銅品位モデル



第10図 地域区分図の作成プロセス

うな情報の収集を計画しました。過去の探査 地球科学的諸情報 鉱物の生成と鉱床の成因に関する情報などです。また地域区分図に関しては これもぜひ欲しかったのですが 十分に納得のいく程度には達成されませんでした。そして 鉱床モデルを使うことにより これらの情報を総合したわけです。

前述の地域区分図 (Terrane map) は地球科学的な情報をすべて総合することによって作られます。第10図はそのプロセスを示すものです。この仕事を行って分ったことは いろいろな精度の地質図が 非常に重要な情報を提供するという事です。また 地質学的な地域区分やその意味付けを行う際に大変役に立つのが 地球物理学的なデータです。

この段階では コロンビアにはランドサット・イメージはありませんでした。ということは われわれの得た情報は 地質図を基礎として 更に地球物理学的な処理を施したものだと言うことです。

このような情報を基礎にして 鉱床のタイプ別 地域別の鉱床評価を行ってゆきます (第11図)。

こういった情報をつなぎ合わせるために用いる 接着剤ともいべき鉱床のモデルというのは何でしょうか。アラスカでは 鉱床のタイプは何かということについて いろいろな論議がなされましたが これといって成文化されたものはありません。コロンビアの場合には 鉱

床タイプといった場合一体何を指すのか それを文章にすることが重要であり またその例を挙げる事が重要であると感じました。

それは われわれカリフォルニアにいる人間の間だけでお互いに理解を確認し合うためというだけではなく コロンビアの地質調査に携わる人々との間の意見交換を促進するためにも どのような地質学的な環境で どのようなタイプの鉱床が存在するかということをはっきりさせた方がいいと考えたわけです。そこで コロンビアの鉱床に関して 63の記述的なモデルを確立するために大変な努力を傾注いたしました。

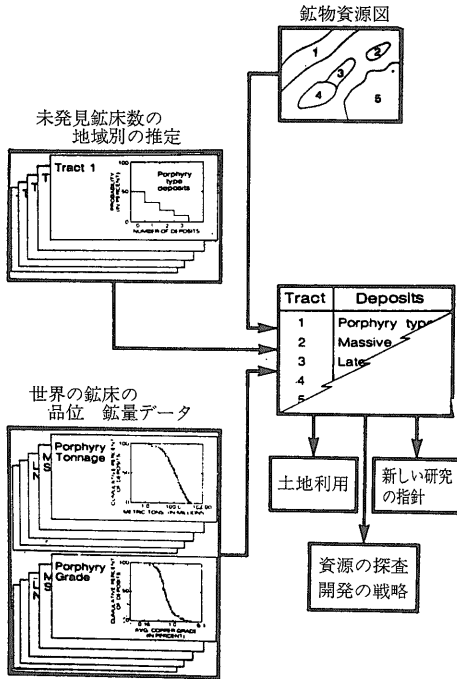
その記述は 第12図に示すように1ページほどの簡単なものですが ここに書きましたような内容から構成されています。更に前に述べたような種々のタイプの鉱床について 37の品位鉱量モデルがつくられ それと63の記述的なモデルとの間に 強い関連性を持たせました。

われわれはこれを行ったことにより 鉱床のタイプに関して大変多くのことを学びましたので その経験をご披露したいと思います。

たとえば ある種の鉱床が一つの範疇にまとめられるものなのかどうかというときには 品位-鉱量モデルを使って検討するのですが その場合この記述的なモデルは大変有用でした。この記述的なモデルの編集及び編さんは D. COX により 品位-鉱量モデルは 私と D. MOSIER が担当致しました。もちろん個々のモデルに関しては たくさんの人の協力を得たことは言う迄ありません。

たくさんの人が参加して行ったために 多くの人の間で意見交換 情報交換がなされ 鉱床タイプの意味するもの そしてどの鉱床がどの分類に属するかなどについて 多くのことを学ぶことができました。しかし われわれの勉強はまだ続いております。現在 あるものについて多少の誤りがあるということも発見されておりますので これからそれを改編していきたいと思っています。そして 新しい記述的なモデル 品位-鉱量モデルを加えていきたいと思っています。そしてその成果を一つの報文としてまとめたいと考えております。

なぜそうしたいかといいますと こうすることにより 多くの分野における鉱物資源評価に 大変すぐれた基礎資料を提供することになると思うからです。こういったモデルというのは 場合によっては非常に一般的なもので 個々の地域については少し変えないと応用できないという場合も確かにあります。しかしこういった情報が 全くないよりは少しでもあった方がいいと感じております。そのほか一つの鉱床タイプに関して 非常に詳しいモデルを作成するといった努力が 現在も米国



第11図 鉱物資源評価のプロセス

地質調査所で続けられております。

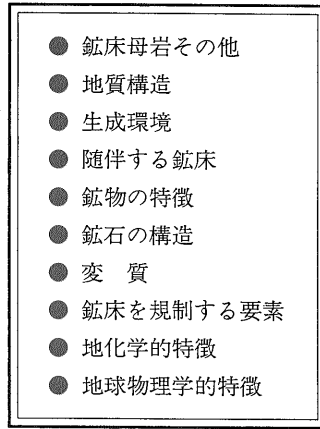
6. 将来の資源評価

最後に将来の資源評価というものがあるのか それについての私の予想をお話したいと思います。

最近 コンピュータ及びコンピュータ科学が急速に進歩したことは皆様ご存じのとおりです。価格が非常に安くなったために 個人がコンピュータのテクノロジーを利用できる可能性も大変大きくなりました。近い将来一人ひとりの地質学者が 机の上にコンピュータ及びレーザーディスクを抱え それによって世界中の地質学的な情報が得られるようになると予測しております。

また レーザーディスクを使うことにより 地質学以外の情報 たとえば地球物理学のデータなどを 地質学的なデータの上に重ね合わせることによって検討することも可能になります。また 膨大な量のデータを 非常に安い価格で分析することも可能になります。これは 鉱床のモデルを開発する人にとっては 大きな変化を意味します。

また地質学的な分野においても さまざまな大型のセンサー (たとえば、宇宙サテライト等) の応用が これから加わってくるでしょう。 そのようにして得られる膨大なデータを処理するためにも コンピュータがどんど



第12図 鉱床モデル作成のための記載項目

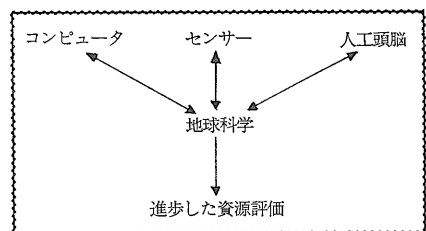
ん進歩しているということは非常に幸いです。

また 人工頭脳も資源評価の分野に大いに貢献することになりましょう (第13図)。

“プロスペクター” という一種の専門家システムを 数年来にわたって米国地質調査所が開発しておりますが それも一つの例です。 専門家の知識を 鉱床タイプに関して抽出していくのが その目的です。 コンピュータを使うことによって そういった知識を他のユーザーが 利用できるようにするという事です。 しかし 資源評価にそれを応用するためには 適正な規模を持ったものとして 再構築する必要があります。

また 鉱床の探査に関係のある領域では 数理地質学の分野で大変な進歩があります。 また いわゆる学習のシステムというものの効用も 大いに提唱されるべきです。

筑波におきましては コンピュータ及び人工頭脳の分野で 大変大きな進歩が達成されていることは よく知られています。 こういった新しいテクノロジーを開発し それを利用していく際の一番重要な要めは まず問題を整理する そしてその問題を常に頭に置きながら製品の開発を図っていく ということです。 そして 資源評価において このようなテクノロジーを開発・推進させていくためには どうしても地球科学的なアプローチが必要であると 強く信じております。



第13図 将来の資源評価のプロセス